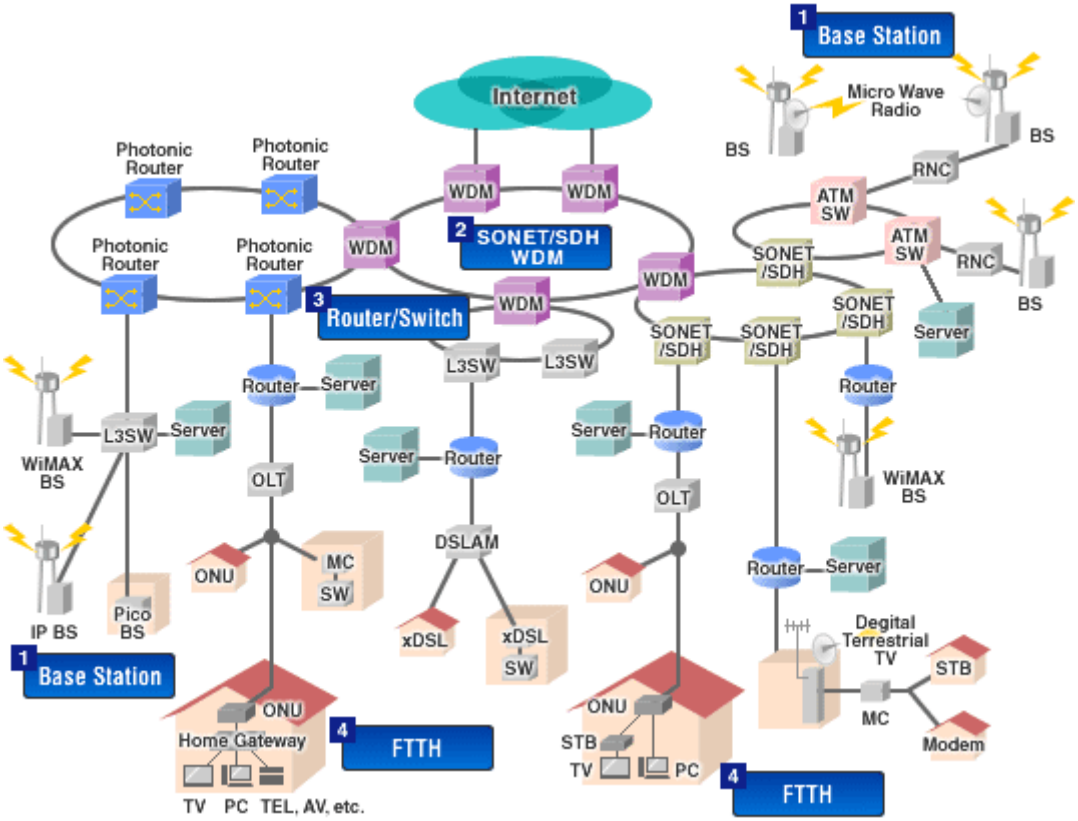
Ю. А. Зингеренко

ОПТИЧЕСКИЕ ЦИФРОВЫЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ СИНХРОННОЙ ЦИФРОВОЙ ИЕРАРХИИ

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2013

Ю.А. Зингеренко. Оптические цифровые телекоммуникационные системы и сети синхронной цифровой иерархии. - Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 393 с.

Учебное пособие посвящено принципам построения оптических цифровых телекоммуникационных систем и сетей, использующих технологию синхронной цифровой иерархии (SDH). Основное внимание уделено непосредственно технологии систем передачи SDH и ее постепенному движению в сторону совместной передачи непрерывного и пакетного трафика с целью реализации сетей нового поколения NGN. Материал учебного пособия разделен на четыре части: волоконно-оптические системы передачи, технология SDH, системы передачи второго поколения - NG SDH и направления развития SDH третьего поколения. В учебном пособии рассмотрены проблемы синхронизации, измерение параметров ошибок, реализация передачи пакетного трафика в системах NG SDH – GFP, VCAT, LCAS, дополняющие NG SDH концепции RPR, TSI, OBS, приведены принципы контроля сетей NG SDH, основные сведения о технологии Ethernet и GE, а также возможные направления развития для систем SDH третьего поколения. Учебное пособие рекомендовано для студентов старших курсов специальностей: 210401 «Физика и техника оптической связи», и 210700 «Инфокоммуникационные технологии системы и сети». Рекомендовано к печати Ученым советом факультета инфокоммуникационных технологий,17 сентября 2013, протокол № 6.

В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2013

©Ю.А.Зингеренко, 2013

Введение.

В течение нескольких лет в НИУ ИТМО студентам старших курсов специальности 210401 читается курс «Оптические цифровые телекоммуникационные системы», а магистрам направления подготовки 210400 «Телекоммуникации» - курс «Теория построения телекоммуникационных систем и сетей». Оба курса охватывают основные сведения как по компонентам волоконной оптики – оптическим волокнам и кабелям, оптическим соединителям, передающим и приемным оптоэлектронным модулям, волоконно-оптическим усилителям и элементам плотного спектрального уполотнени, так и по технологии построения систем передачи синхронной цифровой иерархии SDH. Основные сведения, излагавшиеся в рамках указанного курса, были опубликованы в учебном пособии «Оптические цифровые телекоммуникационные системы», изданном в 2010 г.

Дальнейшее развитие технологии систем передачи SDH и ее постепенное движение в направлении совместной передачи непрерывного и пакетного трафика с целью реализации сетей нового поколения NGN. А именно создание систем передачи NG SDH и движение в сторону систем SDH третьего поколения, стремление не отстать от научно-технического прогресса на современном этапе заставляет включить и эти вопросы для изучения студентов и, особенно, магистров.

Курсы включают в себя: принципы построения технологии SDH, методы мультиплексирования, образование струтуры циклов, формирование виртуальных контейнеров и трибутарных блоков, состав секционных и трактовых заголовков, назначение полей заголовков, принципы реализации системы тактовой сетевой синхронизации, воникновение джиттера и вандера, использование SSM сообщений о статусе синхронизации при резервном защитном переключении, принципы измерения параметров ошибок и мониторинг взаимного соединения, понятие о необходимых и эксплуатационных измерениях.

Курсы предусматривают ознакомление с решением проблемы передачи пакетного трафика и, в частности, с реализацией трех составляющих системы NG SDH: протокола GFP записи пакетного трафика в непрерывный, виртуальной конкатенацией VCAT и процедурой управления шириной транспортного коридора LCAS.

Приводятся некоторые дополнения к технологии NG SDH – концепция упругого пакетного кольца RPR, процедура коммутации сигналов TSI и концепция автоматической коммутации транспортной сети ASTN. Излагаются принципы контроля сетей NG SDH, и основные сведения о технологии Ethernet и GE. В заключение приводятся основные направления развития SDH в сторону систем третьего поколения.

Несмотря на подготовку и издание за последние годы монографий, научных статей и учебных пособий по перечисленным вопросам, проблема обеспечения учебного процесса необходимой учебной литературой остается достаточно острой в свзи с отсутствеим единого учебника, полностью охватывающего оба

перечисленных курса. Предлагаемое издание может частично устранить имеющийся недостаток. Учебное пособие ориентировано на студентов, изучающих курс «Оптические цифровые телекоммуникационные системы» и магистров, изучающих курс «Теория построения телекоммуникационных систем и сетей».

Одной из особенностей учебного пособия является наличие большого числа структурных и функциональных схем конкретных устройств, реализующих соответствующие узлы оборудования, а также примеры реализации измерительных устройств и примеры выполнения сетевых решений, в том числе решений, обеспечивающих заложенную в технологию SDH отказоустойчивость сети.

Глава 1. Основные сведения о ВОСП.

1.1. Основные положения.

Волоконно-оптическая система передачи (ВОСП) – это такая система передачи, у которой информация предается по оптическим диэлектрическим волноводам (оптическим волокнам). Технология волоконно-оптических систем передачи, помимо вопросов технологии собственно волоконной оптики охватывает в большей степени вопросы, касающиеся оборудования формирования передаваемых электрических сигналов, его стандартизации, протоколов передачи, а также вопросы топологии сети связи и общие вопросы построения сетей. Сигналы, передаваемые по ВОСП, в подавляющем большинстве случаев являются цифровыми. Таким образом, ВОСП являются по сути дела разновидностью цифровых систем передачи (ЦСП), использующих в качестве среды передачи оптические волокна.

Передача информации в цифровом виде по ВОСП имеет значительный ряд достоинств перед передачей по медному кабелю. Именно этим объясняется стремительное внедрение в информационные сети оптических линий связи.

Преимущества ВОСП.

Широкая полоса пропускания – обусловлена чрезвычайно высокой частотой несущей 10^{14} Гц. Это обеспечивает потенциальную возможность передачи по одному волокну цифрового потока со скоростью в несколько терабит в секунду. Большая скорость передачи информации – одно из наиболее важных преимуществ оптического волокна над медной или любой другой средой передачи.

Малое затухание светового сигнала. Выпускаемое в настоящее время промышленное оптическое волокно имеет затухание 0,2 – 0,3 дБ/км на длине волны 1,55 мкм. Малое затухание и небольшая дисперсия сигнала позволяют строить участки линий связи без регенераторов протяженностью до 100 км и более.

Низкий уровень шумов и высокая помехозащищенность. Поскольку волокно изготовлено из диэлектрического материала, оно невосприимчиво к электромагнитным помехам со стороны окружающих медных кабельных систем, электрического оборудования и атмосферных воздействий (линии электропередачи, электродвигательные установки, грозовые разряды и т. д.). В многоволоконных кабелях также не возникает проблемы перекрестного влияния, присущего много парным медным кабелям.

Малый вес и объем. Волоконно-оптические кабели (ВОК) имеют меньший вес и объем по сравнению с медными кабелями при расчете на одну и ту же пропускную способность. Например, 900-парный телефонный кабель диаметром 7,5 см может быть заменен двухволоконным ВОК диаметром 1,5 см даже с учетом множества защитных оболочек и стальной ленточной брони.

Высокая защищенность от несанкционированного доступа. Поскольку ВОК практически не излучает в радиодиапазоне, то передаваемую по нему информацию трудно подслушать, не нарушая приема-передачи. Системы непрерывного мониторинга целостности оптических волокон, используя свойства высокой чувствительности волокна, могут мгновенно отключить «взламываемый» канал связи и подать сигнал тревоги.

Гальваничекая развязка элементов сети. Данное преимущество оптического волокна заключается в его изолирующем свойстве. Волокно помогает избежать образования «земельных» петель, когда два сетевых устройства неизолированной вычислительной сети, связанные медным кабелем, имеют заземления в разных точках здания. Это предотвращает возникновение большой разности потенциалов, способной повредить сетевое оборудование.

Взрыво- и пожаробезопасность. Из-за отсутствия искрообразования оптическое волокно повышает безопасность сети на химических, нефтеперерабатывающих предприятиях, при обслуживании технологических процессов повышенного риска.

Экономичность. Волокно изготавливается из кварца, основу которого составляет двуокись кремния, широко распространенного, а поэтому недорогого материала, в отличие от меди. В настоящее время стоимость волокна по отношению к медной паре соотносится как 2:5. Кроме того, ВОК позволяет передавать сигналы на значительно большие расстояния без ретрансляции. Количество регенераторов на протяженных линиях при использовании ВОК значительно меньше, что сокращает капитальные и эксплуатационные расходы.

Длительный срок эксплуатации. Со временем волокно испытывает деградацию – затухание в проложенном кабеле постепенно возрастает. Тем не менее, благодаря совершенству современных технологий производства, этот процесс значительно замедлен, и срок службы ВОК составляет примерно 25 лет. За это время может смениться не одно поколение оборудования.

Несмотря на многочисленные преимущества перед другими способами передачи информации, ВОСП имеют также и недостатки, главным образом вызванные дороговизной прецизионного монтажного оборудования.

Недостатки ВОСП.

Стоимость интерфейсного оборудования. Электрические сигналы должны преобразовываться в оптические и наоборот. Цена на оптические передатчики и приемники остается пока еще высокой. При создании оптической линий связи также требуется высоконадежное специализированное пассивное коммутационное оборудование, оптические разъемные соединители с малыми потерями и большим ресурсом на подключение-отключение, оптические разветвители и аттенюаторы.

Монтаж и обслуживание оптических линий. Стоимость работ по монтажу, тестированию и поддержке волоконно-оптических линий связи также остается высокой. Если повреждается ВОК, то необходимо осуществлять сварку волокон в месте разрыва и защищать этот участок кабеля от воздействия внешней среды. Кроме того, каждая сварка вносит дополнительное затухание, что необходимо учитывать определенным технологическим запасом на затухание переприемного участка.

Требование специальной защиты волокна. Теоретически стекло, как материал, выдерживает колоссальные нагрузки с пределом прочности на разрыв выше 1ГПа $(10^9 Н/м^2)$. На практике оптическое волокно, каким бы совершенным оно не было, имеет микротрещины, которые инициируют разрыв. Для повышения надежности оптическое волокно при изготовлении покрывается специальным лаком на основе эпоксиакрилата, а сам оптический кабель упрочняется, например, нитями на основе кевлара. Если требуется удовлетворить еще более жестким требованиям на разрыв для подвесного, например, кабеля, то он может упрочняться специальным стальным тросом или стеклопластиковыми стержнями. Все это влечет увеличение стоимости оптического кабеля.

Преимущества от внедрения волоконно-оптических линий связи настолько значительны, что несмотря на перечисленные недостатки, дальнейшие перспективы развития технологии ВОСП в информационных сетях более чем очевидны и в настоящее время не имеют альтернативы.

Типовая схема ВОСП.

Типовая схема системы связи, использующая ВОСП, показана на рис 1.1. Аналоговый сигнал, вырабатываемый абонентским устройством, например, телефонным аппаратом, приходит на узел коммутации, где аналогоцифровой преобразователь (АЦП) преобразует его в поток двоичных символов (битов). Индивидуальные битовые потоки в оборудовании мультиплексирования объединяются в общий групповой поток символов (электрических импульсов), который используется для модуляции оптического передатчика, посылающего поток оптических импульсов в оптическое волокно. На приемной стороне импульсы света преобразуются обратно в электрический сигнал при помощи оптического приемника. Восстановленный групповой поток электрических символов в оборудовании демультиплексирования разделяется на индивидуальные потоки, поступающие на цифроаналоговые преобразователи (ЦАП). ЦАП восстанавливает исходный аналоговый сигнал и отдает его на абонентское устройство. Поскольку ВОСП образует, как правило, двунаправленный канал связи, оптические приемники и передатчики, ЦАП и АЦП, мультиплексоры и демультиплексоры на каждом из концов линии связи совмещаются в одном устройстве.

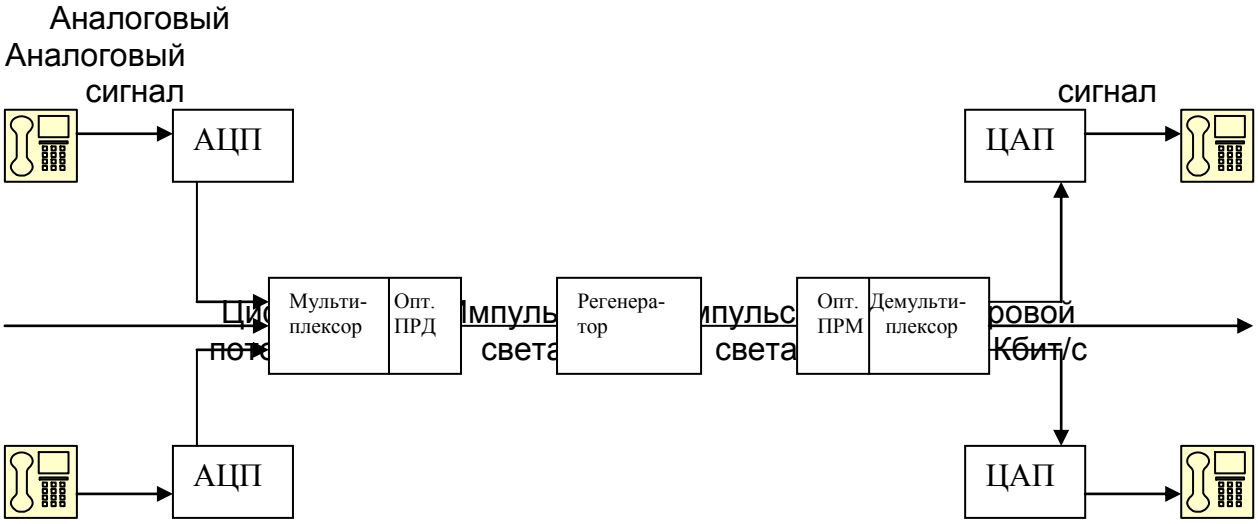


Рис. 1.1. Типовая схема системы связи с использованием ВОСП.

Основные компоненты ВОСП.

Оптический передатчик обеспечивает преобразование входного электрического (как правило, цифрового) сигнала в выходной световой сигнал. При цифровой передаче оптический излучатель передатчика «включается» и «выключается» в соответствии с поступающим на него потоком электрических импульсов. Для этих целей используются инфракрасные светоизлучающие диоды LED или лазерные диоды LD. Эти устройства обладают высоким быстродействием и способны поддерживать модуляцию излучаемого света со скоростями в сотни и тысячи Мбит/с. При построении сетей кабельного телевидения оптический передатчик осуществляет преобразование широкополосного аналогового электрического сигнала в аналоговый оптический. В этом случае оптический передатчик должен иметь высокую линейность.

Оптический приемник осуществляет обратное преобразование оптических импульсов в импульсы электрического тока. В качестве основного элемента оптического приемника в настоящее время используются p-i-n фотодиоды, имеющие малую инерционность.

Если приемная и предающая станции удалены на большое расстояние друг от друга, например, на несколько сотен км, то дополнительно требуется установка промежуточных ретрансляторов для восстановления энергетических и временных соотношений импульсов оптического сигнала. В качестве таких устройств могут использоваться регенераторы оптического сигнала и оптические усилители.

Оптический регенератор содержит оптический приемник, регенератор электрического сигнала и оптический передатчик. Регенератор электрического сигнала с точностью до коэффициента ошибок восстанавливает амплитуду и временное положение информационных импульсов, тем самым обеспечивая с помощью оптического передатчика восстановления формы оптического сигнала до первоначальной.

Оптический усилитель не осуществляет оптоэлектронного преобразования. Он, используя специальные активные волокна и лазеры накачки, непосредственно усиливает проходящий оптический сигнал, благодаря индуцированному излучению. Поэтому усилитель не обеспечивает полного восстановления формы оптического сигнала и не может полностью очистить его от шумов. Применение усилителя становиться предпочтительным в случае спектрального уплотнения, так как усилитель обеспечивает усиление всех оптических стволов одновременно, в то время, как использование регенераторов потребовало бы установки электрических регенераторов для каждой оптической несущей.

На практике на один регенератор из-за накопления шумов и искажения формы оптических импульсов может приходиться несколько последовательных оптических усилителей (до 4-8). Таким образом, эффективность использования оптических усилителей при построении спектрально уплотненных волоконно-оптических магистралей большой протяженности очень высока.

Волоконно-оптический кабель (ВОК). Характерная строительная длина оптического кабеля (длина непрерывного участка кабеля, поставляемого на одном барабане) варьируется в зависимости от производителя и типа кабеля в пределах 2-10 км. На протяженных участках между регенераторами или усилителями могут помещаться десятки строительных длин кабелей. При этом производится

специальное сращивание, как правило, с помощью сварки, оптических волокон. Места сварки защищаются специальной герметичной проходной муфтой.

1. 2. Оптическое волокно.

1.2.1. Типы оптических волокон.

Оптические волокна обеспечивают передачу оптического излучения на разных длинах волн, имеют различные характеристики и выполняют разные задачи. Все оптические волокна делятся на две основные группы: многомодовые MMF (multi mode fiber) и одномодовые SMF (single mode fiber).

Многомодовые волокна подразделяются на ступенчатые и градиентные.

Одномодовые волокна подразделяются на ступенчатые одномодовые волокна или стандартные волокна SF (standart fiber), на волокна со смещенной дисперсией DSF (dispersion shifted) и на волокна с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF (non-zero dispersion shifted).

Типы и размеры волокон приведены на рис 1.2. Каждое волокно состоит из сердцевины и оболочки с разными показателями преломления. Сердцевина, по которой происходит распространение светового сигнала, изготавливается из оптически более плотного материала.
При обозначении волокна указываются через дробь значения диаметров сердцевины и оболочки. Волокна отличаются диаметром сердцевины и оболочки, а также профилем показателя преломления сердцевины.
У многомодового градиентного волокна и одномодового волокна со смещенной дисперсией показатель преломления сердцевины зависит от радиуса. Такой более сложный профиль делается для улучшения технических характеристик в части дисперсии или для достижения других специальных характеристик волокна.

Если сравнивать многомодовые волокна между собой (рис 1.2 а, б), то градиентное волокно имеет лучшие технические характеристики, чем ступенчатое, по дисперсии. Главным образом это связано с тем, что межмодовая дисперсия в градиентном многомодовом волокне, являющаяся основным источником дисперсии, значительно меньше, чем в ступенчатом многомодовом волокне, что обеспечивает бодьшую пропускную способность градиентному волокну.

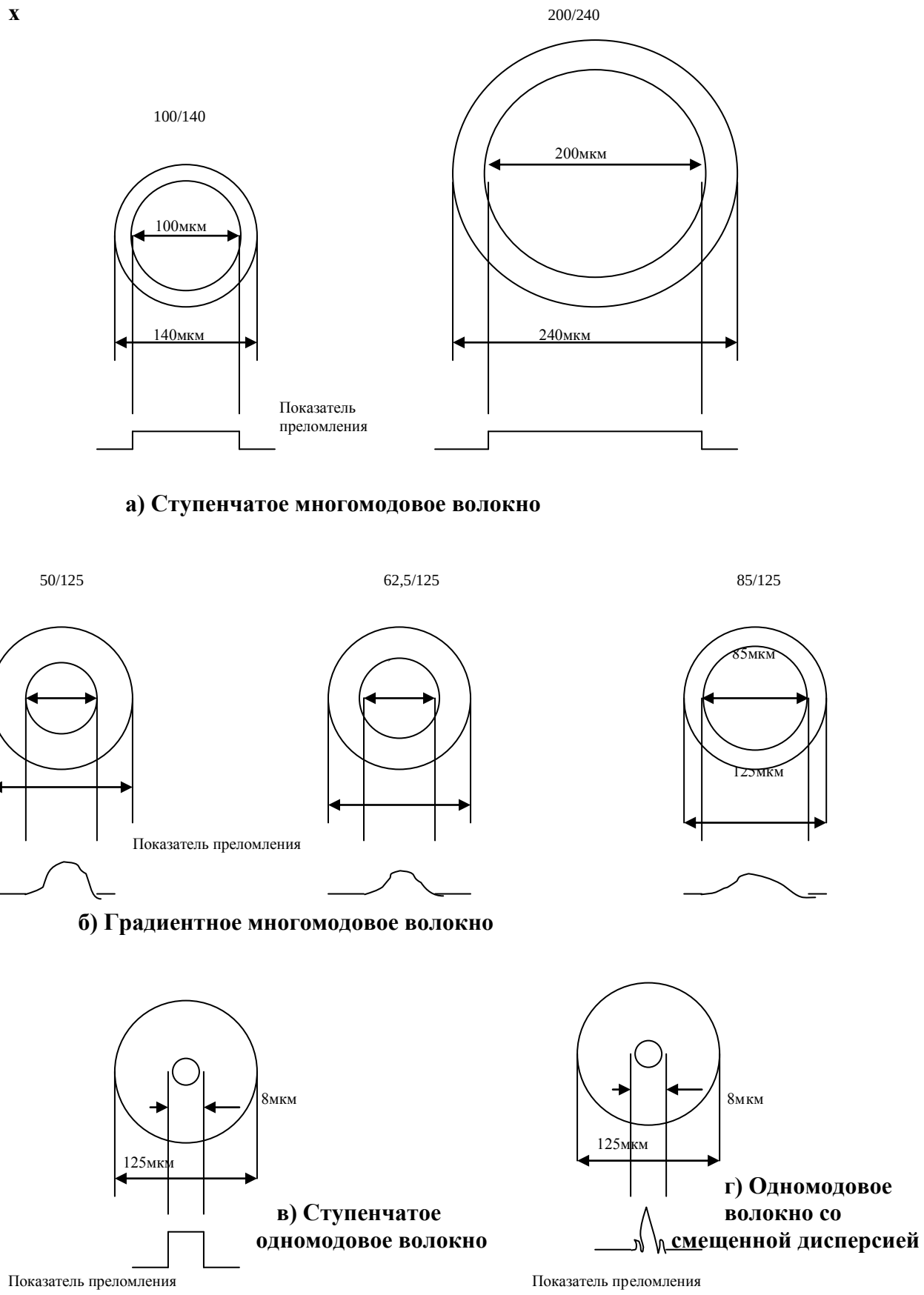


Рис. 1.2. Типы оптических волокон.

Одномодовое волокно имеет значительно меньший диаметр сердцевины по сравнению с многомодовым и, как следствие, из-за отсутствия межмодовой дисперсии, более высокую пропускную способность. Однако, оно требует применения более дорогих лазерных передатчиков.

В ВОСП наиболее широко используются следующие стандарты оптических волокон:

- многомодовое градиентное волокно 50/125 (рис 1.2 а);
- многомодовое градиентное волокно 62,5/125 (рис 1.2 б);
- одномодовое ступенчатое (стандартное) волокно SF 8-10/125 (рис 1.2 в);
- одномодовое волокно со смещенной дисперсией DSF 8-10/125 (рис 1.2 г);
- одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF (по профилю показателя преломления это волокно схоже с DSF).

Волоконно-оптические системы передачи используют область инфракрасного спектра в диапазоне от 800 до 1600 нм в трех окнах прозрачности6 850, 1310 и 1550 нм. Именно окрестности этих трех длин волн образуются локальные минимумы затухания сигнала, что обеспечивает большую дальность передачи.

Многомодовые градиентные волокна.

В стандартном многомодовом градиентном волокне (50/125 или 62,5/125) диаметр светонесущей жилы 50 и 62,5 мкм, что на порядок больше длины волны передачи. Это приводит к распространению множества различных типов световых лучей – мод – во всех трех окнах прозрачности. Для передачи света по многомодовому волокну используют окна прозрачности 850 и 1310 нм.

Одномодовые волокна.

В ступенчатом одномодовом волокне SF диаметр светонесущей жилы составляет 8-10 мкм и сравним с длиной световой волны. В таком волокне при достаточно большой длине волны $\lambda \geq \lambda_{CF}$ (λ_{CF} - длина волны отсечки) распространяется только один луч (одна мода). Одномодовый режим в одномодовом волокне реализуется в окнах прозрачности 1310 и 1550 нм. Распространение только одной моды устраняет межмодовую дисперсию и обеспечивает очень высокую пропускную способность одномодового волокна в этих окнах прозрачности. Наилучший режим распространения с точки зрения дисперсии достигается в окрестности длины волны 1310 нм, когда хроматическая дисперсия обращается в ноль. С точки зрения потерь это не самое лучшее окно прозрачности. В этом окне потери составляют 0,3-0,4 дБ/км, в то время, как наименьшее затухание 0,2-0,25 дБ/км достигается в окне 1550 нм.

В одномодовом волокне со смещенной дисперсией DSF длина волны, на которой результирующая дисперсия обращается в ноль (длина волны нулевой дисперсии λ_0), смещена в окно 1550 нм. Такое смещение достигается благодаря специальному профилю показателя преломления волокна, рис 1.2 г. Таким образом, в волокне со смещенной дисперсией реализуются наилучшие характеристики как по минимуму дисперсии, так и по минимуму потерь. Поэтому такое волокно лучше подходит для строительства протяженных высокоскоростных линий связи с расстоянием между переприемными участками до 100 и более км.

Одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF в отличие от DSF оптимизировано для передачи не одной длины волны, а сразу нескольких длин волн (сигнала со спектральным уплотнением WDM) и наиболее эффективно может использоваться при построении магистралей полностью оптических сетей,

т.е. сетей, на узлах которых не происходит оптоэлектронного преобразования при распространении оптического сигнала.

Передача спектрально уплотненного сигнала на большие расстояния требует использования линейных широкополосных оптических усилителей, из которых наибольшее распространение получили эрбиевые усилители на основе легированного эрбием волокна EDFA. Линейные усилители типа EDFA эффективно могут усиливать сигнал в своем рабочем диапазоне 1530-1560 нм. Длина волны нулевой дисперсии у волокна NZDSF выведена за пределы этого диапазона, что значительно ослабляет влияние нелинейных эффектов в окрестности точки нулевой дисперсии при распространении нескольких длин волн.

Оптимизация трех перечисленных типов одномодовых волокон совершенно не означает, что они всегда должны использоваться исключительно под определенные задачи. Максимально допустимая длина переприемного участка определяется технико экономическими характеристиками как самого волокна (затуханием, дисперсией и стоимостью), так и приемо-передающего оборудования (мощностью, шириной спектральной линии, скоростью передачи, спектральным уширением передаваемого импульса, чувствительностью приемника и стоимостью).

1.2.2. Распространение света по волокну.

Основными факторами, влияющими на характер распространения света в волокне, наряду с длиной волны излучения, являются геометрические параметры волокна, затухание и дисперсия.

Затухание.

Волокно характеризуется двумя важнейшими параметрами: затуханием и дисперсией. Чем меньше затухание (потери) и чем меньше дисперсия распространяемого в волокне сигнала, тем больше может быть расстояние между переприемными участками.

На затухание света в волокне влияют такие факторы, как потери на поглощение, потери на рассеяние и кабельные потери. Потери на поглощеяние и на рассеяние вместе называют собственными потерями, в то время, как кабельные потери в силу их природы называют дополнительными потерями, рис 1.3.

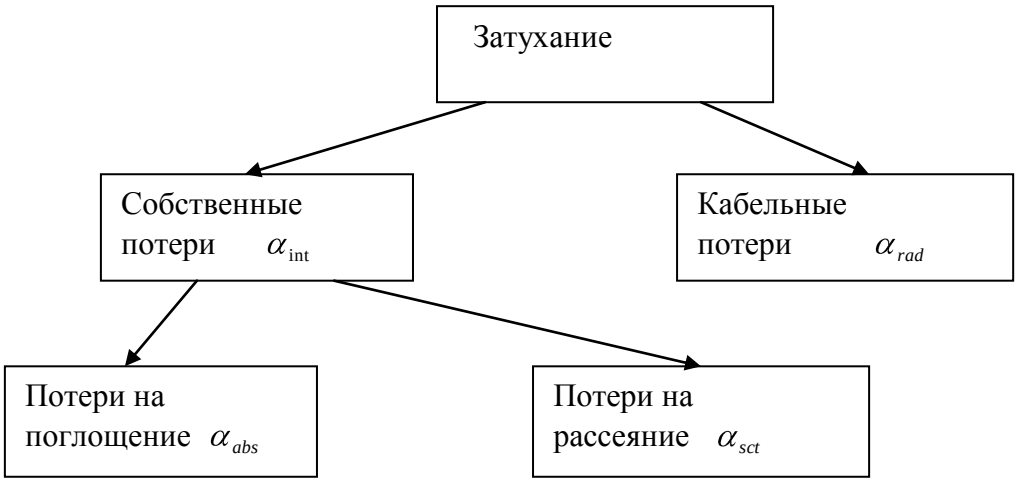


Рис 1.3. Основные типы потерь в волокне.

Полное затухание в волокне (измеряется в дБ/км) определяется в виде суммы:

$$\alpha = \alpha_{\text{int}} + \alpha_{rad} = \alpha_{abs} + \alpha_{sct} + \alpha_{rad}$$

(1.1)

Потери на поглощение α_{abs} состоят как из собственных потерь в кварцевом стекле (ультрафиолетовое и инфракрасное поглощение), так и из потерь, связанных с поглощением света на примесях. Примесные центры, в зависимости от типа примеси, поглощают свет на определенных (присущих данной примеси) длинах волн и рассеивают поглощенную световую энергию в виде джоулева тепла. Даже ничтожные концентрации примесей приводят к появлению пиков на кривой потерь, рис 1.4. Следует отметить

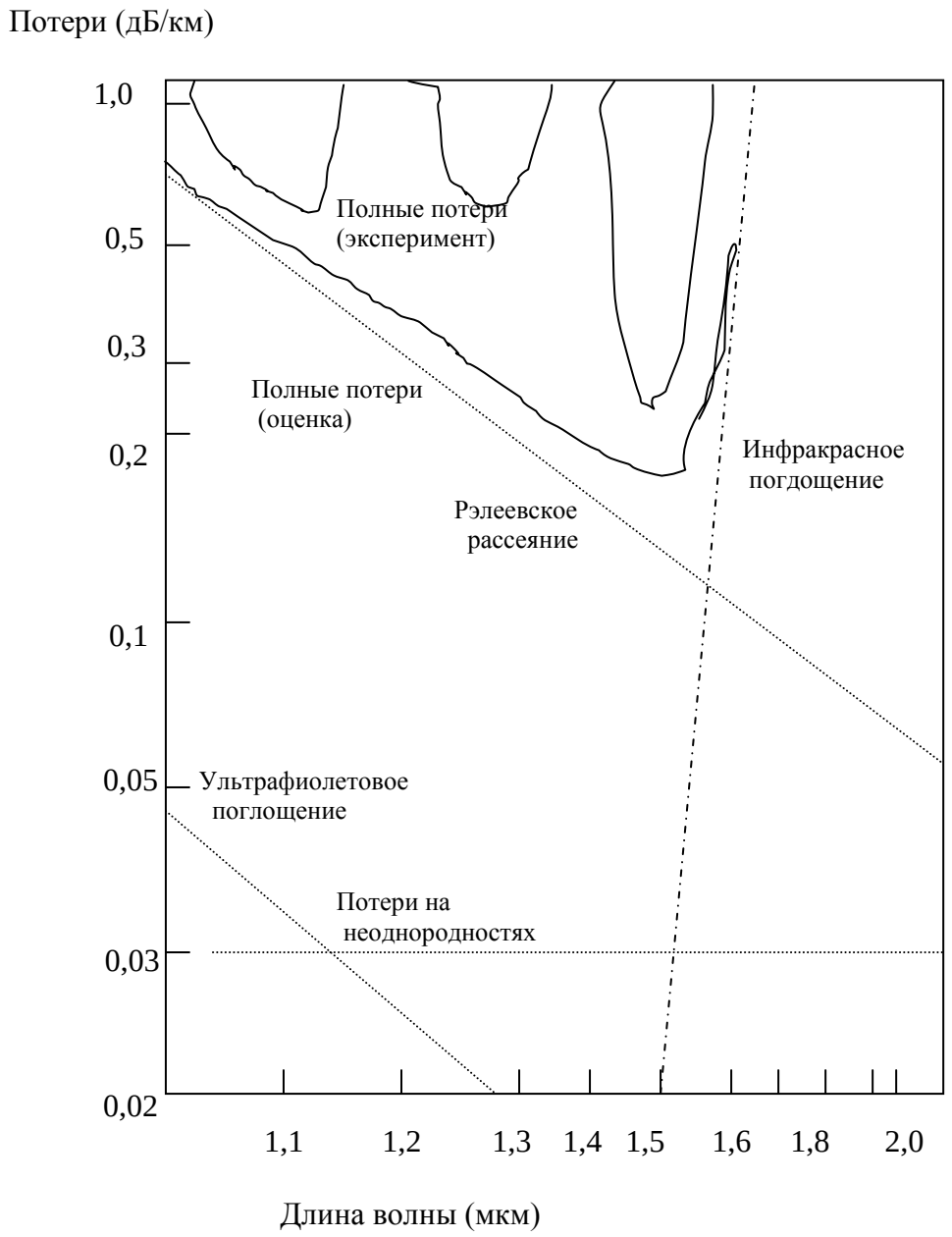


Рис 1.4. Факторы, влияющие на затухание в области 1550 нм.

характерный максимум в районе длины волны 1480 нм, который соответствует примесям ОН. Этот пик присутствует всегда.

Собственные потери на поглощение растут и становятся значимыми в ультрафиолетовой и инфракрасной областях. При длине волны излучения выше 1,6 мкм обычное кварцевое стекло становится непрозрачным из-за роста потерь, связанных с инфракрасным поглощением.

Потери на рассеяние α_{sct}. Уже к 1970 году изготавливаемое оптическое волокно становится настолько чистым (99,9999%), что наличие примесей перестает быть главенствующим фактором затухания в волокне. На длине волны 800 нм затухание составило 1,5 дБ/км. Дальнейшему уменьшению затухания препятствует так называемое рэлеевское рассеяние света. Рэлеевское рассеяние вызвано наличием неоднородностей микроскопического масштаба в волокне. Свет, попадая на такие неоднородности, рассеивается в разных направлениях. В результате часть его теряется в оболочке. Эти неоднородности неизбежно появляются во время изготовления волокна. Потери на рэлеевском рассеянии зависят от длины волны по закону λ^{-4} и сильней проявляются в области коротких волн (рис 1.4).

Длина волны, на которой достигается нижний предел собственного затухания чистого кварцевого волокна, составляет 1550 нм и определяется разумным компромиссом между потерями вследствие рэлеевского рассеяния и инфракрасного поглощения.

Внутренние потери хорошо интерполируются формулой $\alpha = K_{rel}\lambda^{-4} + \delta_{OH}(\lambda) + Ce^{-k/\lambda}$, где $\delta_{OH}(\lambda)$ отражает пик поглощения на примесях ОН с максимумом при 1480 нм, а первое и последнее слагаемые соответствуют рэлеевскому рассеянию и инфракрасному поглощению соответственно. На рис 1.5 приводится общий вид спектральной зависимости собственных потерь с указанием характерных значений четырех основных параметров (минимумов затухания в трех окнах прозрачности 850, 1300 и 1550 нм и пика поглощения на длине волны 1480 нм) для современных одномодовых и многомодовых волокон.

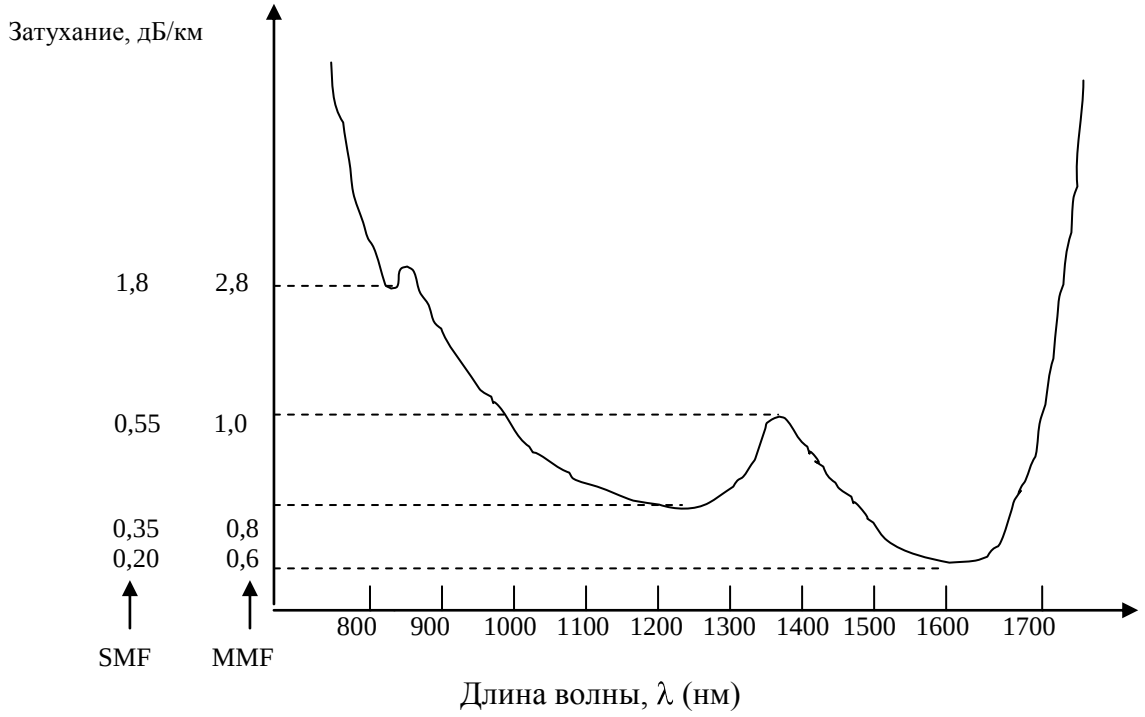


Рис.1.5. Собственные потери в оптическом волокне

Кабельные потери α_{rad} обусловлены скруткой, деформациями и изгибами волокон, возникающими при наложении покрытий и защитных оболочек, производстве кабеля, а также в процессе установки ВОК. При соблюдении ТУ на прокладку кабеля номинальный вклад со стороны этих потерь составляет не больше 20% от полного затухания. Дополнительные потери появляются, если радиус изгиба кабеля становится меньше минимального радиуса изгиба, указанного в спецификации на ВОК.

Дисперсия и полоса пропускания.

По оптическому волокну передается не просто энергия световых импульсов, а полезный информационный сигнал. Импульсы света, последовательность которых переносит информационный поток, в процессе распространения расплываются по длительности. При достаточно большом уширении импульсы начинают перекрываться, так что становится невозможным их обнаружение на приеме.

Дисперсия – уширение импульсов – имеет размерность времени и определяется как корень из разности квадратов длительностей импульсов на выходе и входе участка кабеля длины L по формуле $\tau(L) = \sqrt{t_{out}^2 - t_{in}^2}$. Обычно дисперсия нормируется в расчете на 1 км и измеряется в пс/км. Дисперсия в общем случае характеризуется тремя основными факторами:

- различием скоростей распространения направляемых мод (межмодовая дисперсия τ_{mod}),
- направляющими свойствами световодной структуры (волноводная дисперсия τ_w),
- свойствами материала оптического волокна (материальная дисперсия τ_{mat}).

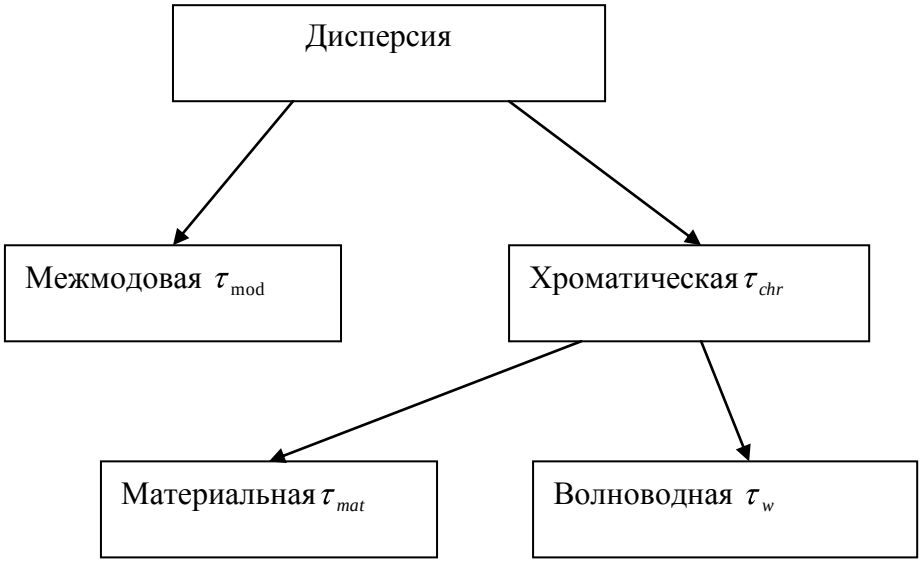


Рис 1.6. Виды дисперсии.

Чем меньше значение дисперсии, тем с большей скоростью поток информации можно передать по волокну. Результирующая дисперсия τ определяется из формулы:

$$\tau^2 = \tau_{\text{mod}}^2 + \tau_{chr}^2 = \tau_{\text{mod}}^2 + (\tau_{mat} + \tau_w)^2 \qquad (1.2)$$

Межмодовая дисперсия.

Межмодовая дисперсия возникает вследствие различной скорости распространения у мод, и имеет место только в многомодовом волокне. Для ступенчатого и градиентного многомодового волокна с параболическим профилем показателя преломления ее можно вычислить соответственно по формулам:

$$\tau_{\text{mod}\,step}(L)\cdot L = \begin{cases} \dfrac{n_1\Delta}{c} L, L < L_c \\ \dfrac{n_1\Delta}{c}\sqrt{L\cdot L_c}, L > L_c \end{cases} ; \quad \tau_{\text{mod}\,grad}(L)\cdot L = \begin{cases} \dfrac{n_1\Delta^2}{2c} L, L < L_c \\ \dfrac{n_1\Delta^2}{2c}\sqrt{L\cdot L_c}, L > L_c \end{cases} \qquad (1.3)$$

где L_c - длина межмодовой связи (для ступенчатого волокна порядка 5км, для градиентного – порядка 10км).

Изменение закона дисперсии с линейного на квадратичный связано с неоднородностями, которые есть в реальном волокне. Эти неоднородности приводят к взаимодействию между модами, и перераспределению энергии внутри них. При $L > L_c$ наступает установившийся режим, когда все моды в определенной установившейся пропорции присутствуют в излучении. Обычно длины линий связи между активными устройствами при использовании многомодового волокна не превосходят 2км и значительно меньше длины межмодовой связи. Поэтому можно пользоваться линейным законом дисперсии.

Вследствие квадратичной зависимости от Δ значения межмодовой дисперсии у градиентного волокна значительно меньше, чем у ступенчатого, что делает более предпочтительным использование градиентного многомодового волокна в линиях связи.

На практике, особенно при описании многомодового волокна, чаще пользуются термином полоса пропускания. При расчете полосы пропускания W можно воспользоваться формулой:

$$W = 0{,}44/\tau \qquad (1.4)$$

Измеряется полоса пропускания в МГц/км. Из определения полосы пропускания видно, что дисперсия накладывает ограничения на дальность передачи и верхнюю частоту передаваемых сигналов. Физический смысл W – это максимальная частота (скорость передачи) передаваемого сигнала при длине линии 1км. Если дисперсия линейно растет с ростом расстояния, то полоса пропускания зависит от расстояния обратно пропорционально.

Хроматическая дисперсия.

Хроматическая дисперсия состоит из материальной и волноводной составляющих и имеет место при распространении как в одномодовом, так и в многомодовом волокне. Однако наиболее отчетливо она проявляется в одномодовом волокне из-за отсутствия межмодовой дисперсии.

Материальная дисперсия обусловлена зависимостью показателя преломления волокна от длины волны. В выражение для дисперсии одномодового волокна входит дифференциальная зависимость показателя преломления от длины волны:

$$\tau_{mat}(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda \cdot L \cdot \frac{\lambda}{c}\frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} = \Delta\lambda \cdot L \cdot M(\lambda) \qquad (1.5)$$

Волноводная дисперсия обусловлена зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны:

$$\tau_w(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda \cdot L \cdot 2n_1^2 \Delta / c\lambda = \Delta\lambda \cdot L \cdot N(\lambda) \qquad (1.6)$$

где коэффициенты M(λ) и N(λ) – удельные материальная и волноводная дисперсии соответственно, а Δλ – уширение длины волны вследствие некогерентности источника излучения. Результирующее значение коэффициента удельной хроматической дисперсии определяется как $D(\lambda) = M(\lambda) + N(\lambda)$. Удельная дисперсия имеет размерность пс/(нм.км). Если коэффициент волноводной дисперсии всегда больше нуля, то коэффициент материальной дисперсии может быть как положительным, так и отрицательным. Здесь важно то, что при определенной длине волны (примерно 1310$\pm$ 10 нм для ступенчатого одномодового волокна) происходит взаимная компенсация $M(\lambda)$ и $B(\lambda)$, а результирующая дисперсия $D(\lambda)$ обращается в ноль. Длина волны, при которой это происходит, называется длиной волны нулевой дисперсии λ_0. Обычно указывается некоторый диапазон длин волн, в пределах которого может варьироваться λ_0 для данного конкретного волокна.

Хроматическая дисперсия связана с удельной хроматической дисперсией простым соотношением $\tau_{chr}(\lambda) = D(\lambda) \cdot \Delta\lambda$, где $\Delta\lambda$ - ширина спектра источника излучения. К уменьшению хроматической дисперсии всегда ведет использование более когерентных источников излучения.

1.2.3. Характеристики поставляемых волокон.

Среди множества мировых производителей оптического волокна выделяются три крупнейших: Corning Optical Fiber, Lucent Technologies и Alcoa Fujikura. Кроме того, существуют сотни менее крупных производителей волокна.

Градиентное многомодовое волокно.

Широко используются два стандарта многомодового градиентного волокна – 62,5/125 и 50/125, отличающиеся профилем сердцевины, рис 1.7 а. Соответствующие спектральные потери для этих волокон показаны на рис 1.7 б.

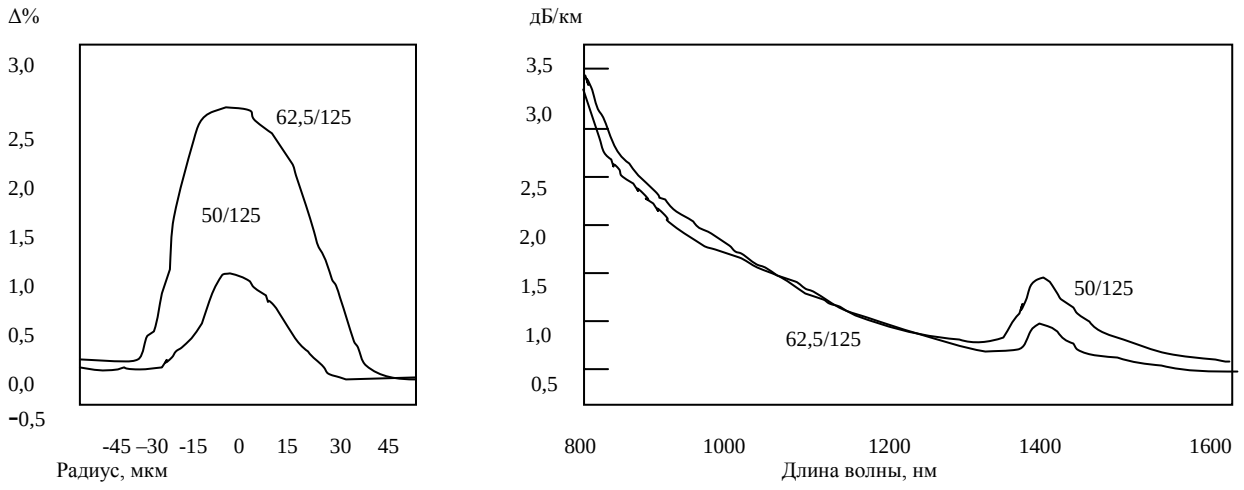


Рис 1.7. а) профили показателей преломления , б) спектральные потери для многомодовых градиентных волокон 50/125 и 62,5/125.

Полоса пропускания на длине волны 1300 нм превосходит соответствующее значение на длине волны 850 нм. Это объясняется следующим. Дисперсия, которая определяет полосу пропускания, состоит из межмодовой и хроматической составляющих.

Межмодовая дисперсия слабо зависит от длины волны, поскольку зависимостью показателя преломления от длины волны можно пренебречь (2.3). Хроматическая дисперсия пропорциональна ширине спектра излучения. Коэффициент пропорциональности D(λ) при длинах волн в окрестности 1300 нм (λ_0) близок к нулю, в то время, как на длине волны 850 нм примерно равен 100 пс/($нм^2$.км). Это приводит к тому, что хроматическая дисперсия на длине волны 850 нм начинает играть существенную роль наряду с межмодовой дисперсией.

По этой причине градиентные многомодовые волокна используются в диапазоне длин волн 1300 нм. Реальные волокна имеют здесь полосу пропускания до 1000 МГц.км, что дает возможность реализовать длину регенерационного участка до 25 км при скорости передачи 34 Мбит/с.

Одномодовое волокно

С точки зрения дисперсии существующие одномодовые волокна делятся на три основных типа: стандартные волокна со ступенчатым профилем (с несмещенной дисперсией) SF, волокна со смещенной дисперсией DSF и волокна с ненулевой смещенной дисперсией. Все три типа волокон очень близки по затуханию, но отличаются

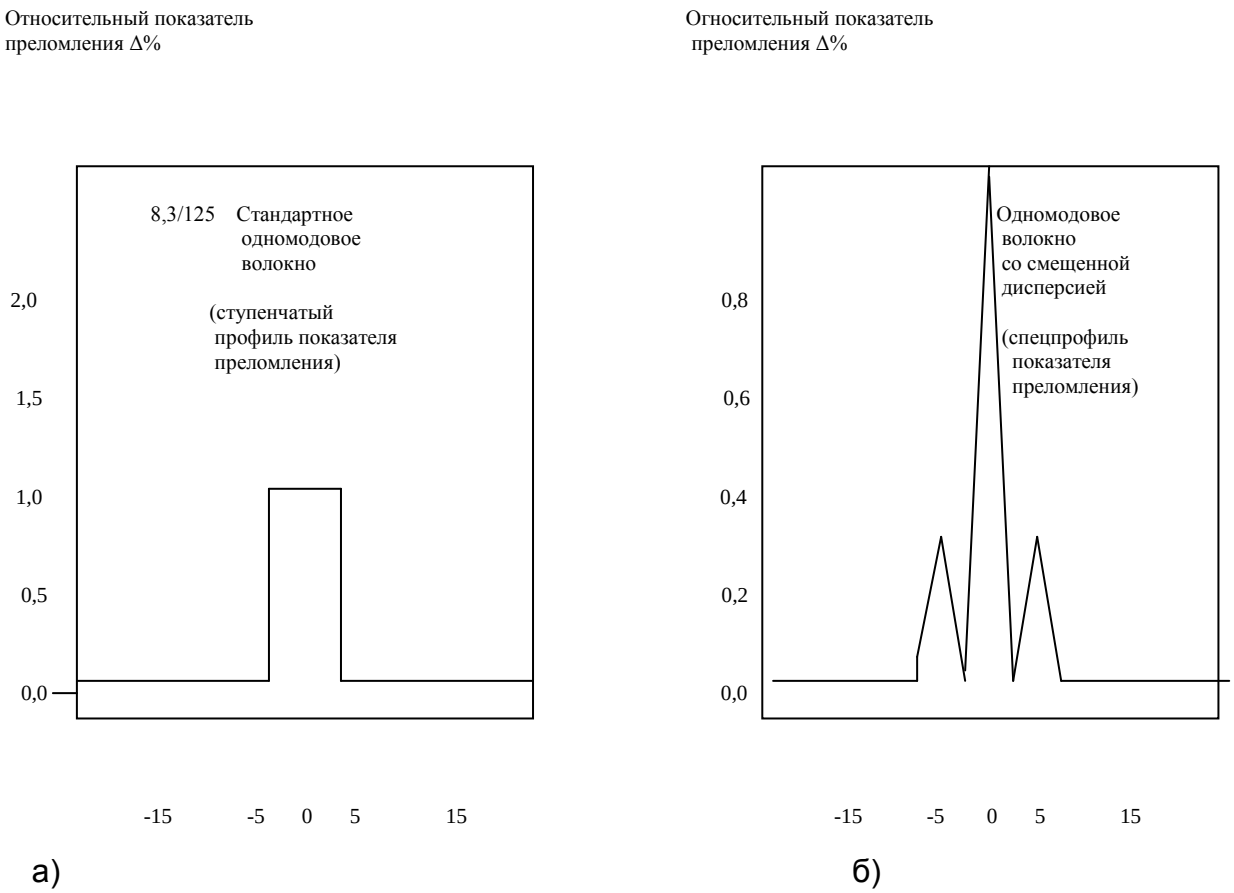


Рис. 1.8. Профили показателей преломления а) ступенчатое (стандартное) одномодовое волокно; б) одномодовое волокно со смещенной дисперсией (волокно со специальным профилем).

характеристиками хроматической дисперсии.

ВолокноSF. В начале 80-х годов прошлого века передатчики на длину волны 1550 нм имели очень высокую цену и не могли конкурировать на рынке с передатчиками на длину волны 1300 нм. Поэтому стандартное ступенчатое волокно стало первым коммерческим волокном и сейчас наиболее широко распространено в телекоммуникационных сетях. Оно оптимально по дисперсии для работы в окне 1310 нм, хотя затухание в этом окне больше, чем в окне 1550 нм.

ВолокноDSF. По мере совершенствования элементной базы для систем передачи на волне 1550 нм встала задача разработки волокна с длиной волны нулевой дисперсии, попадающей внутрь этого окна. В итоге в середине 80-х годов было создано волокно со смещенной дисперсией, полностью оптимизированное для работы в окне 1550 нм как по затуханию, так и по дисперсии. На протяжении многих лет волокно DSF считалось самым перспективным волокном. С появлением технологии передачи мультиплексного оптического сигнала начинают применяться эрбиевые оптические усилители EDFA, способные усиливать многоканальный оптический сигнал WDM. Однако, исследования показали, что именно длина волны нулевой дисперсии (1550 нм), попадающая внутрь рабочего диапазона эрбиевого усилителя, является главным потенциальным источником нелинейных эффектов и, прежде всего, четырехволнового смешивания, которые

проявляются в резком возрастании шума при распространении многоканального сигнала.

Четырехволновое смешивание – это эффект, приводящий к рассеянию двух волн с образованием новых нежелательных длин волн. Новые волны могут приводить к деградации распространяемого оптического сигнала, интерферируя с ним, или перекачивать мощность из полезного волнового канала. Чтобы избежать нелинейных эффектов при использовании DSF в WDM системах приходилось вводить сигнал меньшей мощности, увеличивать расстояние между оптическими каналами и избегать передачи парных (симметричных относительно λ_0) каналов. Именно из-за эффекта четырехволнового смешивания стало ясно, что необходим новый тип волокна, в котором λ_0 располагалось бы по одну сторону (левее или правее) от всех возможных каналов.

Волокно NZDSF создается в начале 90-х годов с целью преодолеть нелинейные эффекты. Известное также как λ-смещенное волокно, оно характерно тем, что длина волны нулевой дисперсии вынесена за пределы полосы пропускания эрбия. Это уменьшает нелинейные эффекты и улучшает характеристики волокна при передаче DWDM сигнала.

Установка новых ВОСП или наращивание уже существующих с учетом перехода на скорости 2, 4 и 10 Гбит/с или использования волнового мультиплексирования может осуществляться с использованием трех перечисленных видов волокон. При выборе конкретного типа волокна следует учитывать такие факторы, как общая стоимость проекта, требуемые емкости каналов, надежность, сложность системы и др.

1.3. Пассивные оптические компоненты.

Пассивные оптические компоненты включают в себя оптические соединители, розетки, шнуры, распределительные панели, кроссовые шкафы, соединительные муфты, оптические разветвители, аттенюаторы, системы спектрального уплотнения и т. д., то есть все, что необходимо для обеспечения передачи оптического сигнала по волоконно-оптическому кабелю от передатчика к приемнику.

По мере роста сложности и увеличения протяженности ВОСП роль пассивных компонентов возрастает. Практически все системы волоконно-оптической связи, реализуемые для магистральных информационных сетей, локальных вычислительных сетей и сетей кабельного телевидения охватывают сразу все многообразие пассивных волоконно-оптических компонентов.

Самым важным вопросом передачи информации по ВОСП является обеспечение надежного соединения оптических волокон. Оптический соединитель – это устройство, предназначенное для соединения различных компонентов волоконно-оптического линейного тракта в местах ввода и вывода излучения. Такими местами являются: оптические соединения оптоэлектронных преобразователей (приемников и передатчиков) с волокном кабеля, соединения отрезков оптического кабеля между собой, а также с другими компонентами. Различают неразъемные и разъемные соединители. Неразъемные соединители используются в местах постоянного монтажа кабельных систем. Основным методом монтажа, обеспечивающим неразъемное соединение, является сварка. Разъемные соединители или коннекторы допускают многократные

соединения/разъединения. Промежуточное положение занимают соединения типа механический сплайс.

1.3.1. Разъемные соединители.

Типы конструкций

По конструкции соединители бывают симметричными и несимметричными. При несимметричной конструкции для организации соединения требуется два элемента: соединитель гнездовой и соединитель штеккерный. Оптическое волокно в капиллярной трубке коннектора-штеккера не доходит до торца капилляра, а остается в глубине. Напртив, волокно в гнездовом соединителе выступает наружу. При организации соединения физический контакт волокон происходит внутри наконечника-капилляра, который обеспечивает соосность волокон. Примером несимметричной конструкции является соединитель типа SC.

При симметричной конструкции для организации соединения требуется три элемента: два соединителя и переходная розетка. Главным элементом соединителя является наконечник. Переходная розетка снабжается центрирующим элементом, выполненным в виде трубки с продольным разрезом – должен быть контакт между наконечником и центрирующим элементом розетки. Центрирующий элемент плотно охватывает наконечники и обеспечивает их строгую соосность.

Внешний диаметр наконечника равен 2,5 мм. Наиболее жесткие требования предъявляются к параметрам отверстия (капилляра) наконечника. Оно должно быть достаточно большим, чтобы волокно могло зайти в него, и при этом достаточно малым, чтобы люфт волокна был незначительным. Диаметр отверстия в соответствии со стандартом равен 126+1/-0 мкм для одномодового волокна и 127+2/-0 мкм для многомодового волокна. Наконечники обычно бывают металлические (на основе нержавеющей стали) и керамические (на основе циркония или оксида алюминия). Примером симметричной конструкции является соединитель типа FC.

К соединителям предъявляются следующие основные требования: малые вносимые потери, малое обратное отражение, устойчивость к внешним механическим, климатическим и другим воздействиям, высокая надежность и простота конструкции, незначительное ухудшение характеристик после многократных повторных соединений.

Вносимые потери

Коэффициент передачи оптической мощности D при торцевом соединении определяется как $D = P_{out} / P_{in}$, где P_{in} и P_{out} соответственно интенсивности излучения на входе и выходе соединения. Обычно вносимые потери зависят от типа волокна (многомодовое или одномодовое), типов и качества соединителей и составляют от 0,2 до 0,5 дБ. Вносимые потери можно разбить на две категории: внутренние и внешние потери.

Внутренние потери определяются факторами, которые невозможно контролировать (достичь их улучшения при заделке волокна в соединитель), а именно парной вариацией диаметров сердцевин, показателей преломления, числовых апертур, эксцентриситетов сердцевина/оболочка и концентричности сердцевины у волокон с разных сторон. Все эти потери следует учитывать

аддитивно. На внутренние потери влияет технология производства волокна, а не конструкция соединителя.

Потери из-за вариации показателей преломления являются следствием френелевского рассеяния и определяются в простейшем случае для волокна со ступенчатым профилем как $a_f = -10\lg(4n_1n_2/(n_1+n_2))$, дБ, где n_1 и n_2 - показатели преломления волокон. Эти потери пропадают только при равенстве показателей преломления. Потери при вариации апертур возникают в том случае, если апертура волокна, передающего сигнал NA_1, больше апертуры волокна, принимающего сигнал NA_2, и определяются как $a_{NA} = -10\lg(NA_2/NA_1)$, дБ. При $NA_1 < NA_2$ апертурные потери не возникают. Потери при вариации диаметров возникают, когда диаметр передающего волокна меньше диаметра принимающего, и определяются соотношением $a_D = -10\lg(D_2/D_1)$, дБ, где D_1 и D_2 - диаметры передающего и принимающего волокон, соответственно. При $D_1 < D_2$ потери не возникают.

Соединение волокон 62,5/125 и 50/125. В настоящее время существуют два основных широко распространенных стандарта многомодового градиентного волокна. Многомодовое волокно получило наибольшее распространение в локальных сетях. Если свет распространяется из волокна 50/125 в волокно 62,5/125, то потери интенсивности света не происходит. Если же свет переходит из волокна 62,5/125 в волокно 50/125, то только до $(50/62{,}5)$ интенсивности света будет во втором волокне, что соответствуеу потерям 1,94 дБ.

Этот факт обычно учитывается при производстве оптических приемопередатчиков – светодиод передатчика рассчитан на волокно меньшего диаметра, а приемник в этом же устройстве на волокно большего диаметра.

Более того, многие сетевые стандарты закладывают большой запас по затуханию. Например, стандарты физического уровня на многомодовое волокно FDDI, Fast Ethernet (100 Base-FX) рассчитаны на максимально допустимое затухание в линии до 11 дБ при максимально допустимом расстоянии 2 км. Если учесть, что потери в кабеле составляют 3 дБ/км, а в соединителе с однотипными волокнами – 0,5 дБ, то один дополнительный переход с 62,5 на 50 мкм, вносящий затухание 2 дБ, не будет критичным даже при максимальной длине кабельного участка.

Соединение многомодового и одномодового волокон. Еще большие внутренние потери (примерно 16 дБ) возникают при сопряжении многомодового и одномодового волокна, когда свет распространяется из первого во второе волокно.

Внешние потери – это потери, которые являются следствием несовершенства как самой конструкции соединителя, так и процесса сборки оптического шнура. Внешние потери зависят от таких факторов как: механическая нестыковка (угловое смещение Θ, радиальное смещение L, осевое смещение S); шероховатости на торце сердцевины; загрязнение участка между торцами волокон рис. 1.9. Некачественная полировка торцов

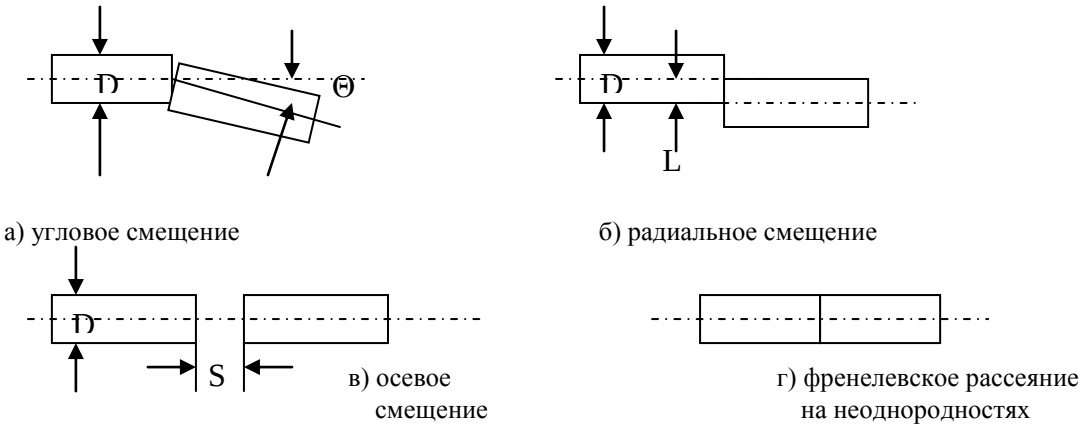


Рис.1.9. Главные причины внешних потерь в соединителе.

волокон, а также трение, возникающее при многократном переключении соединителей, имеющих физический контакт, может привести еще к одному типу потерь – потерь, связанных с рассеянием на микротрещинах.

Обычно суммарные потери в соединителе не превышают 0,3-0,4 дб для одномодового и многомодового волокон. При этом более жесткие требования предъявляются к качеству одномодового соединителя.

Обратное отражение. Контакты типа PC, Super PC, Ultra PC, APC

Рассеяние не только ведет к ослаблению проходящего сигнала, но и увеличивает обратный световой поток. Сильное обратное отражение от стыков соединителей при передаче по одномодовому волокну может взаимодействовать с активной средой одномодового лазерного диода и, в конечном итоге, приводить к ненужным дополнительным световым сигналам. В абонентских широковещательных сетях кабельного телевидения, использующих широкополосные (до 1 ГГц) аналоговые оптические передатчики, такая обратная связь приводит к паразитной интерференции передаваемых сигналов, в результате чего ухудшается качество видеоизображения. При цифровой передаче влияние обратного рассеяния менее критично, однако суммарный эффект обратного рассеяния на стыках нескольких соединителей может быть причиной увеличения коэффициента ошибок приемного устройства.

Обратное отражение является вторым по пагубности фактором после вносимых потерь. Коэффициент обратного отражения R определяется как $R = P_r / P_{in}$, а потери на обратном отражении или просто обратные потери b – определяются как $b = 10\lg P_r / P_{in}$, дБ, где P_r - интенсивность отраженного излучения. Знак минус (в отличие от соотношения для вносимых потерь) здесь намеренно отсутствует, чтобы показать, что лучшими характеристиками обладает соединение с более низкими вносимыми потерями (ближе к 0 дБ) и более низкими (более отрицательными) обратными потерями.

Основным фактором, вносящим вклад в обратное отражение, является френелевское отражение вследствие зазора S (обычно воздушного) между торцами соединяемых волокон. При малых значениях S/λ<0,1 вклад френелевского отражения во вносимые потери пренебрежимо мал, однако именно френелевское отражение является главным фактором обратных потерь.

Значительное уменьшение зазора достигается при сферической поверхности торцов, что позволяет обеспечить *физический контакт* (physical contact, PC) волокон. Дело в том, что при использовании плоской поверхности торцов

наиболее вероятно, что торцы обоих наконечников, из-за трудности практического создания весьма близких к нормали поверхностей, будут иметь небольшие отклонения, вполне достаточные для образования зазора между сердцевинами волокон. Так отклонение на угол $0{,}05^0$ между плоскостями наконечников приводит к зазору около 1 мкм. При сферической поверхности торцов соприкосновение торцов всегда происходит в окрестности светонесущей сердцевины волокон, рис 1.10.

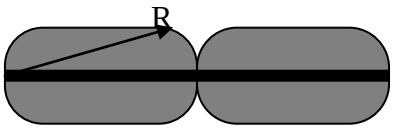


Рис.1.10. Сферическая поверхность – физический контакт PC.

Существуют три градации сферического контакта, отличающиеся качеством технологии изготовления и, вследствие этого уровнем потерь на обратном отражении: PC < -30 дБ; Super PC < - 40 дБ; Ultra PC < - 50 дБ. Радиус кривизны R при PC-соединении может находиться в диапазоне от 15 до 25 мм.

Обратное рассеяние может быть еще больше уменьшено при использовании углового (наклонного) физического контакта (angled PC , APC), когда сферические поверхности торцов закруглены под углом друг к другу. При наклонном торце даже в том случае, когда нет физического контакта, сильный отраженный сигнал не распространяется обратно по сердцевине волокна, а попадает в оболочку. Угол наклона Θ наконечника определяется как угол между осью световодной сердцевины и нормалью к плоскости, касательной в точке поверхности, где находится сердцевина. Потери на обратном отражении для APC обычно меньше – 60 дБ, а типичные значения могут быть – 75 дБ.

Радиус кривизны R для APC может находиться в диапазоне от 5 до 15 мм. Уменьшение этой величины по сравнению с PC объясняется тем, что меньший радиус кривизны обеспечивает большую вариацию угла $\Theta = \Theta_1 - \Theta_2$ между наконечниками при сохранении физического контакта.

В широкополосных абонентских сетях кабельного телевидения, а также в высокоскоростных оптических магистралях (2,5 Гбит/с и более) и магистралях со спектральным уплотнением рекомендуется использование стандарта APC.

Надежность, механические, климатические и другие воздействия.

Обычно соединители рассчитаны на 500 – 1000 переподключений. За это время увеличение вносимых потерь не должно превысить 0,2 дБ. Этого количества подключений при обычной эксплуатации более, чем достаточно. Разъемное соединение считается наиболее слабым звеном в кабельной системе. Сильное напряжение на станционный кабель, идущий к соединителю, или резкие воздействия (на кабель, на соединитель) могут привести к ухудшению технических характеристик соединения или повредить его. Обычно места крепления переходных розеток делаются в закрытых шкафах или коробках. Аккуратная эксплуатация мест кроссирования оптических кабелей увеличивает срок службы соединителей и всей кабельной системы в целом.

1.4. Оптоэлектронные компоненты ВОСП.

1.4.1. Передающие оптоэлектронные модули.

Передающие оптоэлектронные модули (ПОМ), применяемые в ВОСП, предназначены для преобразования электрических сигналов в оптические, которые должны быть введены в волокно с минимальными потерями. Производится большое разнообразие ПОМ, отличающихся по конструкции и по типу источника излучения. Одни работают на низких скоростях и на малые расстояния, другие передают сотни и даже тысячи мегабит в секунду на расстояния в десятки километров.

Типы и характеристики источников излучения.

Главным элементом ПОМ является источник излучения. К основным требованиям, которым он должен удовлетворять, относятся:

- излучение должно вестись на длине волны одного из окон прозрачности;
- источник излучения должен обладать соответствующим быстродействием для того, чтобы обеспечивать передачу информации на требуемой скорости;
- источник должен обеспечивать ввод излучения в волокно с минимальными потерями;
- источник излучения должен иметь достаточную для передачи на большие расстояния мощность, но и не настолько, чтобы излучение приводило к нелинейным эффектам или могло повредить волокно или оптический приемник;
- источник должен выдерживать изменения температуры в заданных пределах;
- стоимость источника излучения должна быть относительно невысокой.

В настоящее время используются два основных типа источников излучения, которые удовлетворяют этим требованиям – светодиоды (LED) и полупроводниковые лазерные диоды (LD).

Главное отличие между светодиодами и лазерными диодами – это ширина спектра излучения. Светоизлучающие диоды имеют широкий спектр излучения, в то время как лазерные диоды имеют значительно более узкий спектр. Оба типа устройств весьма компактны и хорошо сопрягаются со стандартными электронными цепями.

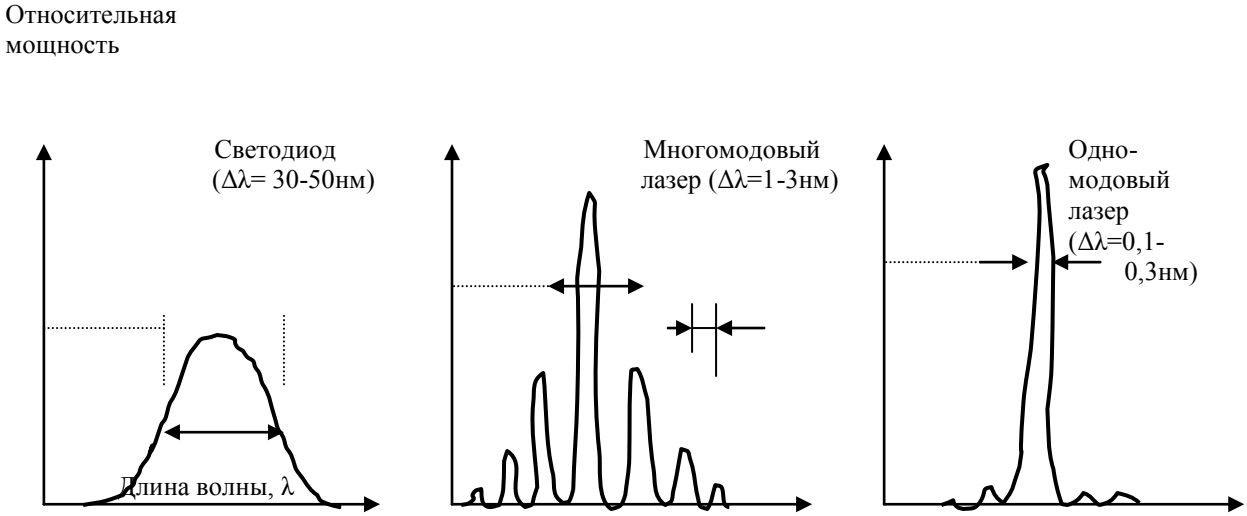


Рис. 1.11. Спектры излучения светодиодов и лазерных диодов

Светоизлучающие диоды

Благодаря своей простоте и низкой стоимости, светодиоды распространены значительно шире, чем лазерные диоды.

Принцип работы светодиода основан на излучательной рекомбинации носителей в активной области гетерогенной структуры при пропускании через нее тока, рис 1.11,а. Носители заряда – электроны и дырки – проникают в активный слой (гетеропереход) из прилегающих пассивных слоев (p- и n- слоя) вследствие подачи напряжения на p-n структуру, где испытывают спонтанную рекомбинацию, сопровождающуюся излучением света.

Длина волны излучения λ (мкм) связана с шириной запрещенной зоны активного слоя E_g (эВ) законом сохранения энергии $\lambda = 1{,}24/E_g$, рис. 1.11 б.

Показатель преломления активного слоя выше показателя преломления ограничивающих пассивных слоев, благодаря чему рекомбинационное излучение может распространяться в пределах активного слоя, испытывая многократное отражение, что значительно повышает КПД источника излучения.

Гетерогенные структуры могут создаваться на основе разных полупроводниковых материалов. Обычно в качестве подложки используются GaAs и InP. Соответствующий композиционный состав активного материала выбирается в зависимости от длины волны излучения и создается посредством напыления на подложку.

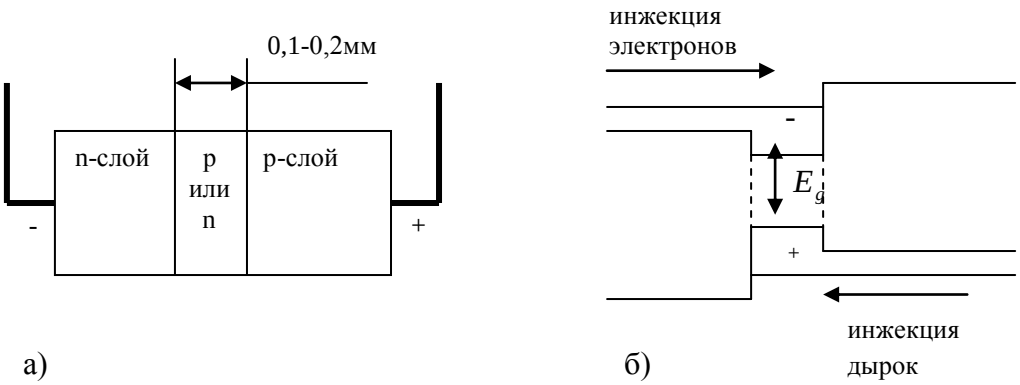


Рис.1.12. Двойная гетероструктура: а) гетероструктура; б) энергетическая диаграмма при прямом смещении

Длину волны излучения λ_0 определяют как значение, соответствующее максимуму спектрального распределения мощности, а ширину спектра излучения $\Delta\lambda_{0,5}$ - как интервал длин волн, в котором спектральная плотность мощности составляет половину максимальной.

Лазерные диоды

У лазерного диода по сравнению со светодиодом есть два главных отличия. Во-первых, лазерный диод имеет встроенный оптический резонатор, и, во-вторых, он работает при значительно больших значениях тока накачки, чем светодиод. Это позволяет при превышении некоторого порогового значения получить режим индуцированного излучения. Именно такое излучение характеризуется высокой когерентностью, благодаря чему лазерные диоды имеют значительно меньшую

ширину спектра излучения (1-2 нм) по сравнению (30-50 нм) со светодиодами, рис. 1.11.

Зависимость мощности излучения от тока накачки описывается ватт-амперной характеристикой. При малых токах накачки лазер испытывает слабое спонтанное излучение, работая как малоэффективный светодиод. При превышении некоторого порогового значения тока накачки $I_{пор}$ излучение становиться индуцированным, что приводит к резкому росту мощности излучения и его когерентности, рис.1.13.

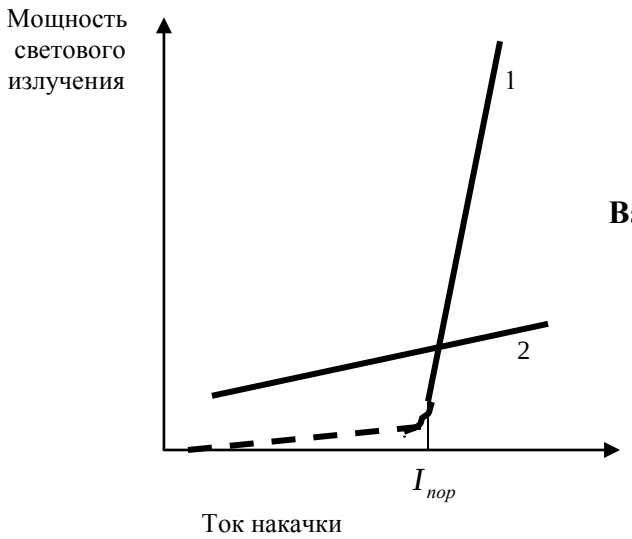


Рис. 1.13.

Ватт-амперные характеристики

1 – лазерного диода
2 - светодиода

Мощность излучения светодиода или лазерного диода $P_{вых}$, вводимая в волокно, измеряется в мВт или дБм. Мощности, измеренной в мВт, будет соответствовать мощность $p_{вых}$=10lg $P_{вых}$ (дБм). Использование единицы измерения дБм упрощает расчет энергетического бюджета волоконно-оптической линии.

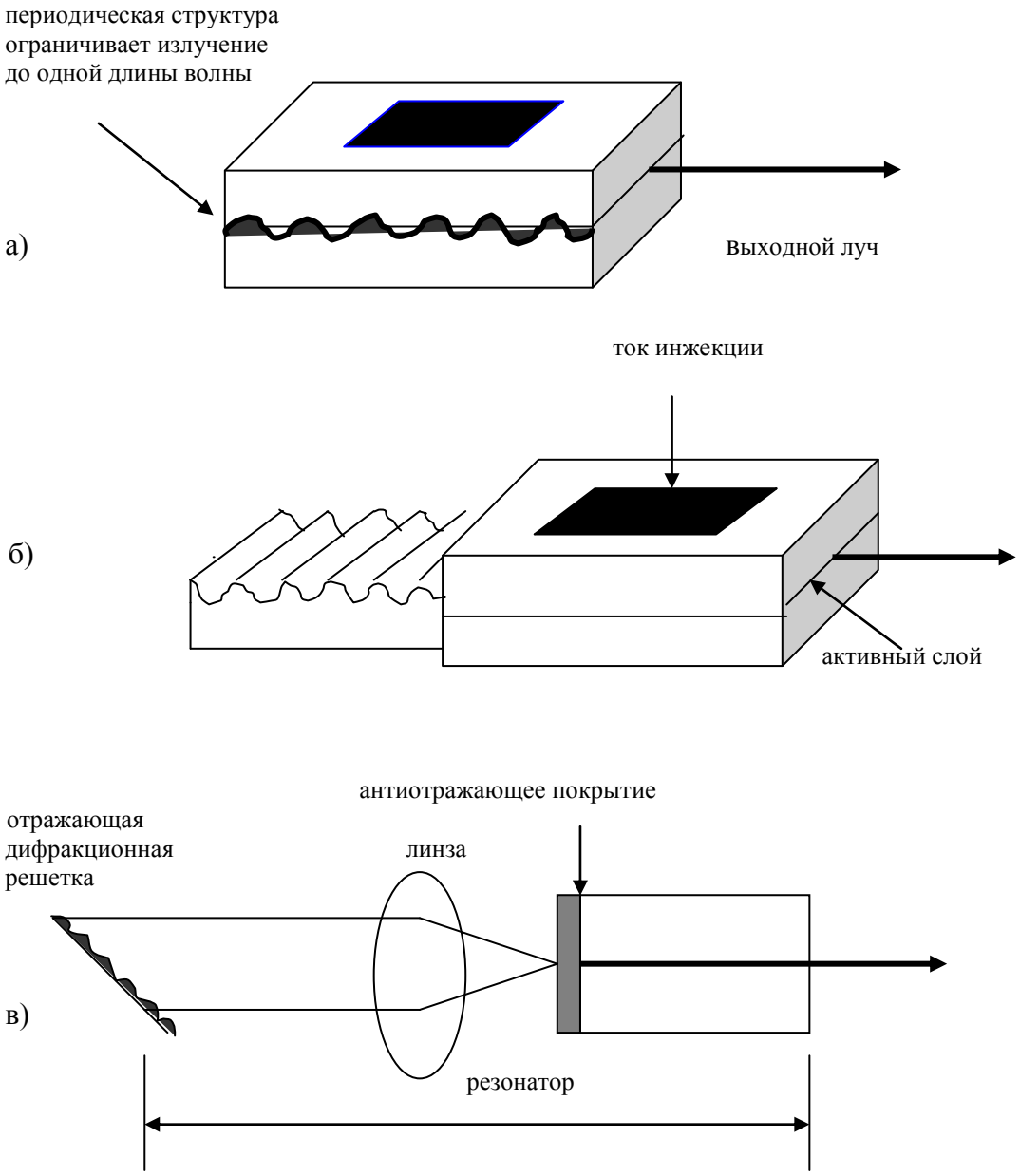
В магистральных ВОСП используются два окна 1,3 и 1,55 мкм. Поскольку наименьшее затухание в волокне достигается в окне 1,55 мкм, на сверхпротяженных регенерационных участках (порядка 100 км) эффективней использовать оптические передатчики именно с этой длиной волны. Однако, если на магистральной ВОСП в состав ВОК входят только ступенчатые одномодовые волокна без смещенной дисперсии с минимумом хроматической дисперсии в окрестности 1,3 мкм, то величина их хроматической дисперсии на длине волны 1,55 мкм составляет 17 пс/нм.км. А поскольку полоса пропускания обратно пропорциональна ширине спектра излучения, то увеличить полосу пропускания можно только уменьшая ширину спектра излучения лазера. Так при ширине спектра Δλ=4 нм полоса пропускания на 100 км составит 63 МГц, а при Δλ= 0,2 нм соответственно 1260 МГц. Поэтому для того, чтобы оптические передатчики на длине волны 1,55 мкм могли использоваться не только на протяженных линиях с одномодовым волокном со смещенной дисперсией (DSF), но и с обычным ступенчатым волокном (SMF), ширину спектра излучения необходимо делать как можно меньше.

Наибольшее распространение получили четыре типа лазерных диодов: с резонатором Фабри – Перо, с распределенной обратной связью, с распределенным брэгговским отражением и с внешним резонатором.

Лазерные диоды с резонатором Фабри – Перо (FP лазеры). В таком лазерном диоде резонатор образуется торцевыми поверхностями, окружающими с обеих сторон гетеропереход. Одна из поверхностей отражает свет с коэффициентом отражения, близким к 100%, другая является полупрозрачной, обеспечивая, таким образом, выход излучения наружу.

Спектр излучения промышленного лазерного диода с использованием резонатора Фабри – Перо показан на рис.1.11 б. Как видно, наряду с главным пиком, в котором сосредоточена основная мощность излучения, существуют побочные максимумы. Их появление связано с условиями образования стоячих волн. Для усиления света определенной длины волны необходимо выполнение двух условий. Первое, длина волны должна удовлетворять соотношению $2D=N\lambda$, где D – диаметр резонатора Фабри – Перо, а N – некоторое целое число. Второе, длина волны должна попадать в диапазон, в пределах которого свет может усиливаться индуцированным излученимем. Если это диапазон достаточно мал, то имеет место одномодовый режим с шириной спектра меньше 1 нм. В противном случае в область $\Delta\lambda_{0,5}$ могут попасть два или более соседних максимумов, что соответствует многомодовому режиму с шириной спектра от одного до нескольких нм. FP лазер имеет далеко не самые высокие технические характеристики, но, когда не требуется очень высокая скорость передачи, он, вследствие более простой конструкции, наилучшим образом подходит с точки зрения цена – эффективность.

Лазерные диоды с распределенной обратной связью (DFB лазер) и с распределенным брэгговским отражением (DBR лазер). Резонаторы у этих двух довольно схожих типов представляют собой модификацию плоского резонатора Фабри – Перо, в которой добавлена периодическая пространственная модуляционная структура. В DFB лазерах периодическая структура совмещена с активной областью (рис.1.14 а), а в DBR лазерах периодическая структура вынесена за пределы активной области (рис.1.14 б). Периодическая структура влияет на условия распространения и тем самым на характеристики излучения. Так, преимуществами DFB и DBR лазеров по сравнению с FP лазером являются: уменьшение зависимости длины волны излучения лазера от тока ижекции и температуры, высокая стабильность одномодовости и практически 100% глубина модуляции. Температурный коэффициент $\Delta/\Delta T$ для FP лазера порядка 0,5-1 нм/^{0}C, в то время как для DFB лазера порядка 0,07-0,09 нм/^{0}C. Основным недостатком DFB и DBR лазеров является сложная технология изготовления и, как следствие, более высокая цена.



длину волны излучения, причем диапазон настройки достигает 30 нм. В силу этого, EC лазеры используются в аппаратуре спектрального уплотнения и измерительных приборах. По характеристикам они схожи с DFB и DBR лазерами.

К другим важным характеристикам источников излучения относятся быстродействие источника излучения, деградация **Рис.1.14. Три основных типа лазерных диодов с узкой шириной спектральной линии:**

а) лазер с распределенной обратной связью, DFB лазер;
б) лазер с распределенным брэгговским отражением, DBR лазер;
в) лазер с одним внешним резонатором, EC лазер

Лазерный диод с внешним резонатором (ЕС лазер). В ЕС лазерах один или оба торца покрываются специальным слоем, уменьшающим отражение, и соответственно, одно или два зеркала ставятся вокруг активной области полупроводниковой структуры. На рис. 1.14 в) показан пример ЕС лазера с одним внешним резонатором. Антиотражательное покрытие уменьшает коэффициент отражения примерно на четыре порядка, в то время как другой торец активного слоя отражает до 30% светового потока благодаря френелевскому отражению. Зеркало, как правило, совмещает функции дифракционной решетки. Для улучшения обратной связи между зеркалом и активным элементом устанавливается линза.

Увеличивая или уменьшая расстояние до зеркала, а также одновременно разворачивая зеркало-решетку, что эквивалентно изменению шага решетки, можно плавно изменять и время наработки на отказ.

Основные элементы ПОМ

Для организации передачи оптических сигналов не достаточно иметь только источник излучения. В любой конструкции ПОМ есть специальный держатель, который позволяет закрепить и защитить составные элементы передатчика: источник излучения, узел электрического интерфейса и место сопряжения с волокном. Важным элементом передающего модуля является цепь тока накачки с поддержанием уровня выходной мощности и система контроля температуры. Общая схема конструкции передающего оптического модуля, в которой не все элементы являются обязательными, приведена на рис. 1.15.

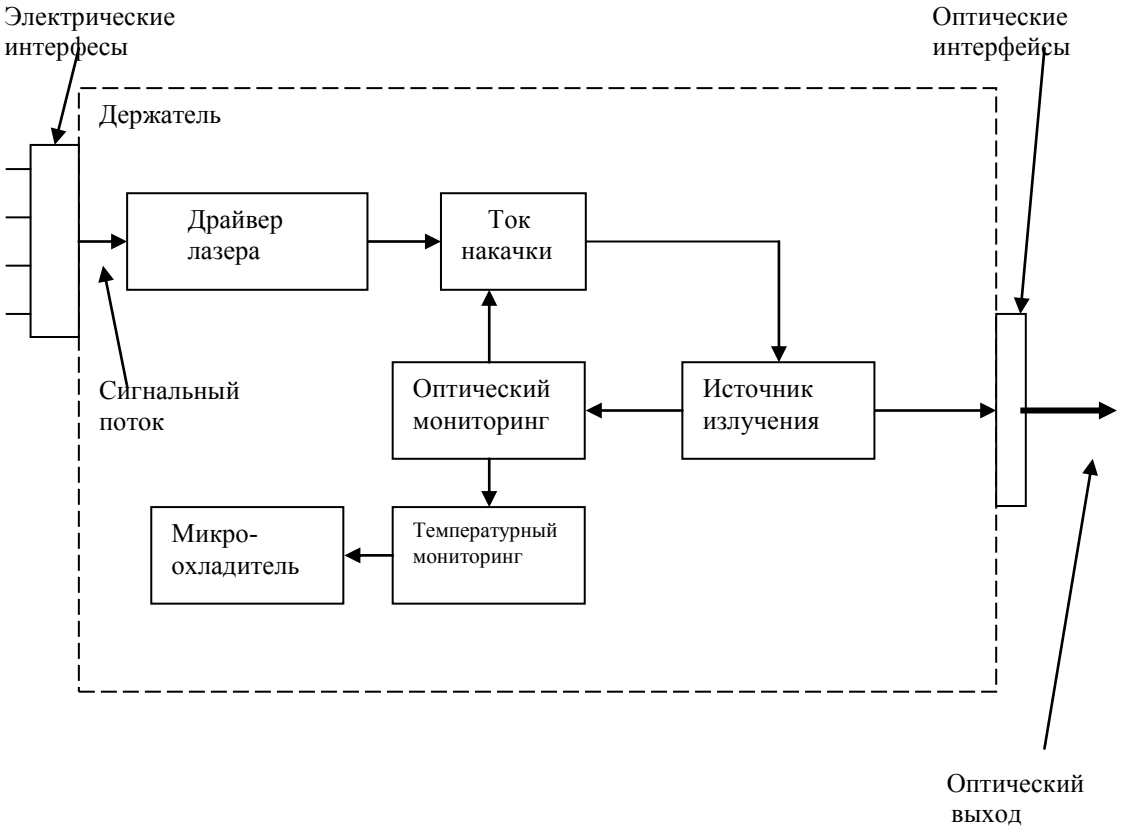


Рис. 1.15. Составляющие элементы передающего оптического модуля ПОМ

1.4.2. Приемные оптоэлектронные модули

Функцией приемных оптоэлектронных модулей (ПРОМ) является преобразование оптического сигнала, принятого из волокна, в электрический. Последний обрабатывается далее электронными устройствами.

Основные элементы приемных оптоэлектронных модулей

Основными функциональными элементами ПРОМ являются:

- фотоприемник, преобразующий полученный оптический сигнал в электрическую форму;
- электрический усилитель, усиливающий сигнал до уровня, пригодного к обработке;
- регенератор, воспроизводящий первоначальную форму сигнала.

В некоторых ПРОМ отсутствует цепь принятия решения, поскольку электрический сигнал с выхода усилителя приемлем для непосредственной обработки другими электронными устройствами. Иногда для более эффективной работы ПРОМ перед фотоприемником устанавливается оптический усилитель.

На рис. 1.16 приведены функциональные элементы аналогового а) и цифрового б) ПРОМ. Аналоговые ПРОМ принимают аналоговый оптический сигнал и на выходе также выдают аналоговый электрический сигнал. К аналоговым приемникам предъявляются требования высокой линейности преобразования и усиления сигнала при минимуме вносимых шумов. Это особенно важно на протяженных линиях с последовательным числом приемо-передающих узлов, поскольку в этом случае искажения и шумы накапливаются.

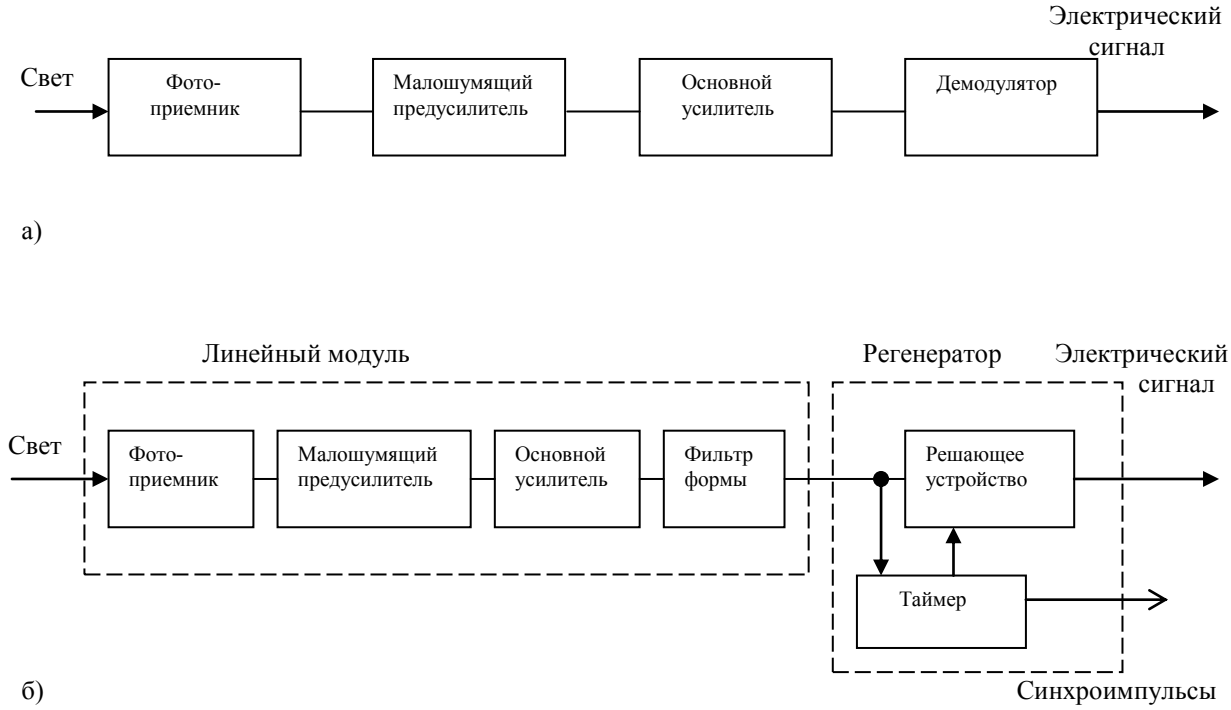


Рис. 1.16. Функциональные элементы приемных оптоэлектронных модулей ПРОМ

а) аналогового; б) цифрового

При цифровой передаче от аналоговой обработки сигнала не требуется восстановление точной формы импульсов. Цифровой приемник включает регенератор, содержащий решающее устройство с порогами установленными на распознавание сигналов 0 и 1. Регенератор распознает, какой символ пришел, устраняет шумы и восстанавливает необходимую амплитуду сигнала. Правильное решение о приеме символа может происходить при относительно большом уровне шумов. Если требуется точное восстановление временных соотношений между импульсами, в состав регенератора включают выделитель тактовой частоты (таймер), который задает решающему устройству моменты принятия решения о приходе соответствующего символа (0 или1).

Принципы работы фотоприемника

Основным элементом ПРОМ является фотоприемник, изготавливаемый из полупроводникового материала. В основе работы фотоприемника лежит явление внутреннего фотоэффекта, при котором в результате поглощения фотонов с энергией, превышающей энергию запрещенной зоны, происходит переход электронов из валентной зоны в зону проводимости (генерация электронно-дырочных пар). При наличии электрического потенциала с появлением электронно-дырочных пар от воздействия оптического сигнала появляется электрический ток, обусловленный движением электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. Эффективная регистрация генерируемых в полупроводнике электронно-дырочных пар обеспечивается путем разделения носителей заряда. Для этого используется конструкция с p-n переходом, которая называется фотодиодом. Из фотоприемников, применяемых в ВОСП, наибольшее распространение получили p-i-n фотодиоды.

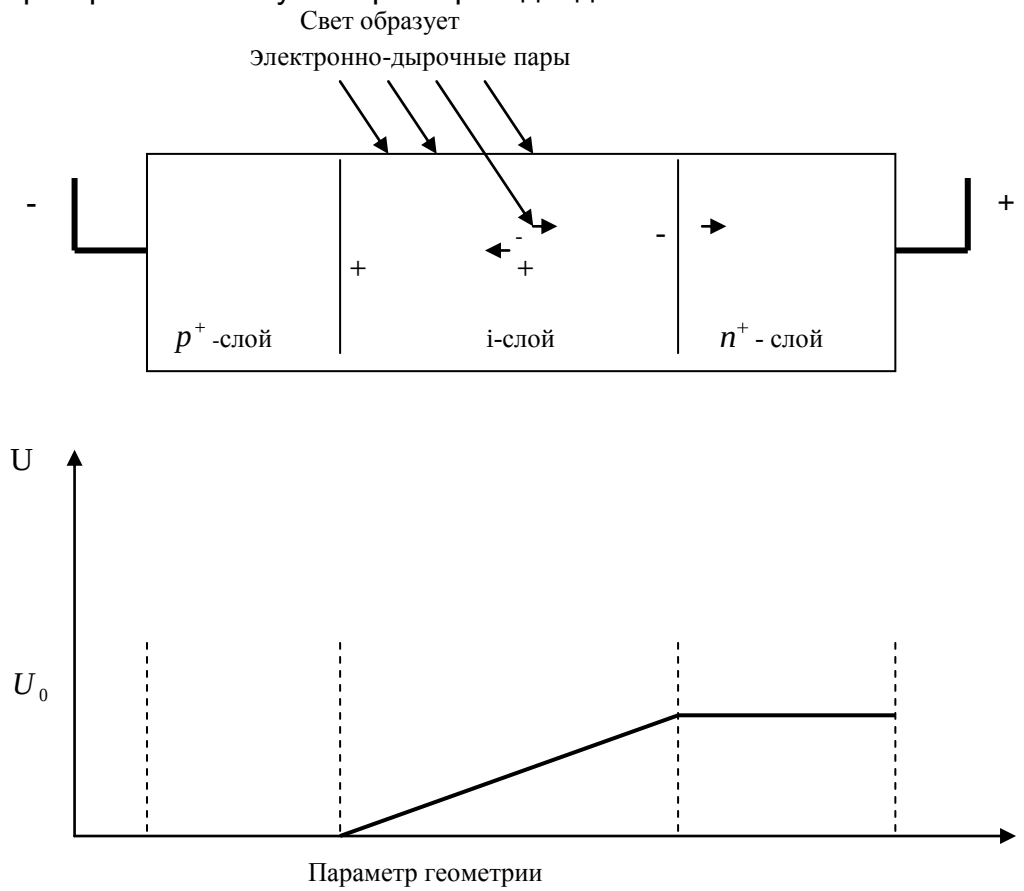


Рис.1.17. Структура, включение и распределение потенциала p-i-n фотодиода.

Рассмотрим принцип работы фотоприемника на основе p-i-n фотодиода, для которого характерно наличие i-слоя (слаболегированного полупроводника n-типа) между слоями p^+ и n^+- типа (+ означает сильное легирование), рис.1.17. Также i-слой называют обедненным слоем, поскольку в нем нет свободных носителей. На p-i-n структуру подается напряжение с обратным смещением U_0 (по сравнению со светоизлучающим диодом). Сильное легирование крайних слоев делает их проводящими, и максимальное значение электрического поля (градиент потенциала) создается в i-слое. Но поскольку там нет свободных носителей, нет и электрического тока, так что i-слой испытывает только поляризацию. При наличии падающего излучения на i-слой, в нем образуются свободные электронно-дырочные пары. Они под действием электрического поля быстро разделяются и двигаются в противоположных направлениях к своим электродам, образуя электрический ток. Эффективным является взаимодействие излучения только с i-слоем, так как при попадании фотонов в p^+ и n^+-слои возникает диффузионный ток, который имеет большую инерционность и ухудшает быстродействие. Поэтому при изготовлении фотодиодов стремятся делать p^+ и n^+-слои как можно тоньше, а обедненную область достаточно большой протяженности, чтобы она полностью поглощала весь падающий свет.

Эффективность (квантовая) обедненной области в рабочем диапазоне длин волн достаточно высока – порядка 80-100%. Однако часть падающего излучения испытывает френелевское отражение от фоточувствительной поверхности из-за скачка показателей преломления на границе между этой поверхностью и средой. Для уменьшения отражения приемную поверхность обедненного слоя покрывают специальным антиотражающим слоем.

Технические характеристики фотоприемников

Основными техническими характеристиками, которые интересуют разработчика при выборе фотоприемника для конкретной ВОСП, являются: широкополосность, соотношение сигнал/шум и чувствительность для аналоговой системы передачи; быстродействие, частость появления ошибок и чувствительность для цифровых систем передачи. На самом деле они зависят от таких характеристик фотодиода и приемного модуля, как: токовая чувствительность, квантовая эффективность, темновой ток, эквивалентная мощность шума, время нарастания и спада, насыщение. Важными параметрами являются также максимально допустимое обратное напряжение, рабочий диапазон температур, наработка на отказ.

Токовая чувствительность (монохроматическая) S_{ph} (А/Вт) определяется как $S_{ph} = I_{ph} / P(\lambda)$, где I_{ph} - фототок, а $P(\lambda)$ - полная оптическая мощность излучения на длине волны λ, падающего на фоточувствительную площадку. Токовая чувствительность характеризует фотоприемник при низких частотах модуляции.

Квантовая эффективность η (безразмерная величина) определяется как $\eta = N_e / N_{ph}$, где N_{ph} - количество фотонов, падающих за единицу времени на приемник, а N_e - количество рожденных в результате этого свободных электронов (или электронно-дырочных пар). Квантовая эффективность для p-i-n фотодиодов не может быть больше 1 (100%)

Между токовой чувствительностью и квантовой эффективностью существует простая связь $S_{ph} = \frac{e\lambda}{hc}\eta$, где е – заряд электрона (1,60$\cdot 10^{-19}$ К), λ – длина волны, h – постоянная Планка (6,63$\cdot 10^{-34}$ Дж.сек), с – скорость света (3,00$\cdot 10$ м.сек$^{-1}$). С подстановкой значений констант получаем $S_{ph} = \frac{\lambda}{1{,}24}\eta$. Типичное значение токовой чувствительности для p-i-n фотодиодов в их рабочих диапазонах составляет 0,5-0,8 А/Вт.

Характеристики η и S_{ph} используют при создании приемных модулей ПРОМ, когда требуется согласовать фотодиод с предусилителем.

Темновой ток $I_d(A)$ протекает при обратном смещении через нагрузку в отсутствии падающего на фотодиод излучения. Его величина зависит от материала полупроводника, температуры окружающей среды и конструкции фотоприемника. Этот ток добавляется к току полезного сигнала, когда на фотодиод поступает свет.

Для описания шумовых характеристик приемника используются еще два шумовых тока: дробовой ток I_{sn} - для p-i-n фотодиода $I_{sn} = (2eI_d B)^{1/2}$, где е – заряд электрона, I_d - темновой ток, В – полоса пропускания (частота модуляции); и тепловой Джонсоновский ток $I_{jn} = (4KTB)^{1/2}$, где К – постоянная Больцмана (1,38$\cdot 10^{-23}$ ДжK^{-1}), Т – абсолютная температура (*К*), В – полоса пропускания, R – сопротивление (Ом). Полный шумовой ток I_n определяется, как среднее квадратичное дробового и теплового тока $I_n = (I_{sn}^2 + I_{jn}^2)^{1/2}$.

Эквивалентная мощность шума P_n(Вт) – одна из наиболее важных характеристик, учитывающих шумовые свойства фотоприемников. Она определяет минимальную мощность оптического сигнала на входе фотоприемника, при которой отношение сигнал/шум равно единице, и вычисляется по формуле $P_n = I_n / S_{ph}$, где I_n - полный шумовой ток. По определению, эквивалентная мощность шума пропорциональна квадратному корню из полосы пропускания. P_n можно пронормировать, поделив на $\sqrt{B}$. Такая нормированная эквивалентная мощность шума имеет размерность Вт/Гц$^{1/2}$ и не зависит от полосы пропускания.

Время нарастания (спада) τ - это самая важная динамическая характеристика фотоприемника. Она определяется как время, необходимое выходному сигналу, чтобы возрасти от уровня 0,1 до 0,9 (упасть от 0,9 до 0,1) от установившегося максимального значения при условии, что на вход подаются прямоугольные импульсы света большой длительности. Эти времена зависят от геометрии светодиода, материала, напряженности электрического поля в слаболегированной области, температуры. С увеличением частоты модуляции входных оптических импульсов максимальное значение фототока уменьшается. Предельная частота определяется как частота модуляции, при которой токовая чувствительность составляет 0,707 от значения токовой чувствительности при низких частотах модуляции. Различные фотоприемники могут сильно отличаться по быстродействию. Наиболее быстрыми являются p-i-n фотодиоды.

Главная функция фотоприемника – это как можно более точное воспроизведение оптического сигнала, поступающего из волокна. Насколько хорошо фотоприемник справляется с этой задачей зависит от амплитуды входного сигнала и уровня шумов, то есть от отношения сигнал/шум.

Соотношение сигнал/шум и чувствительность аналоговых систем передачи. Для аналоговых систем отношение сигнал/шум измеряется количественно. Требуемая величина соотношения сигнал/шум зависит от применения – для одних систем допустимым соотношением может быть величина 50-60 дБ, для других – 30 дБ. Зная P_n и требования к отношению сигнал/шум, можно определить минимальный входной сигнал $P_{смин}$ - чувствительность аналогового ПРОМ, при котором вносимые шумы будут в пределах нормы. Если входной сигнал ниже чувствительности приемника, то соотношение сигнал шум не будет достаточным для конкретного применения. Принятой единицей измерения чувствительности является дБм.

Коэффициент ошибок и чувствительность цифровых систем. В цифровых системах передачи, когда информация передается двоичными символами, мерой качества принятого сигнала является вероятность некорректной передачи 0 или 1, которая измеряется частостью или коэффициентом ошибок. Она определяется как отношение неправильно принятых символов к их полному числу. Коэффициент ошибок очень резко зависит от мощности входного сигнала, рис.1.18. В определенном диапазоне уменьшение

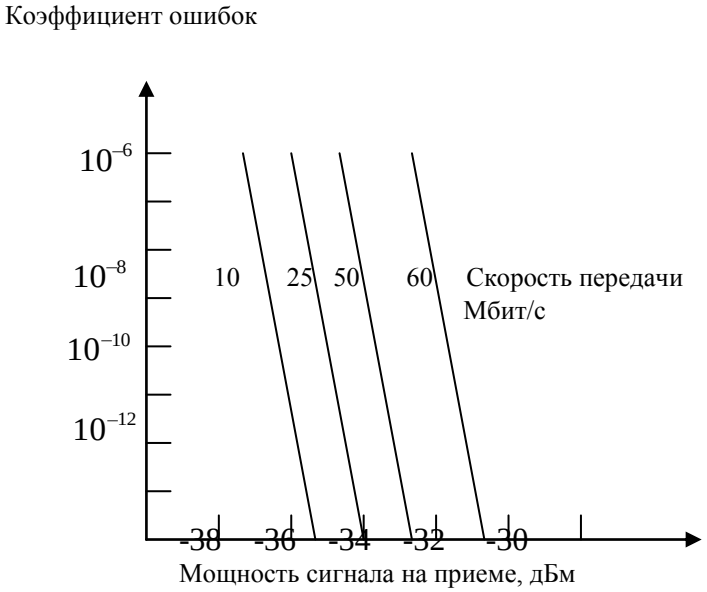


Рис. 1.18. Коэффициент ошибок как функция мощности

на 0,5 дБ амплитуды входного сигнала приводит к увеличению коэффициента ошибок на порядок. В цифровых телекоммуникационных системах частота появления ошибок должна быть не больше 10^{-9}. В вычислительных сетях требования к коэффициенту ошибок более высокие -10^{-12}.

Чувствительностью цифрового ПРОМ называется минимальная мощность входного сигнала, при которой достигается заданный для данной системы передачи коэффициент ошибок. Для нормальной работы мощность оптического сигнала на входе должна быть не меньше чувствительности ПРОМ. Чувствительность цифровых приемников также измеряют в дБм.

Насыщение ПРОМ. Электронные усилители приемника имеют линейную зависимость амплитуды выходного электрического сигнала от входной оптической мощности. Это справедливо до тех пор, пока входной сигнал не превышает определенного значения, которое называется насыщением ПРОМ. В цифровых приемниках, в отличие от аналоговых, работа усилителей в нелинейной области не так опасна. Однако при больших входных сигналах нулевые символы,

следующие непосредственно за единицей, из-за «хвостов» фототока, вызванных нелинейностью, могут неправильно определяться, что приведет к увеличению коэффициента ошибок. Насыщением цифрового ПРОМ называется максимальная входная мощность, при которой, коэффициент ошибок начинает превышать заданную величину. Диапазон значений мощности от чувствительности до насыщения называется динамическим диапазоном ПРОМ.

Максимально допустимое обратное напряжение U_r - это напряжение, превышение которого может привести к пробою фотоприемника и его разрушению.

1.5. Волоконно-оптические усилители и волновое мультиплексирование

1.5.1. Оптические усилители

Оптические усилители обеспечивают внутреннее усиление оптического сигнала без его преобразования в электрическую форму. Они аналогично лазерам используют принцип индуцированного излучения. Известно пять типов оптичесикх усилителей (Табл. 1.1).

1. Усилители Фабри-Перо. Эти усилители оснащаются плоским резонатором с зеркальными полупрозрачными стенками, они обеспечивают высокий коэффициент усиления (до 25 дБ) в очень узком (1 ГГц), но широко перестраиваемом (800 ГГц) спектральном диапазоне. Кроме этого, эти устройства не чувствительны к поляризации сигнала и характеризуются сильным подавлением боковых составляющих (ослабление на 20 дБ за пределами интервала в 5 ГГц). В силу своих характеристик, усилители Фабри-Перо идеально подходят для работы в качестве демультиплексоров, поскольку они могут всегда быть перестроены для усиления только одной определенной длины волны одного канала из входного многоканального WDM сигнала.

Табл. 1.1

№	Типы усилителей	Область применения
1	Усилитель с полостью Фабри-Перо	Усиление одного канала (одной длины волны)
2	Усилители на волокне, использующие бриллюэновское рассеяние	Усиление одного канала
3	Усилители на волокне, использующие рамановское рассеяние	Усиление нескольких каналов одновременно
4	Полупроводниковые лазерные усилители	Усиление большого числа каналов в широкой области длин волн одновременно
5	Усилители на примесном волокне	Усиление большого числа каналов в широкой области длин волн одновременно

2. Усилители на волокне, использующие бриллюэновское рассеяние. Стимулированное бриллюэновское рассеяние – это нелинейный эффект, возникающий в кремниевом волокне, когда энергия от оптической волны на частоте f_1 переходит в энергию новой волны на смещенной частоте f_2. Если мощная накачка производится на частоте f_1, стимулированное бриллюэновское рассеяние способно усиливать слабый входной сигнал на частоте f_2. Выходной

сигнал сосредоточен при этом в узком диапазоне, что позволяет выбирать канал с погрешностью 1,5 ГГц.

3. Усилители на волокне, использующие рамановское рассеяние. Стимулированное рамановское рассеяние – также нелинейный эффект, который подобно бриллюэновскому рассеянию может использоваться для преобразования части энергии из мощной волны накачки в слабую сигнальную волну. Однако, при рамановском рассеянии частотный сдвиг между сигнальной волной и волной накачки $|f_2 - f_1|$ больше, выходной спектральный диапазон усиления шире, что допускает усиление сразу нескольких каналов в WDM сигнале. Большие переходные помехи между усиливаемыми каналами представляют основную проблему при разработке таких усилителей.

4. Полупроводниковые лазерные усилители (ППЛУ). Основу ППЛУ составляет активная среда, аналогичная той, которая используется в полупроводниковых лазерах. В ППЛУ отсутствуют зеркальные резонаторы, характерные для полупроводниковых лазеров. Для уменьшения френелевского отражения с обеих сторон активной среды наносится специальное покрытие толщиной λ/4 с согласованным показателем преломления (рис. 1.19).

Полупроводниковые лазерные усилители не получили столь широкого распространения, как усилители на примесном волокне. Дело в том, что ППЛУ свойственны два существенных недостатка.

Первый недостаток заключается в том, что светоизлучающий активный слой имеет поперечный размер несколько микрон, а толщину в пределах одного микрона, что много меньше, чем диаметр светонесущей части оптического волокна (около 9 мкм для одномодового волокна). Вследствие этого большая часть светового потока из входящего волокна не попадает в активную область и теряется, что уменьшает КПД усилителя. Увеличить КПД можно, поставив между входящим волокном и активной средой линзу, но это приводит к усложнению конструкции

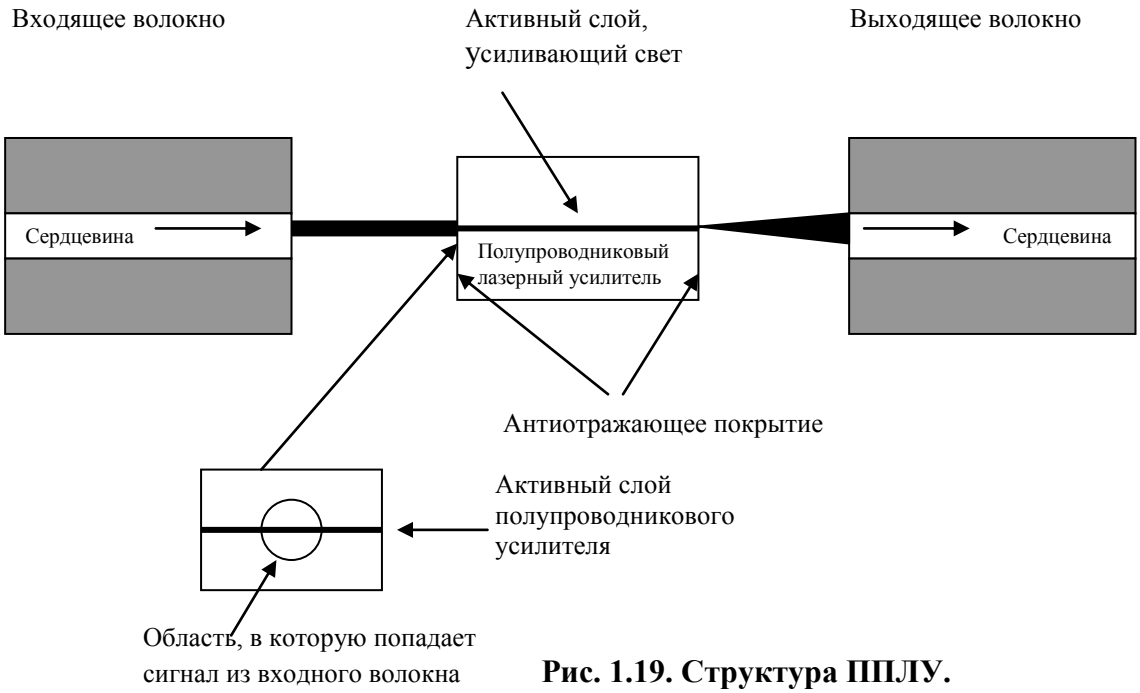


Рис. 1.19. Структура ППЛУ.

Второй недостаток имеет более тонкую природу. Дело в том, что выход (коэффициент усиления) ППЛУ зависит от направления поляризации и может отличаться на 4-8 дБ для двух ортогональных поляризаций. Это нежелательно, так как в стандартном одномодовом волокне поляризация распространяемого светового сигнала не контролируется. Мощность светового потока данной поляризации может флуктуировать вдоль длины. Отсюда вытекает, что коэффициент усиления ППЛУ зависит от неконтролируемого фактора. Можно уменьшить эту зависимость от поляризации путем установки двух лазеров – возможно как параллельное (требуется пара разветвителей), так и последовательное их подключение. Но это снова приводит к усложнению конструкции и росту стоимости.

Оба приведенных недостатка нивелируются в тех случаях, когда ППЛУ интегрирорван с другими оптическими устройствами. И именно так преимущественно используются ППЛУ. Одна из возможностей – производство совмещенного светоизлучающего лазерного диода, непосредственно на выходе которого устанавливается ППЛУ.

5. Усилители на примесном волокне. Этот тип оптического усилителя наиболее широко распространен, поскольку он позволяет усиливать сигнал в широком спектральном диапазоне.

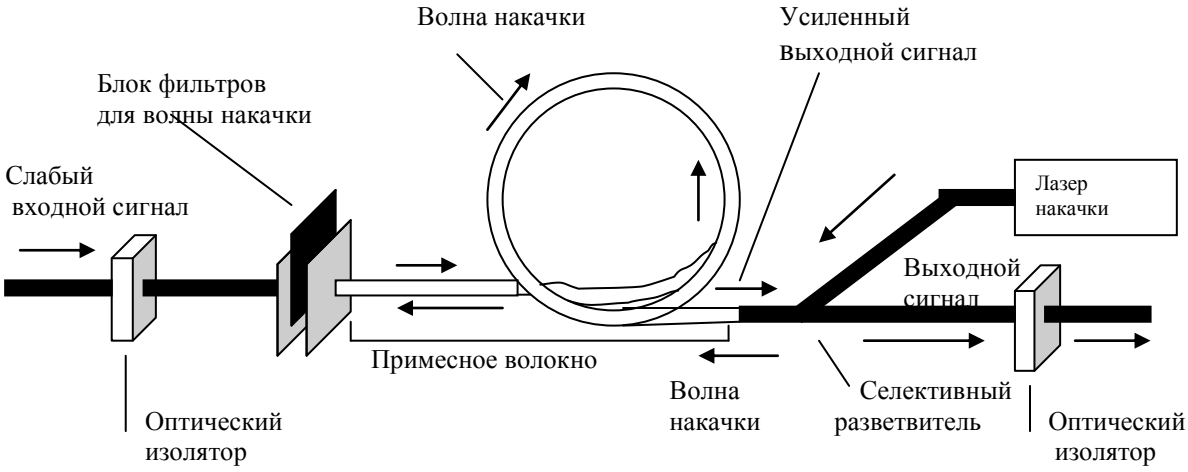


Рис. 1.20. Схема усилителя на примесном волокне.

На рис. 1.20 приведена схема усилителя на примесном волокне. Слабый входной оптический сигнал проходит через входной оптический изолятор, который прпускает свет в прямом направлении – слева направо, но не пропускает рассеянный свет в обратном направлении. Далее входной сигнал проходит через блок оптических фильтров, которые блокируют световой поток на длине волны накачки, но прозрачны к длине волны сигнала. Затем сигнал попадает в катушку с волокном, легированным примесью из редкоземельных элементов. Длина такого участка волокна составляет несколько метров. Этот участок волокна подвергается сильному непрерывному излучению полупроводникового лазера, установленного с противоположной стороны, с более короткой по сравнению с сигналом длиной волны накачки. Свет от лазера накачки (волна накачки) возбуждает атомы примесей. Возбужденные состояния имеют достаточно большое время релаксации, чтобы спонтанно перейти в основное состояние. Однако при наличии слабого сигнала происходит индуцированный переход атомов примесей из возбужденного состояния в основное с излучением света на той же длине волны и с той же самой фазой, что и повлекший это сигнал. Селективный разветвитель перенаправляет усиленный полезный сигнал в выходное волокно. Дополнительный оптический изолятор на выходе предотвращает попадание

обратного рассеянного сигнала из выходной части схемы в активную область оптического усилителя.

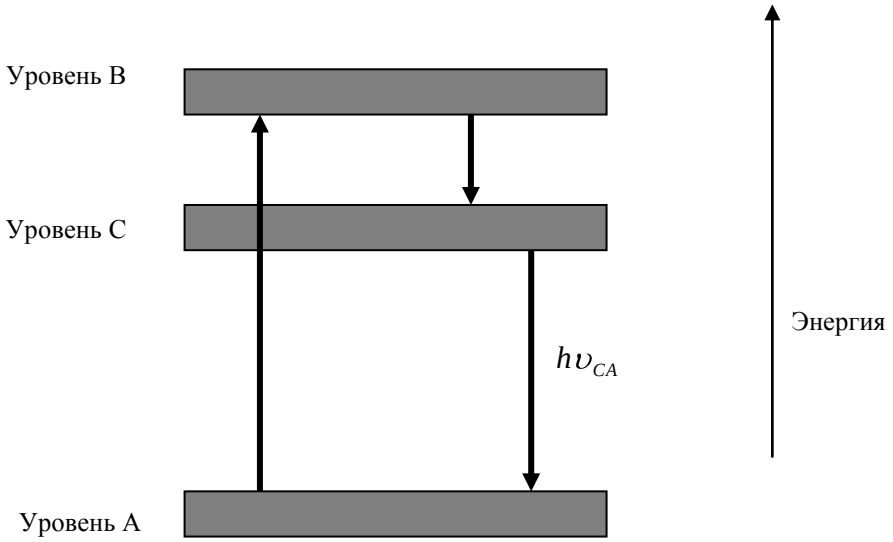


Рис. 1.21. Трехуровневая атомная система оптического усилителя.

Активной средой усилителя является одномодовое волокно, сердцевина которого легируется примесями редкоземельных элементов с целью создания трехуровневой атомной системы (рис. 8.3). Лазер накачки возбуждает электронную подсистему примесных атомов. В результате этого электроны с основного состояния (уровень А) переходят в возбужденное состояние (уровень В). Далее происходит релаксация электронов с уровня В на промежуточный уровень С. Когда заселенность уровня С становится достаточно высокой, так что образуется инверсная заселенность уровней А и С, то такая система способна индуцированно усиливать входной оптический сигнал в определенном диапазоне длин волн. Если же входной сигнал не нулевой, то происходит спонтанное излучение возбужденных атомов, приводящее к шуму.

Особенности работы усилителя во многом зависят от типа примесей и от диапазона длин волн, в пределах которого он должен усиливать сигнал. Наиболее широко распространены усилители, в которых используется кремниевое волокно, легированное эрбием. Такие усилители получили название EDFA. Межатомное взаимодействие является причиной очень важного положительного фактора – уширения уровней, что, в конечном итоге, обеспечивает усилителю широкую зону усиления сигнала.

В EDFA наиболее широкая зона усиления от 1530 до 1560 нм, соответствующая переходу $h\upsilon_{CA}$, достигается при оптимальной длине волны лазера накачки 980 нм.

Усиление в другом окне прозрачности 1300 нм можно реализовать с использованием примесей празеодимия, однако такие оптические усилители не получили большого распространения по той причине, что большее увеличение длины переприемного участка можно достичь переходом на длину волны 1550 нм.

Коэффициент усиления сигнала зависит от его входной амплитуды и длины волны. При малых входных сигналах амплитуда выходного сигнала растет линейно с увеличением входного сигнала, т. е. имеет место линейность

амплитудной характеристики усилителя, а коэффициент усиления достигает при этом своего максимального значения. Например, если входной сигнал имеет среднюю мощность 1 мкВт (- 30 дБм), то выходной сигнал может иметь величину 1 мВт (0 дБм), что соответствует усилению в 30 дБ. Но при большом входном сигнале сигнал на выходе достигает насыщения, что приводит к падению коэффициента усиления. Например, на той же длине волны поступление входного сигнала в 1 мВт приведет к генерации выходного сигнала в 20 мВт в режиме насыщения, т. е. амплитудная характеристика мощности перестает быть линейной, а коэффициент усиления падает, его величина составит всего 13 дБ.

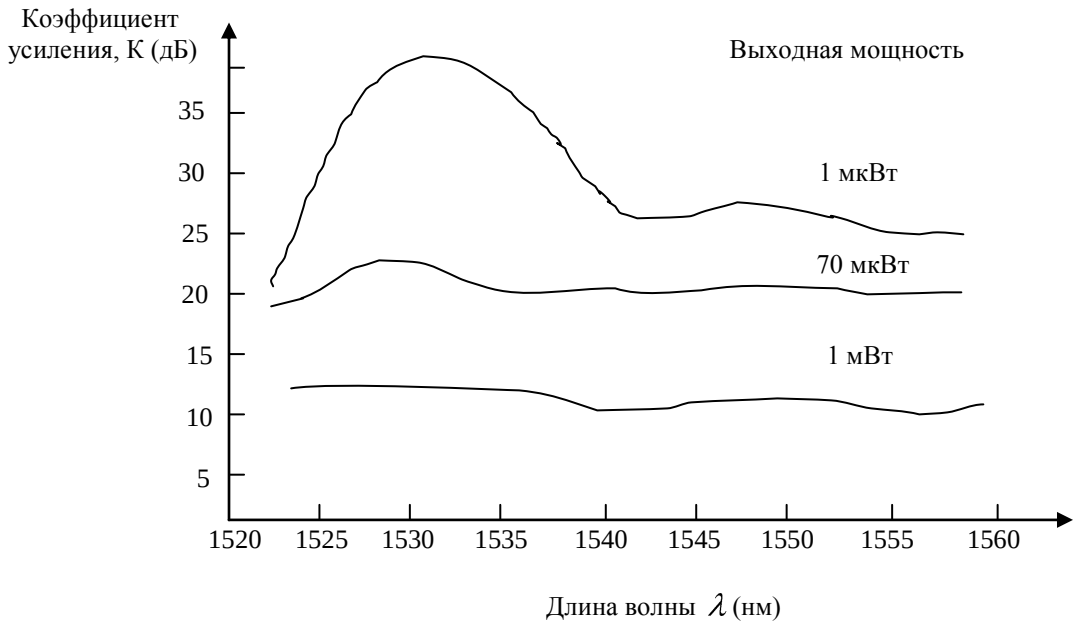


Рис. 1.22. Зависимость коэффициента усиления EDFA от длины волны.

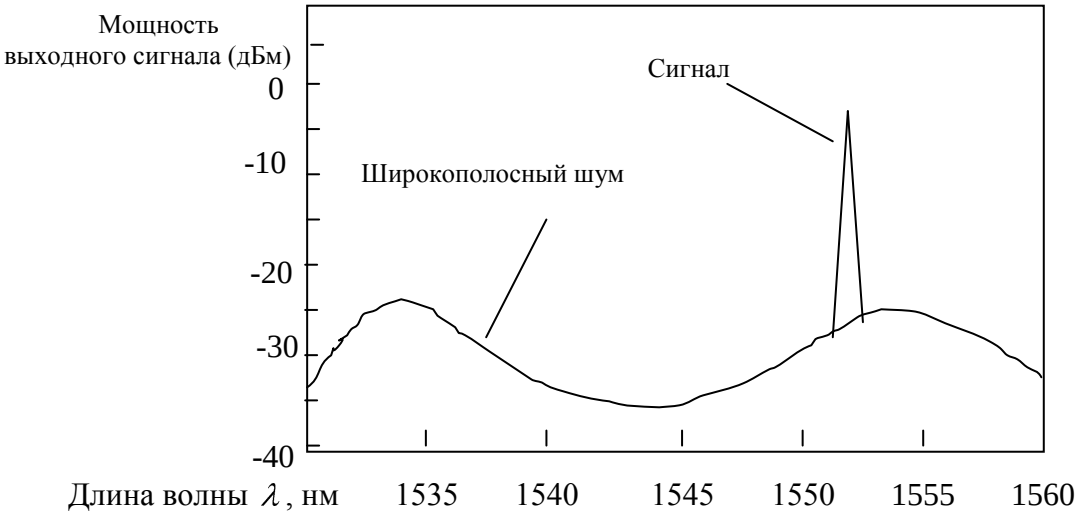


Рис.1.23. Зависимость собственного шума от длины волны.

На рис. 1.22 показано, как ведет себя коэффициент усиления К усилителя EDFA в зависимости от длины волны и при различных значениях мощности входного сигнала. Уменьшение К при $P_{вх} = 1$ мВт связано с насыщением усилителя. На кривой зависимости К от длины волны при малых значениях входной мощности заметна неравномерность этой характеристики. Отсутствие плоской части в широком диапазоне длин волн (от 1530 до 1560 нм) заставляет при использовании каскадно включенных усилителей на линии с оборудованием для плотного спектрального уплотнения DWDM устанавливать волновые корректоры с целью выравнивания амплитуд мультиплексного сигнала на разных длинах волн. Кроме того, ведутся интенсивные исследования по созданию усилителей с более плоской амплитудно-частотной (волновой) характеристикой.

Характерным для оптических усилителей является собственный широкополосный шум (рис. 1.23). Этот шум, избежать который невозможно, главным образом связан со спонтанным излучением инверсно-заселенных уровней на примесных атомах.

В настоящее время применяются две разновидности усилителей EDFA на примесном волокне: на кремниевой основе и на фтор-цирконатной основе. Усилители на кремниевой основе первыми появились на рынке благлдаря возможности усиления WDM сигнала в широком спектральном диапазоне при небольших вносимых шумах. Сегодня оба типа усилителей (кремниевые и фтор-цирконатные) способны работать во всем диапазоне выхода оптического излучения эрбия от 1530 нм до 1560 нм. Однако оптичесие усилители на кремниевой основе не имеют столь ровной зависимости коэффициента усиления от длины волны, как усилители на фтор-циркнатной основе (рис. 1.26). На рисунке представлена зависимость от длины волны выходной мощности усилителя, определенной через мощность выходного шума при отсутствии сигнала на входе.

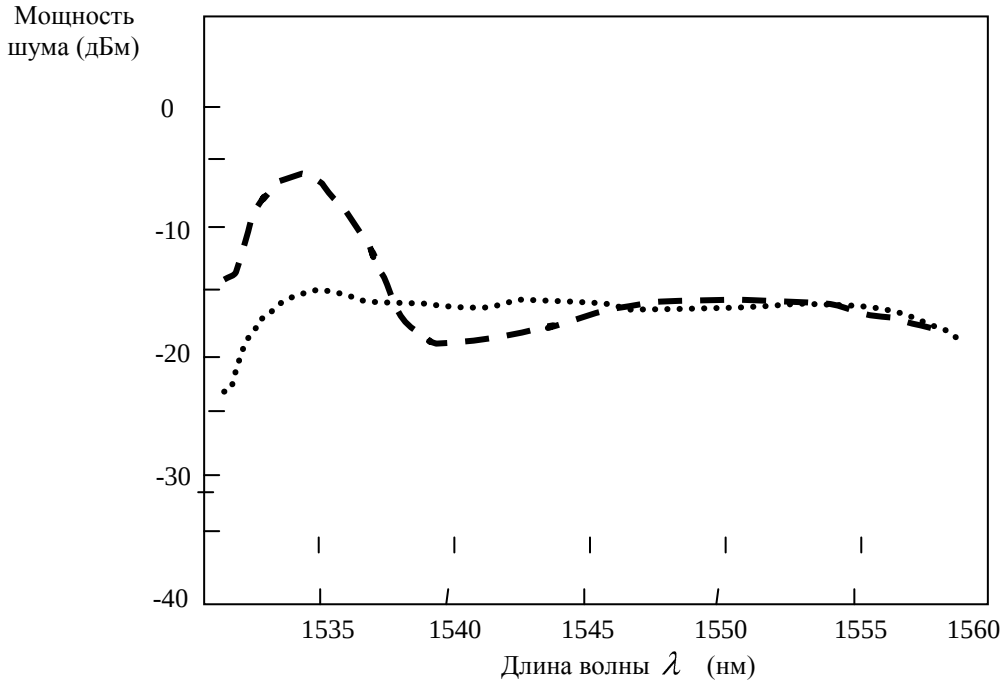


Рис. 1.26. Зависимость коэффициента усиления отдлины волны для усилителей на кремниевой и фтор-цирконатной основе.

Волоконно-оптичесие усилители, также как и обычные усилители электрического сигнала вносят определенный шум в усиливаемый сигнал, приводя к уменьшению отношения сигнал-шум и ограничивая тем самым число последовательно включенных усилителей и расстояние между двумя электронными регенераторами. Однако это не помешало дальнейшему стремительному развитию технологии и серийного производства усилителей EDFA.

Появившееся сравнительно недавно четырехволновое мультиплексирование, сегодня сменяется мультиплексными системами плотного спектрального уплотнения DWDM с числом волновых каналов более 40. Ясно, что применение одного усилителя с широким спектральным диапазоном усиления экономически значительно выгоднее использования 40 регенераторов. Платой за увеличение числа волновых каналов является уменьшение удельной мощности (мощности на канал) выходного сигнала, которая ослабевает примерно на 3 дБ при удвоении числа каналов.

Усилители на кремниевой основе. Усиление DWDM сигнала в традиционных усилителях на кремниевом волокне связано с одной технологической проблемой – неравномерностью коэффициента усиления как функции длины волны. На рис. 1.27а показана кривая выходной мощности при усилении многоканального

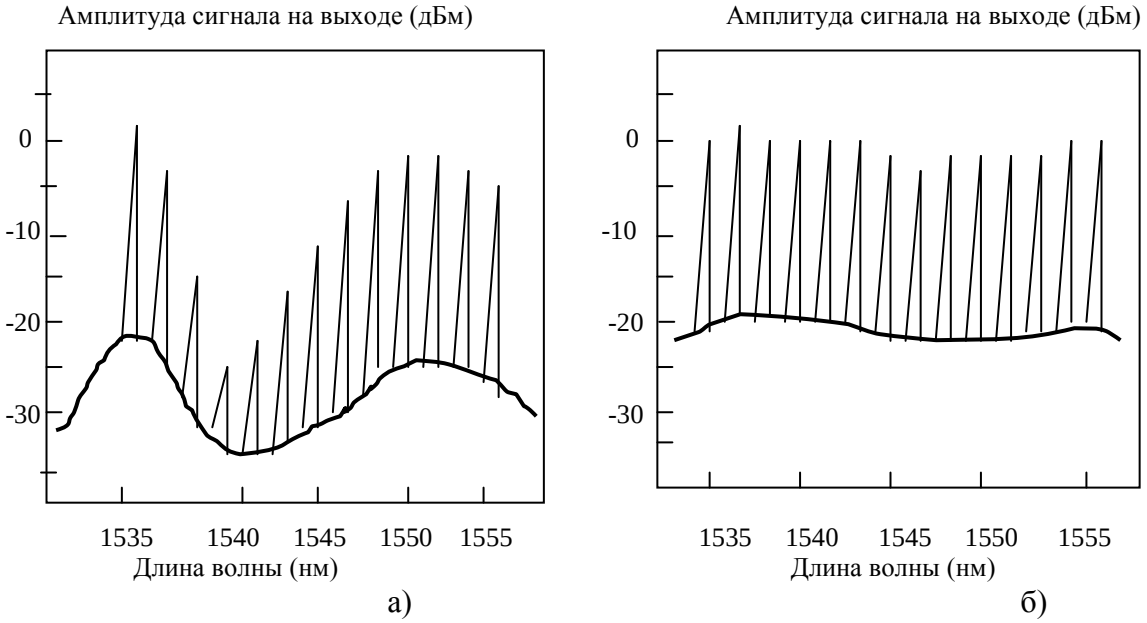


Рис. 1.27. Зависимость выходной мощности от длины волны.

мультиплексного сигнала со скоростью на канал, соответствующей STM-16 (2,5 Гбит/с). Как видно, на некоторых каналах сохраняется довольно высокое отношение сигнал/шум, в то время как на других, особенно в районе 1540 нм, значение отношения сигнал/шум низкое. В результате может оказаться, что DWDM сигнал, проходящий через усилитель на одних каналах (например, выше 1545 нм) будет иметь приемлемое отношение сигнал/шум, а на других (район 1540 нм) не удовлетворительное соотношение сигнал/шум.

В результате того, что технология усилителей EDFA на кремниевой основе появилась раньше, большее арспространение на сегодняшний день имеют именно эти усилители. Некоторые потребители (операторы связи) решают проблему завала кривой волнового усиления простым исключением области низкого усиления от 1530 до 1542 нм, используя более узкое окно. Но это может повлечь при большом числе волновых каналов к очень высокой плотности каналов, что нежелательно, так как с ростом плотности сильнее сказываются нелинейные эффекты, такие как, например, четырех волновое смешивание.

Другой способ решения проблемы завала волновой характеристики состоит в предварительном селективном ослаблении входного сигнала с целью получения более ровного распрделения амплитуд выходных сигналов и более согласованных значений отношения сигнал/шум на разных каналах. При выполнении селективного ослабления приходится принимать во внимание то, что энергия на других каналах также перераспределяется. В результате этого оптимизация системы становится сложной итерационной процедурой.

Усилители на фтор-цирконатной основе. Эти усилители имеют более равномерную волновую характеристику усиления. Дело в том, что фторосодержащее волокно способно поглолтить больше эрбия, что и приводит к улучшению профиля в области 1530-1642 нм, которая теперь может быть

использована для усиления DWDM сигнала. Рис. 1.27 б показывает, насколько более эффективно усиливается DWDM сигнал. Мультиплексированные каналы практически во всей полосе имеют близкие значения сигнал/шум. Это значительно упрощает процедуру оптического балансирования при передаче сигналов, когда каналы добавляются или удаляются.

Фтор-цирконатный усилитель EDFA имеет один недостаток – у него выше, чем у кремниевого, уровень шума, что является следствием большей рабочей длины волны лазера накачки 1480 нм. Дело в том, что длина волны накачки 980 нм, характерная для кремниевого EDFA, не эффективна для работы флюоридного усилителя EDFA, поскольку на этой длине волны велико сечение поглощения, сопровождающееся возбуждением других состояний. Указанный недостаток проявляется при строительстве сверхпротяженных безрегенерационных сегментов с каскадом оптических усилителей, ограничивая расстояние между усилителями. Существуют технологические пути решения этой проблемы, и производители оборудования собираются поставлять следующее поколение фтор-цирконатных усилителей EDFA, имеющих равномерную волновую характеристику усиления, низкий уровень шумов и более высокую надежность.

1.5.2. Применение оптических усилителей EDFA

Традиционные цифровые волоконно-оптические системы передачи используют оптические регенераторы, восстанавливающие оптический сигнал по амплитуде, форме и временному положению оптических импульсов (рис 1.28 а). Когда длина участка волоконно-оптического кабеля между двумя удаленными мультиплексорами превосходит предельное значение, обеспечивающее требуемый коэффициент ошибок, в промежуточных точках устанавливают дополнительные регенераторы. Они принимают слабый оптический сигнал, усиливают его и в процессе оптоэлектронного преобразования переводят в

электрическую форму. Затем в электронной форме осуществляется восстановление скважности, фронтов и временных положений следования электрических импульсов, которые после преобразования в оптическую форму передаются дальше в том виде и с такой же амплитудой, с какой они были на выходе предыдущего регенератора.

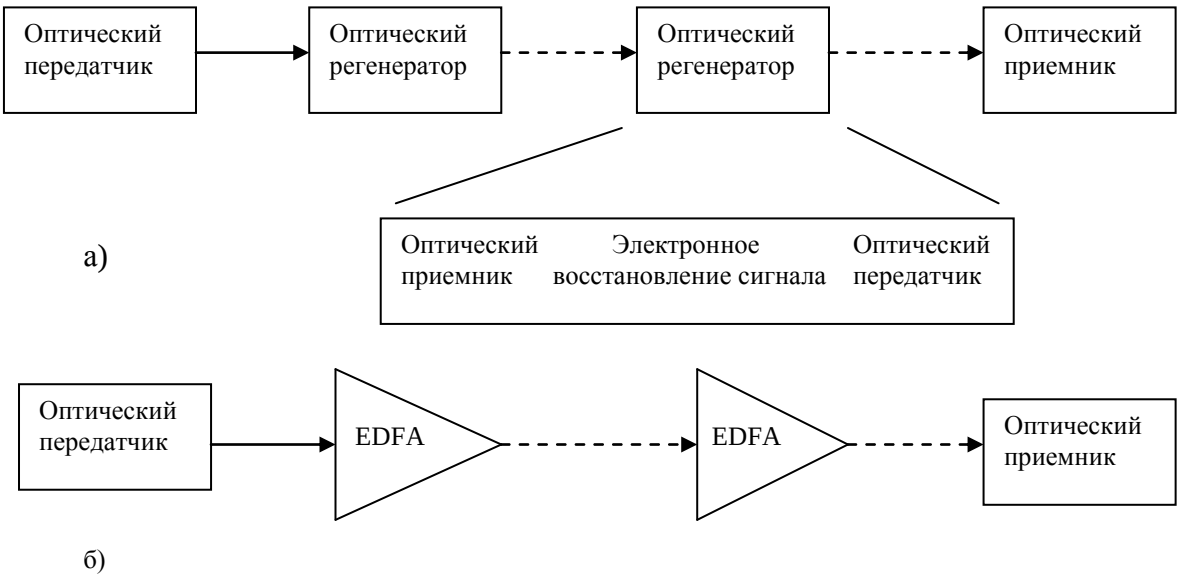


Рис.1.28. Применение оптических регенераторов и усилителей.

Такие системы передачи с регенерацией сигнала работают надежно и обеспечивают малый коэффициент ошибок. Однако, в некоторых случаях, когда по условиям прокладки трассы не удавалось реализовать длину участка, обеспечивающую требуемый коэффициент ошибок, на этих участках устанавливали совмещенные с регенераторами оптические усилители, которые за счет дополнительного усиления оптического сигнала поднимали его уровень до необходимой величины.

С внедрением волнового уплотнения и, в частности, плотного спектрального уплотнения DWDM большую актуальность приобретают усилители EDFA.

На основе EDFA потери мощности в линии преодолеваются с помощью оптического усиления (рис. 1.28 б). В отличие от регенераторов такое усиление не привязано к битовой скорости сигнала, что позволяет передавать информацию на более высоких скоростях и наращивать пропускную способность до тех пор, пока не вступают в силу такие ограничивающие факторы, как хроматическая дисперсия и поляризационная модовая дисперсия.

Усилители EDFA в силу своей широкополосности способны усиливать многоканальный DWDM сигнал, что является их основным преимуществом, так как в этом случае вместо большого числа регенераторов (по одному для каждого волнового канала) можно использовать один усилитель.

В отличие от регенераторов, оптические усилители вносят дополнительный шум, который необходимо учитывать. Поэтому, наряду с коэффициентом усиления, одним из важных параметров EDFA является коэффициент шума.

Технические параметры усилителей EDFA. Основными параметрами, характеризующими EDFA, являются: мощность насыщения, коэффициент усиления, мощность усиленного спонтанного излучения и шум-фактор.

Мощность насыщения $P_{выхнас}$ - определяет максимальную выходную мощность усилителя. Чем больше эта величина, тем больше растояние участка между ретрансляторами можно реализовать. Этот параметр варьируется в зависимости от модели оптического усилителя. У мощных EDFA он может превосходить 36 дБм (4 Вт).

Коэффициент усиления G определяется из соотношения

$$G = P_{свых} / P_{свх}, \qquad (1.7)$$

где $P_{свх}$ и $P_{свых}$ - мощности (полезных) сигналов на входе и выходе усилителя, а логарифмический эквивалент определяется по формуле $g = 10\lg G$ (дБ). Величина коэффициента усиления зависит от входной мощности и стремится к своему максимальному значению по мере уменьшния мощности входного сигнала. Например, для усилителей EAU-200/350, выпускаемых IRE POLUSE-GROUP, предельное значение коэффициента усиления составляет 42 дБ.

Мощность усиленного спонтанного усиления ASE (amplified spontaneous emission). В отсутствии входного сигнала EDFA является источником спонтанного излучения фотонов. Спектр излучения зависит от формы энергетической зоны атомов эрбия и от статистического распределения заселенностей уровней зоны. Спонтанно образованные фотоны, распространяясь по волокну в активной зоне усилителя EDFA, тиражируются, в результате чего создаются вторичные фотоны на той же длине волны, с той же фазой, поляризацией и направлением распространения. Результирующий спектр спонтанных фотонов называется усиленным спонтанным излучением (рис. 1.29). Его мощность нормируется в расчете на 1 Гц и имеет размерность Вт/Гц. Если на вход усилителя подается сигнал, то определенная доля энергетических переходов, ранее работавшая на усиленное спонтанное излучение, начинает происходить под действием оптического сигнала, усиливая входной сигнал. Таким образом, происходит не только усиление полезного входного сигнала, но и ослабление ASE (рис. 1.29). При подаче на вход мультиплексного сигнала происходит дальнейший отток мощности от ASE в пользу усиливаемых мультиплексных каналов. Обычно усилители работают в режиме насыщения по отношению к сигналу на выходе.

Это создает естественное выравнивание уровней сигналов в каналах, что крайне желательно, особенно для протяженных линий с большим числом последовательных усилителей. Если лазер, предшествующий усилителю,

генерирует излучение в спектральном окне $\Delta\nu$ ($\Delta\nu = \frac{c}{\lambda^2}\Delta\lambda$, где с – скорость света), и фильтр в приемном оптоэлектронном модуле пропускает сигнал соответственно в этом же окне, то вклад в мощность шума на выходе бдагодаря усиленному спонтанному излучению будет равен $ASE_{\Delta\nu} = ASE \cdot \Delta\nu$. Таким образом, оптические линии с каскадом EDFA проявляют себя лучше, когда мультиплексный сигнал представлен более узкими в спектральном отношении отдельными каналами. Использование непосредственно перед приемным оптоэлектронным модулем узкополосных фильтров, настроенных на рвбочую длину волны, также помогает уменьшить уровень шума от усиленного спонтанного излучения.

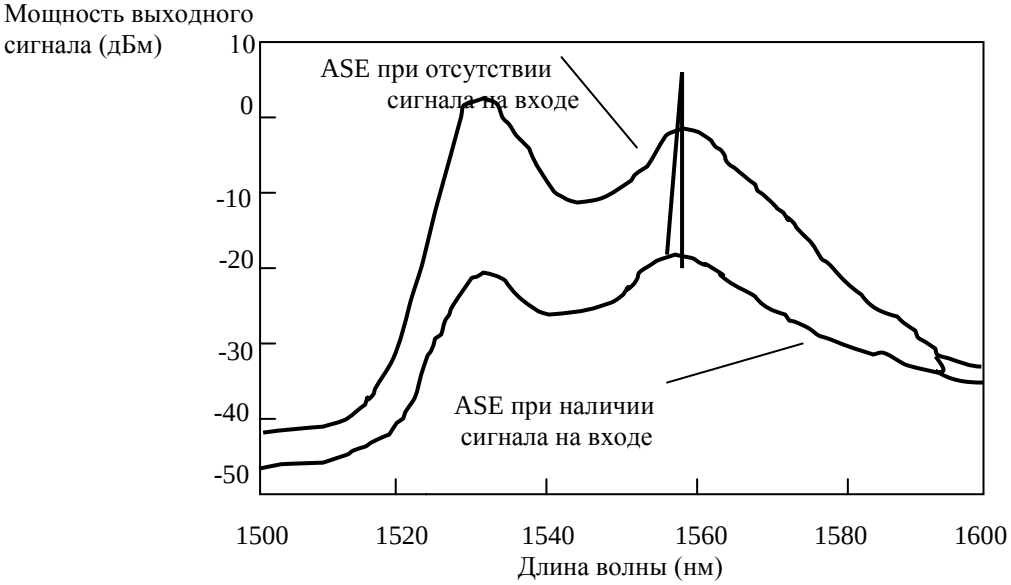


Рис. 1.29. Усиленное спонтанное излучение

Большие собственные постоянные времени EDFA – постоянная времени перехода в метастабильное состояние –1 мкс, время жизни метастабильного состояния –10мкс – устраняют кросс-модуляцию ASE в усилителе и делают более стабильной работу каскада оптических усилителей. Мощность усиленного спонтанного излучения связана с коэффициентом усиления формулой

$$ASE = h\nu \frac{n_{сп}}{\eta}(G-1), \qquad (1.8)$$

где h – постоянная Планка, равная $6{,}6252\times10^{-34}$ Вт$\cdot c^2$, ν - частота (Гц), соответствующая длине волны λ из диапазона 1530-1560 нм ($\nu = c/\lambda$, с – скорость света, равная $2{,}9979\times10^8$ м/с), $n_{сп}$ - коэффициент спонтанной эмиссии, η - квантовая эффективность. В идеальном случае $n_{сп} = \eta = 1$ при G>>1, отнесенная ко входу мощность усиленного спонтанного излучения идеального квантового усилителя $ASE_{ид}/G$ просто равна $h\nu$, что при $\lambda = 1550$ нм составляет $1{,}28\times10^{-19}$ Вт/Гц в расчете на спектральную полосу 1 Гц.

Размеру окна анализатора в 0,8 нм соответствует спектральное окно в 100 ГГц, что определяет приведенную ко входу величину эффективной мощности усиленного спонтанного излучения $1{,}28\times10^{-8}$ Вт или – 48,9 дБм.

Шум-фактор NF определяется как отношение сигнал/шум на входе, отнесенное к отношению сигнал/шум на выходе

$$NF = \frac{P_{свх}}{P_{швх}} / \frac{P_{свых}}{P_{швых}} \qquad (1.9)$$

Важно отметить, что мощность шума на входе является квантово-ограниченной минимальной величиной и определяется нулевыми флуктуациями вакуума $P_{швх} = h\nu \cdot \Delta\nu$. Мощность шума на выходе состоит из суммы мощности усиленного спонтанного излучения $ASE_{\Delta\nu}$ и мощности шума нулевых флуктуаций вакуума, которые проходят через усилитель без изменения: $P_{швых} = ASE_{\Delta\nu} + h\nu \cdot \Delta\nu$. Если учесть, что $P_{швых} / P_{швх} = G$, то шум-фактор можно выразить через коэффициент усиления и мощность усиленного спонтанного излучения:

$$NF = \frac{1}{G}\left(1 + \frac{ASE}{h\nu}\right). \qquad (1.10)$$

Часто при описании EDFA значение шум-фактора указывается в дБ: nf = 10lgNF. Минимальный шум-фактор равен 1 (0 дБ) и достигается при $n_{сп} / \eta = 1$ или при G = 1. Это означает, что усилитель вносит минимальный шум, равный шуму идеального оптического усилителя. На практике nf необходимо увеличить сразу на 3 дБ (10lg2), так как существует два направления поляризации (две моды), в связи с чем $n_{сп} = 2$, а типичные значения составляют 5,5 дБ.

При использовании каскадно-включенных усилителей полный шум-фактор на выходе каскада возрастает. Найдем полный шум-фактор NF двух усилителей, характеризующихся соответственно усилением G_1 и G_2 и шум-факторами NF_1 и NF_2. Шум на выходе после двух каскадов записывается в виде

$$P_{швых} = h\nu\Delta\nu \left[NF_1 G_1 G_2 + (NF_2 - 1) G_2\right], \qquad (1.11)$$

где учтен квантовый шум вакуума, который возникает только на выходе цепочки усилителей, а сигнал на выходе

$$P_{свых} = G_1 G_2 P_{свх}, \qquad (1.12)$$

откуда полный шум-фактор равен

$$NF = NF_1 + (NF_2 - 1) G. \qquad (1.13)$$

Лучший способ получения устройства с низкошумящими характеристиками, как и в случае радиочастотных усилителей, состоит в использовании низкошумящего усилителя с большим усилением в первом каскаде и шумящего усилителя высокой мощности во втором каскаде. Первый каскад определяет шумовую характеристику многокаскадного усилителя.

Классификация усилителей EDFA по способам применения.

В зависимости от применения различают предварительные усилители, линейные усилители и усилители мощности (рис. 1.30).

Предварительные усилители (предусилители) устанавливаются непосредственно перед приемным оптоэлектронным модулем и способствуют увеличению отношения сигнал/шум на его выходе. Это позволяет получить

требуемый коэффициент ошибок регенератора на участках с длиной, превышающей предельную.

Линейные усилители устанавливаются в промежуточных точках протяженных магистралей с волновым спектральным уплотнением между регенераторами. В этом случае нет необходимисти демультиплексировать групповой DWDM сигнал на отдельные волновые каналы для их регенерации и снова их мультиплексировать после регенерации. Таким образом, один линейный усилитель заменяет DWDM мультиплексор/демультиплексор и столько регенераторов, сколько волновых каналов содержится в групповом DWDM сигнале.

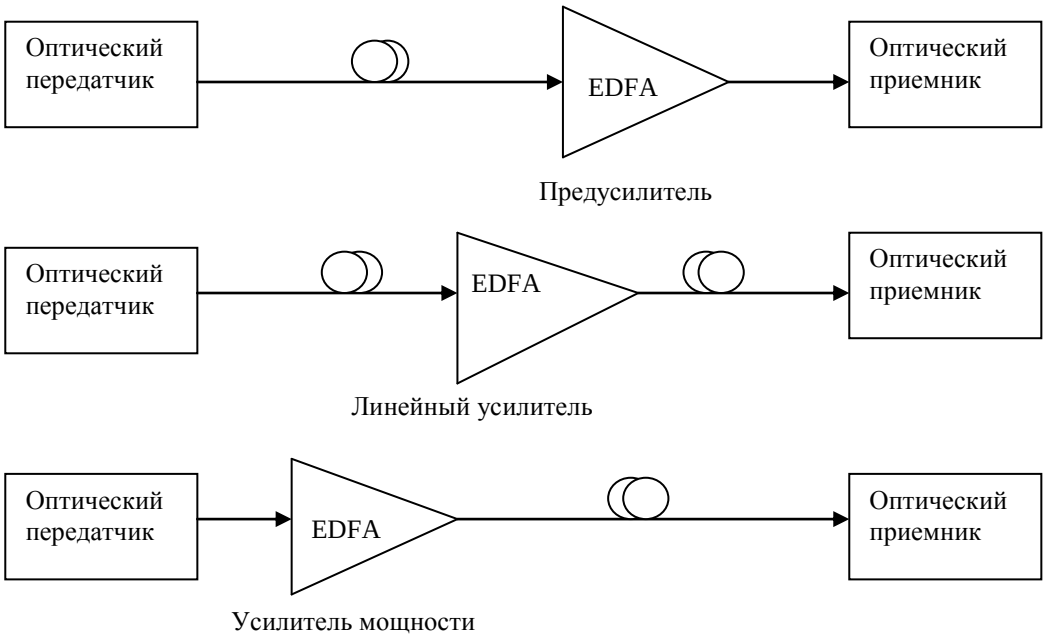


Рис. 1.30. Типы усилителей EDFA

Поскольку распространение оптического сигнала вдоль цепочки линейных усилителей приводит к накоплению шума, вносимого каждым усилителем, это ограничивает число последовательно включенных в регенерационную секцию усилителей и уменьшает максимально допустимое расстояние между ними.

Усилители мощности (бустеры) устанавливаются непосредственно после лазерных передатчиков (передающих оптических модулей) и предназначены для дополнительного усиления сигнала до уровня, который не может быть достигнут на основе лазерного диода.

Расчет числа каскадов линейных усилителей EDFA

На рис 8.11 показана типовая диаграмма мощности сигнала в процессе распространения по цепочке усилителей, а также процесс накопления шума в линии из каскада усилителей EDFA. Каждый усилитель осуществляет усиление сигнала с коэффициентом усиления $g(\lambda)$ (дБ) и вносит определенный уровень шума $N_0(\lambda)$ (Вт). Далее будем пренебрегать мощностью шума нулевых флуктуаций.

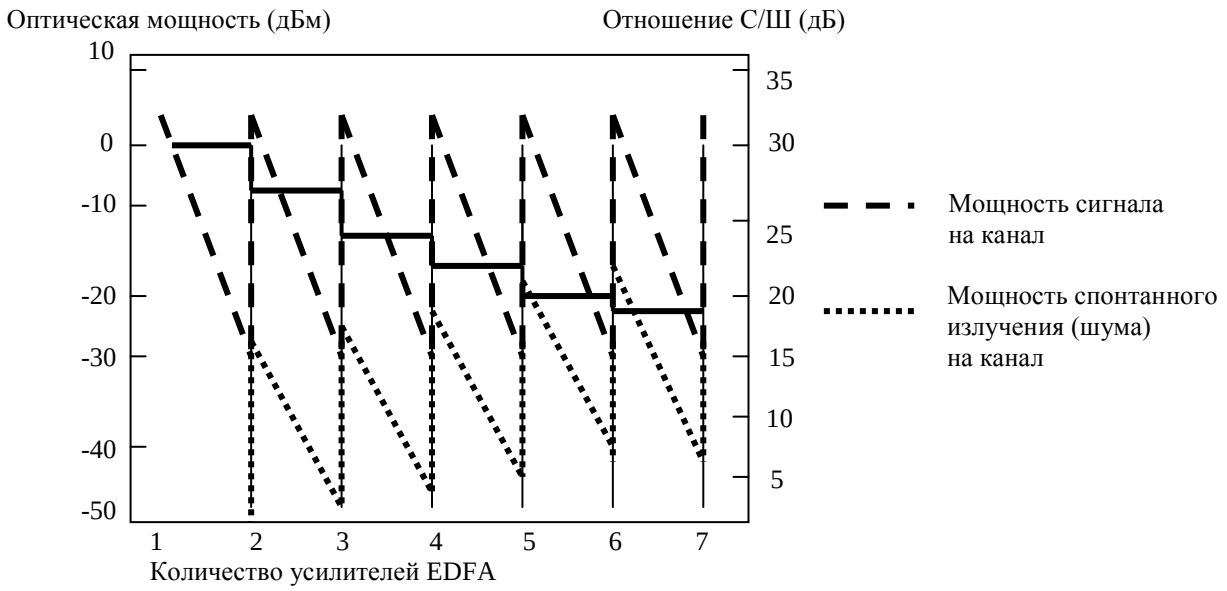


Рис. 1.31. Диаграмма мощности сигнала по цепочке усилителей

Обозначим удельное затухание в волокне α (дБ/км), тогда полное затухание на длине L участка между двумя усилителями составит αL. Рассмотрим основные соотношения, описывающие затухание в линии и усиление на EDFA для полезного сигнала и шума:

$$\alpha L = 10\lg(P_{выхi-1} / P_{вхi}), \quad (1.14) \qquad g = 10\lg(P_{выхi} / P_{вхi}), \quad (1.15)$$

$$\alpha L = 10\lg(N_{выхi-1} / N_{вхi}), \quad (1.16) \qquad g = 10\lg\left(\frac{N_{выхi} - N_0}{N_{вхi}}\right), \quad (1.17)$$

где $P_{вхi}, P_{выхi}, N_{вхi}, N_{выхi}$ обозначают, соответственно, мощности входного и выходного сигнала, а также входного и выходного шума по отношению к усилителю i. Оптические усилители имеют определенныую мощность насыщения выходного сигнала $P_{выхнас.}$ Эффективная работа усилителя достигается при таком входном сигнале, когда выходной сигнал сравним с мощностью насыщения (обычно немного превосходит мощность насыщения) – при меньшем уровне входного сигнала возрастает удельный вес постоянной составляющей вносимого шума, а при большем уровне входного сигнала (следовательно, и входного шума) происходит усиление только шума. Таким образом, в идеально сбалансированной линии из каскада усилителей $P_{выхi-1} = P_{выхi} = P_{выхнас.}$ Отсюда $\alpha L = g.$ Тогда, приравнивая соотношения (1.16) и (1.17), получаем $N_{выхi} = N_{выхi-1} + N_0.$ Пренебрегая уровнем шума $N_{вых0}$ в выходном сигнале от первого регенератора, т. е. положив $N_{вых0} = 0,$ для отношения синал/шум на выходе k-го усилителя имеем:

$C / Ш_k = 10\lg(P_{выхнас} / N_{выхk}) = 10\lg(P_{выхнас} / kN_0)$ дБ. И окончательно, если мощность сигнала и шума приведена в дБм, запишем это соотношение в виде:

$$C / Ш_k = p_{выхнас} - n_{вых} - 10\lg k \text{ (дБ)}, \quad (1.18)$$

где $n_{вых} = 10\lg N_{вых} = n_{выхид\Delta\nu} + nf = -134{,}1 + 10\lg\Delta\nu + g + nf$ (дБм), значение $\Delta\nu$ нужно подставлять в Гц.

Как видно из (1.18), С/Ш падает с ростом числа последовательно установленных уилителей EDFA. Допустимая величина отношения С/Ш сильно зависит от сетевого приложения. По этой причине выбор оптических усилителей с теми или иными параметрами, равно как и расчет максимального числа усилителей в межрегенерационной секции и ее максимальная протяженность, должны проводиться строго в соответствии с планируемым сетевым приложением.

Например, если в мультиплексных каналах волнового уплотнения одновременно будут использоваться разные сетевые стандарты: STM-1, STM-4, Gigabit Ethernet, STM-16, то достаточно удовлетворить самому жесткому требованию на соотношение С/Ш, т. е. для STM-16.

1.5.3. Плотное волновое мультиплексирование

Мультиплексоры DWDM

Мультиплексоры DWDM осуществляют объединение/разделение большого числа волновых каналов (до 32-х и более). Поэтому, наряду с устройствами собственно плотного волнового мультиплексирования/демультиплексирования, в системах передачи с DWDM возможно применение устройств, работающих в режиме мультиплексора ввода/вывода, т. е. устройств, допускающих добавление или вывод одного и более волновых каналов в/из основной мультиплексный сигнал, представленный большим числом индивидуальных каналов. Поскольку выходные порты демультиплексора закреплены за определенными длинами волн, говорят, что такое устройство осуществляет пассивную маршрутизацию по длинам волн.
Из-за малых расстояний между каналами и необходимости работы с большим числом каналов одновременно, изготовление мультиплексоров DWDM требует значительной прецизионности.

Кроме того, важно обеспечить высокие характеристики по ближним (коэффициент направленности) и дальним (изоляция) переходным помехам на портах DWDM устройства. Все это приводит к высокой стоимости изделий плотного волнового мультиплексирования.

Типовая схема DWDM мультиплексора с зеркальным отражающим элементом показана на рис. 1.32 а. Рассмотрим его работу в режиме демультиплексирования. Приходящий мультиплексный сигнал попадает на входной порт. Затем этот сигнал проходит через волновод-пластину и распределяется по множеству волноводов, представляющих собой дифракционную структуру. Сигнал в каждом из волноводов остается по-прежнему мультиплексным, а каждый канал $\{\lambda_1, \lambda_2, \ldots\}$ остается представленным во всех волноводах.
Далее происходит отражение сигналов от зеркальной поверхности, и, в итоге, световые потоки вновь собираются в волноводе-пластине, где происходит их фокусировка и интерференция – образуются пространственно разнесенные интерференционные максимумы интенсивности, соответствующие разным каналам. Геометрия волновода-пластины, в частности, расположение выходных полюсов и длины волноводов дифракционной структуры рассчитываются таким

образом, чтобы интерференционные максимумы совпадали с выходными полюсами. Мультиплексирование происходит обратным путем.

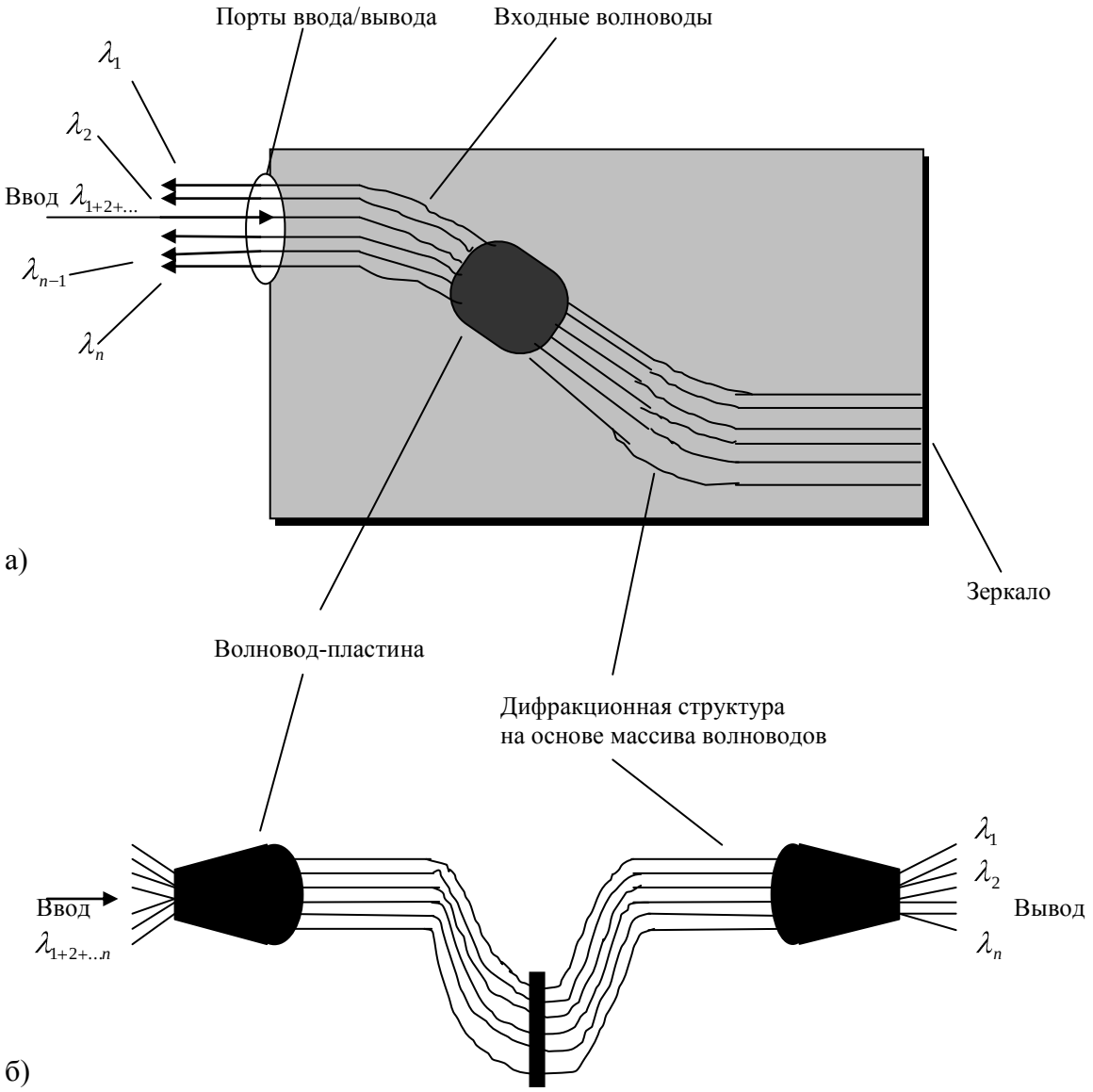


Рис. 1.32. Типовые схемы DWDM мультиплексора.

Другой способ построения мультиплексора базируется не на одной, а на паре волноводов-пластин (рис. 1.32 б). Принцип действия такого устройства аналогичен предыдущему случаю за исключением того, что здесь для фокусировки и интерференции используется дополнительная пластина.

DWDM мультиплексоры, являясь чисто пассивными устройствами, вносят большое затухание в сигнал. Например, потери для устройства (рис. 1.32 а), работающего в режиме демультиплексирования, составляют 10-12 дБ, при дальних переходных помехах <-20 дБ, и полуширине спектра сигнала 1 нм. Из-за больших потерь почти всегда возникает необходимость установления оптического усилителя перед и/или после DWDM мультиплексора.

Разнесение каналов по частоте и стандартизация DWDM.

Самым важным параметром в технологии плотного волнового мультиплексирования бесспорно является расстояние между соседними каналами. Стандартизация пространственного (по длине волны или частоте) расположения каналов нужна, уже хотя бы потому, что на ее основе можно проводить тесты на взаимную совместимость оборудования разных производителей. МСЭ-Т утвердил частотный план DWDM с расстоянием между соседними каналами 100ГГц (0,8 нм) и 50 ГГц (0,4 нм). Без понимания того, какие ограничения и преимущества имеет каждый частотный план, операторы связи и организации, планирующие наращивание пропускной способности сети, могут столкнуться со значительными трудностями и излишними инвестициями.

Сетка 100 ГГц. В табл. 1.2 приведены сетки частотного плана 100 ГГц с различной степенью разреженности каналов. Все сетки, кроме одной 500/400, имеют равноудаленные каналы. Равномерное распределение каналов позволяет оптимимзировать работу волновых конверторов, перестраиваемых лазеров и других устройств оптической сети, а также позволяет легче ее наращивать. Реализация той или иной сетки частотного плана во многом зависит от трех основных факторов: типа используемых оптических усилителей (кремниевого или фтор-цирконатного); скорости передачи на волновой канал – 2,4 Гбит/с (СТМ-16) или 10Гбит/с (СТМ-64); влияния нелинейных эффектов, причем все эти факторы сильно взаимосвязаны между собой.

Стандартные усилители EDFA на кремниевом волокне имеют один недостаток – большую неравномерность коэффициента усиления в области ниже 1540 нм, что приводит к более низким значениям соотношения сигнал/шум и нелинейным искажениям в этой области. Одинаково нежелательны как сильно низкие, так и сильно высокие значения коэффициента усиления. С ростом полосы пропускания минимально допустимое соотношение сигнал/шум возрастает – так, для канала СТМ-64 оно на 4-7 дБ выше, чем для СТМ-16. Таким образом, неравномерность коэффициента усиления кремниевого усилителя EDFA в большей степени ограничивает размер волновой зоны для мультиплексных каналов СТМ-64 (1540-1560 нм), чем для каналов СТМ-16 и меньшей емкости, где можно использовать практически всю зону усиления кремниевого EDFA, несмотря на неравномерность характеристики усиления.

Сетка 50 ГГц. Более плотный план сетки с интервалом 50 ГГц позволяет эффективней использовать зону 1540-1560 нм, в которой работают стандартные кремниевые оптические усилители. Наряду с этим преимуществом у этой сетки есть и недостатки. Во-первых, с уменьшением межканальных интервалов возрастает влияние эффекта четырех волнового смешивания, что начинает ограничивать максимальную длину межрегенерационной линии. Во-вторых, малое межканальное расстояние 0,4 нм может приводить к ограничениям в возможности мультиплексирования каналов STM-64 (рис. 8.13). Как видно из рисунка, мультиплексирование каналов STM-64 с интервалом 50 ГГц не допустимо, поскольку возникает перекрытие спектров соседних волновых каналов. Перекрытие спектров не возникает только, если имеет место меньшая скорость передачи на канал (STM-16 и ниже). В-третьих, при интервале 50 ГГц требования к перестраиваемым лазерам, мультиплексорам и другим компонентам становятся более жесткими, что ведет к увеличению стоимости оборудования.

Табл. 1.2

Частота, ГГц	Интервал 100 ГГц 8 каналов и более	Интервал 200 ГГц 4 канала и более	Интервал 400 ГГц только 4 канала	Интервал 500/400 ГГц только 8 каналов	Интервал 600 ГГц только 4 канала	Интервал 1000 ГГц только 4 канала	Длина волны, нм
196,1	*	*					1528,77
196,0	*						1529,55
195,9	*	*					1530,33
195,8	*						1531,12
195,7	*	*					1531,90
195,6	*						1532,68
195,5	*	*			*	*	1533,47
195,4	*						1534,25
195,3	*	*		*			1535,04
195,2	*						1535,82
195,1	*	*					1536,61
195,0	*						1537,40
194,9	*	*			*		1538,19
194,8	*			*			1538,98
194,7	*	*					1539,77
194,6	*						1540,56
194,5	*	*				*	1541,35
194,4	*						1542,14
194,3	*	*		*	*		1542,94
194,2	*						1543,73
194,1	*	*					1544,53
194,0	*						1545,32
193,9	*	*	*	*			1546,12
193,8	*						1546,92
193,7	*	*	*		*		1547,72
193,6	*						1548,51
193,5	*	*	*			*	1549,32
193,4	*			*			1550,12
193,3	*	*	*				1550,92
193,2	*						1551,72
193,1	*	*	*		*		1552,52
193,0	*			*			1553,33
192,9	*	*	*				1554,13
192,8	*						1554,94
192,7	*	*	*				1555,75
192,6	*						1556,55
192,5	*	*	*	*	*	*	1557,36
192,4	*						1558,17
192,3	*	*	*				1558,98
192,2	*						1559,79
192,1	*	*		*			1560,61

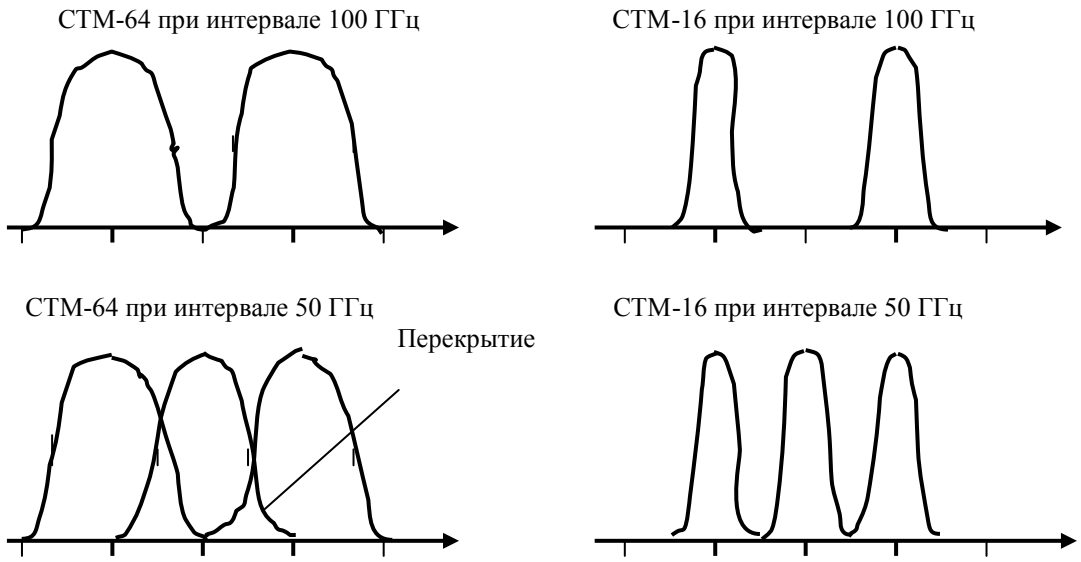


Рис. 1.33. Перекрытие спектров соседних волновых каналов.

В настоящее время ведется освоение надежных фтор-цирконатных усилителей EDFA, обеспечивающих большую равномерность во всей области 1530-1560 нм коэффициента усиления. С увеличением рабочей области усилителей EDFA становится возможным мультиплексирование 40 волновых каналов STM-64 с интервалом 100 ГГц общей емкостью 400 ГГц в расчете на пару волокон.

Соотношение между волновым и временным уплотнением

В настоящее время налажено промышленное производство мультиплексоров синхронной цифровой иерархии СЦИ со скоростями передачи агрегатных потоков 2,5 Гбит/с и 10 Гбит/с. Интересно сравнить два решения, реализующие общую пропускную способность 80 Гбит/с на основе волнового мультиплексирования соответственно 32 каналов СТМ-16 и 8 каналов СТМ-64.

При одном недостатке – невозможности дальнейшего наращивания – система 32 х СТМ-16 имеет ряд преимуществ перед системой 8 х СТМ-64:

- большая протяженность участка линии между регенераторами;
- более гибкие возможности по наращиванию и наличие разнообразных трибутарных интерфейсов (1,5/2/6/8/34/45/140 Мбит/с);
- большее разнообразие реализуемых архитектур SDH;
- проще движение к полностью оптическому уровню.

Рассмотрим их более подробно.

Протяженность линии определяется энергетическими и дисперсионными соотношениями.

Отношение сигнал/шум. В табл. 1.3 приведены основные параметры оптических спецификаций для сигналов STM-16 и STM-64. Как видно, система STM-64 предъявляет более высокие требования к отношению сигнал/шум, превышая на 5-10 дБ этот параметр для STM-16, что ведет к меньшему допустимому числу промежуточных усилителей EDFA между регенераторами STM-64.

Табл. 1.3

Параметры	STM-16 2,5 Гбит/с	STM-64 10 Гбит/с
Минимальное отношение сигнал/шум, дБ	18-21	27-31
Допустимая дисперсия в волокне, пс/нм	10 500	1 600
Ограничения из-за ПМД	нет	<400 км

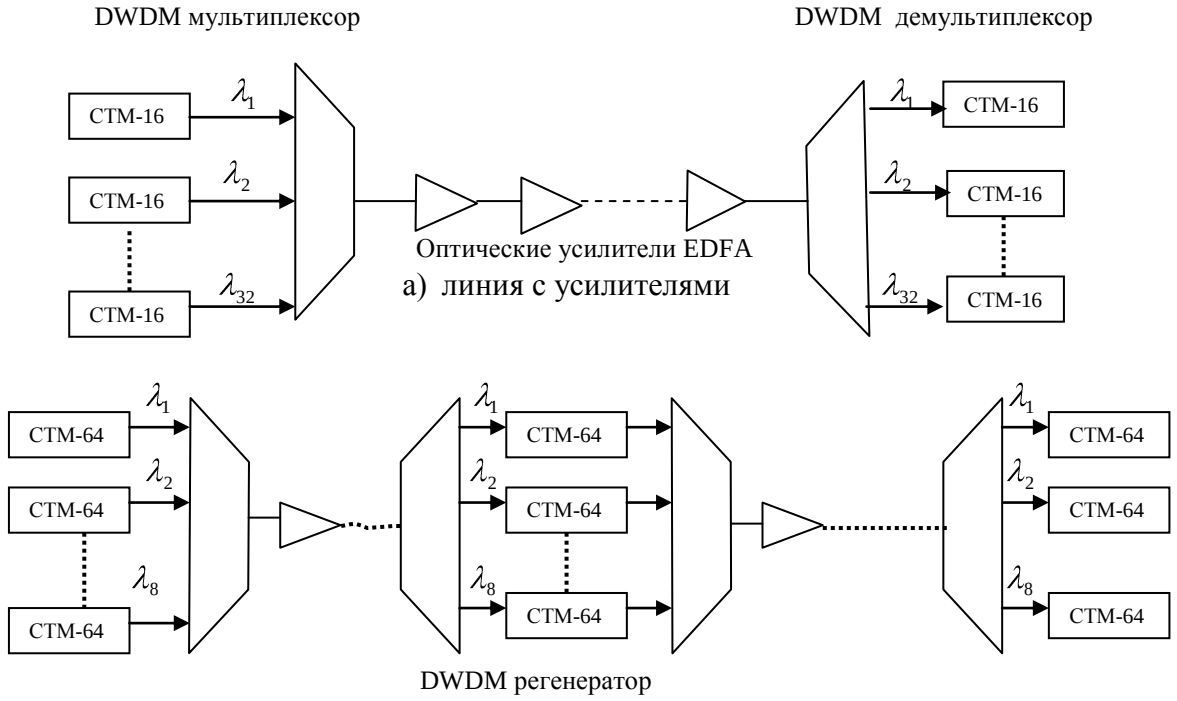
Хроматическая дисперсия. СТМ-16 допускает значительно большую дисперсию сигнала в линии, чем СТМ-64, что дает выигрыш как в протяженности сегментов между двумя соседними оптическими усилителями, так и в общей протяженности участка линии между регенераторами. Ограничения на длину, возникающие из-за хроматической дисперсии, приведены в табл. 1.4 (для волокон SF и NZDSF взяты значения удельной дисперсии 20 и 5,5 пс/(нм.км), соответственно). Благодаря линейности хроматической дисперсии, используя вставки из волокон с компенсирующей дисперсией, можно добиться значительного увеличения указанных в таблице длин участков.

Табл. 1.4

Тип волокна	STM-16	STM-64
Стандартное одномодовое волокно SF, км	525	80
Одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF, км	1909	291

Поляризационная модовая дисперсия. Проведем оценку влияния ПМД на передачу агрегатных потоков СТМ-16 и СТМ-64. В соответствии с общими требованиями ПМД не должна превышать 0,1 тактового интервала. Отсюда значение накопленной поляризационной модовой дисперсии не должно быть больше 40 пс и 10 пс для линий с СТМ-16 и СТМ-64 соответственно. Величина ПМД после прохождения светом длины L определяется по формуле $\tau_{ПМД}(L) = T\sqrt{L},$ где T – удельная поляризационная модовая дисперсия. При $T = 0{,}5 пс\sqrt{км}$ для волокон NZDSF получаем для линий СТМ-16 и СТМ-64 предельные расстояния между регенераторами 6400 км и 400 км соответствено. Первое ограничение так велико, что дело до него не доходит. Заметим, что в отличие от хроматической дисперсии, поляризационная модовая дисперсия не компенсируется. Поэтому уменьшить этот параметр можно, только используя новые волокна с меньшим значением удельной поляризационной модовой дисперсии.

На рис. 1.34 приведен состав гипотетических линий для систем передачи 32 х СТМ-16 и 8 х СТМ-64., имеющих одну и туже полную длину 496 км. Как видно, в случае 32 х СТМ-16 связь между двумя мультиплексорами можно построить на основе только линейных оптических усилителей. В случае 8 х СТМ-64 требуется установить два промежуточных регенератора, кроме того, сокращается расстояние между соседними усилителями EDFA.



б) линия с двумя регенераторами

Рис. 1.34. Сравнительный состав гипотетических линий.

Интерфейсы компонентных потоков. Мультиплексоры СТМ-64 разработаны главным образом для создания сверхскоростных протяженных магистралей и допускают подключение трибутарных потоков синхронной цифровой иерархии только двух видов – СТМ-4 и СТМ-16. При необходимости организации доступа к магистрали по менее скоростным компонентным потокам – СТМ-1 или через трибутарные интерфейсы плезиохронной иерархии (Е1, Е2, Е3 и т. д.), наряду с мультиплесором СТМ-64, потребуется использовать дополнительный сетевой элемент – мультиплексор СТМ-4 или СТМ-16. В то же время построение сети с DWDM мультиплексированием на базе мультиплексоров СТМ-16 позволяют осуществлять прямой доступ к сетевым элементам.

Реализуемая архитектура сети. Сетевые элементы СТМ-64 пока еще не настолько развиты, чтобы позволять создавать кольцевые структуры сети с возможностью резервирования SNCP или MS-SPRing для низкоскоростных компонентных потоков. Они расчитаны, в основном, на реализацию линейной топологии сети. В то же время именно возможность создания большого разнообразия кольцевых архитектур сети является одной из наиболее сильных сторон СТМ-16.

Движение к полностью оптической сети. Поскольку трудно предсказывать будущие потребности в сетях и в полосе пропускания, преимущество имеют те архитектуры, которые допускают более плавное наращивание своих ресурсов. Развертывание системы передачи 8 х СТМ-64 имеет большой шаг в 10 Гбит/с, в то время, как система 32 х СТМ-16 может наращиваться более плавно с шагом 2,5 Гбит/с. Кроме этого, сегментирование трафика в большее число волновых каналов и последующая их полностью оптическая кросс-коммутация, а также

ввод/вывод является технологически более простым решением, чем электронное временное уплотнение потоков СТМ-16 в агрегатные потоки СТМ-64.

Глава 2. Системы передачи синхронной цифровой иерархии (SDH) первого поколения.

2.1. Общие особенности построения SDH и ее основные характеристики.

Несмотря на очевидные преимущества сетей синхронной цифровой иерархии СЦИ (SDH) перед сетями плезиохронной цифровой иерархии ПЦИ (PDH), они не имели бы такого успеха, если бы не обеспечивали преемственность и поддержку стандартов ПЦИ. Кроме того, при первоначальной разработке технологии SONET ставилась задача и поэтому обеспечивалась преемственность американской, а при разработке SDH – европейской иерархий PDH. В окончательном варианте стандарты SONET/SDH поддерживают обе эти иерархии. Это выражается в том, что терминальные (оконечные) мультиплексоры и мультиплексоры ввода/вывода (промежуточные) сетей SONET/SDH, через которые осуществляется доступ в сеть, изначально были расчитаны на поддержку только тех входных каналов, или каналов доступа, скорость передачи которых соответствует объединенному стандартному ряду американской и европейской иерархий ПЦИ, а именно: 1,5, 2, 6, 8, 34, 45 и 140 Мбит/с. Цифровые сигналы каналов доступа, скорость передачи которых соответствует указанному ряду, называют трибутарными или компонентными потоками ПЦИ, а сигналы, скорость передачи которых соответствует стандартному ряду скоростей СЦИ – трибутарными потоками СЦИ. Итак, **первая особенность** иерархии SDH – поддержка в качестве входных сигналов каналов доступа трибутарных потоков PDH и SDH.

Вторая особенность относится к процедуре формирования структуры цикла (фрейма). К разряду общих здесь относятся два правила: при наличии иерархии в цикле передачи структура верхнего уровня строится из структур нижнего уровня и несколько структур того же уровня могут объединяться в одну более общую структуру. Остальные правила отражают специфику технологии, направленную на резкое сокращение аппаратных средств при вводе/выводе компонентных потоков. Например, на входе мультиплексора доступа имеем трибутарные потоки PDH, которые должны быть упакованы в оболочку цикла так, чтобы их легко можно было ввести и вывести в нужном месте с помощью мультиплексора ввода/вывода. Для этого сам фрейм достаточно представить в виде некоторого **контейнера** стандартного размера (в силу синхронности сети его размеры не должны меняться), имеющего сопровождающую документацию – **заголовок**, где собраны все необходимые для управления и маршрутизации контейнера параметры, и внутреннюю емкость для размещения **полезной нагрузки**, где должны располагаться однотипные контейнеры меньшего размера (нижних уровней), которые также должны иметь некий заголовок и полезную нагрузку, и т. д. по принципу матрешки или последовательных вложений.

Для реализации этого метода было предложено использовать понятие контейнер, в который и упаковывается трибутарный поток. По типоразмеру контейнеры делятся на 4 уровня, соответствующие уровням ПЦИ. На контейнер должен наклеиваться ярлык, содержащий управляющую информацию для

прохождения контейнера. Контейнер с таким ярлыком используется для переноса информации, т. е. является логическим, а не физическим объектом, поэтому его называют **виртуальным контейнером**. Итак, **вторая особенность** иерархии SDH – трибутарные потоки должны быть упакованы в стандартные помеченные контейнеры, размеры которых определяются уровнем компонентного потока в иерархии PDH.

Виртуальные контейнеры объединяются двумя различными способами. Контейнеры нижних уровней могут, например, мультиплексироваться (т. е. составляться вместе) и использоваться в качестве полезной нагрузки контейнеров верхних уровней (т. е. большего размера), которые, в свою очередь, служат полезной нагрузкой контейнера самого верхнего уровня (самого большого размера) – фрейма STM-1. Такое группирование, с одной стороны, может осуществляться по жесткой синхронной схеме, при которой место отдельного контейнера в поле для размещения нагрузки строго фиксировано. С другой стороны, из нескольких циклов могут быть составлены новые (более крупные образования) сверхциклы (мультифреймы). Из-за возможных различий в типе составляющих цикл контейнеров и непредвиденных временных задержек в процессе загрузки фрейма положение контенеров внутри мультифрейма может быть, строго говоря, не фиксировано, что может привести к ошибке (проскальзыванию) при вводе/выводе контейнера, учитывая общую нестабильность синхронизации в сети.

Для устранения этого явления, на каждый виртуальный контейнер заводится **указатель**, содержащий фактичесикй адрес начала виртуального контенера в поле, отведенном под полезную нагрузку. Причем, в силу принципа причинности, ясно, что виртуальный контейнер в поле нагрузки не может начинаться во времени раньше соответствующего ему указателя. Указатель дает контейнеру некоторую степень свободы, т. е. возможность «плавать» в поле нагрузки под действием непредвиденных временных флуктуаций, но при этом гарантирует, что он не будет потерян. Итак, **третья особенность** иерархии SDH – положение виртуального контейнера определяется с помощью указателей, позволяющих устранить противоречие между фактом синхронности обработки и возможным изменением положения контейнера внутри поля полезной нагрузки.

Хотя размеры контейнеров различны и емкость контейнеров верхних уровней достаточно велика, может оказаться, что либо она все равно недостаточна, либо под нагрузку лучше выделить несколько (в том числе и с дробной частью) контейнеров меньшего размера. Для этого в SDH технологии предусмотрена возможность сцепления или **конкатенации** контейнеров (составление нескольких контейнеров вместе в одну структуру, называемую «сцепкой»). Составной контейнер отличается соответствующим индексом от основного и рассматривается (с точки зрения размещения нагрузки) как один большой контейнер. Указанная возможность позволяет с одной стороны оптимимзировать использование имеющейся номенклатуры контейнеров, с другой стороны позволяет легко приспособить технологию к новым типам нагрузок, не известных на момент ее разработки. В частности, она позволяет использовать сети SDH для передачи трафика Ethernet (ETH over SDH). Итак, **четвертая особенность** иерархии SDH – несколько контейнеров одного уровня могут быть сцеплены вместе и рассматриваться как один непрерывный контейнер, используемый для размещения нестандартной полезной нагрузки.

Пятая особенность иерархии SDH состоит в том, что в ней предусмотрено формирование отдельного (как это принято в технологиях пакетной обработки) поля заголовков размером 9x9 = 81 байт. Хотя перегруженность общим заголовком невелика и составляет всего 3,33%, он достаточно большой, чтобы разместить необходимую управляющую и контрольную итнформацию и отвести часть байт для организации необходимых внутренних (служебных) каналов передачи данных. Учитывая, что передача каждого байта в структуре цикла эквивалентна потоку данных со скоростью 64 кбит/с, передача указанного заголовка соответствует организации потока служебной информации со скоростью 5,184 Мбит/с. Все это стало возможным благодаря тому, что технология SDH изначально была расчитана на волоконно-оптические системы передачи, в которых увеличение скорости передачи на 3,33% существенным образом не сказывается на помехозащищенности.

Естественно, что при построении любой иерархии должен быть определен ряд стандартных скоростей этой иерархии, либо правило его формирования и первый (**порождающий**) член ряда. Если для ПЦИ значение скорости основного цифрового канала ОЦК (64 кбит/с) вычислялось достаточно просто, то для СЦИ значение первого члена ряда можно было получить только после определения структуры цикла и его размера. Схема логических рассуждений в этом случае достаточно проста. Во-первых, поле полезной нагрузки цикла должно было вмещать максимальный по размеру виртуальный контейнер VC-4, формируемый при вводе трибутарного потока 140 Мбит/с. Во-вторых, его размер: 9x261 = 2349 байт и определил размер поля полезной нагрузки СТМ-1, а добавление к нему поля заголовков определило размер **синхронного транспортного модуля** СТМ-1: 9x261 + 9x9 = 9x270 = 2430 байт или 2430x8 = 19440 бит, что при частоте повторения 8000 Гц позволяет определить и порождающий член ряда иерархии SDH: 19440x8000 = 155,52 Мбит/с.

Цифровая иерархия, построенная на этих принципах, которые во многом близки к компьютерной технике, позволяет:

- реализовать ввод/вывод компонентных потоков без сборки/разборки группового потока (это означает, что имеется возможность определения положения каждого потока, составляющего общий поток);
- реализовать структуру циклов, позволяющих осуществлять не только развитую маршрутизацию, но и осуществлять в пределах иерархии управление сетями с топологией любой сложности;
- систематизировать иерархический ряд скоростей передачи и продолжить его за пределы ПЦИ;
- разработать стандартные интерфейсы для обеспечения стыковки оборудования разных производителей;
- иметь возможность контроля качества прохождения компонентных потоков в пределах всего трафика.

Параметры сигналов синхронной иерархии для различных схем (американской и европрейской) приведены в Табл. 2.1. В данном случае несомненной заслугой разработчиков и международных институтов является то, что обе версии являются совместимыми в ряде точек иерархии.

Синхронные сети имеют ряд преимуществ перед используемыми ранее плезиохронными, которые по сути являются асинхронными. Основные из этих преимуществ следующие:

Табл. 2.1

Скорость передачи синхронной цифровой иерархии Мбит/с	Обозначение уровня иерархии	
	SDH	SONET
51,48	СТМ-0	OC-1/STS-1
155,52	СТМ-1	OC-3/STS-3
622,08	СТМ-4	OC-12/STS-12
2488,32	СТМ-16	OC-48/STS-48
9953,28	СТМ-64	OC-192/STS-192

- упрощение сети, вызванное тем, что в синхронной сети один мультиплексор ввода/вывода , позволяя непосредственно ввести или вывести, например поток Е1 (2 Мбит/с) из цикла СТМ-1, заменяет целую гирлянду мультиплексоров ПЦИ;
- надежность и самовосстанавливаемость сети, обусловленные тем, что, во-первых, сеть использует волоконно-оптические кабели, передача по которым практически не подвержена действию электромагнитных помех, и, во-вторых, архитектура и гибкое управление сетями позволяет использовать защищенный режим работы, допускающий два альтернативных пути распространения сигнала с почти мгновенным переключением в случае повреждения одного из них, а также обход поврежденного узла сети. Все это делает эти сети самовосстанавливающимися;
- гибкость управления сетью, обусловленная наличием большого числа широкополосных каналов управления и компьютерной иерархической системой управления с уровнями сетевого и элементного менеджмента, а также возможностью автоматического дистанционного управления сетью из одного центра, включая динамическую реконфигурацию каналов и сбор статистики о функционировании сети;
- выделение полосы пропускания по требованию – сервис, который раньше мог быть осуществлен только по заранее спланированной договоренности, теперь может быть предоставлен в считанные секунды путем переключения на другой (более широкополосный) тракт;
- прозрачность для передачи любого трафика – факт, обусловленный использованием виртуальных контейнеров для передачи трафика,

сформированного другими технологиями, включая самые современные технологии Frame Relay, ISDN, ATM и Ethernet;

- универсальность применения – технология может быть использована как для создания глобальных сетей или глобальной магистрали, передающей из точки в точку тысячи каналов со скоростью до 40 Гбит/с, так и для компактной кольцевой корпоративной сети, объединяющей десятки локальных сетей;
- простота наращивания мощности – при наличии универсальной стойки для размещения аппаратуры переход на следующую более высокую скорость иерархии можно осуществить, просто вынув одну группу функциональных блоков и вставив новую.

Упрощение реализации сетевых узлов. Различие в сложности реализации ввода/вывода первичного цифрового потока для технологий PDH и SDH наглядно представлено на рис. 2.1. Видно, что мультиплексор ПЦИ требует для формирования групповового потока трех ступеней мультиплексирования и содержит по 2 вторичных, третичных и четверичных, плезиохронных мультиплексора, в то время, как в мультиплексоре SDH выделение 2 Мбит/с компонентного потока потока происходит непосредственно из агрегатного потока STM-N.

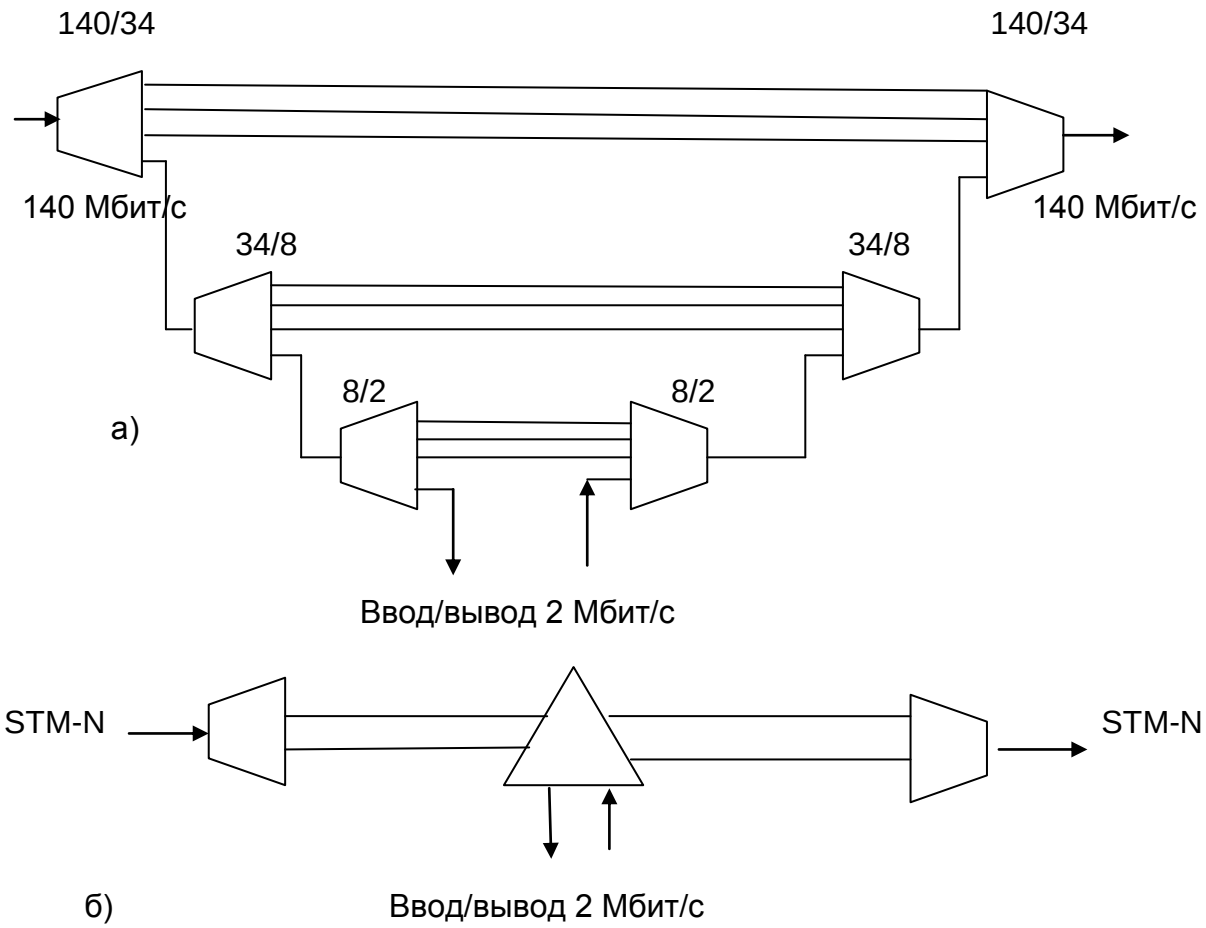


Рис. 2.1. Пошаговый (PDH) и прямой (SDH) ввод/вывод компонентных потоков.

Надежность и самовосстанавливаемость сети, построенной на технологии SDH, определяется возможностью реализации с помощью мультиплексоров SDH

кольцевой архитектуры сети. При этом кольцевые структуры могут быть однонаправленными и двунаправленными, а сами кольца – одиночными и двойными.

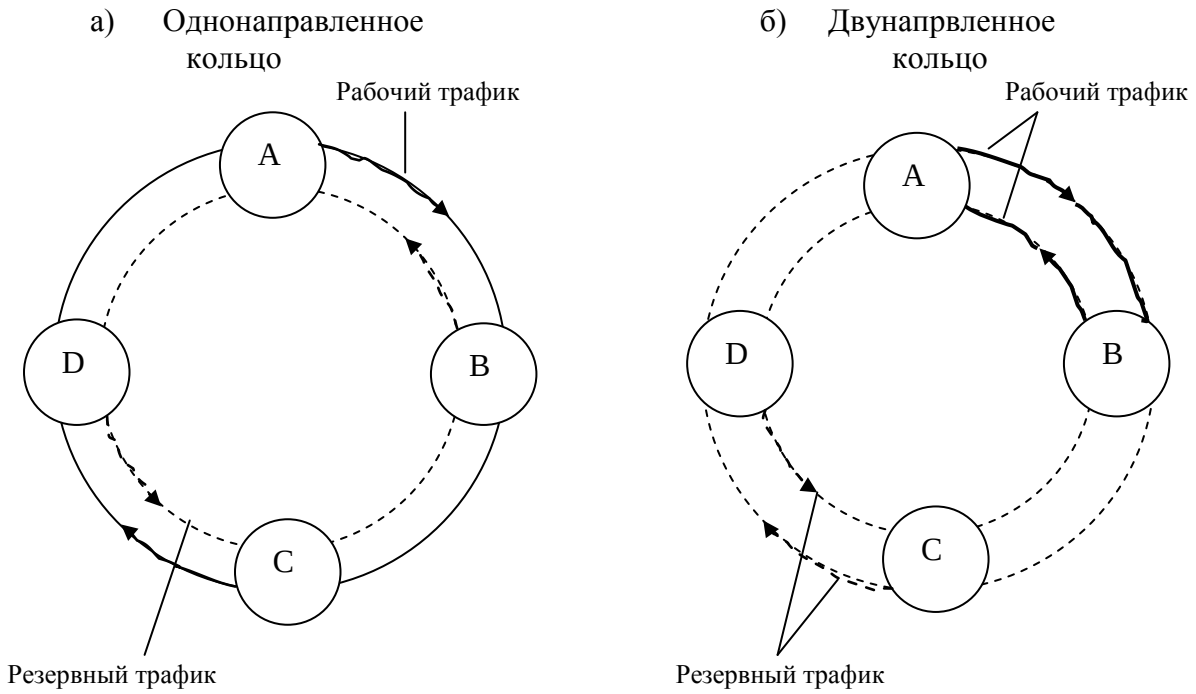


Рис. 2.2

В случае однонаправленного кольца (рис. 7.2 а) рабочий трафик между узлами сети осуществляется в одном направлении, например, по часовой стрелке, а резервный трафик – в обратном направлении. Это значит, что связь между узлами сети, например А и В, в одну сторону идет по кратчайшему пути, а в другую сторону – по длинному пути. Одновременно с этим, оборудование, установленное на этих узлах, передает и получает резервные сигналы по резервному закольцованному волокну в обратных напрвлениях. В случае неисправности (обрыва волокна или выхода из строя оборудования одного из промежуточных узлов) приемная часть оборудования узла, который фиксирует отсутствие сигнала или низкую достоверность передачи на рабочем входе, автоматически переключается на обработку сигнала, приходящего на резервный вход.

В двунаправленном кольце (рис. 7.2 б) рабочий трафик между узлами сети, например А и В, осуществляется по кратчайшему, а резервный по длинному пути. Это означает, что оборудование, установленное на узлах, передает сигналы в разных направлениях и принимает сигнлы с разных направлений одновременно. На приемных концах осуществляется обработка только тех сигналов, которые приходят с рабочего направления, т. е. сигналов, пришедших по кратчайшему пути. В случае любого повреждения приемная часть оборудования автоматически переключается на обработку сигнала, пришедшего по резервному направлению.

а) одинарное кольцо б) двойное кольцо

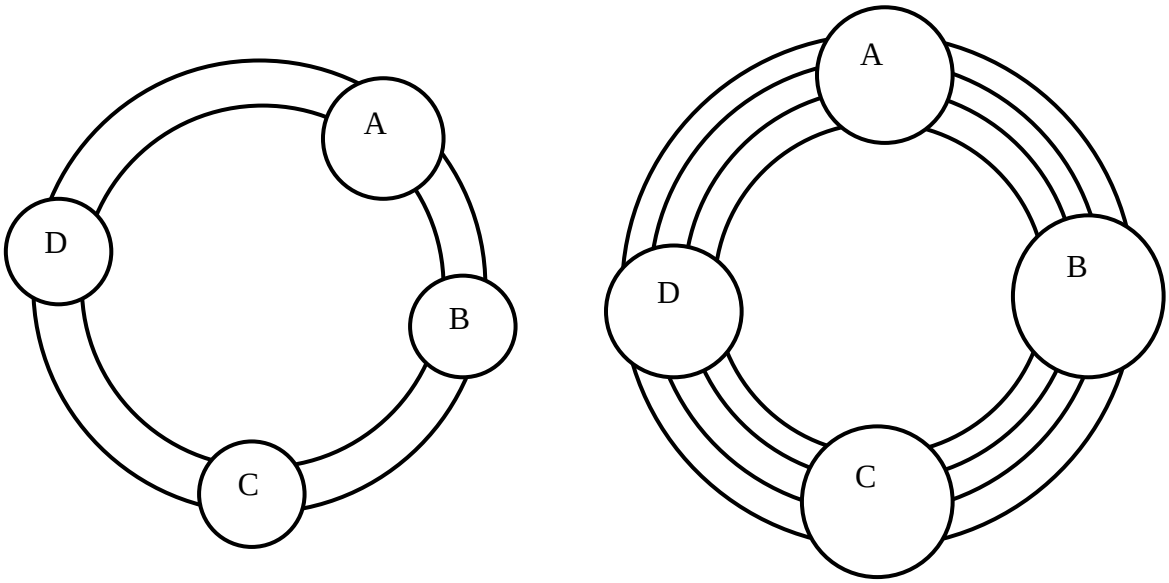


Рис. 2.3

Одинарное кольцо (рис.2.3 а) реализуется с помощью двух волокон. При этом часть емкости двухволоконного кольца из-за того, что одни и те же сигналы передаются в разных направлениях, приходится расходовать на передачу резервного трафика. Можно показать, что при равномерном распределении ввода/вывода компонентных потоков в узлах сети на резервный трафик расходуется часть потенциальной емкости двухволоконного кольца и, в частности, количество ответвляемых в узлах компонентных потоков уменьшается пропорционально числу узлов. Двойное кольцо реализуется на четырех волокнах, т. е. рабочий трафик передается по одному, а резервный - по другому двухволоконному кольцу. В этом случае потенциальная емкость кольца используется полностью, однако за это приходится платить применением дополнительно двух волокон. Поэтому двойные кольца используются только на стратегически важных направлениях.

Важным является то, что рабочие и резервные волокна обязательно должны располагаться в разных, разнесенных друг от друга в пространстве кабелях, потому что в противном случае при обрыве кабеля будут повреждены как рабочие, так и резервные волокна.

Технология SDH изначально была расчитана на волоконно-оптические системы передачи, в которых увеличение скорости передачи на несколько процентов существенным образом не сказывается на помехозащищенности и которые характеризуются очень малой вероятностью ошибки. По этой причине оказалось возможным ввести необходимую избыточность для формирования заголовков, в которых размещается необходимая контрольная и управляющая информация и организуются внутренние (служебные) каналы передачи данных. Кроме того, оказалось возможным поребовать за счет резервирования высокой надежности передачи информации. Информация может пропадать только в нештатных ситуациях при сбое в системе.

2.2. Основы функционирования SDH.

2.2.1. «Аллегория поезда».

Для облегчения восприятия рассмотрим часто используемую аллегорию, которая позволяет быстро сориентироваться в принципах работы системы мультиплексирования и метода ввода/вывода в системах SDH. Представим себе, что мимо железнодорожной станции (узел связи) идет поезд (цикл передачи STM-N), который представляет собой, как обычно, локомотив и ряд вагонов. На перроне стоит человек (синхронный мультиплексор), который ждет поезд и знает, что на локомотиве написано имя (идентификатор) состава. Каждый вагон тоже имеет свое имя (номер вагона). В вагоне содержится полезная нагрузка, упакованная в ящики. Это товар, поэтому на ящике написано название товара. Человек на перроне не имеет полную информацию о том, где какой ящик лежит, он знает лишь название ящика, содержащего товар, который он должен вытащить. Выполнение порученной работы на ходу поезда ему облегчают два реестра. Один, назовем его указатель административного блока AU PTR, содержится у машиниста и в нем указано в каком вагоне какие ящики лежат. Другой реестр TU PTR (указатель трибутарного блока) находится у проводника вагона и в нем содержится информация о том, где в вагоне находится какой ящик. У человека на станции имеется другой ящик с товаром. Человек должен выхватить из поезда на ходу ящик с одним товаром, а на его место поставить ящик с другим товаром. Ошибка исключается. Поэтому человек действует следующим образом:

1. Он ждет поезда и проверяет, тот ли поезд идет мимо станции.

2. Если это нужный поезд, человек на ходу читает реестр у машиниста и понимает, что ему нужен вагон, прицепленный, например, вторым к составу.

3. У проводника вагона человек быстро считывает реестр и определяет местоположение ящика в вагоне.

4. Теперь человек на ходу выдергивает ящик с нужным товаром, предварительно проверив название ящика, а на его место вставляет ящик с другим товаром, на котором предварительно он написал название товара, договорившись об изменении реестров AU и TU.

Ситуация конечно довольно фантастическая, но она правильно отражает метод работы системы SDH. Теперь только нужно представить, что мимо станции идет бесконечный поезд (цифровой поток), устроенный следующим образом: локомотив, четыре вагона (цикл передачи STM-N), опять локомотив, снова четыре вагона и т. д. Тогда человек может постоянно повторять описанную операцию, а в результате из поезда на перрон ящик за ящиком будет выгружаться один товар, а в поезд с перрона – загружаться другой товар. Поскольку мы дорожим нашим товарооборотом по железной дороге, любое нарушение в работе описанного алгоритма приводит только к одному результату: человек не выполняет операцию. Но во всех возможных вариантах нарушений результат будет один: ящики не переставляются, чтобы на перроне не оказалось товара, не предназначенного для данной станции.
Рассмотрим теперь, как в действительности функционирует технология SDH с учетом всех заложенных в нее полей, заголовков и указателей.

Контейнер представляет собой структурированные данные, передаваемые в системе. Если система PDH (американской ANSI или европейской ETSI иерархии) создает трафик, который нужно передать по системе SDH, то данные PDH сначала структурируются (укладываются) в контейнеры (рис. 2.4). Затем к контейнеру добавляются заголовок и указатели, в результате после мультиплексирования контейнеров нижних уровней образуется синхронный транспортный модуль STM-1. По сети STM-1 передаются в системе SDH разных уровней STM-N, но во всех случаях раз сформированный STM-1 может только складываться с другим транспортным модулем, т. е. имеет место**.**

2.2.2. Процедура контейнирования нагрузки.

Контейнер представляет собой структурированные данные, передаваемые в системе. Если система PDH (американской ANSI или европейской ETSI иерархии) создает трафик, который нужно передать по системе SDH, то данные PDH сначала структурируются (укладываются) в контейнеры (рис. 1.2). Затем к контейнеру добавляются заголовок и указатели, в результате после мультиплексирования контейнеров нижних уровней образуется синхронный транспортный модуль STM-1. По сети STM-1 передаются в системе SDH разных уровней STM-N, но во всех случаях раз сформированный STM-1 может только складываться с другим транспортным модулем, т. е. имеет место мультиплексирование не только контейнеров, но и транспортных модулей. Вся эта процедура называется контейнированием нагрузки.

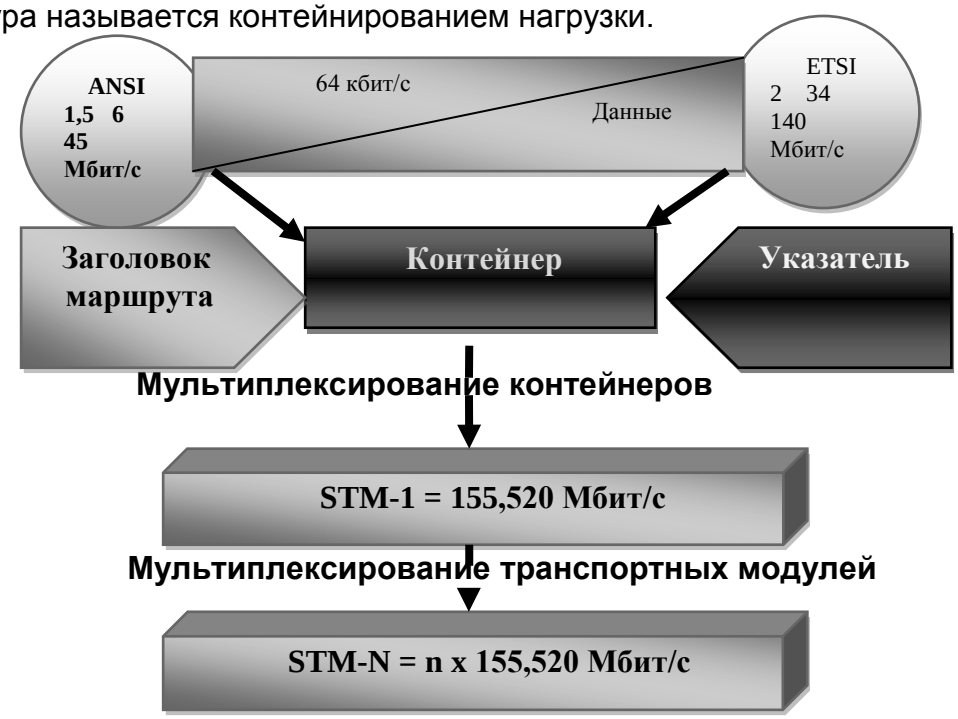


Рис. 2.4. Общие принципы контейнирования в технологии SDH.

Нагрузка (цифровой поток PDH), которая в аллегории представляет собой товар, преобразуется в структурированные (стандартные по размеру) контейнеры С. Контейнеры – это эквивалент ящиков. Затем к контейнеру присоединяется заголовок маршрута (надпись на ящике), в результате образуется виртуальный контейнер (ящик, подготовленный к загрузке в вагон). Виртуальный контейнер обозначается VC. К виртуальному контейнеру добавляется указатель, в результате чего появляется трибутарный блок TU (рис. 2.5).

Разные по скорости потоки PDH преобразуются в разные контейнеры C-n. Размер контейнеров C-n выбирался в соответствии с допустимой вариацией скорости потока PDH. Например, для передачи потока E1 (2048 кбит/с) нельзя использовать контейнер C такого же размера, т. к. возможно, что в результате вариации скорости на вход мультиплексора придет не 2048 кбит/с, а 2049 кбит/с и поток не поместится. Обычно все такие отклонения от номинальной скорости передачи связаны с системами синхронизации, поскольку скорость передачи и частота передачи – синонимы. Различают как постоянное отклонение в скорости передачи, так и переменное. Например, портом A и портом B мультиплексора может быть постоянная разница или изменяющаяся во времени. Чтобы компенсировать отклонение в частоте размер контейнера выбирался с запасом на вариацию. Процедура выравнивания скоростей разных потоков при формировании контейнеров C-n называется стаффингом. Стаффинг представляет собой процедуру «дополнения» потока служебными битами. Основной проблемой здесь является создание процедуры распознавания и удаления стаффинговых битов при выгрузке потока из контейнера. Возвращаясь снова к аллегории поезда, стаффинг – это уплотнители, которые мы кладем ящик, чтобы не побить хрупкий товар.

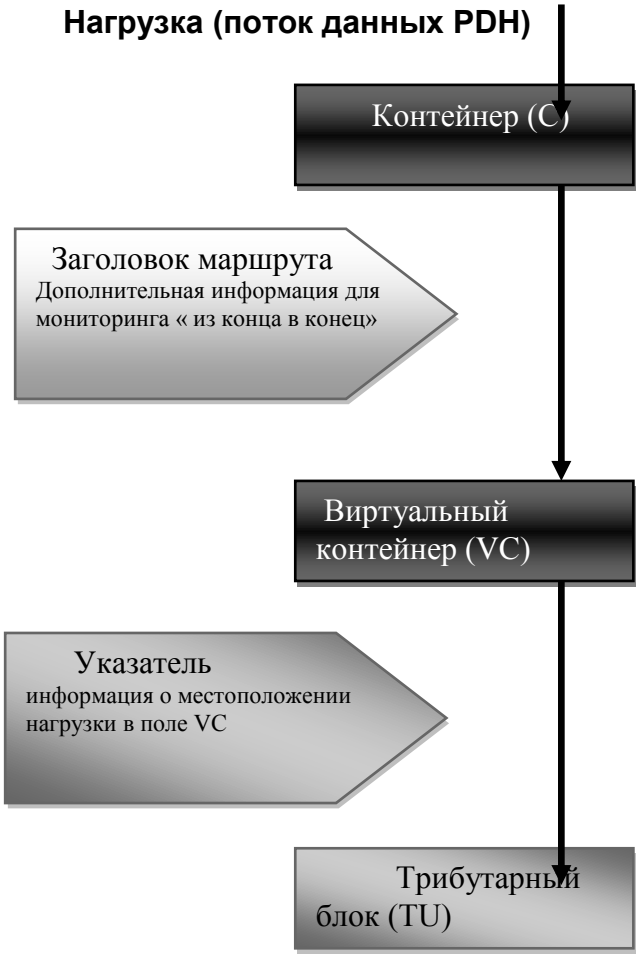


Рис. 2.5. От контейнера C до трибутарного блока TU.

Если детально рассмотреть стаффинг, то можно выделить два типа битового стаффинга:

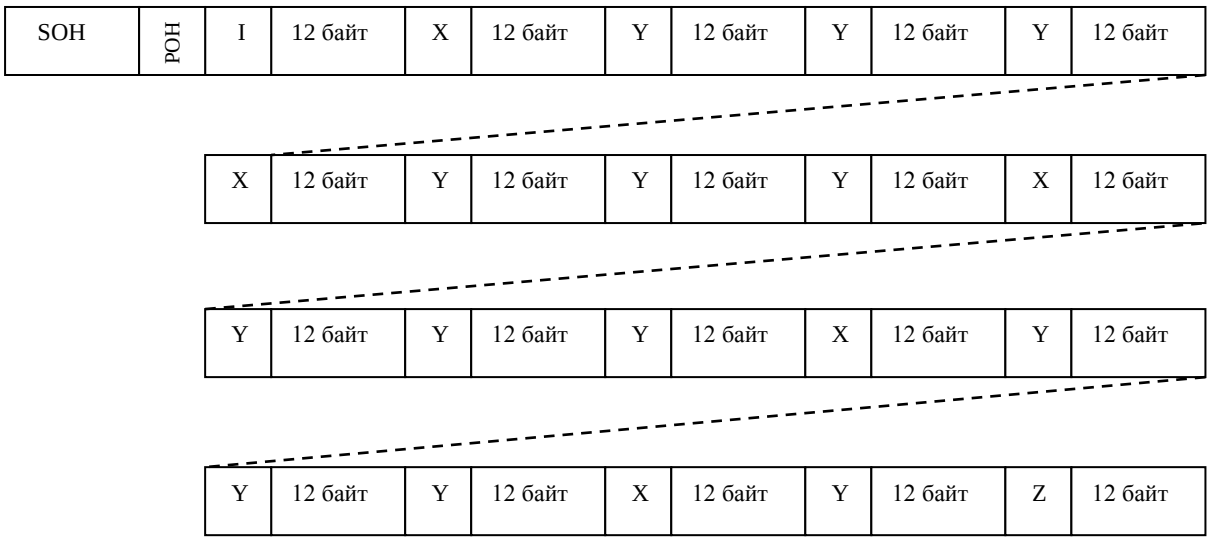
- *Плавающее выравнивание* предусматривает компенсацию переменной разницы в скоростях загружаемых цифровых потоков. В этом случае полезная нагрузка в

контейнере может гибко увеличиваться или уменьшаться, давая возможность загрузки в контейнер потока с вариацией скорости. Для обеспечения плавающего выравнивания в нескольких частях контейнера предусматриваются поля переменного стаффинга. Периодически повторяемые индикаторы стаффинга определяют, является ли бит в поле переменного стаффинга информационным или битом выравнивания и подлежит уничтожению в процессе выгрузки.

- *Фиксированное выравнивание* предусматривает добавление в состав контейнера дополнительных битов для того, чтобы его размер соответствовал стандартному (стаффинговые биты «дополнения»). В отличие от процесса плавающего выравнивания где стаффинговые биты идентифицируются индикаторами, в процессе фиксированного выравнивания индикаторы не используются, т. к. место расположения этого стаффингового поля определено структурой контейнера.

В процессе загрузки и выгрузки цифрового потока используются оба типа выравнивания.

В качестве примера рассмотрим загрузку потока 140 Мбит/с в транспортный модуль STM-1 (рис 2.6).



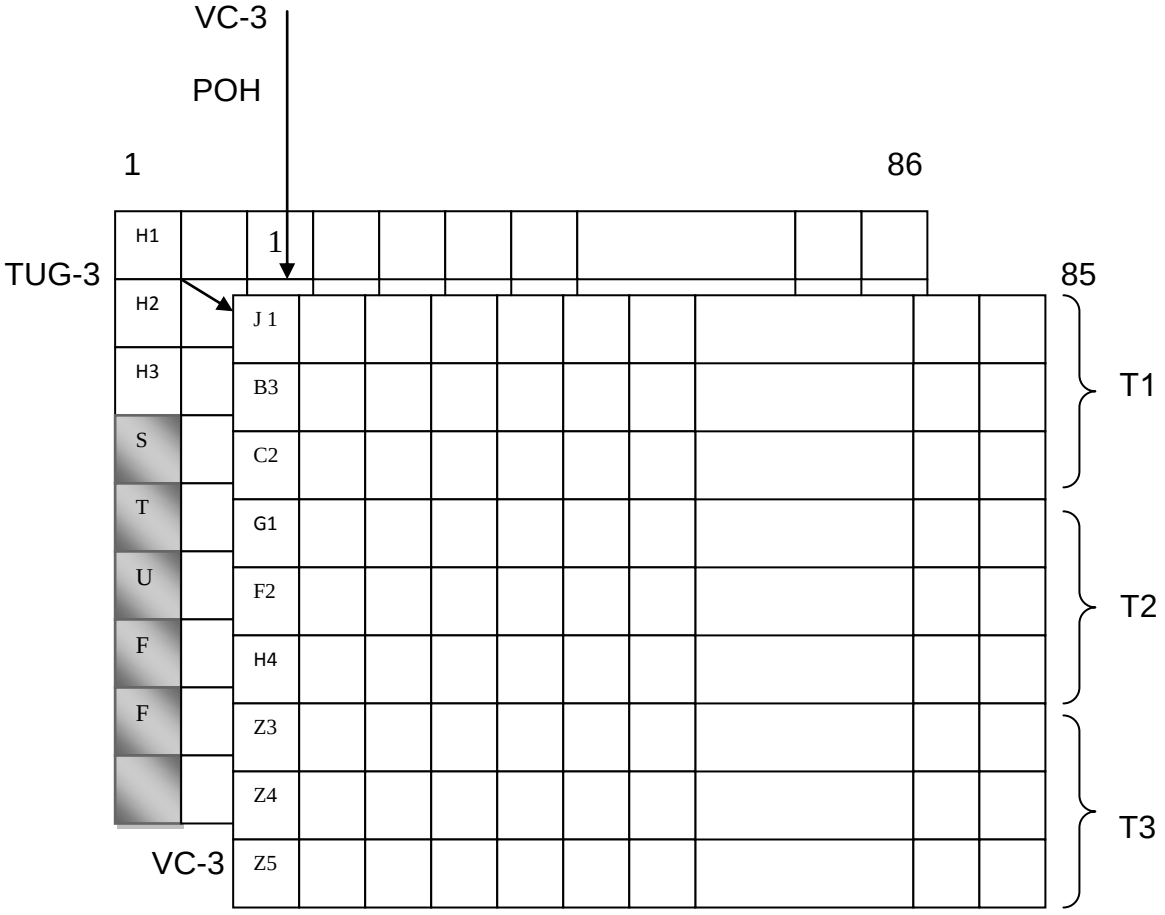
Значения битов:

I	IIII IIII	C	индикатор стаффинга
X	CRRR RROO	O	биты заголовка
Y	RRRR RRRR	R	биты фиксированного стаффинга
Z	IIII IISR	S	стаффинговый или информационный бит

Рис. 2.6. Загрузка потока 140 Мбит/с в синхронный транспортный модуль.

Как видно из рисунка, в процессе загрузки потока 140 Мбит/с в синхронный транспортный модуль используются процедуры фиксированного выравнивания (биты R) и плавающего выравнивания (биты S, индикаторы C). Процедура фиксированного выравнивания используется чаще и связана с байтами X, Y и Z. Процедура плавающего выравнивания связана с использованием байтов X и Z, причем непосредственно стаффинговые биты плавающего выравнивания передаются в байте Z. Байт X содержит индикатор стаффинга, передаваемый периодически (до появления байта Z индикатор передается 5 раз).

В качестве второго примера рассмотрим загрузку потока 34 Мбит/с (E3), представленную на рис. 2.7.



.

X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I		X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	X	3x8I
X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I		X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	X	3x8I
X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I		X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	X	3x8I

X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	C	3x8I
X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	C	3x8I
X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	3x8I	X	X	A B 8I

X = RRRRRRRR R = Бит фиксированного стаффинга

C = RRRRRRC1C2 C1,C2 = Бит контроля стаффинга

A = RRRRRRRS1 S1,S2 = Бит стаффинга

B = S2 I I I I I I I I = Информационный бит

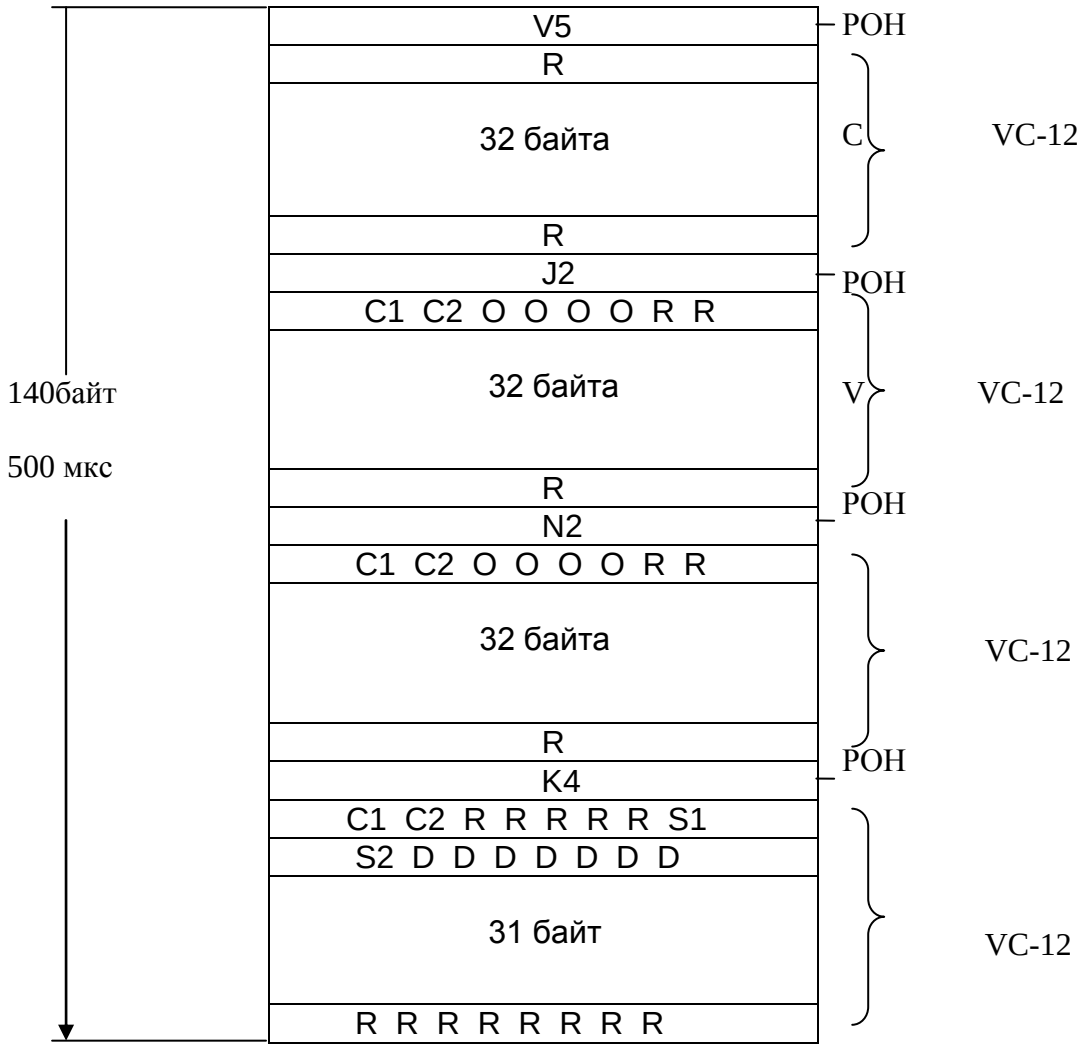
Рис. 2.7. Загрузка потока Е3 (34 Мбит/с).

Как следует из рисунка, загрузка потока Е3 в группу трибутарных блоков TUG-3 во многом аналогична загрузке потока Е4 (рис. 2.6). И в том и в другом случае используются виртуальные контейнеры верхнего уровня – VC-3 и VC-4, соответственно. В обоих случаях используется процедура стаффинга, причем как фиксированного (биты R), так и плавающего или переменного (биты S). Для идентификации битов переменного стаффинга используются индикаторы стаффинга (биты С). На рис. 2.7 помимо процедуры стаффинга представлена также структура заголовков, в том числе трактовый заголовок (маршрута) верхнего уровня VC-3 POH. Информационные байты или поля, составляющие этот заголовок, будут рассмотрены позже.

Наконец, в качестве примера образования виртуального контейнера нижнего уровня рассмотрим асинхронную загрузку потока 2 Мбит/с, как наиболее часто используемый вариант загрузки цифрового потока (рис. 2.8). Здесь представлена побайтовая структура загруженного в синхронный транспортный модуль потока Е1 (2о48 кбит/с). На рисунке отдельно выделены байты трактового заголовка POH (V5, J2, N2 и К4), которые будут рассмотрены позже. Можно видеть, что в процессе асинхронной загрузки потока Е1 также использованы процедуры фиксированного и плавающего выравнивания.

За счет использования процедуры стаффинга размер контейнера С-n превосходит соответствующий ему размер загружаемого потока Е-n иерархии PDH. Допустимые значения вариации скоростей загружаемых потоков PDH и соответствующие им контейнеры приведены в таблице 2.2. Допустимое изменение скорости потоков включает в себя как постоянную, так и переменную вариацию.

Если рассмотреть процесс контейнирования от поступления нагрузки, например, потока Е1 до образования синхронного транспортного модуля STM-1, то получится более сложная, чем на рис. 2.6 картина. Детально этот процесс представлен на рис. 2.9. Здесь представлена полная схема (по ETSI) контейнирования потоков Е1 и формирования синхронного транспортного модуля STM-1.



C – индикатор стаффинга D – информационный бит O – бит заголовка

R – бит фиксированного стаффинга S – стаффинговый или информационный бит

Рис. 2.8. Асинхронная загрузка потока 2 Мбит/с в синхронный транспортный модуль.

Таблица 2.2. Допустимые значения вариации скорости потока и различные типы контейнеров.

Скорость цифрового потока в Мбит/с	**Максимально допустимая вариация скорости, ppm**	**Скорость цифрового потока в контейнере, Мбит/с**	**Название контейнера**
1,544	50	1,600	C11
2,048	50	2,176	C12
6,312	30	6,784	C21
34,368	20	36,864	C31
44,736	20	48,384	C32
139,264	15	149,760	C4

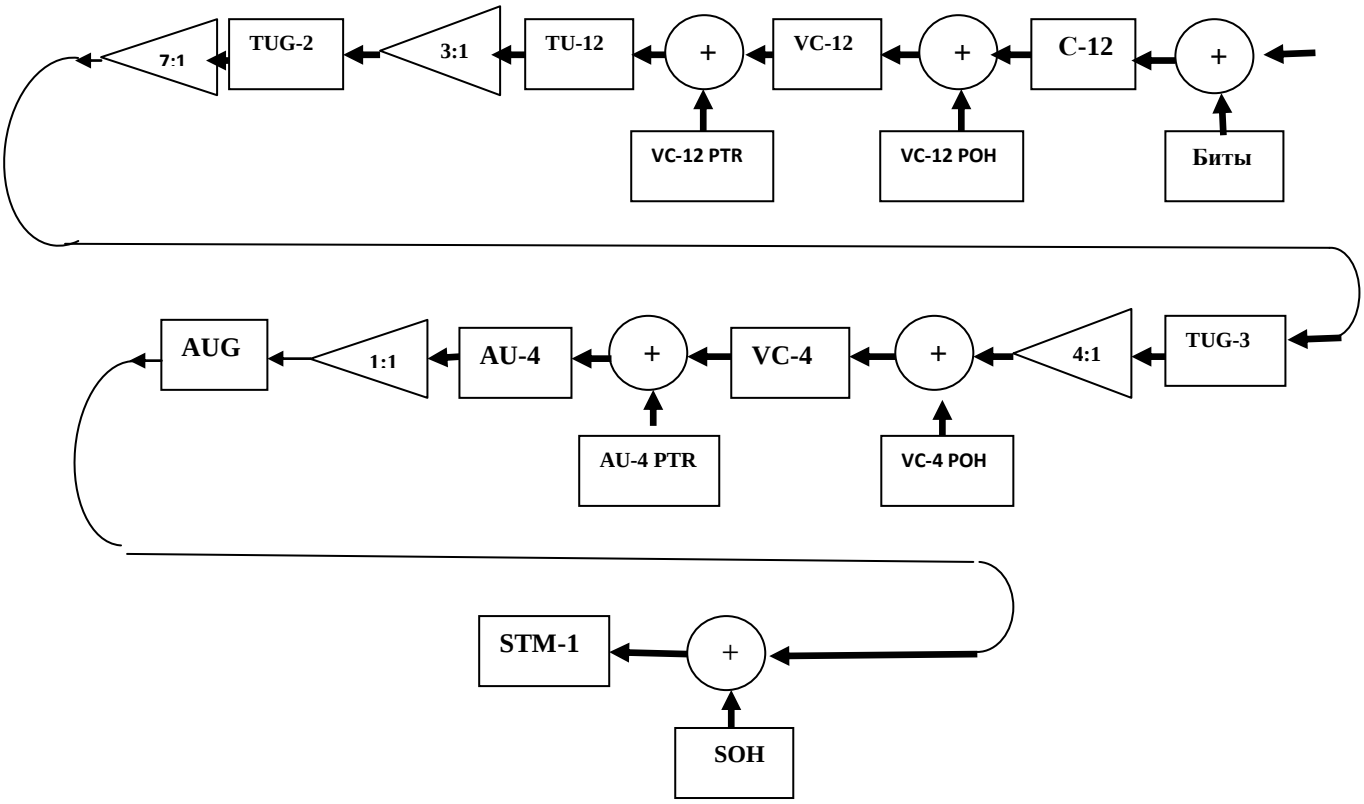


Рис. 2.9. Формирование синхронного транспортного модуля STM-1 из потока E1.

Как видно из рисунка, в процессе формирования синхронного транспортного модуля к нагрузке (товару) сначала добавляются выравнивающие биты (стаффинг), а также фиксированные, управляющие и упаковывающие биты. В результате образуется контейнер С-12. К нему добавляется маршрутный (трактовый) нижнего уровня VC-12 POH – название ящика, в результате формируется виртуальный контейнер VC-12 (ящик). Добавление к виртуальному контейнеру VC байта указателя PTR (реестр у проводника вагона) превращает VC в трибутарный блок TU. Затем происходит процедура мультиплексирования блоков нагрузки в группы трибутарных блоков TUG различного уровня (укладка ящиков в вагон по своим местам) вплоть до формирования виртуального контейнера верхнего уровня VC-4 (вагон). В результате присоединения трактового заголовка VC-4 POH (название вагона) и указателя AU PTR (реестр у машиниста) образуется административный блок AU, к которому присоединяется секционный заголовок SOH (локомотив). Таким образом, образуется синхронный транспортный модуль (поезд), который передается по сети SDH.

Детальный пример схемы формирования синхронного модуля STM-1.

При детальном рассмотрении логическую схему формирования синхронного транспортного модуля СТМ-1 из компонентных потоков E1 можно разделить на 8 шагов. При этом следует иметь в виду, что в физической схеме положение отдельных элементов схемы, например указателей, не соответствует их месту в логической схеме, кроме того используется ряд резервных или фиксирующих

элементов, играющих роль «наполнителей», или элементов управления, или элементов выравнивания СЦИ цикла.

Шаг 1. Процесс начинается с формирования контейнера С12, который наполняется компонентным потоком Е1, поступающим из канала доступа. Поток 2,048 Мбит/с, для удобства последующих рассуждений, лучше представить в виде цифровой 32-байтной последовательности, повторяющейся с частотой 8 кГц, совпадающей с частотой повторения цикла СТМ-1.

К этой последовательности в процессе формирования С-12 возможно добавление выравнивающих бит, а также других служебных бит. Ясно, что емкость С-12 будет больше 32 байт, фактически она, как будет видно из дальнейшего, в зависимости от режима преобразования VC-12 в TU-12 будет больше или равна 34 байтам. Для конкретизации последующих рассуждений примем размер контейнера С-12 равным 34 байтам.

Шаг 2. Далее к контейнеру С-12 добавляется трактовый (маршрутный) заголовок VC-12 POH длиной в один байт с указанием информации, используемой для сбора статистики прохождения контейнера. В результате формируется виртуальный контейнер VC-12 размером 35 байт.

Шаг 3. Добавление указателя TU PTR к виртуальному контейнеру превращает его в трибутарный блок TU-12 длиной 36 байт. Формально это удобнее представить в виде двумерной матрицы 9 х 4 байт, учитывая, что окончательная структура – модуль СТМ-1 – также формально представляется в виде двумерной матрицы 9 х 270 байт с 9 строками и 270 столбцами.

Замечание 1. Преобразование виртуального контейнера VC-12 в трибутарный блок TU-12 и последующее мультиплексирование может проходить по двум схемам, или в двух режимах: плавающем и фиксированном. Достоинство плавающего режима в том, что он допускает использование указателей для определения истинного положения контейнера в поле полезной нагрузки, а значит допускает определенную асинхронность в транспортировке контейнера и является средством гибкого динамического выравнивания положения контейнера внутри структуры, в которую он погружен. Фиксированный режим использует фиксированное синхронное отображение струкурированной информации трибутарных блоков на поле полезной нагрузки контейнеров верхних уровней. Достоинство такого режима – более простая структура TU или TUG, недостаток – исключается любая несинхронность при транспортировке контейнера.

Для обеспечения плавающего режима фолрмируется сверхцикл, состоящий из нескольких циклов, в которых мог бы плавать контейнер нижнего уровня С-12. При создании такого сверхцикла допускается три варианта отображения трибутарных потоков на его структуру: асинхронное, бит-синхронное и байт-синхронное. Варианты отображения устанавливаются операторами сети, причем по умолчанию используется асинхронное отображение. Для контейнеров VC-12 сверхцикл формируется из четырех последовательных циклов VC-12. Он имеет период повторения 500 мкс и составную длину 140 байтов.

Шаг 4. Последовательность трибутарных блоков TU-12 в результате байт-мультиплексирования 3:1 превращаются в группу трибутарных блоков TUG-2 с суммарной длиной 108 байтов. Логически структуру TUG-2 тоже удобнее представить в виде матрицы 9 х 12 байт.

Замечание 2. Фактически при объединении TU-12 в TUG-2 указатели, как будет видно в дальнейшем, TU-12 PTR располагаются отдельно от виртуальных контейнеров в начале цикла.

Шаг 5. Последовательность TUG-2 подвергается повторному байт-мультиплексированию 7:1, в результате котрого формируется группа трибутарных блоков TUG-3 с длиной цикла 756 байтов, соответствующей матрице 9 x 84 байта.

Замечание 3. Фактически TUG-3 соответствует циклу 9 x 86, в начале которого добавляется два служебных столбца 2 x 9 байт, состоящие из поля индикации нулевого указателя – NPI и фиксированного пустого поля (наполнителя) – FS. В результате формула образования TUG-3 принимает вид: TUG-3 = 7 x TUG-2 + NPI + FS_{TUG-3}. Таким образом, цикл TUG-3 имеет длину 774 байта, что соответствует 9 x 86 байт.

Шаг 6. Полученная последовательность вновь байт-мультиплексируется 3:1, в результате чего формируется последовательность блоков TUG-3 с суммарной длиной 2322 байта (774 x 3 = 2322).

Шаг 7. Производится формирование виртуального контейнера верхнего уровня VC-4 добавлением к полученной последовательности трактового заголовка POH длиной 9 байтов, что образует цикл длиной 2331 байт (2322 + 9 = 2331).

Замечание 4. Фактически VC-4 имеет цикл 9 x 261, структура которого состоит из одного столбца (1 x 9 байт) POH, двух столбцов фиксированного пустого поля FS и трех TUG-3, полученных мультиплексированием. В результате формула образования VC-4 принимает вид: VC-4 = 3 x TUG-3 + $POH_{VC-4} + FS_{VC-4}$. Таким образом, виртуальный контейнер VC-4 имеет длину 2349 байтов (3 x 774 + 9 + 2 x 9 = 2349), что соответствует циклу 9 x 261 байт.

Шаг 8. На последнем этапе осуществляется формирование синхронного транспортного модуля STM-1. При этом сначала формируется AU-4, путем добавления указателя AU-4 PTR, длиной 9 байт, который размещается в SOH, а затем группа административных блоков AUG путем формального для данного кокретного случая мультиплексирования 1:1 AU-4. К группе AUG добавляется секционный заголовок SOH, который состоит из двух частей: заголовка регенерационной секции RSOH (формат 3 x 9 байт) и заголовка мультиплексной секции MSOH (формат 5 x 9 байтов), окончательно формируя синхронный транспортный модуль STM-1, представляемый в виде кадра, имеющего длину 2430 байтов (9 x 270 байт), что при частоте повторения 8 кГц соответствует скорости передачи 155,52 Мбит/с.

Итак, если формализовать результаты рассмотренного примера, плолучим следующую формулу преобразования компонентного потока E1 в схеме мультиплексирования по стандарту ETSI

$$STM-1 = ((((E1 + <\text{байты}> + VC-12_{POH} + TU-12_{PTR}) \times 3_{TUG-2}) \times 7_{TUG-3} + NPI$$
$$+ FS_{TUG-3}) \times 3_{VC-4} + VC-4_{POH} + FS_{VC-4} + AU-4_{PTR}) \times 1_{AUG} + RSOH + MSOH$$

Эта формула является более точной, хотя и менее наглядной по сравнению с рис. 2.9 эквивалентной формой представления процесса формирования модуля STM-1.

Процесс отображения и выравнивания компонентного потока.

На этапе отображения компонентный поток E1 упаковываектся в контейнер C-12 (рис. 2.8) и к нему добавляется трактовый заголовок POH с образованием виртуального контейнера VC-12, затем с помощью указателя TU-12 индицируется положение VC-12 в поле TU-12. Запись потока 2 Мбит/с в контейнер C-12 требует согласования скоростей. Допускается три варианта отображения компонентных потоков: асинхронное, бит-синхронное и байт-синхронное. Варианты отображения устанавливаются операторами сети, причем по умолчанию используется асинхронное отображение.

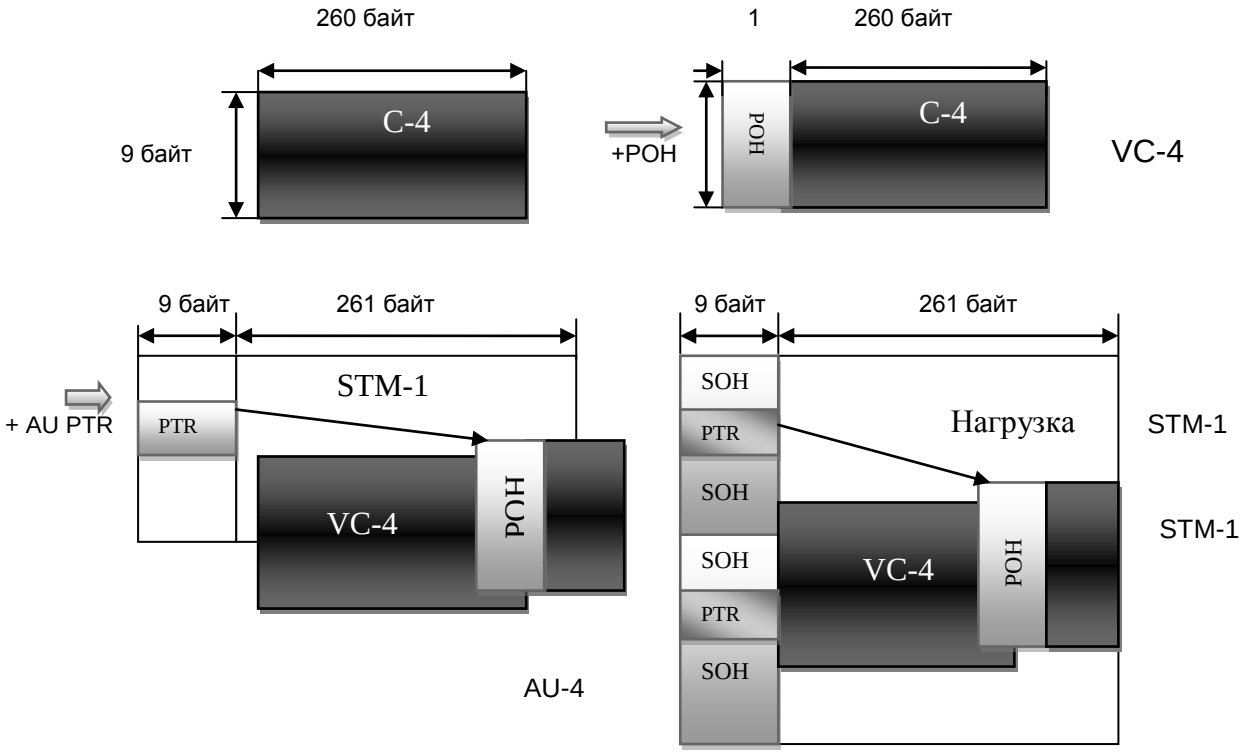
Как видно, в плавающем режиме создается четыре варианта реализации контейнера C-12, т. е. создается сверхцикл, содержащий четыре последовательных цикла VC-12, причем в каждом цикле к контейнеру C-12 добавляется по одному байту трактового заголовка POH виртуального контейнера VC-12 (рис. 2.8). Поэтому общий информационный объем трактового заголовка VC-12 составляет четыре байта, хотя к каждому из четырех VC-12 добавляется один байт.

С процедурой контейнирования связано разделение контейнеров, заголовков и маршрутов (трактов) на контейнеры верхнего уровня VC-3 и VC-4, и контейнеры нижнего уровня VC-11, VC-12 и VC-2. В нашей аллегории контейнер верхнего уровня соответствует вагону, а нижнего – ящику, и вполне понятно, что эти объекты неэквивалентны. Действительно, контейнеры верхнего уровня используются для передачи в своем составе либо нагрузки с высокой скоростью передачи (потоков 34 Мбит/с или 140 Мбит/с), либо контейнеров нижнего уровня. Т. е. в вагон могут быть загружены ящики с товаром, либо товар врассыпную. Последний случай соответствует нагрузке PDH высоких скоростей передачи.

Таким образом, не всегда процедура контейнирования реализуется по полной схеме рис. 2.9. Она сильно зависит от вида самой нагрузки. Например, если в качестве нагрузки выступает поток 140 Мбит/с, то никакой процедуры контейнирования нижнего уровня выполняться не будет, для загрузки сразу используется контейнер верхнего уровня. Вполне понятно, что в этом случае процедура формирования STM-1 будет проще (рис.2.10). Поток 140 Мбит/с соответствует контейнеру C-4. К контейнеру добавляется трактовый заголовок (название вагона), в результате формируется виртуальный контейнер верхнего уровня VC-4 (вагон). Добавление к заголовку указателя AU PTR (реестр у машиниста) формирует административный блок AU-4. Затем к полученному контейнеру добавляется секционный заголовок SOH (локомотив), и в результате получается синхронный транспортный модуль STM-1.

Из сказанного следует, что не всегда поток E1 может быть выделен из STM-1, а только в том случае, когда нагрузка контейнирована на нижнем уровне. В противном случае, например, в случае рис. 2.10 можно выделить только поток 140 Мбит/с. Высокая востребованность процедуры ввода/вывода потоков E1 на всех участках сети в настоящее время приводит даже к такому комбинированному

решению, когда поток PDH верхних уровней иерархии на входе в сеть разбирается, а загрузка осуществляется на уровне потоков E1 (рис.2.11).

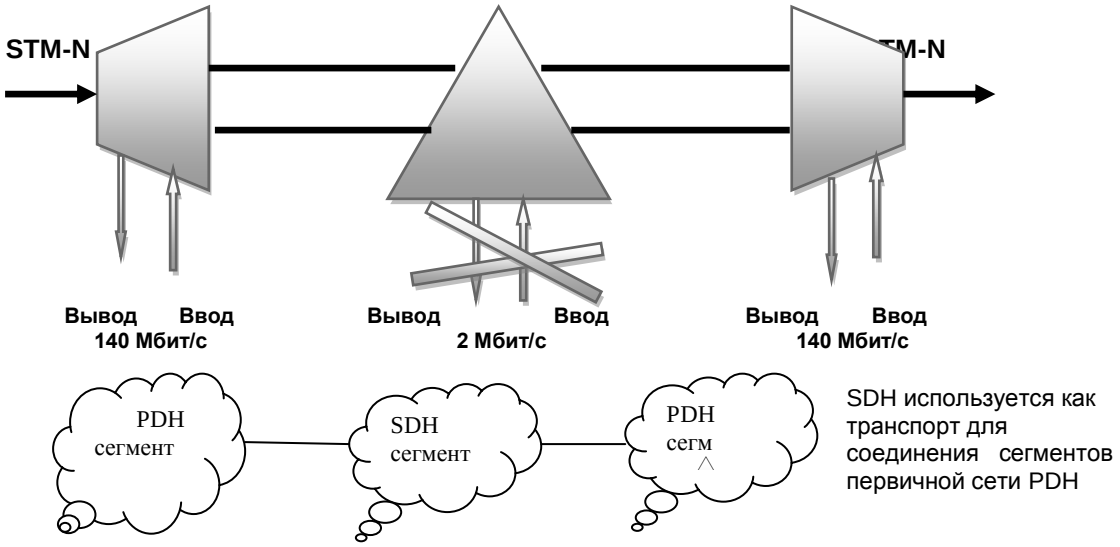


POH	Path Overhead	Трактовый заголовок
SOH	Section Overhead	Секционный заголовок
VC	Virtual Container	Виртуальный контейнер
AU	Administraitive Unit	Административный блок
PTR	Pointer	Указатель

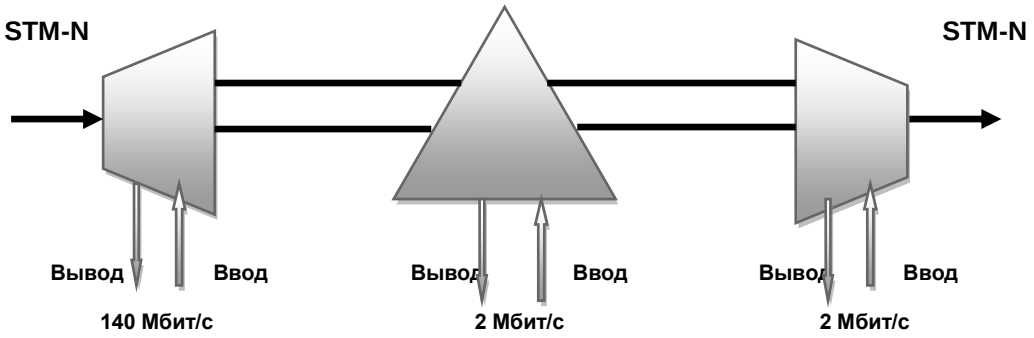
Рис. 2.10. Контейнирование потока 140 Мбит/с.

Такое решение называют шлюзовым мультиплексором, поскольку с точки зрения организации первичной сети такое устройство представляет собой точку преобразования одной технологии в другую, и оно может именоваться шлюзом. Наличие шлюзового интерфейса между сетями PDH и SDH позволяет, с одной стороны, обойтись без замены старого оборудования PDH, с другой стороны, использовать технологию SDH и все ее преимущества сразу после интерфейсного мультиплексора. Вполне понятно, что использование такого шлюзового мультиплексора оказывается невозможным в случае, если нагрузка потока PDH состоит не только из потоков E1, но и потоков более высокого уровня, например, 8 Мбит/с, так что сам принцип шлюзового мультиплексора актуален только для систем SDH, используемых в транспортной сети для приложений уровня E1.

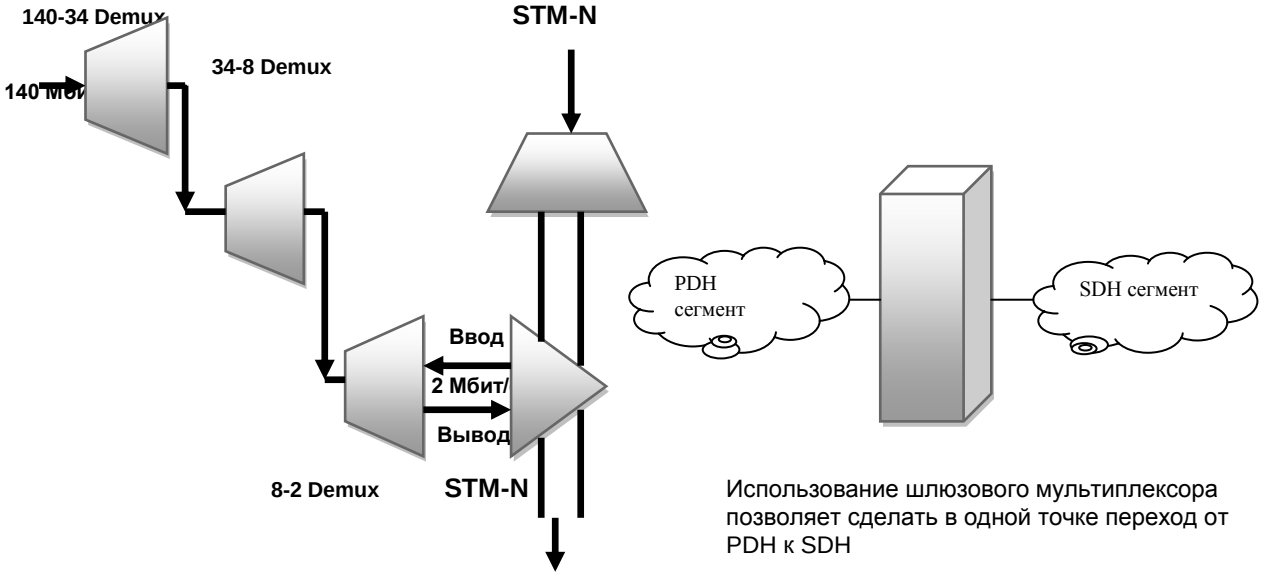
Схема переходного шлюзового мультиплексора особенно интересна в контексте новых направлений использования самой технологии SDH, а именно технологии «канально-разделенной SDH (Channelized SDH).



Вариант передачи потока 140 Мбит/с в виде контейнера С-4. Процедура ввода/вывода потока Е1 на промежуточном узле невозможна.



Вариант использования шлюзового мультиплексора 140М/2М. Процедура ввода/вывода потока Е1 на промежуточном узле возможна. На выходе системы передачи может быть набор потоков Е1.



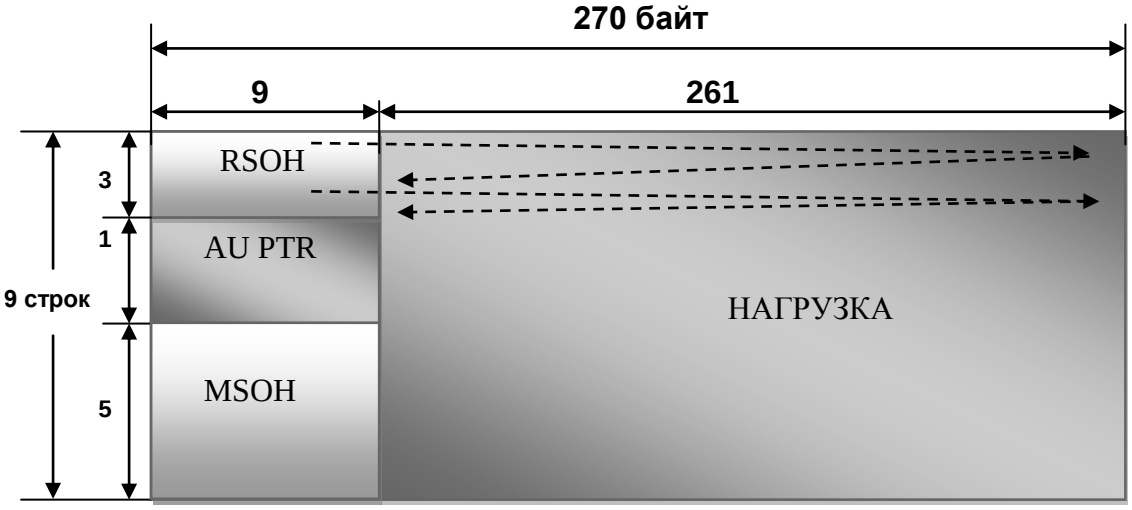
Реализация процедуры преобразования 140М/2М в шлюзовом мультиплексоре.

Рис. 2.11 Шлюзовой мультиплексор обеспечивает загрузку в сеть по потокам Е1.

2.2.3. Понятие виртуального контейнера.

Еще одно важное понятие, непосредственно связанное с технологией SDH, это понятие виртуального контейнера. Виртуальные контейнеры находятся в идеологической и технологической связи с контейнерами, рассмотренными в таблице 2.2, так что контейнеру С-12 соответствует виртуальный контейнер VC-12 (передача потока Е1), С-3 – VC-3 (передача потока Е3), С-4 –контейнер VC-4 (передача потока Е4).

Для правильного понимания структуры виртуального контейнера нужно понимать его матричную запись. На рис. 2.12 представлена матричная (логическая) структура синхронного транспортного модуля STM-1 с указанием его параметров и правил чтения записанной информации. Для удобства понимания нагрузка STM-1 здесь не специфицирована по структуре, т. е. не указан тип и размещение виртуальных контейнеров. .



SOH	Section Overhead	Секционный заголовок
PTR	Pointer	Указатель

Рис.2.12. Структура STM-1 и правило чтения его информации

Из рисунка видно, что логическая структура STM-1 представляется в виде матрицы, в которой поля разделены в соответствии с байтовой структурой. Всего STM-1 содержит 270 столбцов по горизонтали и 9 колонок по вертикали. Это означает, что общий объем цикла составляет 2430 байт или 19440 бит. При скорости в 155 Мбит/с такая информация передается чуть более 125 мкс.

Очевидно, что в реальном канале передачи не может передаваться никакая двумерная структура. В действительности поля передаются последовательно в соответствии с правилом чтения информации по стрелке, как показано на рис. 2.12. Так сначала передаются 9 байт заголовка регенерационной секции RSOH,

затем 261 байт нагрузки (это могут быть разные виртуальные контейнеры), затем снова 9 байт заголовка RSOH и т. д.

Но несмотря на чередование байтов заголовка и нагрузки в реальном процессе передачи, представление информации в виде двумерной матричной записи оказывается удобным и наглядным, поскольку заголовок SOH при такой записи расположен изолированно от поля нагрузки. Кроме того, двумерная запись цикла SDH позволяет в полной мере пользоваться понятием **поля** как выделенного пространства для функционально специализированной информации.

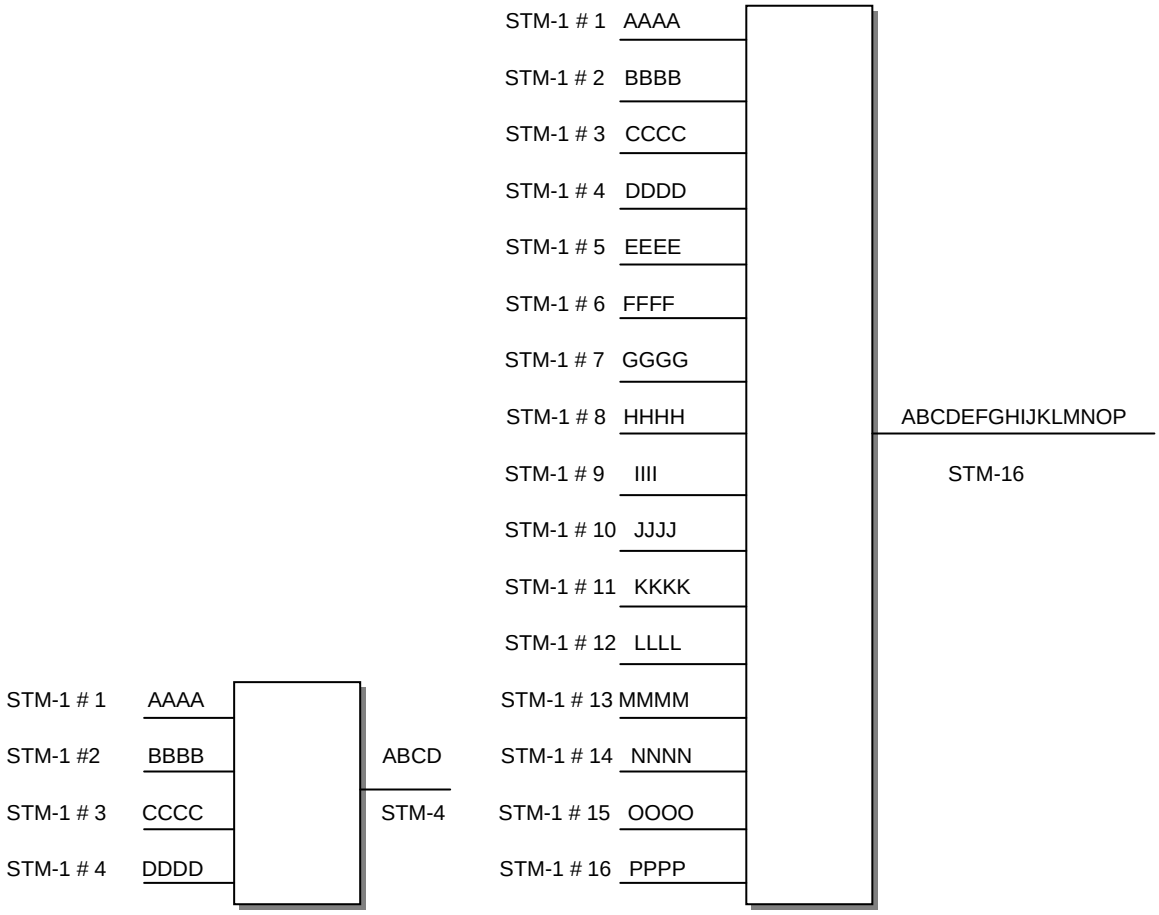
В дальнейшем при рассмотрении полей и заголовков мы будем следовать установившейся традиции удобного матричного представления данных цикла. Например, на рис. 2.10 представлены виртуальные контейнеры верхнего уровня VC-4 в поле нагрузки транспортных модулей STM-1. Причем VC-4 также представлены в виде матрицы, в которой заголовок рассматривается отдельно. И далее при рассмотрении заголовков и различных полей мы часто будем отделять заголовок от поля нагрузки. Необходимо только помнить о том, что в реальной системе передачи поле нагрузки неотделимо от заголовка и чередуется с ним в процессе передачи.

Матричное представление виртуальных контейнеров и транспортных модулей настолько прижилось в практике SDH, что и сами процессы преобразования сигналов в SDH ориентированы на сохранение удобства матричной структуры. В частности в этом смысле интересно рассмотреть процесс мультиплексирования 4 потоков STM-1 и формирование единого транспортного модуля STM-4 (рис. 2.13). Объединение потоков в системах SDH выполняется но основе байт-синхронного алгоритма, так что в потоке STM-N первый байт считывается с первого канала STM-1, второй – со второго STM-1 и т. д., что и показано на рис. 2.13. Из рисунка видно, что мультиплексирование не изменяет архитектуру матричного представления, т. к. в результате «столбцы» заголовков выстраиваются друг за другом, образуя заголовок транспортного модуля STM-N.

Сравнивая рис. 2.10 и 2.12, легко заметить, что логическая структура виртуальных контейнеров и транспортных модулей подобна. Логика построения самой технологии SDH оказывается единой для контейнера, виртуального контейнера и синхронног8о транспортного модуля. Все они представляют собой контейнеры разного названия. Это дает основание ввести для такого обобщенного виртуального контейнера одно понятие, распространяющееся на все структуры SDH.

Введя логическое понятие виртуального контейнера, можно сказать, что виртуальный контейнер представляет собой совокупность трех компонентов: контейнированной нагрузки, заголовка и указателя. Причем, под понятие виртуального контейнера подпадают виртуальные контейнеры нижнего уровня (VC-11, VC-12 и VC-2), виртуальные контейнеры верхнего уровня (VC-3, VC-4) и синхронные транспортные модули всех уровней STM-N. Виртуальный контейнер

верхнего уровня может состоять из контейнеров нижнего уровня, но не наоборот. Соответственно, транспортные модули STM-N могут в поле нагрузки содержать контейнеры верхнего и нижнего уровня или другие варианты наполнения.



Байт-синхронное мультиплексирование 4 потоков STM-1 в 1 поток STM-4

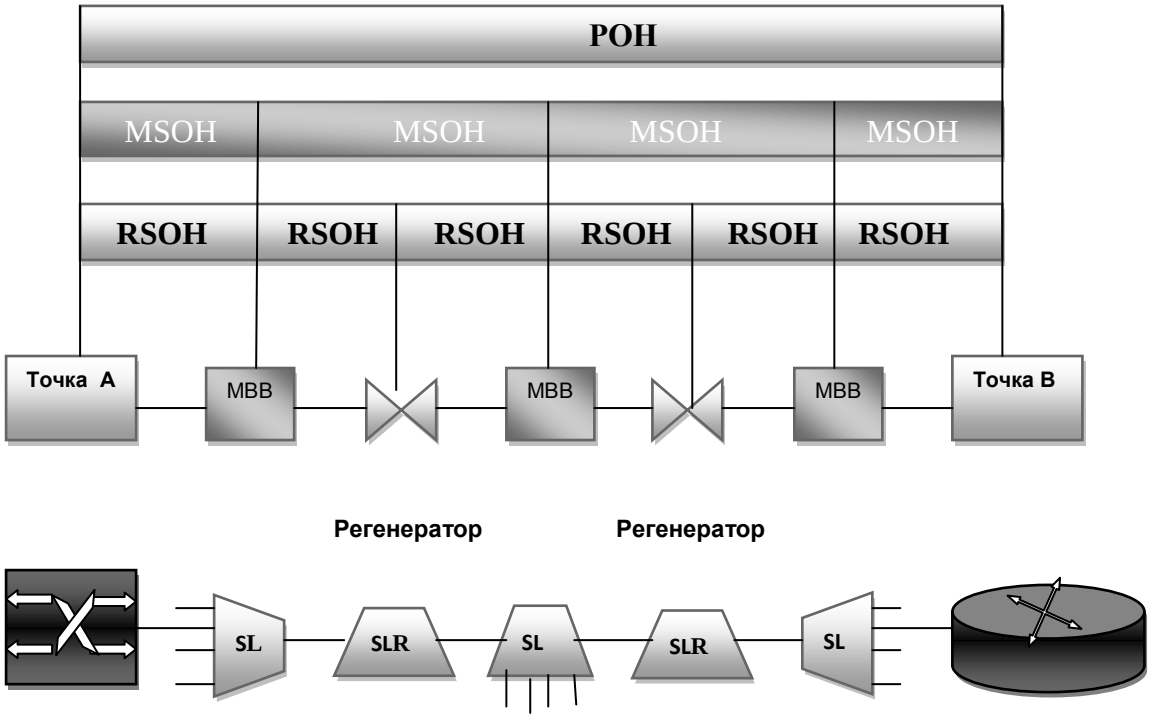
Байт-синхронное мультиплексирование 16 потоков STM-1 в 1 поток STM-16

Рис. 2.13. Синхронное мультиплексирование в иерархии SDH.

2.2.4. Понятие маршрута.

Еще одним ключевым понятием SDH является понятие маршрута. Классическая система SDH (технология SDH первого поколения) может быть представлена в виде совокупности транспортных секций: мультиплексорных секций и регенерационных секций (рис. 2.14). Тракт передачи от мультиплексора формирования STM-1 до мультиплексора разборки виртуальных контейнеров STM-1 и выводы нагрузки рассматривается обычно как маршрут.

В состав маршрута входят мультиплексоры ввода/вывода (MBB – ADM), составляющие мультиплексорные секции, регенераторы и коммутаторы (SDXC – Synchronous Digital Cross Connect), составляющие регенерационные секции (рис. 2.14). Рассмотрим более подробно разные типы устройств, используемые в системе SDH.



Коммутатор ATM **Маршрутизатор**

POH	Заголовок маршрута (трактовый)
MSOH	Заголовок мультиплексной секции
RSOH	Заголовок регенерационной секции
SOH	Секционный заголовок (MSOH + RSOH)
SL(R)	Регенераторы SDH (Synchronous Line Equipment)

Рис. 2.14. Модель транспортной системы SDH с несколькими секциями.

Как видно из рис.2.15, в состав сети SDH входят несколько типовых устройств:

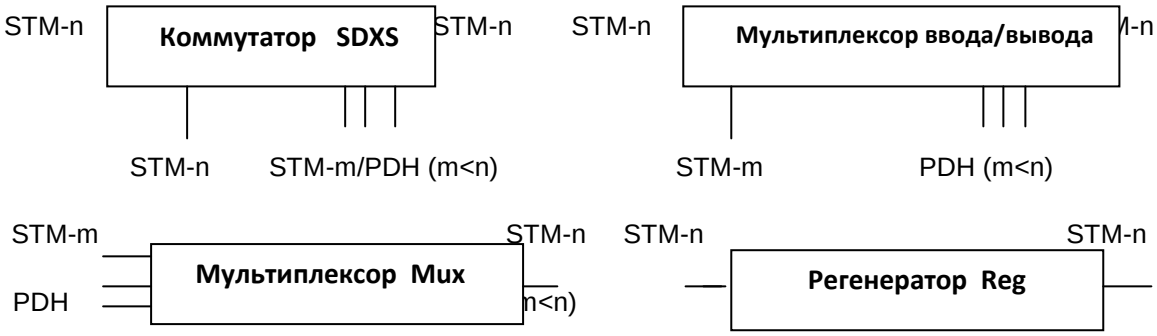


Рис. 2.15. Компоненты сети SDH.

Коммутаторы SDXC обеспечивают переключения на уровне потоков иерархий PDH и SDH. Обычно коммутаторы используются для оперативной

реконфигурации сети, что повышает ее надежность и живучесть, а также позволяет оперативно управлять ресурсами.

Мультиплексоры ввода/вывода (МВВ или ADM) являются ключевыми элементами сети SDH, поскольку обеспечивают загрузку и выгрузку потоков PDH в сеть SDH, формирование синхронных транспортных модулей STM-n и управление процедурами мультиплексирования/демультиплексирования.

Синхронные мультиплексоры MUX обеспечивают мультиплексирование нескольких потоков PDH или STM низкого уровня иерархии в потоки STM-n. Обычно MUX является составной частью ADM или SDXC.

Наконец, *регенераторы REG* выполняют функцию восстановления линейного сигнала STM-n при его передаче по сети SDH.

Очень важно понимание назначения каждого из указанных элементов системы и их место в структуре маршрута. Для облегчения понимания вновь обратимся к аллегории поезда. Если раньше мы рассматривали только процедуру ввода/вывода нагрузки в SDH, и, соответственно, аллегория сводилась к перрону, то теперь целесообразно рассмотреть весь маршрут следования нашего поезда. Как известно, этот маршрут включает в себя оконечные станции следования (на рис. 2.14 точки А и В), между которыми курсирует поезд, а также промежуточные станции, где осуществляется смена локомотива. Точки А и В не просто представляют собой оконечные точки маршрута, это еще и точки, и формируется и расформировывается весь состав, включая локомотив, вагоны, ящики, реестры.

Такое расширение аллегории, однако, не учитывает разницы между регенерационными и мультиплексорными секциями. Мультиплексор ввода/вывода соответствует станции с перроном, где стоит человек, осуществляющий загрузку и выгрузку полезных товаров в вагонах. При этом обновляются реестры (указатели), описывающие местоположение нагрузки (товара) в составе. Регенераторы могут трактоваться как узловые станции, где происходит смена локомотива для осуществления движения всего состава. Причем, как на перронах, так и на узловых станциях локомотив меняется. Соответственно, секции будут делиться на мультиплексорные и регенерационные. Мультиплексорная секция – это секция от мультиплексора до мультиплексора, а регенерационная секция – от регенератора до регенератора.

Если вернуться снова к рис. 2.14, то увидим, что маршрут представляет собой весь путь синхронного транспортного модуля STM-1 от точки его формирования до точки расформирования. Такие точки называются точками окончание (терминирования) маршрута. По пути следования STM-1 по маршруту ему встречаются регенераторы и мультиплексоры. Как уже отмечалось, маршрут делится на регенераторные и мультиплексорные секции. Основное назначение регенератора – это восстановление сигнала. Но в отличие от систем PDH, где большей частью используются регенераторы без логической структуры, в

системах SDH регенератор представляет собой также устройство, обеспечивающее работу с секционным заголовком, контроль четности и пр. При этом мультиплексор также выполняет те же функции и может считаться в этом смысле и регенератором, и мультиплексором. Следовательно, регенерационные секции входят в состав мультиплексорных секций, что и показано на рисунке.

Указанные связи между регенерационными и мультиплексорными секциями представлены в заголовке. На самом деле секционный заголовок SOH состоит из двух частей – мультиплексорной MSOH и регенерационной RSOH части. Заголовок действует только в рамках секции маршрута а затем переписывается. Регенераторы работают со своей частью заголовка RSOH и полностью ее переписывают при прохождении STM-1 через регенератор. Мультиплексоры переписывают и RSOH, и MSOH.

Кроме того существует трактовый заголовок маршрута POH, который формируется в точке начала маршрута и переписывается в точке конца маршрута. Следует отметить, что как существуют контейнеры верхнего и нижнего уровней, так существуют и маршруты верхнего (HP) и нижнего (LP) уровней, записанные в заголовки, соответственно, HP-POH и LP-POH. Это означает, что на нашей железной дороге путь вагона и путь ящика-посылки могут отличаться, что интуитивно понятно. Маршрут нижнего уровня LP обычно протяженнее маршрута верхнего уровня HP, что тоже интуитивно понятно. Достаточно сравнить протяженность трассы железной дороги с протяженностью доставки ящика «от двери до двери».

2.2.5. Мультиплексирование нагрузки и варианты загрузки VC.

Рассмотрим теперь мультиплексирование нагрузки в системе SDH. Под мультиплексирование мы будем понимать объединение различных логических структур SDH в единую структуру. Некоторые азы алгоритмов мультиплексирования уже были рассмотрены, а именно:

1. Нагрузка PDH загружается в систему SDH с использованием процедуры стаффинга;

2. Транспортные модули STM мультиплексируются по байт-синхронному алгоритму (рис.2.13).

Теперь рассмотрим варианты объединения виртуальных контейнеров в синхронный транспортный модуль STM-1. Один из вариантов образования STM-1 из потоков E1 был представлен на рис. 2.8. Однако технология SDH должна обеспечивать различные методы формирования STM-модулей из всех возможных типов нагрузки. Существует следующий граф, отражающий все возможные правила мультиплексирования в системе SDH (рис. 2.16).

Как уже отмечалось, процесс загрузки цифрового потока связан с использованием процессов выравнивания скоростей (битового стаффинга), активностью указателей, а также с использованием заголовков POH и SOH.

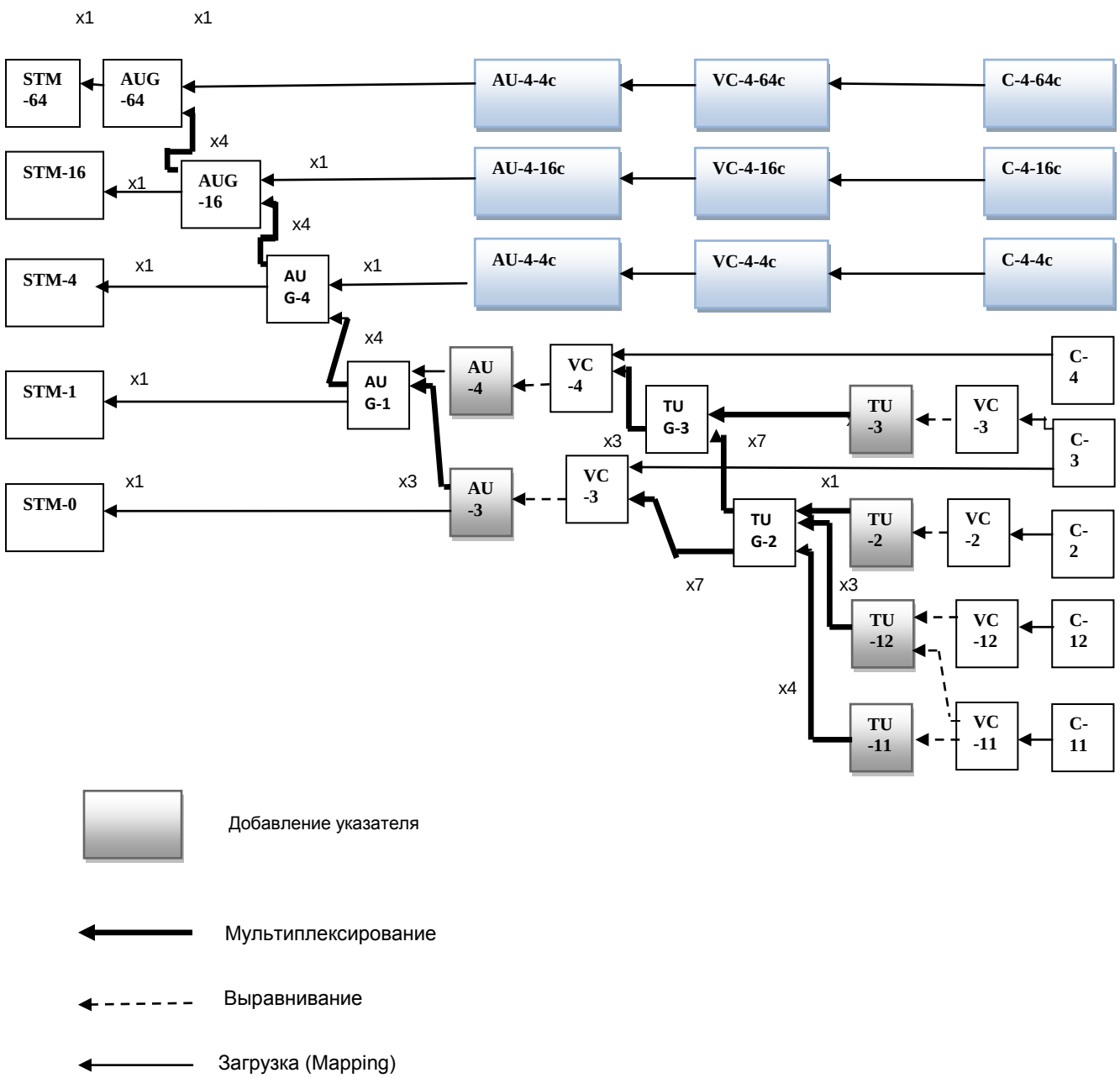


Рис. 2.16 Процесс загрузки цифрового потока в синхронные транспортные модули STM-N.

Здесь мы будем рассматривать только правила мультиплексирования нагрузки. Исходной точкой формирования STM-модулей являются обычные контейнеры, обозначаемые как C-n, где величина n зависит от скорости загружаемого потока. Каждый из контейнеров C-n проходит свой путь по графу до STM-n модуля.

В качестве первого примера рассмотрим контейнер С-4 и формирование из него транспортного модуля STM-16. С-4 преобразуется в VC-4 добавлением трактового заголовка. Добавление указателя преобразует его в административный блок AU-4. Затем происходит формирование административной группы мультиплексированием. Наличие символа x1 на стрелке означает, что в этом случае мультиплексирование тривиальное, из одного AU-4 формируется один AUG-1. Далее в соответствии с правилами мультиплексирования 4 группы AUG-1 объединяются в AUG-4. К полученной группе добавляется секционный заголовок, в результате мы получаем модуль STM-4. Полученный путь можно обозначить схемой мультиплексирования

$$C4 \rightarrow (VC-4) \rightarrow (AU-4) \rightarrow (AUG-1) \rightarrow (AUG-4) \rightarrow (STM-4)$$

Даже визуально по рис. 2.16 видно, что с загрузкой контейнеров нижнего уровня не все так просто. Существует, например, несколько путей преобразования С-12 в STM-1 (и потоки более высоких ступеней иерархии):

$$C12 \rightarrow (VC-12) \rightarrow (TU-12) \rightarrow (TUG-2) \rightarrow (VC-3) \rightarrow (AU-3) \rightarrow (AYG-1) \rightarrow (STM-1)$$

или

$$C-12 \rightarrow (TU-12) \rightarrow (TUG-2) \rightarrow (TUG-3) \rightarrow (VC-4) \rightarrow (AU-4) \rightarrow (AUG-1) \rightarrow (STM-1)$$

В первом случае схема загрузки называется «синхронный TU», т. к. в этом случае мультиплексирование выполняется на уровне TU, во втором - «структура TUG», т. к. мультиплексирование выполняется на уровне TUG-3.

Рис. 2.16 отражает современное понимание процессов мультиплексирования потоков PDH. Часть схемы, выделенная цветом, относится к процессам «конкатенации» нагрузки, когда в систему SDH загружаются потоки данных, не умещающиеся по размеру в контейнер С-4. Процесс конкатенации связан со всеми контейнерами типа VC-4-XXc.

2.2.6. Заголовки и поля.

Заголовки и указатели представляют собой очень важный компонент технологии SDH, т. к. сам процесс контейнирования нагрузки связан с их использованием. Здесь мы рассмотрим только структуру заголовков.

Описанное выше понятие маршрута и разделение маршрута на секции нашло отражение в формате заголовков системы SDH. Заголовки формируются в процессе создания синхронного модуля и используются всеми устройствами маршрута. Следовательно, в соответствии с моделью транспортной системы SDH (рис. 2.14) и самим понятием о маршруте существует 4 типа заголовков:

- заголовок маршрута нижнего уровня LP-POH;

- заголовок маршрута верхнего уровня HP-POH;

- заголовок регенерационной секции RSOH;

- заголовок мультиплексной секции MSOH.

Прежде чем рассмотреть структуру основных полей заголовков, целесообразно рассмотреть основные обозначения, которые существуют при описании заголовков в SDH. Логические поля, связанные с определенными процедурами в технологии SDH, обозначаются следующими буквами:

J – поле идентификаторов разного уровня;

B – поле контроля четности разного уровня;

K – поле, связанное с процедурой резервного переключения на разных уровнях;

C – поле, связанное с типом нагрузки в контейнерах;

H – поле указателей различного уровня.

Все перечисленные поля используются в различных заголовках, например J0 – идентификатор секционного заголовка, J1 – идентификатор маршрута верхнего уровня и т. д. Логическое обозначение полей заголовков идентичного типа одинаковыми буквами оказалось удобным и для понимания структуры полей, и для запоминания и идентификации полей.

По своей структуре поля заголовков могут быть трех видов: однобайтовые фиксированные поля, поля с расширенным размером и поля-каналы служебных данных. Наиболее простые поля – это поля фиксированного размера, Например, поле C2 заголовка HP-POH, обозначаемое кстати буквой C, определяет тип нагрузки. Значение 0000 0000 соответствует незагруженному контейнеру, а значение 0000 0001 – загруженному контейнеру с неспецифицированной нагрузкой. Но важно, что 1 байт поля C2 имеет законченный логический смысл. Такие поля легко идентифицируются, но имеют ограничение на объем передаваемой в них информации – только 1 байт.

Если объема одного байта оказывается недостаточно, то несколько полей идущих последовательно транспортных модулей или контейнеров SDH объединяются, создавая одно большое логическое поле. В качестве примера рассмотрим поле идентификатора J1 заголовка HP-POH (рис. 2.17). Здесь поле идентификатора маршрута верхнего уровня J1 передается в 16 последовательных циклах и состоит из 15-байтовой последовательности идентификаторов маршрута и 1 байта суммы CRC-7 для определения ошибок в

трассе маршрута. Идентификаторы маршрута представляют собой последовательность ASCII-символов в формате, соответствующем рек. ITU-T E.164, и используются для того, чтобы принимающий терминал получал подтверждение о связи с определенным передатчиком (идентификация точки доступа к маршруту). Как следует из рис. 2.17, 16 последовательных виртуальных контейнеров объединяются для формирования единого цикла, включающего в себя служебные биты, информационное наполнение (собственно, сам идентификатор) и поле контрольной суммы CRC-7 для проверки безошибочной передачи идентификаторов по сети. Это объединение 16 логических полей в одну логическую структуру расширяет возможности передачи информации. Можно назвать такой тип логического поля расширенным логическим полем.

Байты J1, номера битов								
1	2	3	4	5	6	7	8	
1	C	C	C	C	C	C	C	Байт 1
0	X	X	X	X	X	X	X	Байт 2
								:
								:
0	X	X	X	X	X	X	X	Байт 16
								CCCCCCC – контрольная сумма CRC7 предыдущего цикла XXXXXXX – идентификатор точки доступа к маршруту (кодирование ASCII)

Рис. 2.17. Формирование составного логического поля идентификатора J1.

Поля-каналы передачи данных представляют собой непрерывный процесс объединения логических полей заголовков. Например, на рис. 2.18 представлен секционный заголовок, в состав которого несколько полей серии D – поля формирования служебного канала. При передаче потока STM-1 по сети SDH данные передаются в виде синхронных транспортных модулей. Каждый из них состоит из секционного заголовка и нагрузки. Это означает, что через каждые 125 мкс поле D1 размером в 1 байт повторяется. Если в каждое из полей D1 помещать определенные данные, формируется канал передачи данных, который получил название DCC (Data Communication Channel). Всего для DCC предусмотрены 12 байтов заголовка (D1 – D12). Различают DCCR с общей скоростью передачи 192 кбит/с (по байтам D1 – D3) и DCCM с общей скоростью передачи 576 кбит/с (по байтам D4 – D12). На сети СЦИ один и более сетевых элементов (узлов) могут

быть оборудованы Q-интерфейсами, по которым обеспечивается соединение с системой управления. Для обмена данными внутри системы управления могут использоваться оба канала DCC.

9 байтов

RSOH

AU pointer

9 строк

MSOH

A1	A1	A1	A2	A2	A2	J0		
B1			E1			F1		
D1			D2			D3		
H1	H1	H1	H2	H2	H2	H3	H3	H3
B2	B2	B2	K1			K2		
D4			D5			D6		
D7			D8			D9		
D10			D11			D12		
S1	Z1	Z1	Z2	Z2	M1	E2		

A1, A2 - байты цикловой синхронизации, идентифицируют начало цикла STM-1
B1. B2 – контроль четности
J0 – идентификатор регенерационной секции
D1 – D12 – служебный канал управления
E1, E2 - канал голосовой служебной связи
F1 – зарезервирован под канал передачи данных управления
K1, K2 – управление резервным переключением
M1 – подтверждение ошибки по контролю четности
S1 – индикатор качества синхронизации
Z1, Z2 – резервные байты

зарезервировано для национального использования

зависящие от среды передачи байты

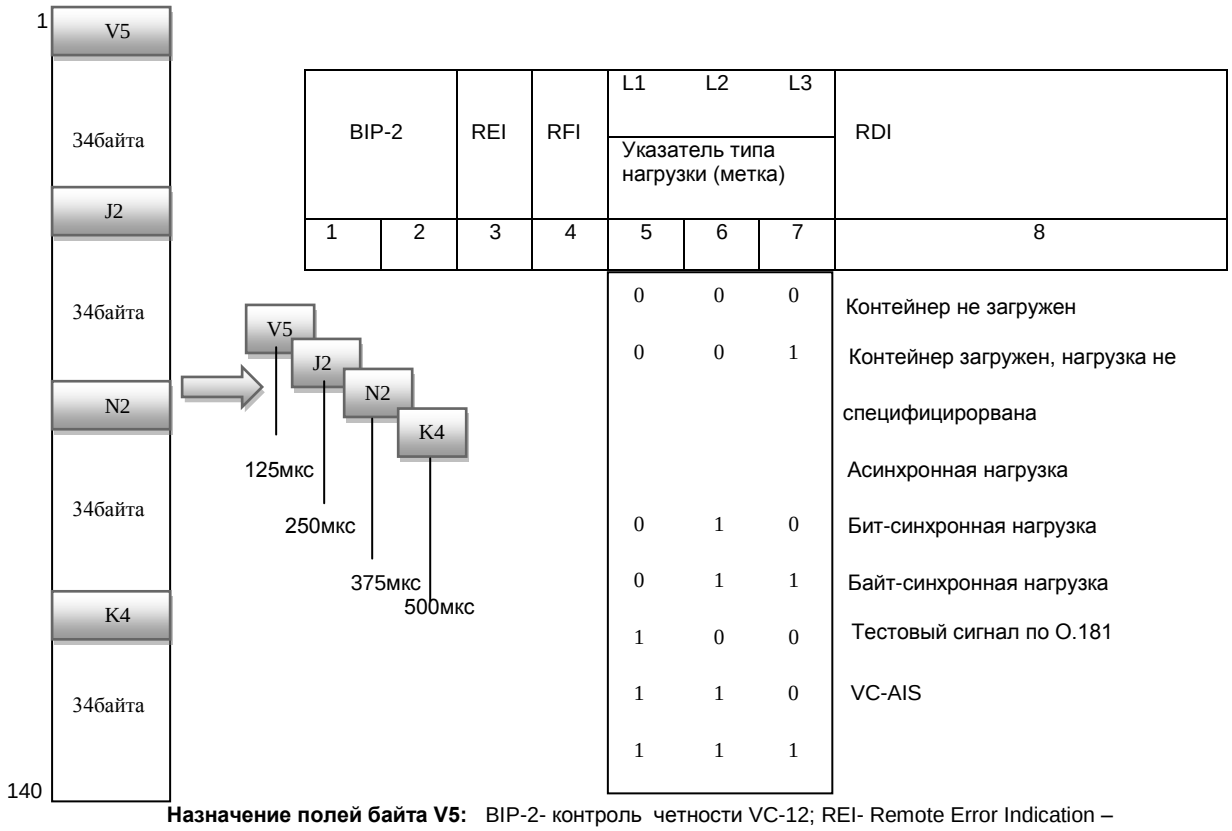
Рис. 2.18. Структура секционного заголовка

Таким образом, если в заголовке содержится то или иное поле, это не означает, что мы видим законченный логический объект, это может быть только часть логического поля или обозначение местоположения целого канала передачи служебной информации.

Кроме секционного заголовка, как уже отмечалось, существуют трактовые заголовки: заголовок маршрута верхнего уровня HP-POH (рис. 2.19) и заголовок маршрута нижнего уровня LP-POH (рис. 2.20).

J1	Идентификатор маршрута
B3	Мониторинг качества (по закону BIP-8)
C2	Указатель типа полезной нагрузки
G1	Подтверждение ошибок передачи
F2	Сигналы обслуживания
H4	Индикатор сверхцикла
F3	Сигналы обслуживания
K3	Автоматическое переключение
N1	Мониторинг взаимного соединения (TCM)

Рис. 2.19. Структура заголовка HP-POH.



Назначение полей байта V5: BIP-2- контроль четности VC-12; REI- Remote Error Indication – сообщение подтверждения ошибки BIP-2 (ощибка удаленного конца); RFI –Remote Fault Indication – Неисправность на удаленном конце; RDI- Remote Defect Indication – Индикация дефекта на удаленном конце – передается при потере цикловой синхронизации.

Рис. 2.20. Структура заголовка LP-POH со структурой байта V5.

Для работы системы, безусловно, важны все заголовки. Но не все из них имеют эксплуатационную ценность. Мы рассмотрим основные информационные поля заголовков в контексте тех процессов в системе, с которыми они связаны, и не будем разделять при этом заголовки на секционный.и заголовки маршрутов верхнего и нижнего уровня. Будем рассматривать наиболее ценные поля заголовков применительно к связанным с ними процессам в системе SDH.

2.2.7. Идентификаторы J-x.

Рассмотрение начнем с идентификаторов J0, J1, J2 (J-x). Из предыдущих рисунков видно, что эти идентификаторы присутствуют на всех трех уровнях SDH:

- на секционном уровне J0 в подзаголовке RS-SOH;

- на уровне маршрута верхнего уровня J1;

- на уровне маршрута нижнего уровня J2.

Как показано на рис. 2.17, информационное поле идентификаторов формируется из 16 байтов и представляет собой расширенное составное поле. Рассмотрим функцию, выполняемую этими идентификаторами. Из принятой нами аллегории ясно, что помимо реестров местоположения ящиков и вагонов, все компоненты железнодорожного состава (локомотив, вагон и ящики) имеют собственные имена, иначе реестры не работают. Эти имена и есть идентификаторы соответствующих логических частей синхронного транспортного модуля. Например, на поезде может быть написано его название, на вагоне – номер вагона, а на ящике – наименование груза. Здесь важно то, что локомотив меняется на каждой узловой станции, вагон следует из конца в конец рельсового пути, а ящик доставляется до дверей грузополучателя. Каким бы извилистым не был путь ящика, надпись на нем (идентификатор J2) будет написана в пункте отправления и стерта в пункте назначения. Вагон может перевозить по сети разные грузы, на перронах станций ящики в них могут заменяться в режиме реального времени, но надпись на вагоне будет написана в пункте отправления, а стерта в пункте назначения. Такова реальная роль идентификатора.

Переходя к технологии, рассмотрим идентификаторы подробнее. Из вышесказанного можно сделать вывод, что идентификаторы J-x представляют собой уникальные номера соответствующих частей маршрута внутри SDH: секции, маршрута верхнего уровня HP и маршрута нижнего уровня LP. Составное поле идентификатора J-x, состоящее из 16 последовательных байт достаточно велико, чтобы дать волю фантазии оператора в придумывании названий.

Процесс прописывания имени маршрута, как уже понятно, делается на всех трех уровнях: секционном, маршрутов верхнего и нижнего уровней. Сделано это по понятным причинам. В общем случае маршрут верхнего уровня может включать в себя несколько секций, а маршрут нижнего уровня может проходить по нескольким «трубам» маршрутов верхнего уровня. Основная процедура управления первичной сетью сводится к тому, что оператор должен дать канал от точки А до точки В. Выполняя эту функцию, оператор и устанавливает маршрут виртуальной «трубы» по совокупности доступных ему сетей, прописывая единое

имя данной «трубы» - идентификатор маршрута верхнего уровня J1. Внутри же трубы могут быть несколько «ручейков», каждый из которых имеет право на свое индивидуальное имя. Когда труба или определенный ручеек становятся ненужными в сети, они исчезают из общей топологии сети, а соответствующие идентификаторы удаляются.

Идентификатор J0 располагается в регенерационной секции заголовка SOH. Как уже отмечалось, именно эта секция заголовка переписывается при передаче STM-модуля через любые транзитные узлы, как мультиплексоры, так и регенераторы, тогда как подзаголовок MSOH переписывается только на мультиплексорах. По этой причине внутри MSOH идентификатор отсутствует, он просто не нужен.

Идентификатор J1 представляет собой имя маршрута верхнего уровня и формируется при создании маршрута верхнего уровня. Аналогичная ситуация с контейнером нижнего уровня.

Любые процессы ввода/вывода нагрузки, мультиплексирования и демультиплексирования на всех уровнях требуют от устройств в составе сети SDH работы с идентификаторами. Нарушения и ошибки при передаче идентификатора останавливают работу соответствующего уровня маршрута. Например, если сеть B ждет от сети A контейнер VC-4 с идентификатором J1=33333, а получает контейнер с идентификатором J1=33332, то контейнер не пропускается в сеть B.

На самом деле внутри одной сети идентификаторы не могут вызвать проблем. Дело в том, что система управления формирует маршрут любого уровня, как правило, автоматически, так что все сетевые элементы программируются с требованием одинаковых идентификаторов на всем маршруте и на входе в сетевой элемент. Проблемы с идентификаторами могут возникать только в случае составного маршрута, проходящего через несколько сетей (рис. 2.21). Внутри однородной сети наличие системы управления (Система управления 1) гарантирует от неисправностей в части идентификаторов маршрутов, но в случае составного маршрута проблема может возникнуть в связи с разницей в данных в точке объединения сетей. На рисунке коммутатор ожидает значение идентификатора J1=333, но вместо этого получает J1=332 и останавливает формирование маршрута на входе в сеть SDH2. В этом случае контейнер верхнего уровня оказывается незагруженным. Поскольку идентификатор J1 от сети SDH1 формируется системой управления 1, а таблица маршрутизации коммутатора формируется системой управления 2, то налицо конфликт данных от разных систем управления.

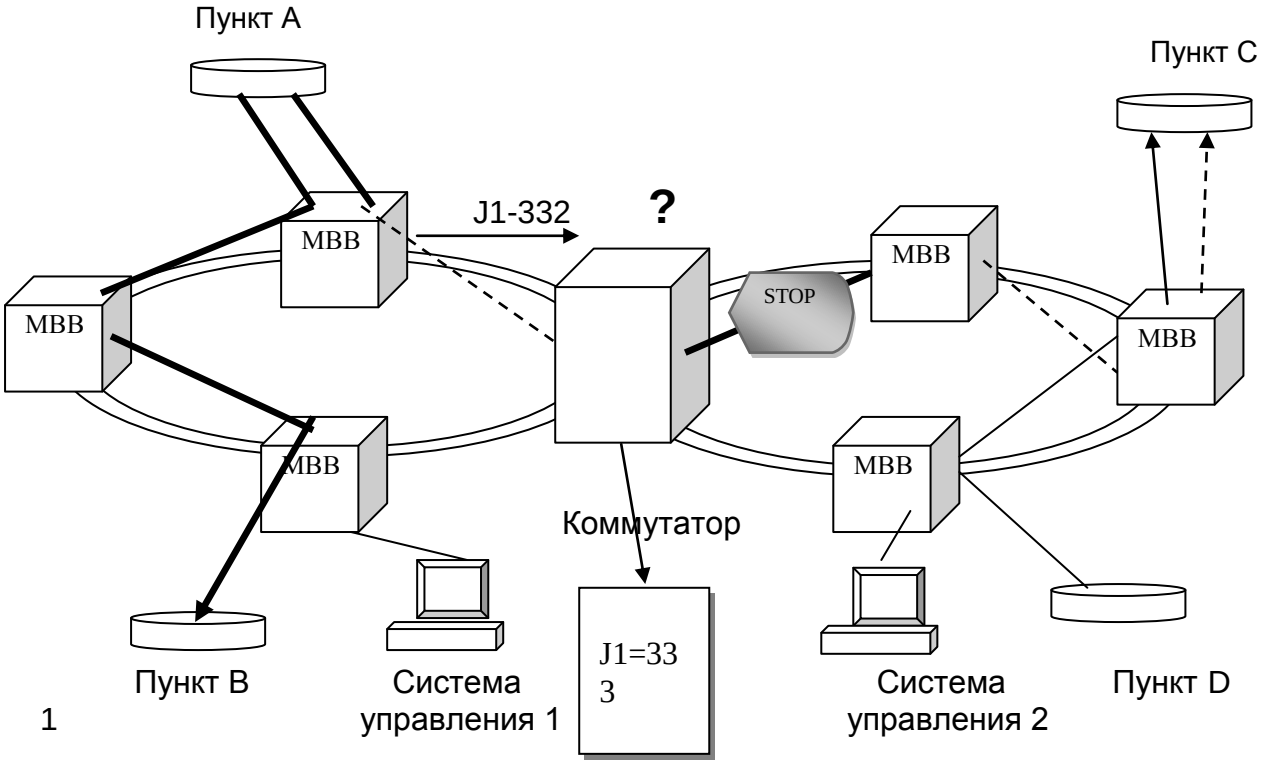


Рис. 2.21. Проблема идентификаторов может проявиться при составном маршруте

Хотя на первый взгляд проблема кажется надуманной, в реальной практике она очень актуальна. Кажется, почему бы операторам систем управления 1 и 2 не сравнить результаты и не прописать маршрут верхнего уровня из конца в конец сети так, как этого требует технология. Но это не всегда возможно, мешают разные форматы данных в разных системах управления и простая неаккуратность. Например, оператор сети SDH1 к названию «Маршрут №4» в конце добавляет пробел. Этот пробел с первого взгляда не виден, т. к. в ASCII кодах на экране системы управления мы видим по-прежнему «Маршрут № 4» и привычно соглашаемся, что это тот же идентификатор, что и в сети SDH2. Но в 16-ричном представлении эти идентификаторы разные.

Это случай нерадикального сбоя в системе. На рис. 2.21 видно, что из пункта А в пункт В маршрут устанавливается без проблем, также и из С в D, но между В и С маршрута нет. Дело в том, что идентификатор маршрута – индивидуальное имя маршрута в сети SDH, тогда понятно, что один маршрут от В к С может не устанавливаться, хотя все другие будут существовать и работать. Эта ситуация соответствует «нерегулярному дефекту», а именно такие ситуации наиболее сложно вычислить и устранить в процессе эксплуатации.

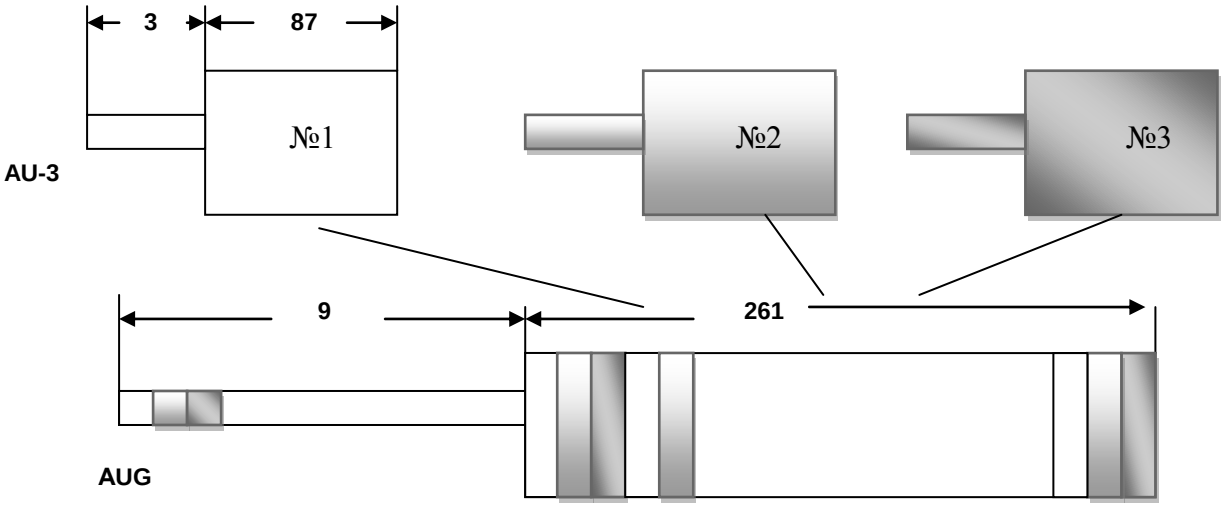
2.2.8. Указатели – поля Нх.

Указатели обозначаются в заголовках, как байты Н. Они выполняют в технологии SDH две основных функции:

- обеспечение быстрого поиска и доступа к нагрузке;

- обеспечение процедур выравнивания и компенсации рассинхронизации передаваемых потоков.

Здесь мы рассмотрим только первую функции, а вторую оставим для главы, посвященной вопросам синхронизации, явлению джиттера в системах SDH и пр. итак основным назначением указателей, определившем их наименование, является обеспечение доступа к нагрузке. В принятой нами аллегории указатели = это реестр вагонов у машиниста и список ящиков у проводника вагона, что соответствует указателям административного блока AU и трибутарного блока TU. Присоединение указателей и формирует на самом деле из контейнера нижнего уровня трибутарный блок, а из контейнера верхнего уровня – административный. В матричном виде отображение административного блока выглядит не очень красиво (рис. 2.22), но, когда к структуре AUG добавится секционный заголовок, образуется компактный синхронный транспортный модуль в виде прямоугольника.



. Рис. 2.22. Административный блок –
это виртуальный контейнер + поле указателей.

Функция указателей по идентификации местоположения нагрузки является очень важной, поскольку именно с ней связано основное преимущество технологии SDH – отсутствие необходимости пошагового мультиплексирования/демультиплексирования. Указатели административных блоков AU PTR и блоков нагрузки TU PTR обеспечивают прямой доступ к загруженному в синхронный транспортный модуль потоку на любом уровне (рис. 2.23).

Механизм организации доступа к нагрузке с помощью указателей легко воспринимается с помощью «аллегории книги». Когда мы ищем информацию в книге, мы сначала открываем содержание и ищем номер страницы, а затем

открываем страницу и ищем на ней нужный раздел или абзац. В системе SDH поиск контейнера нижнего уровня выполняется так же. Сначала сетевой элемент (мультиплексор) исследует содержимое административного указателя AU PTR (содержание), где указывается местоположение контейнера верхнего уровня (страница) в поле нагрузки (вся книга). Затем анализируется указатель трибутарного блока TU PTR (страница), указывающего на местоположение контейнера нижнего уровня (абзаца, слова, раздела) в контейнере верхнего уровня (страница).

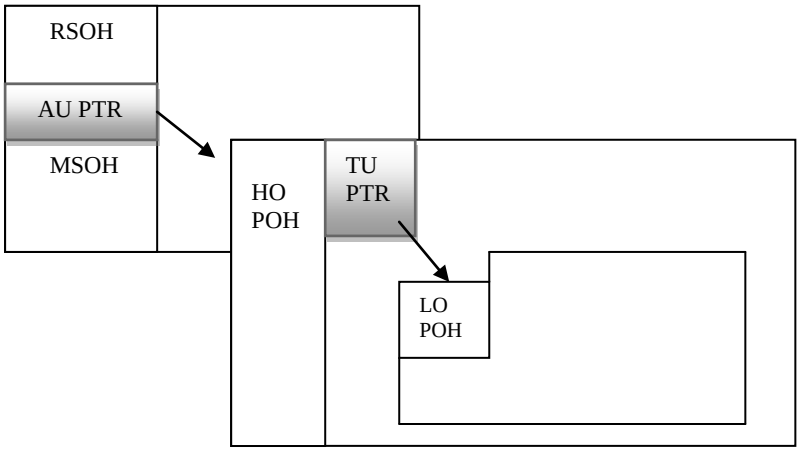


Рис. 2.23. Механизм организации прямого доступа к нагрузке.

Рассмотрим принцип работы указателей на примере трибутарного блока TU-12 и административного блока AU-4.

Указатель трибутарного блока TU-12.

Принцип работы указателя в трибутарном блоке TU-12 приведен на рис. 2.24.

Значение указателя TU-12 в составе байтов V1 и V2 отмечает начало (байт V5) виртуального контейнера VC-12 в поле нагрузки трибутарного блока. Контейнер VC-12 размещается, начиная с некоторой позиции (байта) от 0 до 139 того блока, к которому относятся байты указателя, и заканчивается через 140 байт после своего начала уже в поле нагрузки следующего трибутарного блока.

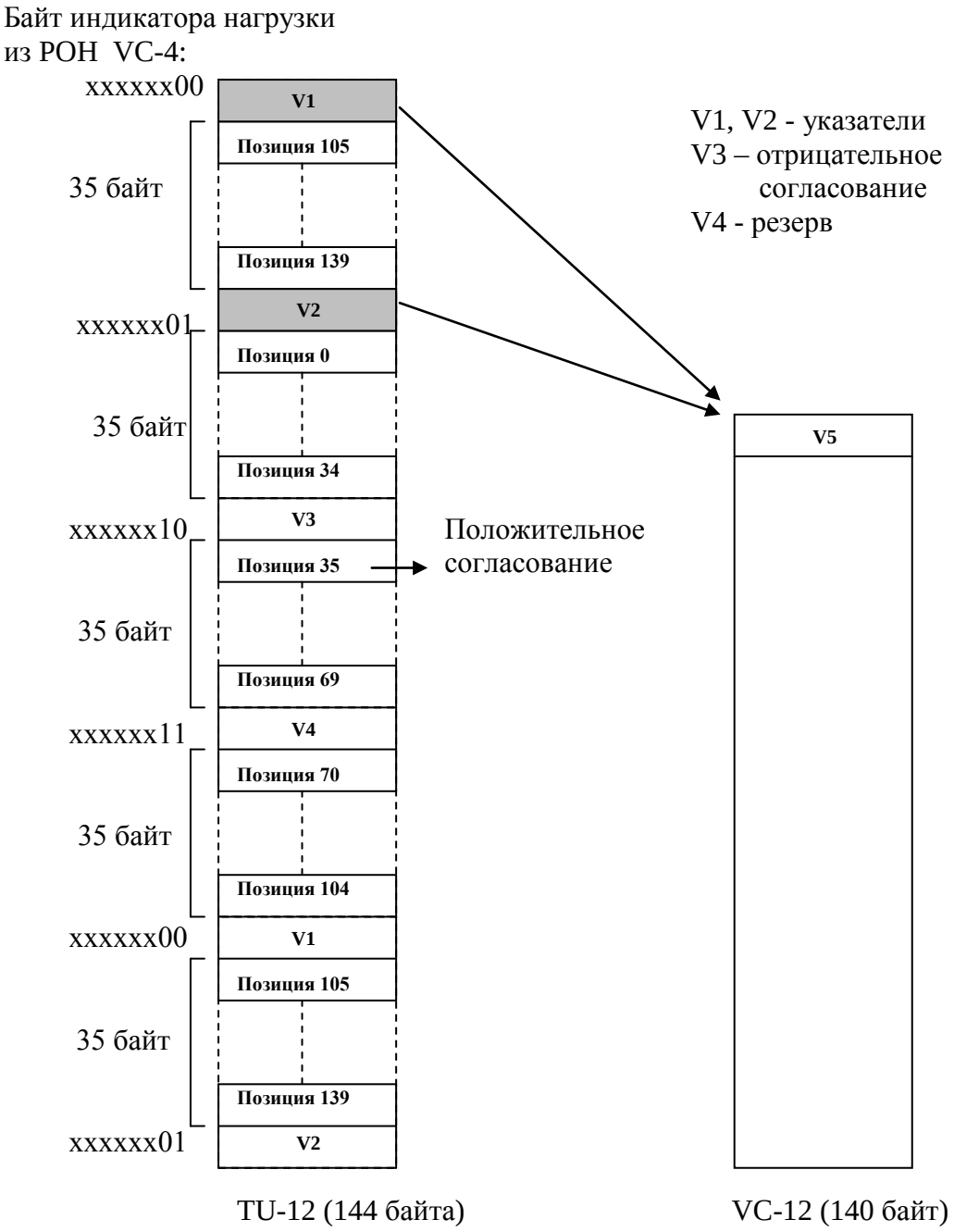


Рис. 2.24. Начало VC-12 в поле нагрузки TU-12.

Назначение бит указателя:

Байт V1	**N**	**N**	**N**	**N**	**S**	**S**	**I**	**D**

Байт V2	**I**	**D**	**I**	**D**	**I**	**D**	**I**	**D**

Биты N (флаг новых данных NDF) принимают значение 1 0 0 1, если флаг активен, и 0 1 1 0, если флаг не активен.
Биты S служат для индикации типа трибутарного блока. Например, если SS имеют величину 1 0, то это означает, что передается блок VC-12.
Биты I и D (10 бит) определяют величину указателя, которая может меняться от 0 до 139, и, кроме того, служат для указания о типе согласования. На отрицательное согласование указывает инверсия 5 бит D, а на положительное согласование – инверсия 5 бит I. Инверсия 5 бит предусматривается с целью защиты от ошибок по мажоритарному принципу.

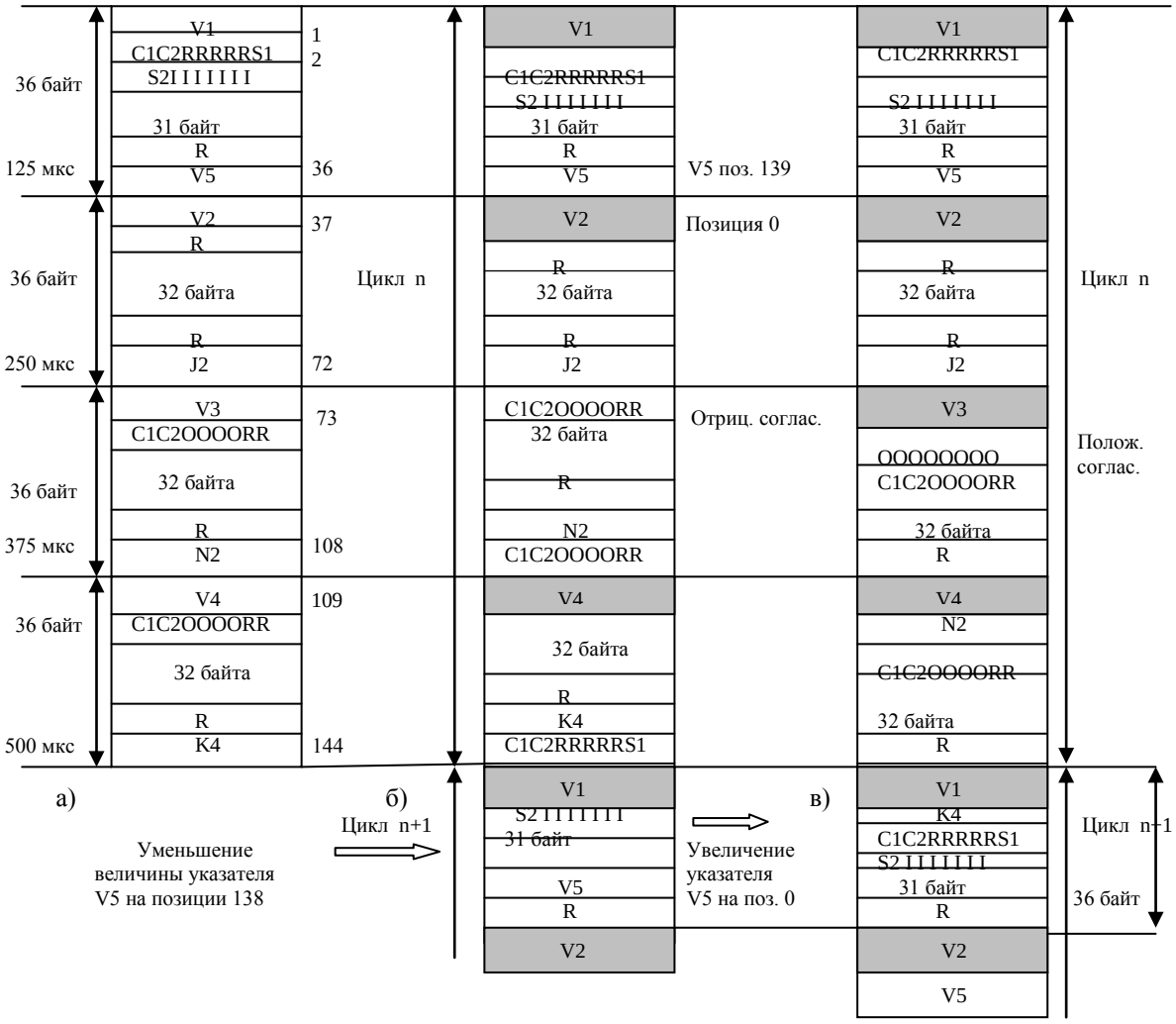


Рис. 2.25. Характерный пример работы указателя TU-12.

Кроме того, байты указателя могут передавать информацию об индикации аварийного состояния AIS – на позициях всех бит байтов V1 и V2 передаются 1, и информацию о состоянии конкатенации (сцепки) трибутарных блоков – в этом случае флаг активен, а биты I и D имеют значение 1.

Рассмотрим работу указателя трибутарного блока TU-12 на характерном примере, когда начало виртуального контейнера VC-12 (трактовый заголовок – байт V5) находится на 139 позиции от указателя (рис. 2.25). На рис 2.25 а) показан случай, когда выравнивание (согласование) не производится. Выравнивание с помощью байта V3 производится по отношению к предыдущему циклу n. Оно может быть отрицательным (рис. 2.25 б), когда для размещения информационных данных используется поле V3, и все последующие байты сдвигаются вперед. В этом случае начало VC-12 в следующем (n+1) сверхцикле TU-12 переходит на 138 позицию от указателя (байта V2). При положительном выравнивании (рис. 2.25 в) информационные данные не записываются в байт, следующий за V3, и все последующие байты сдвигаются назад, поэтому начало VC-12 (байт V5) в (n+1)-ом цикле TU-12 переходит на позицию 0 относительно следующего указателя.

Указатель административного блока AU-4

Размещение и структура AU PTR приведены на рис. 2.26, а принцип его работы подробно описан в главе 3, посвященной проблемам синхронизации.

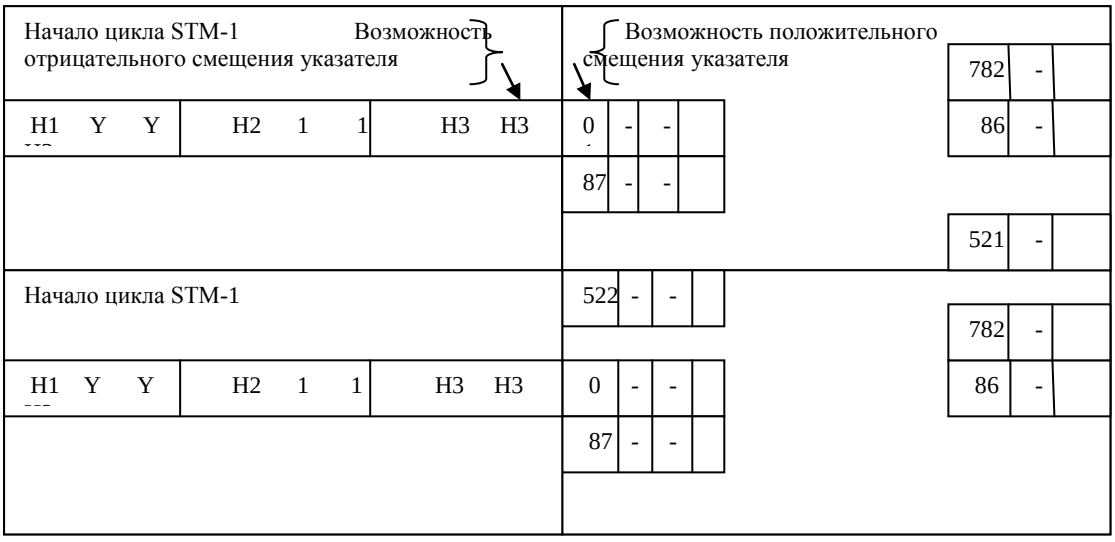


Рис. 1.22. Структура указателя AU-4.

Начало каждого контейнера VC-4 идентифицируется номером, соответствующим положению этого контейнера в поле нагрузки. Каждое такое положение (или ячейка положения) включает в себя по 3 байта. Ячейка с номером 0 следует непосредственно за 9 байтами указателя в составе SOH STM-1. Стандартом предусмотрено до 782 3-байтовых ячеек в поле нагрузки.

Таким образом указатель обеспечивает индикацию положения виртуальных контейнеров. Механизм формирования указателей обратен к механизму поиска нагрузки.

Схематически его можно представить рис. 2.27.

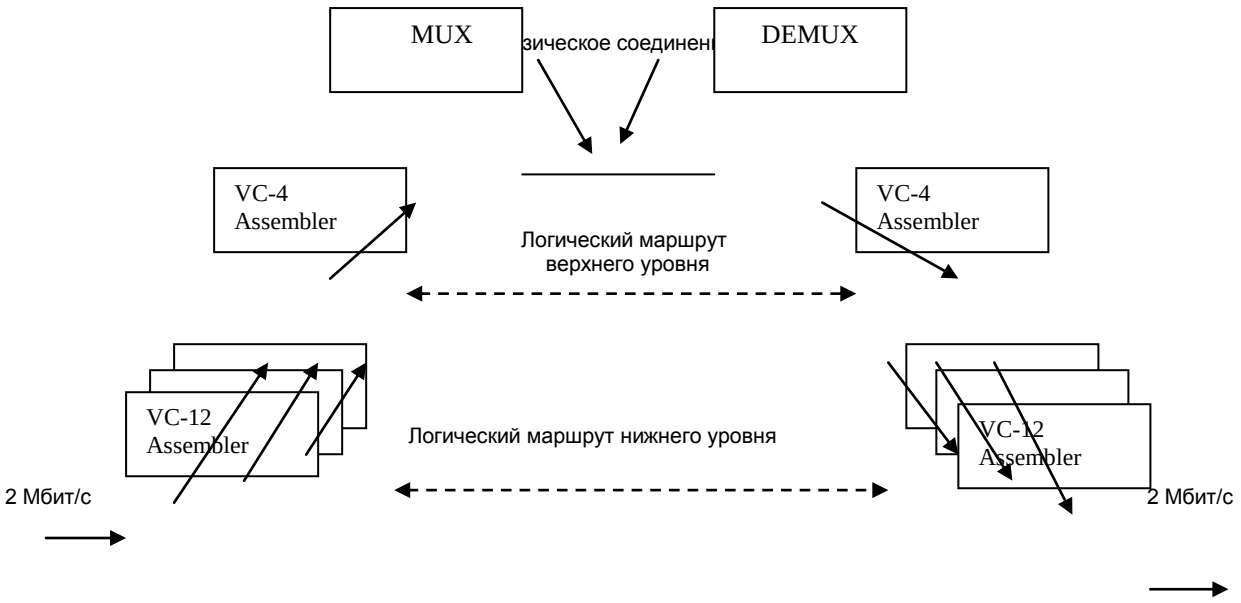


Рис. 1.23. Структура присвоения/поиска, формирование сигнала SDH.

Действие указателя

Принципы действия указателя могут быть обобщены следующим образом:

1). В процессе обычной работы указатель отмечает начало виртуального контейнера VC-n в поле логического цикла административного блока AU-n. Кодовое слово флага новых данных представлено последовательностью <0110>;

2). Величина указателя может быть изменена только выполнением операций 3, 4 или5;

3). Если требуется положительное выравнивание, в текущем значении указателя осуществляетс инверсия бит I и последующие позиции в поле нагрузки, отведенные для положительно согласования, занимаются наполнителем.

Значение следующего указателя увеличивается на одну единицу. Если величина предыдущего указателя была максимально возможной, то значение седующего указателя принимается равной нулю. Не допускается изменение величины указателя в течение последующих трех циклов;

4). Если требуется отицательное выравнивание, в текущем значении указателя производится инверсия D бит и позиции в поле указателя, отведенные для отрицательного выравнивания, занимаются полем нагрузки (информационными битами). Значение следующего указателя уменьшается на единицу, Если величина предыдущего указателя равнялась нулю, то значение следующего указателя принимается равным максимальному. Не допускается изменение величины указателя в течение последующих трех циклов;

5). Чтобы предотвратить случайные изменения положения контейнера VC-n в поле нагрузки, новая величина указателя передается вместе с флагом новых данных <1001> NDF в цикле, в котором происходит процесс выравнивания. После этого контейнер VC-n в поле нагрузки занимает новое положение, а новая величина указателю присваивается, начиная со следующего цикла.

2.2.9. Топология сети и резервирование – байты К.

К современной цифровой первичной сети предъявляются повышенные требования в части надежности. Поэтому современные первичные сети строятся с использованием резервных трактов и коммутаторов, выполняющих оперативное переключение в случае неисправности хотя бы на одном из каналов. Для этого в состав системы передачи включаются цепи резервирования мультиплексной секции (Multiplex Section Protection - MSP). В сети SDH осуществляется постоянный мониторинг параметров ошибок (процедура контроля четности BIP) и параметров связности.

В случае значительного ухудшения качества передачи в мультиплексной секции выполняется оперативное переключение (Automatic Protection Switching - APS) на резервную мультиплексную секцию. Это переключение выполняется соответствующими коммутаторами. По типу резервирования различаются коммутаторы APS с архитектурой 1 + 1 и 1 : n. В первом случае при выходе из строя важного блока или узла, например, кросс-коммутатора происходит переключение на резервный. Аналогичное переключение осуществляется при защите мультиплексной секции по схеме 1 + 1 в линейной топологии. Во втором случае, при выходе из строя одного из n менее важных блоков, например, платы компонентных потоков происходит переключение на резервирующую ее плату.

Рассмотрим теперь методы резервирования в сетях SDH кольцевой топологии. Для этого применяются байты К, используемые для резервного переключения. Всего существует 4 типа байтов К, соответственно К1, К2, К3 и К4. С помощью этого достигается высокая гибкость в части резервирования, а именно, резервное переключение осуществляется на всех уровнях SDH: на секционном уровне и на уровне маршрутов. Эта ситуация напоминает обеспечение непотопляемости судна – отдельно проектируется контур защиты отсека и отдельно каюты, в результате реализуется практически непотопляемое судно.

Если по пути следования маршрут верхнего уровня обрывается, происходит переход на резерв и маршрут восстанавливается, аналогично происходит самовосстановление на уровне маршрута нижнего уровня. Это необходимо, т. к. маршруты верхнего и нижнего уровней имеют разную протяженность относительно друг друга и протяженность каждого из них больше, чем протяженность секций.

В оборудовании и сетях СЦИ применяются следующие основные виды автоматической защиты в зависимости от типа защищаемого с помощью резервирования элемента сети:

- защита блоков и элементов оборудования SDH (Equipment Protection Switching, EPS);
- защита агрегатных и трибутарных плат мультиплексора (Card Protection, CP);
- защита мультиплексной секции, т. е. участка сети между двумя смежными мультиплексорами SDH (Multiplex Section Protection, MSP);
- защита пути (соединения) через сеть для определенного виртуального контейнера (Sub-Network Connection Protection, SNC-P);
- разделяемая между пользовательскими соединениями защита путей в кольцевой топологии (Multiplex Section Shared Protection Ring MS-SPRing,).
-

В СЦИ предусмотрены следующие схемы защиты блоков «1 + 1», «1:1» и «1:N». Защита «1+1» означает, что резервный элемент выполняет ту же работу, что и основной. Например, при защите трибутарной платы по схеме «1+1» трафик проходит как через рабочую плату (резервируемую), так и через защитную (резервную). Схема «1:1» подразумевает, что защитный элемент в нормальном режиме не выполняет функции защищаемого, а переключается на них только в случае отказа.
Защита «1:N» предусматривает выделение одного защитного элемента на N защищаемых; при отказе одного из них его функции начинает выполнять защитный, при этом остальные элементы остаются без прикрытия – до тех пор пока отказавший элемент не будет заменен.

Защита EPS применяется для таких жизненно важных элементов мультиплексора, как процессорный блок, блок кросс-коммутации, блок питания, блок ввода сигналов синхронизации и т. п. EPS обычно работает по схемам «1+1» или «1:1».
Защита плат CP позволяет мультиплексору продолжить работу в случае отказа одной из агрегатных или трибутарных плат и организуется по схемам «1+1», «1:1» и «1:N». Защита «1+1» (рис. 2.28) обеспечивает непрерывность транспортного сервиса, так как трафик пользовательских соединений не прерывается.

В приведенном на рисунке примере защита трибутарных двухпортовых плат в мультиплексоре осуществляется по схеме «1+1». Одна из плат является основной или рабочей, а другая – защитной. Режим работы пары плат, связанных так, как показано на рис. 2.28, задается конфигурированием мультиплексора. Когда и та и другая плата работоспособны, трафик обрабатывается параллельно каждой из них

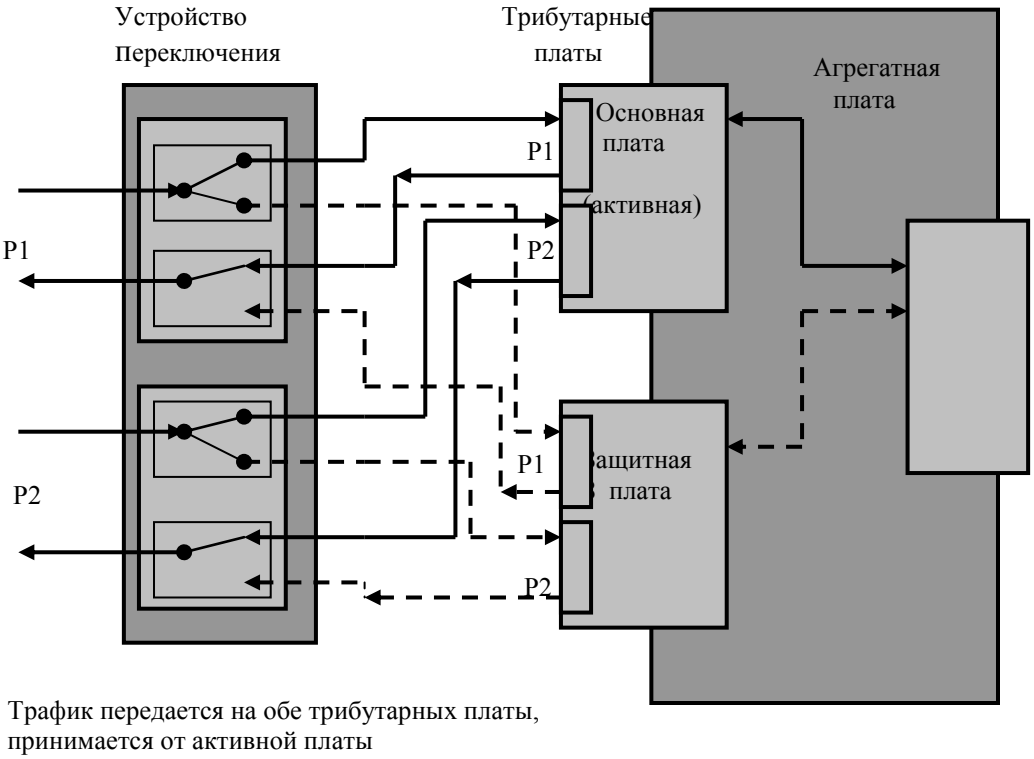


Рис. 2.28. Защита 1+1.

Для переключения трафика между трибутарными платами используется дополнительное устройство переключения. Входящий трафик каждого порта поступает на ключи устройства переключения, которые разветвляют его и передают на входы соответствующих портов трибутарных плат. Агрегатная плата принимает оба сигнала STM-N нижнего уровня от трибутарных плат и выбирает полученный от активной в данный момент платы. Выходящий трафик от агрегатной платы также обрабатывается обеими трибутарными платами, но устройство переключения передает на выход только трафик от активной платы.

При отказе основной платы (или другом событии, наступление которого предусматривает переход на резервную плату, - деградации или ошибке принимаемого сигнала, удалении платы) агрегатная плата по команде от блока управления мультиплексором переходит на прием сигнала от защитной трибутарной платы. Одновременно устройство переключения также начинает передавать на выход сигналы от резервной платы.

Данный способ обеспечивает автоматическую защиту всех соединений, проходящих через защищаемую плату. То есть, при установлении защиты на уровне СР конфигурация соединений рабочей платы дублируется для резервной платы.

Защита мультиплексной секции (MSP) действует более избирательно по сравнению с защитой плат. Она защищает секцию между двумя мультиплексорами, включающую два порта и линию связи, куда, в свою очередь, могут входить регенераторы. Обычно защита организуется по схеме «1+1». При этом для рабочего канала (верхняя пара соединенных кабелем портов на рис. 2.29) конфигурируется защитный канал (нижняя пара портов). При установлении защиты MSP на каждом мультиплексоре необходимо выполнить конфигурирование, указав связь между рабочим и защитными портами. В исходном состоянии весь трафик передается как по рабочему, так и по защитному каналам.

Защита MSP может быть однонаправленной и двунаправленной. В первом случае, который показан на рисунке, решение о переключении принимает только один из мультиплексоров – тот, который является приемным для отказавшего канала. После обнаружения отказа (не работает порт, ошибка или деградация сигнала и т. п.) этот мультиплесор переходит на прием по защитному каналу. Причем, передача и прием ведутся через разные порты.

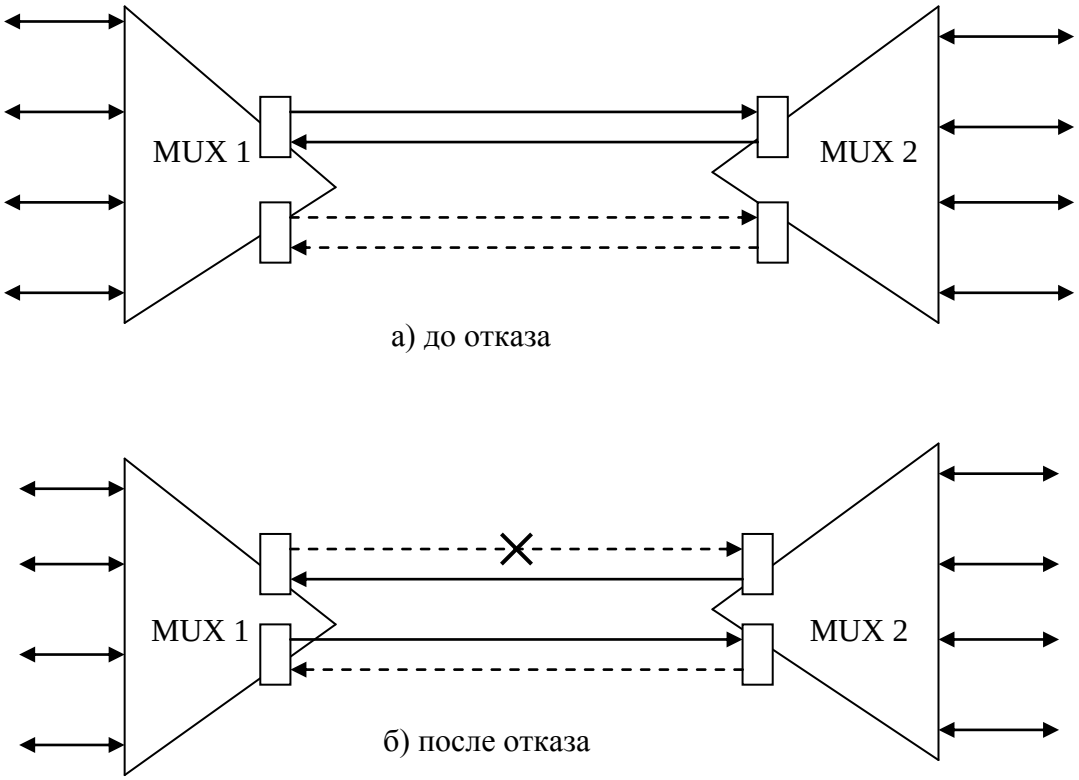


Рис. 2.29. Защита мультиплексной секции.

Второй случай предусматривает полное переключение на защитные порты мультиплексоров при отказе рабочего канала в каком-либо направлении. Для уведомления передающего (по рабочему каналу) мультиплексора о необходимости переключения принимающий мультиплексор использует информацию, которая передается в байте К секционного заголовка цикла STM-N, об указании статуса рабочего и защитного каналов, а также анализирует информацию об отказе.

Механизм MSP защищает все соединения, проходящие через защищаемую мультиплексную секцию. Время переключения защиты MSP, согласно требованиям рекомендации МСЭ, не должно превышать 50мс.

Защита соединения (Sub-Network Connection Protection, SNC-P) обеспечивает переключение определенного пользовательского соединения на альтернативный путь при отказе основного. Объект защиты SNC-P согласно определению – трибутарный трафик, помещенный в виртуальный контейнер определенного типа (например, в VC-12, VC-3 или VC-4). Используемая схема «1+1».

Защита SNC-P конфигурируется на двух мультиплексорах – входном, в котором помещенный в виртуальный контейнер трибутарный трафик разветвляется, и выходном, где сходятся два альтернативных пути. Пример защиты SNC-P показан на рис. 2.30.

В мультиплексоре ADM 1 (add/drop мультиплексор ввода/вывода) для виртуального контейнера VC-4 трибутарного порта T2 заданы два соединения: с одним из четырех контейнеров VC-4 агрегатного порта A1 и с одним из четырех контейнеров VC-4 агрегатного порта A2.

Одно соединение конфигурируется как рабочее, а второе – как защитное, при этом трафик передается по обоим соединениям. Промежуточные мультиплексоры, где не предусмотрен ввод/вывод компонентного потока данного контейнера, конфигурируются обычным образом.

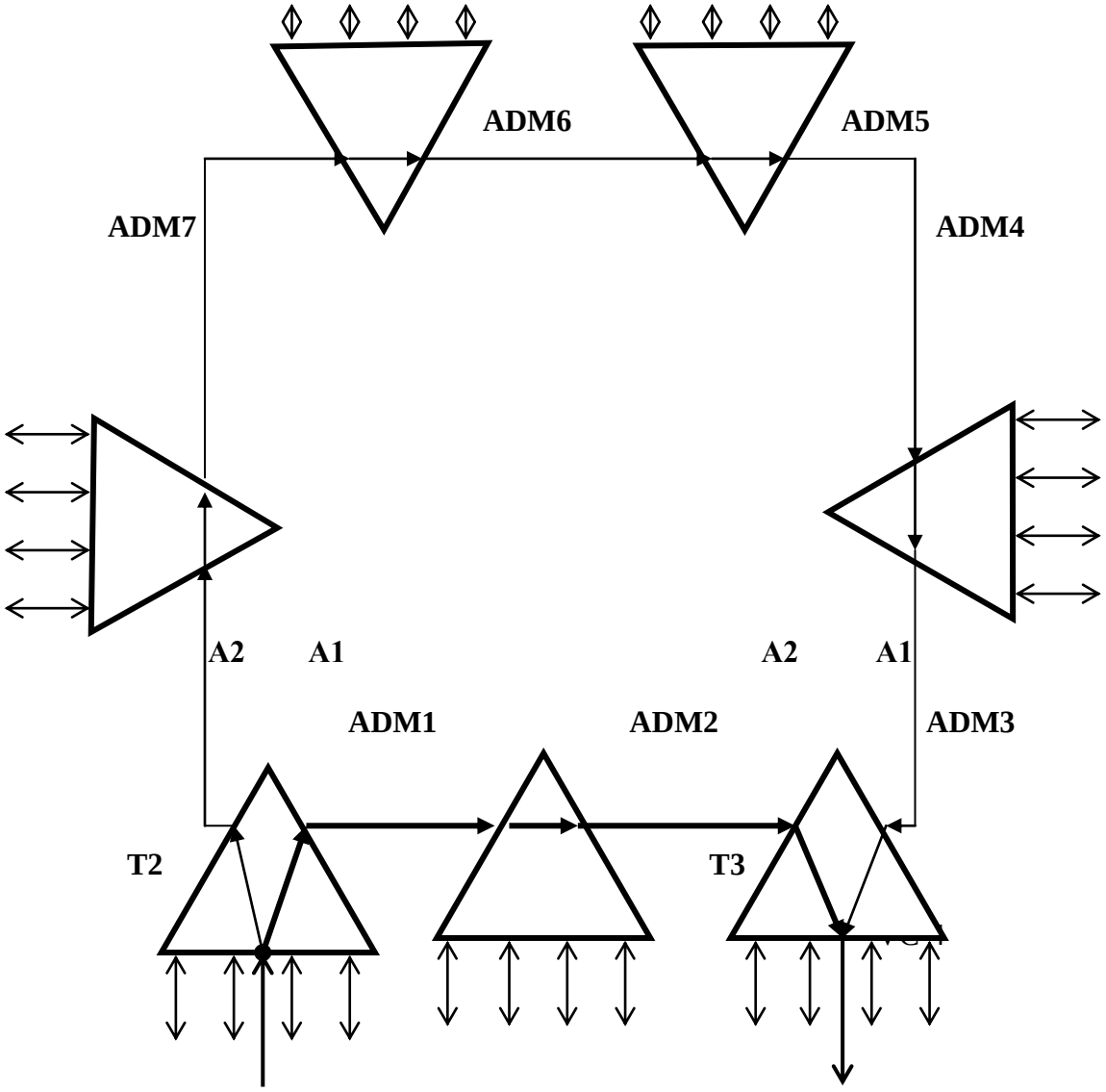


Рис. 2.30. Защита SNC-P.

В выходном мультиплексоре контейнер VC-4 трибутарного порта Т3 также соединяется с контейнерами – агрегатного порта А1 и агрегатного порта А2. Из двух поступающих на порт Т3 потоков выбирается тот, качество которого выше (при равном нормальном качестве сигнал берется от агрегатного порта, получившего при конфигурации статус рабочего).

Защита SNC-P применяется в любых топологиях сетей SDH, где имеются альтернативные пути следования трафика, т. е. кольцевых и ячеистых. Хотя защита SNC-P вполне подходит для кольцевой топологии сети СЦИ, во многих случаях применение SNC-P уменьшает полезную пропускную способность кольца, так как каждое соединение использует удвоенную пропускную способность вдоль всего кольца.
Например, в кольце СТМ-16 можно установить в этом случае только 16 защищенных с помощью SNC-P соединений VC-4 (см. рис. 2.31).

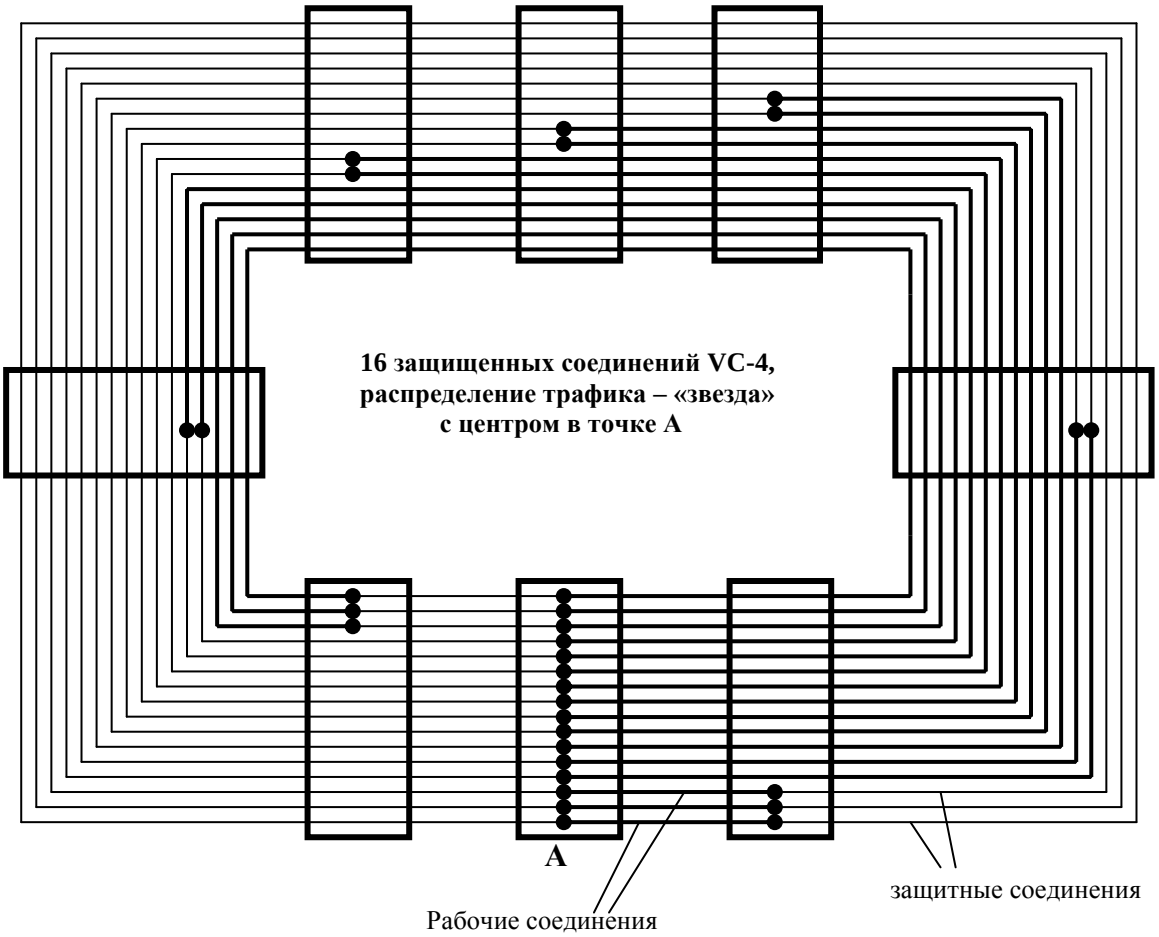


Рис. 2.31. Уменьшение пропускной способности кольца.

Защита с разделением кольца MS-SPRing

обеспечивает более эффективное использование пропускной способности, поскольку она не резервируется заранее для каждого соединения.
Вместо этого резервируется подовина пропускной способности, которая выделяется для высокоприоритетного трафика динамически, по мере необходимости, только после обнаружения факта отказа линии или мультиплексора.

Резервная часть пропускной способности кольца становится сетевым запасом и может служить для переноса низкоприоритетного трафика, который при отказе может быть потерян. Степень экономии в случае защиты MS-SPRing зависит от распределения трафика.

Если весь трафик сходится в один мультиплексор, т. е. имеет место топология «звезда», то защита MS-SPRing экономии по сравнению с защитой SNC-P вообще не давала бы, если бы резервные контейнеры не использовались для низкоприоритетного трафика.

Пример такой ситуации представлен на рис. 2. 32а, где весь основной трафик направляется к мультиплексору А, а в кольце установлено те же 16 защищенных соединений, что и в примере SNC-P на рис. 2. 31. Для защиты соединений резервируется 8 из 16 виртуальных контейнеров агрегатного потока СТМ-16.

При возникновении неисправности, например, обрыве кабеля, как показано на рис. 2.32б, трафик в мультиплексорах с нарушенной связью «разворачивается» в обратном направлении.

Для этого используются резервные виртуальные контейнеры агрегатных портов, с которыми соединяются виртуальные контейнеры «пострадавших» соединений.

В то же время соединения, на которые отказ не повлиял, функционируют в прежнем режиме и резервные контейнеры не задейс

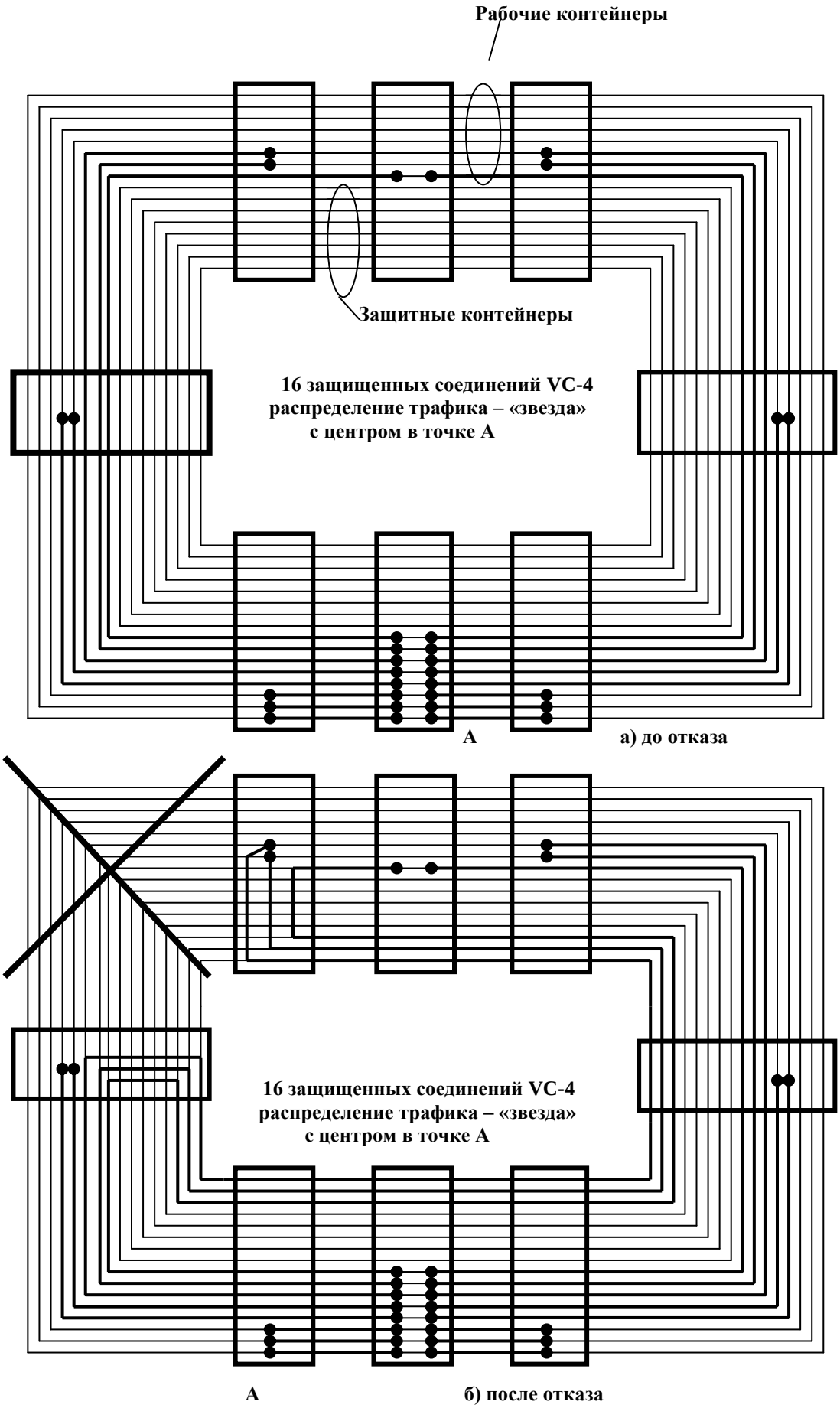


Рис. 2.32. Защита MS-SPRing.

Для уведомления мультиплексоров о необходимости реконфигурации кольца применяется информация, которая передается в байте К заголовка синхронного транспортного модуля. Время переключения на защитные соединения MS-SPRing составляет около 50 мс. При равномерном распределении трафика экономия пропускной способности в кольце по сравнению с SNC-P может оказаться значительной.

Механизмы самовосстанавливающихся колец при всех своих преимуществах имеют такие недостатки, как: отсутствие устойчивого функционирования при нескольких отказах в сети и сравнительно низкий коэффициент использования пропускной способности сети.

С точки зрения типа, поля К относятся к категории однобайтовых с одной поправкой. Для практического исследования процессов резервного переключения интерес представлют не значения полей К, а изменение этих значений в процессе переключения. По этой причине их можно отнести в большей степени к полям-каналам, рассматривая фиксированные логические комбинации в качестве элементарных сигналов, передаваемых по такому служебному каналу.

2.2.10. Контроль четности – байты В.

Как известно, развитие встроенных систем самодиагностики в составе современных систем передачи привело к появлению и развитию концепции контроля параметров качества цифровой передачи с использованием избыточного циклического кода (CRC).

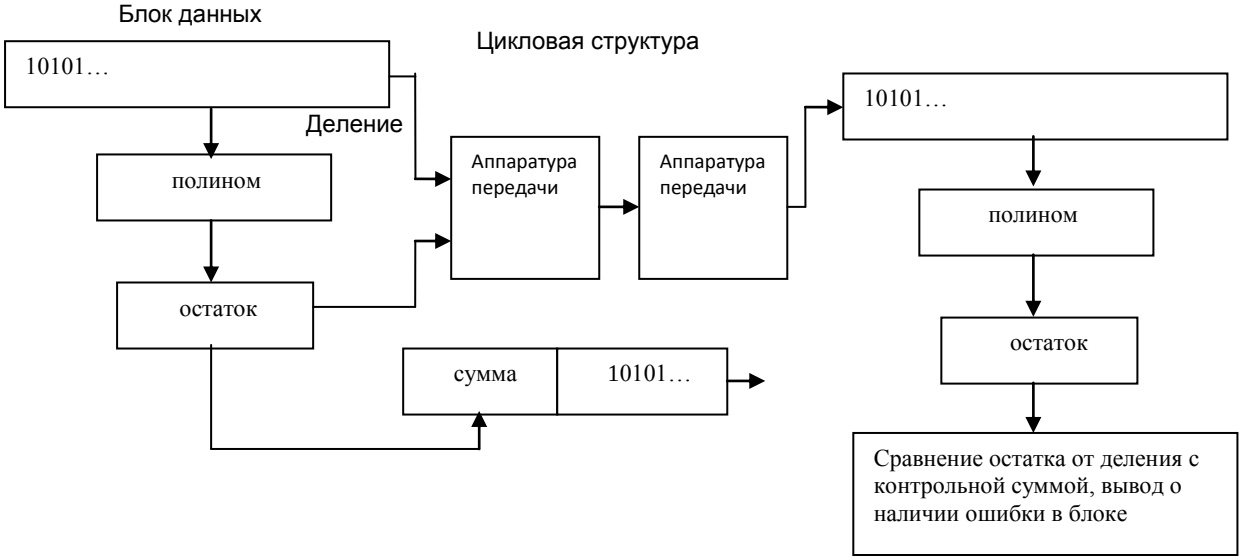


Рис. 2.33. Алгоритм применения избыточного циклического кода.

Суть процедуры контроля ошибок передачи по CRC довольно проста и представлена на рис. 2.23. Информационный поток, предназначенный для передачи по цифровому каналу, разбивается на несколько блоков данных фиксированного размера. Для каждого блока данных выполняется операция деления последовательности битов на полином заданного вида (в зависимости от типа кода, например CRC-4 означает полином 4 степени, а остаток деления – 4 бита). В результате деления образуется остаток, который передается вместе с блоком данных в составе цикла (кадра) в канале. Процедура деления потока данных на блоки и передача их с рассчитанным остатком от деления приводит к необходимости использования в аппаратуре передачи цикловой структуры,

именно разделение на циклы и формирует фиксированные блоки данных. Таким образом, контроль ошибок без отключения канала (без перерыва связи) возможно только для систем передачи с цикловой структурой. Остаток от деления передается в составе цикла в виде контрольной суммы. На приемной стороне делаются аналогичные вычисления остатка от деления, результат расчета сравнивается с переданной контрольной суммой. В случае расхождения результатов делается вывод о наличии битовой ошибки в блоке.

Из рис. 2.33 следует, что для передачи на другую сторону остатка от деления нужно к блоку данных приложить блок контрольной суммы. Тем самым еще раз уменьшается КПД системы передачи.

Методика измерения параметров ошибок на основе CRC предусматривает оценку параметра ошибки в реально работающем канале. Следует отметить, что методология измерения ошибок по CRC связана с использованием контрольных сумм и идентифицирует наличие ошибки в конкретном блоке данных, поэтому параметр ошибки, измеренной методом CRC, является параметром ошибки в блоке (BLER), который лишь относительно связан с параметром битовой ошибки (BER). Например, два, три и т. д. пораженных бита в одном блоке могут проявляться в виде одной ошибки, ошибки могут компенсировать друг друга в смысле остатка от деления и т. д. Тем не менее, возможность контроля ошибок без перерыва связи является очень эффективной и и получила широкое распространение в диагностике систем PDH.

В системах SDH также используется метод контроля параметров ошибки без отключения канала, который получил название метода контроля четности (Bit Interleaved Parity – BIP). Этот метод, также как и CRC, является оценочным, но он дает хорошие результаты при анализе систем передачи SDH.

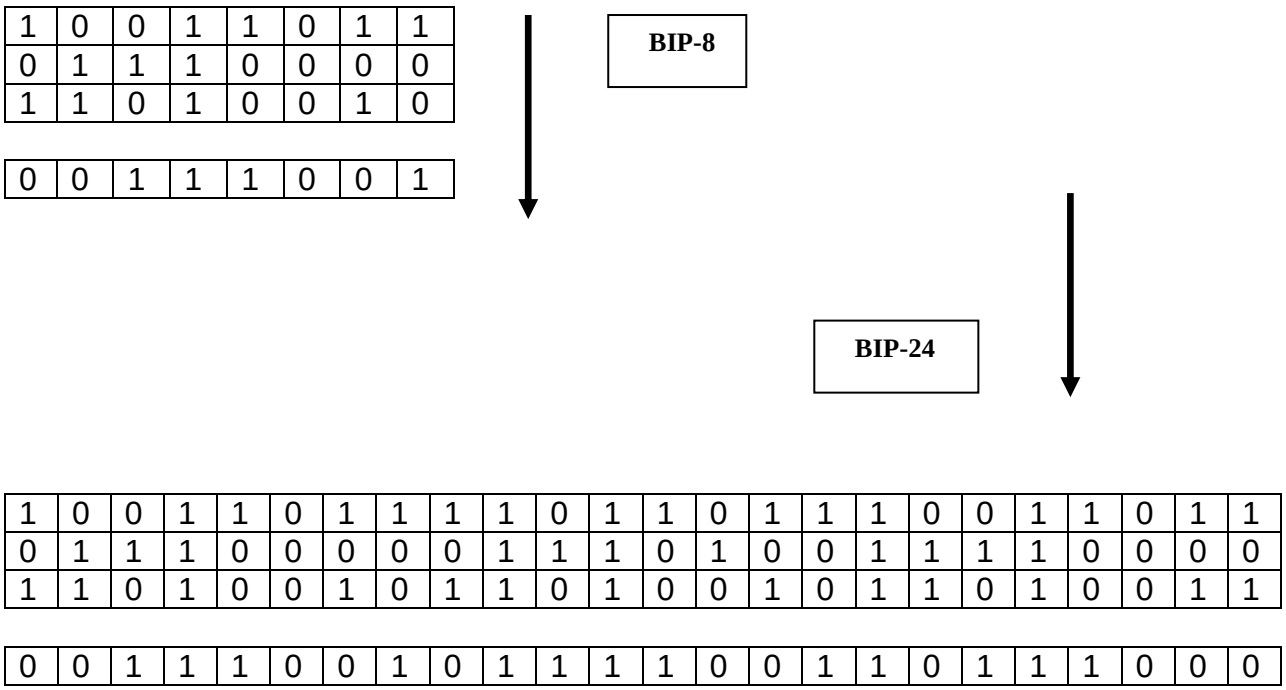


Рис. 2.34. Иллюстрация работы механизма контроля четности.

Алгоритм контроля четности достаточно прост (рис. 2.34). Контроль четности выполняется для конкретного блока данных в цикле по группам данных по 2, 8 и 24 бита (BIP-2, BIP-8 и BIP-24 соответственно). Эти группы организуются в столбцы, затем для каждого столбца рассчитывается его четность, т. е. четное или нечетное число 1 в столбце. Результат подсчета передается в виде кодового слова на приемную сторону. Здесь делается аналогичный расчет, который сравнивается с принятым, и делается вывод о количестве ошибок четности. Результат сравнения передается на передающую сторону (сигнал идентификации ошибок).

В зависимости от уровня контроля (тип виртуального контейнера, транспортный модуль) используются различные блоки данных для поиска ошибок. Данные BIP (результат контроля четности) передаются в полях семейсива B заголовков.

В регенерационной секции используется поле B1 в составе RSOH, а для контроля четности используется однобайтовое кодовое слово BIP-8. Это слово подсчитывается по всем битам модуля STM-N. Байт B1 подсчитывается и регенерируется в каждом мультиплексоре и регенераторе.

В мультиплексной секции используется поле B2 в составе MSOH. Для контроля ошибок на каждой мультиплексной секции используется кодовое слово BIP-Nx24 размером Nx3 байта. Кодовое слово BIP-Nx24 за исключением первых трех строк SOH и вставляется в Nx3 байта B2, предусмотренных для этого в последующем модуле. Поскольку B2 находится в мультиплексной секции Байты B2 не изменяются регенераторами.

Контроль ошибок в POH выполняется для виртуальных контейнеров VC-3 и VC-4. Для этого используется поле B3 в составе HP-POH. Байт B3 предназначен для обнаружения ошибок в пути передачи индивидуальных VC-3 и VC-4. Одно кодовое слово BIP-8 (1 байт) подсчитывается по всем битам виртуального контейнера за исключением бит указателя и вставляется в соответствующий байт B3 POH последующего VC.

Контроль ошибок на уровне маршрута нижнего уровня выполняется в VC-1 и VC-2. Для этого используются первые два бита поля V5 LP-POH. Они предназначены для обнаружения ошибок в маршруте передачи индивидуальных VC-1 и VC-2. Одно кодовое слово BIP-2 (2 бита) подсчитывается по всем битам виртуального контейнера за сверхцикл длительностью 500 мкс и вставляется в соответствующие битовые позиции байта V5 POH последующего VC.

Все вышеперечисленное можно свести в таблицу.

Таблица 2.3. Поля, используемые для контроля четности и участки SDH.

Байт	Заголовок	Длина	Секция мониторинга
B1	RSOH	BIP-8	STM-1
B2	MSOH	BIP-24	STM-1 без RSOH
B3	POH VC-3/4	BIP-8	VC-3/4
V5	POH VC-1/2	BIP-2	VC-1/2

Переход от уже известного и отработанного алгоритма контроля ошибок CRC к более простому объясняется, в основном, высокой скоростью передачи в системах SDH. Дело в том, что при передаче данных даже на уровне STM-1 один цикл происходит за 125 мкс. На такой скорости производить вычисления остатка от деления данных на полином уже вызывает затруднения и требует использования специального высокоскоростного процессора, А в случае STM-64 это тем более затруднительно.

Метод контроля четности является оценочным, поскольку несколько ошибок за цикл могут компенсировать друг друга в смысле контроля четности, однако этот метод дает приемлемый уровень оценки качества цифровой системы передачи.

Идеология SDH, основанная на многоуровневом построении, нашла отражение и в процедуре контроля ошибок. Как показано на рис. 2.35, метод контроля четности в дает возможность обнаруживать ошибки от секции к секции и от начала до конца маршрутов верхнего и нижнего уровня. На рисунке показаны также и поля В, ответственные за каждую секцию. Такой многоуровневый контроль ошибок повышает надежность и точность процедуры.

В случае обнаружения ошибок количество найденных ошибок передается в обратном направлении в виде сигнала REI (Remote Error Indication) – обнаружение ошибки на дальнем конце. Например, количество ошибок, обнаруженное в канале В3, передается в байте G1 POH VC-4следующего цикла.

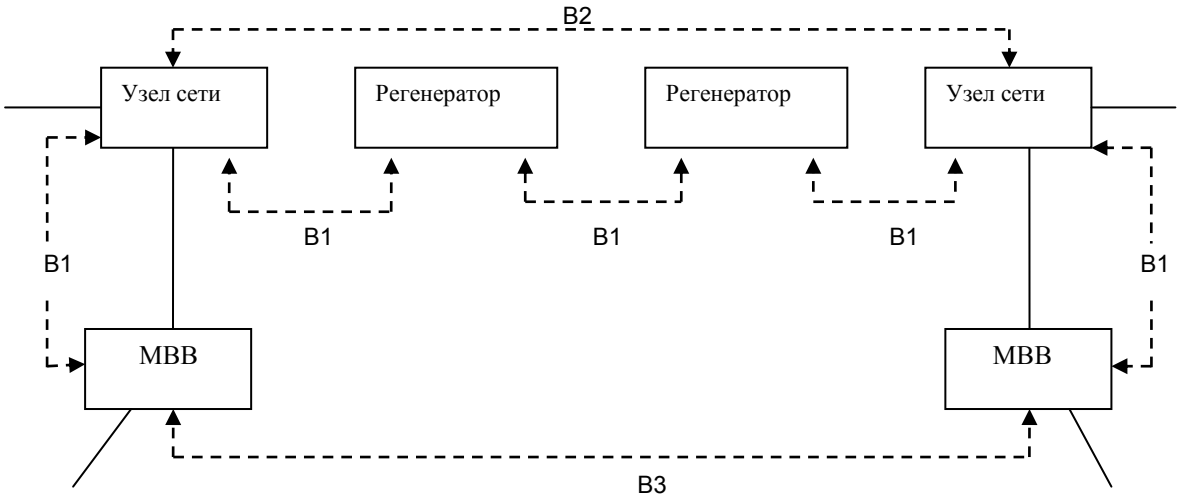


Рис. 2.35. Посекционный мониторинг параметров цифровой передачи.

Байты В представляют собой фиксированные поля. С точки зрения эксплуатации эти поля представляются служебными, и в реальной практике нет смысла рассматривать их как эксплуатационные единицы. Важна сама процедура контроля ошибок в SDH.

2.2.11. Другие важные поля – C, G, V.

Существует несколько полей, которые не образуют семейств, но также отражают определенные процедуры и процессы в системах SDH. В этом разделе будут рассмотрены поля, наиболее ценные для вопросов эксплуатации систем передачи.

Рассмотрение начнем с поля C2, входящего в заголовок HP-POH. Это поле является указателем типа полезной нагрузки. Оно определяет тип полезной нагрузки в контейнере верхнего уровня. Сделано это для того, чтобы мультиплексор заранее настраивался на определенный тип загрузки в контейнере.

Основные типы полезной нагрузки определены рек. ITU-T G.707, кроме того ITU-T определил несколько дополнительных рекомендаций, связанных с передачей по системе STM нагрузки ATM и FDDI. Значения байта C2 и соответствующие им типы нагрузки приведены в табл. 2.4.

В «аллегории поезда» можно рассматривать байт C2 как указатель типа нашего вагона: открытый, закрытый, теплушка с людьми, насыпной, цистерна и т. д. Со стороны стоящего на перроне человека тип вагона визуально понятен, но это не так для диспетчера, формирующего составы и следящего за их движением. Поэтому на железной дороге применяются различные обозначения и литеры для идентификации вагонов разного типа. Также и в SDH контейнеры верхнего уровня могут отличаться типом загрузки, даже VC-12, как было показано ранее, могут загружаться в сеть двумя способами.

Таблица 2.4. Значения указателя типа полезной нагрузки C2.

Бинарный вид	**HEX**	**Значение**
0000 0000	00	Контейнер не загружен
0000 0001	01	Контейнер загружен, нагрузка не специфицирована
0000 0010	02	Структура TUG
0000 0011	03	Синхронный TU-n
0000 0100	04	Асинхронная загрузка 34 или 45 Мбит/с
0001 0010	12	Асинхронная загрузка 140 Мбит/с
0001 0011	13	Загрузка ATM
0001 0010	14	Загрузка MAN (DQDB)
0001 0101	15	Загрузка FDDI
1111 1110	FE	Тестовый сигнал по рек. O.181
1111 1111	FF	VC-AIS в случае поддержки TCM

Легко понять, что произойдет, если вопреки ожиданиям мимо перрона начнет проносится состав с совершенно другими вагонами. Где искать ящики, если мимо едет цистерна? Так и в SDH – при неправильной установке поля C2 контейнер верхнего уровня не проходит узловой элемент, т. к. в сети не могут реализоваться процедуры работы с нагрузкой.

Поле C не образует семейства, на нижнем уровне роль поля C выполняют три бита в составе поля V5: L1, L2 и L3 (рис. 2. 20). На секционном уровне состав нагрузке не контролируется, поскольку тип нагрузки критичен для маршрутов, но не для транспортного модуля.

Второй пример поля, не образующего семейства – это однобайтовое поле G1 в составе заголовка HP-POH. Оно служит для передачи сигналов подтверждения ошибок передачи по BIP, вычисленных в конце маршрута верхнего уровня. Всего предусмотрено использовать байт G1 для передачи данных об ошибках двух категорий (рис. 2.36):

FEBE (Far End Block Error) – наличие блоковой ошибки на дальнем конце, сигнал, посылаемый в ответ на получение на удаленном конце ошибки четности по BIP-8;
FERF (Far End Receive Failure) – наличие неисправности на дальнем конце, сигнал, посылаемый в случае возникновения на удаленном конце нескольких неисправностей.

Поле G1не образует семейства. Функции G1 на уровне маршрута нижнего уровня выполняют биты L3, L4 и L8 поля V5, идентифицируя неисправности на уровне маршрута нижнего уровня REI, RFI и RDI, соответственно. Назначения этих сигналов будут рассмотрены ниже.

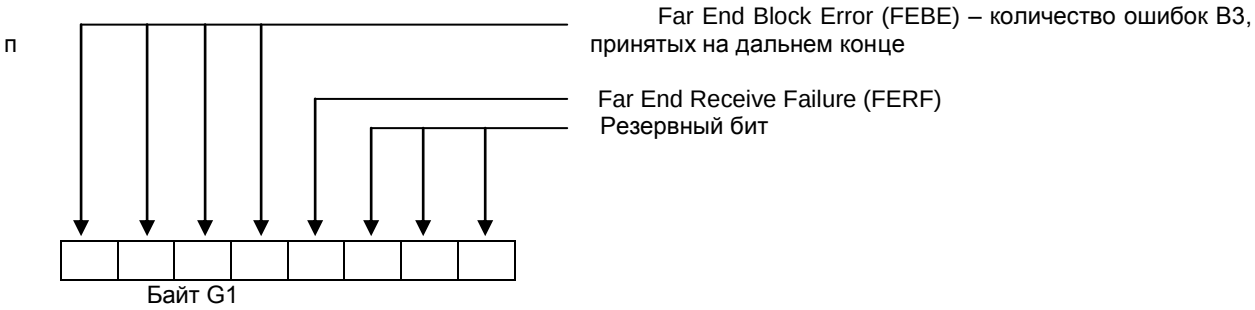


Рис. 2.36. Значение байта G1.

На секционном уровне роль поля G1 выполняет поле M1 (рис. 2.18), которое также ответственно за передачу сигнала об обнаружении ошибки или неисправностей на дальнем конце.

И третий пример очень важного поля, не образующего семейства, - это однобайтовое поле S1 в составе секционного заголовка. Поле S1 определяет параметр качества источника синхронизации. Информация об этом параметре передается комбинацией битов с 5 по 8 в составе байта S1. Возможные значения параметров качества источника синхронизации приведены в табл. 2.5. Передача этой информации позволяет избежать проблем, связанных с нарушениями в структуре системы синхронизации. Учитывая, что система передачи на основе SDH использует принципы синхронной передачи и мультиплексирования, параметры синхронизации в SDH чрезвычайно важны. Они будут рассмотрены отдельно в главе 3. С увеличением разветвленности сети, использованием концепций резервирования сетей, повышается вероятность возникновения проблем, связанных с системой синхронизации. Так, например, в процессе реконфигурации или гибкого переключения на резерв, система синхронизации должна также реконфигурироваться. Передача информации о качестве источника синхронизации конкретного узла дает возможность авторегулирования процессов в системе сихронизации, например, сигнал от источника плохого качества не должен использоваться для распределения по сети и синхронизации от него других узлов. Часто информацию, передаваемую байтом S1, называют SSM (System Synchronization Messeges – Сообщения о параметрах синхросигналов), которые широко используются в современных технологиях синхронизации. Более подробно поле S1 и вопросы синхронизации в SDH будут рассмотрены в главе 3

Таблица 2.5. Возможные значения параметра источника синхронизации, передаваемые в байте S1.

Параметр	Приоритет при использовании	Значение параметра
0010	Наиболее высокий	G.811 первичный источник синхронизации (PRC)
0100		G.812 вторичный источник синхронизации транзитного узла
1000		G.812 вторичный источник синхронизации оконечного узла
1011		Источник синхронизации цифрового оборудования
1111	Наиболее низкий	Не использовать для внешней синхронизации
0000		Качество не определено

Рассмотрев практически все поля заголовков, когда особое внимание уделялось вопросам передачи сигналов о неисправностях и обнаруженных ошибках, рассмотри теперь процедуру управления в системах SDH с точки зрения самой технологии генерации и приема сигналов о неисправности.

2.2.12. Управление в системе SDH.

Эволюция принципов организации цифровых систем передачи от PDH к SDH привела к значительному увеличению количества сообщений о неисправности, используемых при эксплуатации системы передачи. Если в системах ИКМ и PDH используется несколько сообщений о неисправности, то в системах SDH и SONET их количество достигает 50. Сообщения о неисправности в системе SDH можно условно разбить не три категории:

- Сообщения о наиболее существенных неисправностях, воздействующих на весь маршрут и приводящих обычно к потере канала передачи.

- Сервисные сигналы, связанные с передачей контейнера высокого уровня (VC-4, VC-3).

- Сигналы и сообщения об ошибках и неисправностях при передаче контейнера низкого уровня, т. е. VC-12.

Более детальная классификация сигналов неисправности включает в себя пять уровней, непосредственно связанных с самой технологией SDH: физический уровень, уровень регенерационной секции, мультиплексной секции, маршрута верхнего уровня и маршрута нижнего уровня. Разделение сигналов неисправностей с примерами сообщений представлено на рис. 2.37 в виде пирамиды.

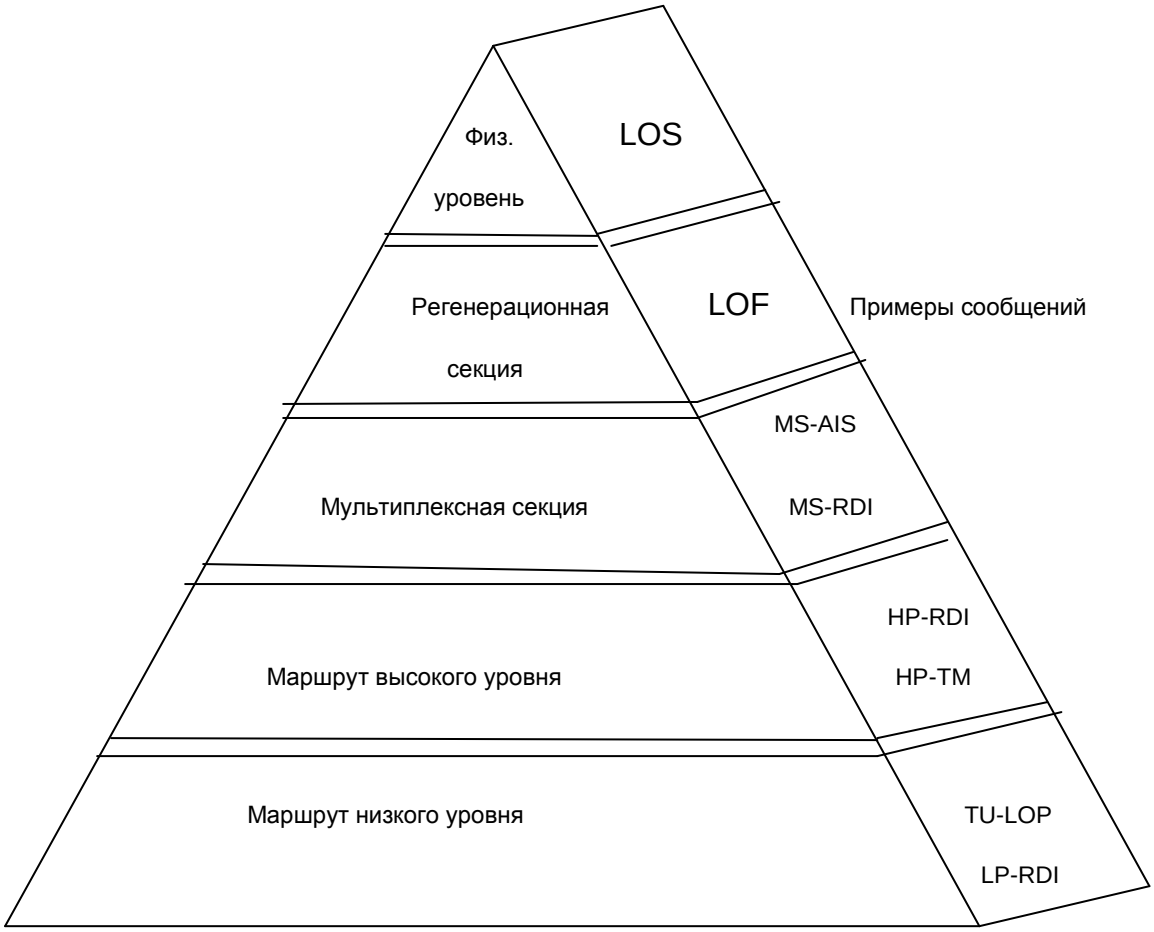


Рис. 2.37. Классификация сигналов и сообщений о неисправностях в системе SDH.

Любой процесс неисправности в системе передачи подчиняется указанной иерархии и напоминает катание с горки. Если неисправность возникает на верхнем уровне, она передается на нижние уровни. Например, если неисправность возникает на уровне мультиплексной секции, то система теряет маршрут верхнего уровня и маршрут нижнего уровня. Неисправность на уровне регенарационной секции приводит последовательно к неисправностям на уровне мультиплексной секции, маршрута верхнего уровня и маршрута нижнего уровня.

Такое поведение системы понятно и сточки зрения «аллегории поезда». Если в результате сбоя мы потеряем состав, то окажутся потерянными все вагоны, тем более – ящики в них. Если будет потерян вагон, но не состав, ящики все равно будут потеряны.

Таким образом, между сигналами неисправности имеются логические взаимосвязи, определяемые процессами, проистекающими в системе передачи. Схематически логические связи между сообщениями представлены на рис. 2.38 в виде своеобразного паука. Белыми квадратами на рисунке обозначена генерация сообщения, темными квадратами – прием сообщения.

сообщения, темными квадратами – прием сообщения.

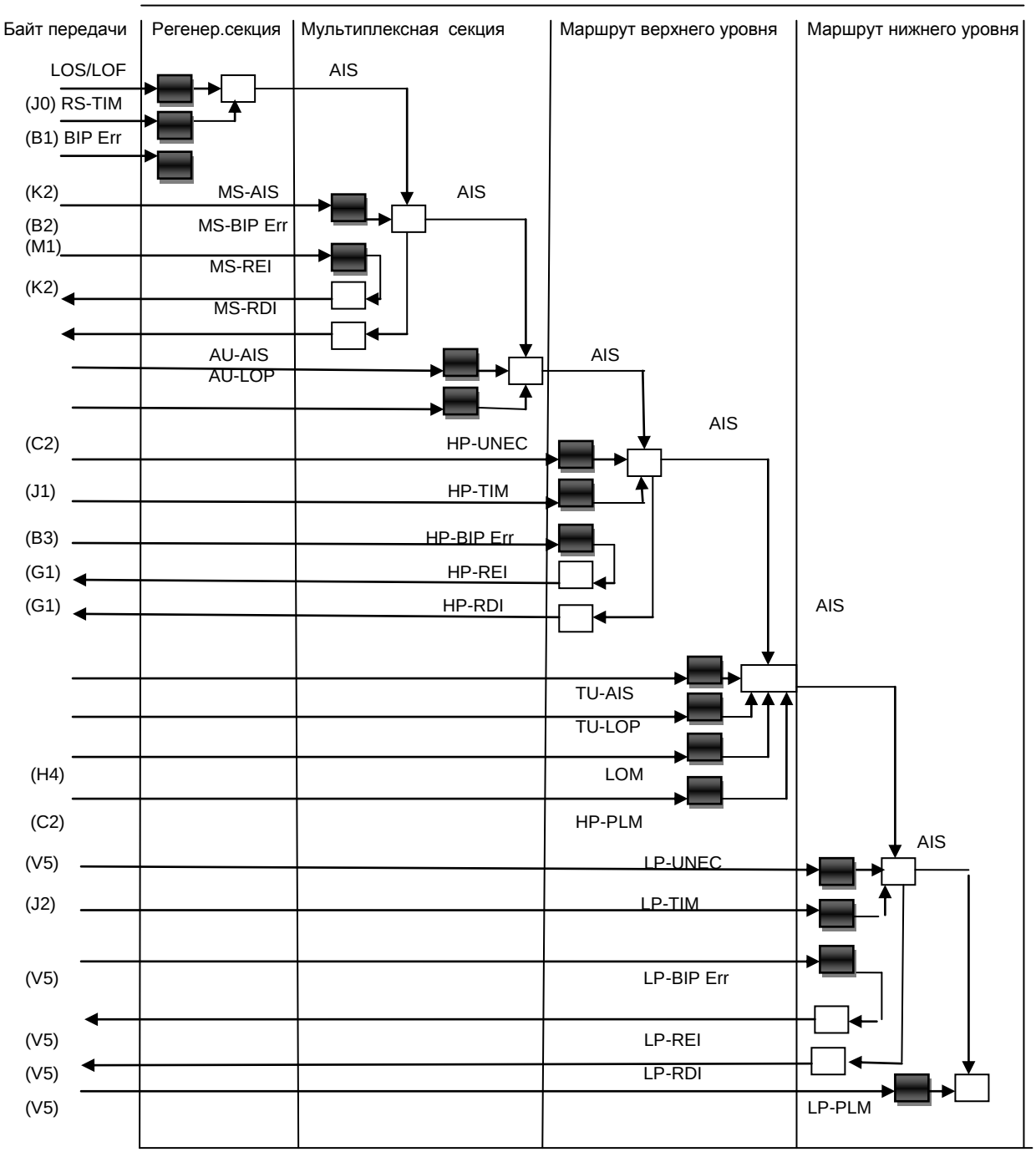


Рис. 2.38. Логические взаимосвязи между сообщениями о неисправностях в SDH.

Эта схема на первый взгляд сложна и требует пояснений. Возьмем, например, сигнал о неисправности HP-UNEC (контейнер верхнего уровня не загружен из-за неисправности в поле С). Кстати, этот факт можно проверить по схеме, стрелка с этим сигналом действительно идет от байта С, а сам сигнал находится на уровне маршрута верхнего уровня)HP). При получении сигнала HP-UNEC сетевой элемент формирует сигнал неисправности AIS, который каскадно передается вниз по иерархии. В результате на уровне маршрута верхнего уровня система формирует сигнал о неисправности на верхнем уровне HP-RDI, который передается в обратном направлении в поле G1 (см. соответствующую стрелку). Сигнал AIS передается на уровень маршрута нижнего уровня, где формируется сигнал LP-RDI, передаваемый в поле V5 в обратном направлении. Этот сигнал означает радикальную неисправность на уровне маршрута нижнего уровня. В результате мы получаем следующую схему генерации неисправностей в системе SDH:

$$HP - UNEQ(C2) \rightarrow HP - RDI(G1), LP - RDI(V5),$$

что означает, что у нас полностью нарушены маршруты верхнего и нижнего уровней. Этот результат получен с помощью логического путешествия по схеме рис. 2.38.

Как видно из рисунка, для каждого элемента маршрута или секции имеется свой набор сигналов неисправности, представленных в табл. 2. 6. Различные устройства в системе SDH реагируют на сигналы неисправности по разному, в соответствии с секциями маршрута. Так. Регенераторы, которые управляются только заголовками регенерационной секции, реагируют на сигналы неисправности RSOH. Цифровые коммутаторы SDXC будут давать отклик на сигналы неисправностей в RSOH и MSOH. MBB и терминалы системы SDH связаны с маршрутами в целом и будут реагировать на все виды сигналов неисправностей.

Еще одним важным следствием из рис. 2.38 и рассмотренного примера является то, что сигналы и сообщения о неисправностях в системе SDH возникают каскадно в случае возникновения неисправности на любом уровне иерархии. Так, неисправность в регенерационной секции вызывает генерацию сообщений в мультиплексной секции, в секции маршрута верхнего уровня и в секции маршрута нижнего уровня. Неисправность в маршруте верхнего уровня вызывает генерацию сообщений в секции маршрута нижнего уровня и т. д. Неисправность физического уровня (например, LOS) вызывает генерацию сообщений о неисправностях на всех уровнях.

Следует отметить, что описываемые сигналы о неисправностях представляют собой не специализированные сигналы, передаваемые в каком либо канале, В таблице 2.6. указаны поля, в которых передаются соответствующие сигналы о неисправностях, а также критерии их обнаружения на приемной стороне. Как видно из таблицы, эти сигналы передаются в системе SDH через определенные поля в составе заголовков и представлены довольно разнородно.

Таблица 2.6. Сигналы о неисправностях в системе SDH (стандарт ETSI)

Название	Значение	Байт заголовка	Критерий обнаружения
LOS (NO-SIG)	Потеря сигнала (Loss of Signal)		
TSE (BIT ERR)	Ошибка в ПСП (Test Sequence Error –Bit Error)		
LSS (NO-PATT)	Потеря синхронизации ПСП (Loss of Sequence Synchronization)		
Регенерационная секция			
OOF	Потеря цикла (Out of Frame)	A1, A2	Ошибка в A1 и A2 более 625 мкс
LOF	Потеря цикловой синхронизации (Loss of Frame)	A1, A2	Если OOF больше 3 мс
B1 (8бит)	Ошибка B1	B1	Контроль четности
RS-TIM	Потеря идентификатора трассы (Trace Identifier Mismatch)	J0	Идентификация из тракта
Мультиплексная секция			
B2 (24бита)	Ошибка B2	B2	Контроль четности
MS-REI	Ошибка удаленного конца мультиплексной секции (Mux Section Remote Error Indication)	M1	Биты с 1 по 8 содержат данные с ошибкой по четности
MS-AIS	AIS мультиплексной секции (Mux Section AIS)	K2	TX: все биты кроме RSOH равны 1 RX: биты K2 6, 7, 8 = 111
MS-RDI	Индикация дефнкта мультиплексной секции на дальнем конце Mux Section RDI)	K2	Биты 6, 7, 8 = 110
Административный блок (AU)			
AU-LOP	Потеря указателя AU (Loss of AU Pointer)	H1, H2	8 – 10 некорректных указателей
AU-AIS	AIS административного блока	AU вкл.H1, H2, H3	TX: все биты AU3/4 = 1 RX: H1, H2 = 1
AU-PJE	Смещение указателя AU (Pointer Justification Event)	H1, H2	Положительное или отрицательное смещение указателей
Маршрут верхнего уровня (HO-PATH)			
B3 (8бит)	Ошибка B3	B3	Контроль четности
HP-REI (HP-FEBE)	Ошибка удаленного конца HO (HO Path Remote Error Indication)	G1	Биты с 1 по 4 содержат данные с ошибкой по четности B3
HP-RDI (HP-FERF)	Индикация дефекта HO на дальнем конце	G1	Биты 5, 6, 7 = 100

HP-RDI-EP	Индикация дефекта, связанного с нагрузкой (HO Path Enchanced RDI Payload Defect)	G1	Биты 5, 6. 7 = 010
HP-RDI-ES	Индикация дефекта, связанного с сервером (HO Path Enchanced RDI Server Defect)	G1	Биты 5, 6, 7 = 101
HP-RDI-EC	Индикация дефекта, связанного со связностью (HO Path Enchanced RDI Cjnnectivity Defect)	G1	Биты 5, 6, 7 = 110
HP-TIM	Потеря идентификатора трассы (Trace Identifier Mismatch)	J1	Идентификация из тракта
HP-PLM	Потеря идентификатора типа нагрузки HO Path Payload Label Mismatch)	C2	Ошибка данных в C1
HP-ENEQ	Нет индикации типа нагрузки (HO Path Unequipped VC Indication (VC-3/4))	C2	C2 = 00
Трибутарный блок (TU)			
TU-LOP	Потеря указателя TU (Loss of TU Pointer)	V1, V2	8 – 10 некорректных указателей
TU-AIS	AIS административного блока	TU вкл. V1, V2	TX: все биты TU = 1 RX: V1, V2 = 1
TU-LOM	Потеря сверхцикла TU (Loss of TU Multiframe)	H4	Биты 7, 8 не в последовательности 00, 01, 10, 11
Маршрут нижнего уровня (LO-PATH)			
BIP-2	Ошибка BIP-2	V5	Контроль четности
LP-REI (LP-FEBE)	Ошибка удаленного конца LO (LO Path Remote Error Indication)	G1/V5	VC3: биты G1 1, 2, 3, 4 приняты с ошибкой по четности B3 VC-11,12, 2: 3 бит V5 = 1 при ошибке BIP-2 в цикле
LP-RDI (LP-FERF)	Индикация дефекта LO на дальнем конце	G1/V5	VC-3 биты G1 5, 6, 7 = 100 VC-11,12,2: 8 бит V5 = 1
LP-RDI-EP	Индикация дефекта, связанного с нагрузкой (LO Path Enchanced RDI Payload Defect)	G1/V5/K4	VC-3 биты G1 5, 6, 7 = 010 VC-11,12,2: 8 бит V5 = 0 биты K4 5, 6, 7 = 010
LP-RDI-ES	Индикация дефекта, связанного с сервером (LO Path Enchanced RDI Server Defect)	G1/V5/K4	VC-3 биты G1 5, 6, 7 = 101 VC-11,12,2: 8 бит V5 = 1 биты K4 5, 6, 7 = 101
LP-RDI-EC	Индикация дефекта, связанного со связностью (LO Path Enchanced RDI Cjnnectivity Defect)	G1/V5/K4	VC-3 биты G1 5, 6, 7 = 100 VC-11,12,2: 8 бит V5 = 1 биты K4 5, 6, 7 = 110
LP-RFI	Индикация неисправности LO на дальнем конце (LO Path Remote Fault Indication)	V5	Бит 4 = 1
LP-TIM	Потеря идентификатора трассы (Trace Identifier Mismatch)	J2	Идентификация из тракта
LP-PLM	Потеря идентификатора типа нагрузки LO Path Payload Label Mismatch)	C2/V5	Ошибка данных в C1
LP-UNEQ	Нет индикации типа нагрузки (LO Path Unequipped VC Indication)	C2/V5	VC-3: C2 = 00 VC-11,12,2: биты V5 5, 6, 7 = 0

Сигналы о неисправностях несут разный уровень проблемности и имеют различное назначение. В качестве примера рассмотрим четыре наиболее часто встречающихся сигнала о неисправностях: AIS, REI, RFI и RDI. Сигналы REI, RFI и RDI можно интерпретировать как три уровня проблемы на дальнем конце:

- REI (Remote Error Indication) – обнаружена ошибка четности на удаленном конце, что само по себе не предполагает ничего криминального;

- RFI (Remote Fault Indication) – обнаружен сбой на удаленном конце, это уже серьезнее, сеть работает, но может наступить и повреждение;

- RDI (Remote Defect Indication) – обнаружен сбой на удаленном конце, т. е. все развалилось.

Все три сообщения передаются стороне – источнику неисправности как подтверждение обнаруженных сбоев в работе (рис. 2.39). Ситуация очень похожа на светофор, REI напоминает мигающий зеленый, RFI – желтый, RDI – красный свет.

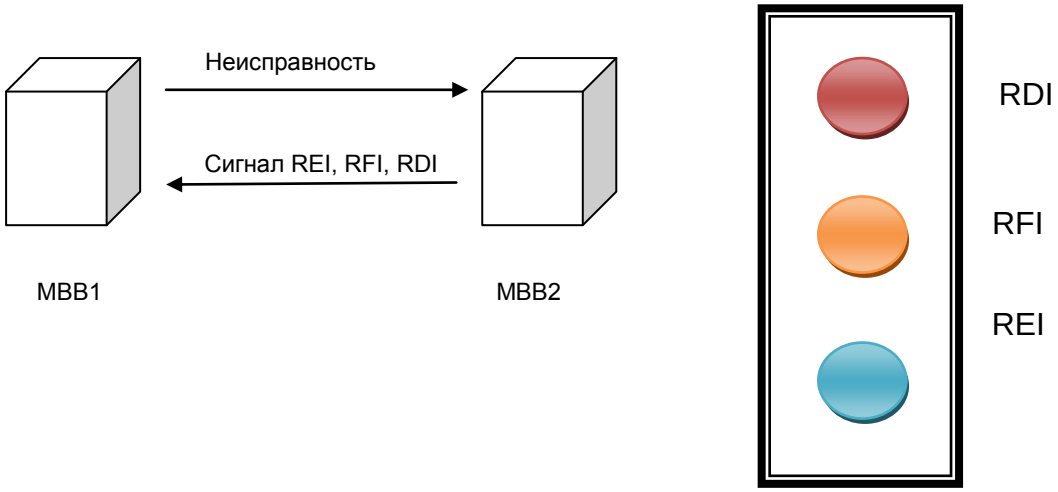


Рис. 2.39. Сигналы о неисправностях очень напоминают светофор.

Сигналы также разделены топологически. Неисправность, передаваемая в прямом направлении, отображается AIS, а в обратном – REI, RFI, RDI. В результате различные устройства принимают и генерируют различные сигналы о неисправностях.

В качестве примера рассмотрим передачу сигналов о неисправности в случае возникновения сигнала LOS (например, обрыв кабеля) в системе из трех сетевых элементов (рис. 2.40).

Предположим, что при передаче сигнала (обозначенного как нормальный сигнал - Ок!) между узлами NE1 и NE2 происходит обрыв кабеля. Это идентифицируется узлом NE2 как прием сигнала о неисправности LOS. Не имея никакой полезной нагрузки, узел NE2 посылает дальше по линии сигнал AIS,

который обычно представляет собой сигнал обычной цикловой структуры, но без нагрузки (в наиболее простых вариантах AIS, например, все единицы). Одновременно с этим в сторону узла NE1 узел NE2 генерирует сигнал RDI. Узел NE2 принимает AIS и генерирует в обратном направлении сигнал RDI. Приняв в обратном направлении сигнал RDI, узел NE1 передает его дальше по линии, подтверждая, что соединение разорвано. Все три узла в составе системы SDH включены в единую систему управления. В составе всех узлов имеются встроенные устройства диагностики, которые называются иногда сенсорами. Сенсоры фиксируют сигналы о неисправностях, генерируют соответствующие сигналы и передают всю историю процесса в центральный компьютер системы управления SDH. Передача может осуществляться с использованием служебного канала, образованного полями семейства D в составе SOH. Итак, все три сенсора NE1, NE2 и NE3 передают информацию системе управления в виде следующих сообщений (Табл. 2.7).

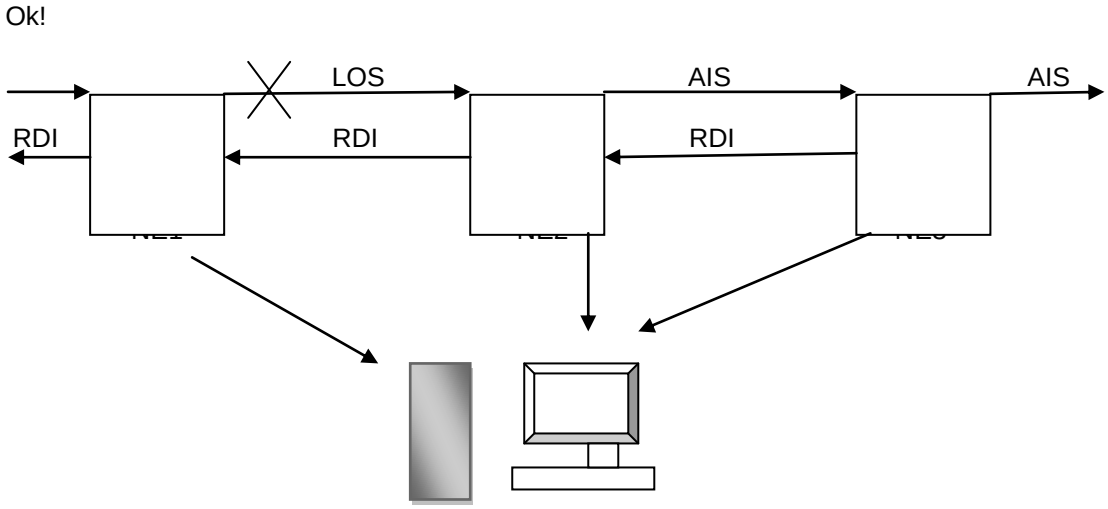


Рис. 2.40. Механизм генерации сигналов о неисправности в простой сети из трех узлов.

Таблица 2. 7. Сообщения о состоянии, передаваемые в ситуации рис. 1.32.

Передаваемое состояние	**NE1**	**NE2**	NE3
Сигналы входа слева	Норма	LOS	AIS
Сигналы по входу справа	RDI	RDI	RDI
Собственное состояние	Норма	Норма	Норма
Сигналы выхода слева	RDI	RDI	RDI
Сигналы по выходу справа	Норма	AIS	AIS

На основании полученных данных система управления принимает правильное решение, о том, что неисправность возникла в тракте передачи между NE1 и NE2 и не затрагивает сами устройства. Так работает система диагностики в SDH.

Таким образом, система управления TMN сетей SDH представляет собой специализированное программное обеспечение, которое обрабатывает сообщения о неисправностях, передаваемые по сети. А набор реализованных в системе SDH сигналов о неисправностях определяет потенциальную мощность системы управления и самодиагностики. Корректность генерации сообщений о неисправностях логическими устройствами сети (сенсорами) определяет корректность работы ПО системы управления, а каскадная генерация сообщений о неисправностях позволяет системе управления не только диагностировать причину неисправности, но и локализовать секцию, в которой неисправность возникла.

Организационная модель управления сетью SDH

Основные определения. Общая схема сети управления телекоммуникациями TMN может быть представлена четырехуровневой моделью управления, где каждый уровень выпоняет определенную функцию, предоставляя верхнему уровню последовательно обобщаемую нижними уровнями картину функционирования сети. Это следующие уровни:

- бизнес менеджмент (верхний уровень управления экономической эффективностью сети – BOS);
- сервис менеджмент (уровень управления сервисом сети - SOS);
- сетевой менеджмент (уровень систем управления сетью – NOS);
- элемент менеджмент (нижний уровень элемент менеджеров EM или систем управления элементами сети – EOS).

Функционирование каждого верхнего уровня в этой иерархии основано на информации уровня, лежащего ниже, передаваемой через интерфейс между этими уровнями.

Интересующий нас в данном случае элемент менеджер EM осуществляет управление отдельными элементами сети NE, т. е. оборудованием (мультиплексорами, коммутаторами, регенераторами и т. д.) сети.

Его задачи:

- конфигурация элементов сети – установление параметров конфигурации, например, назначение каналов, распределение трибутарных интерфейсов, установка реального времени;
- мониторинг – определение степени работоспособности (статуса), сбор и обработка сигналов о возникновении аварийных ситуаций;
- управление функцией передачи – управление операционными параметрами, отвечающими за функционирование сети, а именно: проверка состояния интерфейсов, активация систем защиты для переключения на резервное оборудование;
- управление функциями TMN – управление потоками сигналов о возникновении аварийных состояний, адресация возникающих при этом сообщений, формирование критериев фильтрации ошибок, маршрутизация

пакетов сообщений по служебным каналам, формируемым в SOH циклов SDH, генерация и мониторинг сигналов синхронизации;
- тестирование элементов сети – проведение тестов, характерных для данного типа оборудования;
- локализация NE в рамках выделенного слоя – осуществление сервиса NE и обработка информации от NE, специфических для данного слоя.

Архитектура TMN рассматривается в трех аспектах:
- функциональном, определяющем состав функциональных блоков, позволяющих реализовать сеть TMN любой сложности;
- информационном, основанном на объектно-ориентированном подходе и принципах OSI;
- физическом, описывающем реализуемые интерфейсы и примеры физических компонентов TMN.

TMN включает ряд функциональных блоков, выполняющих следующие одноименные функции:
- OSF – функции управляющей (операционной) системы OS;
- MF – функция устройств сопряжения MD (медиаторная функция);
- NEF – функция сетевого элемента NE;
- QAF – функция Q-адаптера QA;
- WSF – функция рабочей станции WS.
-

Для передачи информации между указанными блоками TMN используется функция передачи данных DCF. Пары функциональных блоков, обменивающихся информацией, разделены между собой опорными (или интерфейсными) точками.

Функциональные блоки реализуют определенные функции, а именно:
Блок OSF – обрабатывает управляющую информацию с целью мониторинга и/или управления, а также реализует функцию управляющего приложения OSF-MAF;
Блок MF – обрабатывает информацию, передаваемую между блоками OSF и NEF (или QAF), позволяя запоминать, фильтровать, адаптировать и сжимать информацию, а также реализует функцию управляющего приложения MF-MAF;
Блок NEF – включает функции связи, являющиеся объектом управления, а также реализует функцию управляющего приложения NEF-MAF;
Блок QAF – подключает к TMN логические объекты класса NEF или QSF, не являющиеся частью TMN, осуществляя связь между опорными точками внутри и вне TMN, а также реализует функцию управляющего приложения QAF-MAF;
Блок WSF – позволяет интерпретировать информацию TMN в терминах, понятных пользователю управляющей информации.

В состав функциональных блоков включаются также дополнительные функциональные компоненты:
MAF – функция управляющего приложения – фактически осуществляет управляющий (административный) сервис TMN, может играть роль либо **Менеджера,** либо **Агента**, используется в функциональных блоках MF, NF, OSF и QSF;
MIB – база управляющей информации – играет роль информационного архива управляющих объектов, не является объектом стандартизации TMN, используется в схеме дистанционного мониторинга RMON, а также протоколом SNMP, применяется во всех, кроме WSF, функциональных блоках;
ICF – функция преобразования информации – используется в промежуточных системах для трансляции информационной модели с интерфейса на интерфейс, используется в функциональных блоках MF, OSF, QAF;

PF – функция представления – преобразует информацию к удобному для отображения виду, используется в функциональном блоке WSF;
HMA – человеко-машинная адаптация – преобразует информацию MAF к удобному для отображения виду, используется в функциональных блоках OSF, MF;
MCF – функция передачи сообщения – используется для обмена управляющей информацией, содержащейся в сообщении, используется во всех функциональных блоках;
DCF – функция передачи данных – используется для передачи информации между блоками, наделенными управляющими функциями.

В сети TMN вводятся опорные (интерфейсные) точки, определяющие границы сервиса. Эти точки делятся на две группы. Первая включает точки внутри TMN, вторая –вне ее. Точки первой группы делятся на три класса:

- Q – точки между блоками OSF, QAF, MF и NEF обеспечивают информационный обмен между блоками в рамках информационной модели; Эти точки делятся на два типа:
- Q_x - точки между двумя блоками MF или блоком MF и остальными блоками;
- Q_3 - точки между двумя блоками OSF или блоком OSF и остальными блоками;
- F – точки для подключения блоков WSF к OSF и/или к MF;
- X – точки между OSF, принадлежащих двум TMN.

Точки второй группы делятся на два класса:

- G – точки между WSF и пользователем;
- M – точки между QAF и управляемым объектом, не принадлежащим TMN.

При создании информационной модели обмена данными (сообщениями) в TMN используется **объектно-ориентированный подход** (ООП) и концепция **менеджер/Агент.**

ООП рассматривает управление обменом информацией в TMN в терминах Менеджер – Агент – Объекты. Менеджер, представляя управляющую открытую систему, издает в процессе управления управляемой открытой системой директивы и получает в качестве обратной связи от объекта управления уведомления об их исполнении. Директивы, направленные от Менеджера к объекту, доводятся до объекта управления Агентом. Уведомления, напрвленные от объекта к Менеджеру, доводятся до Менеджера тем же Агентом.

Один Менеджер может быть вовлечен в информационный обмен с несколькими Агентами и, наоборот, один Агент может взаимодействовать с несколькими Менеджерами. Агент может игнорировать директивы Менеджера по соображениям нарушения секретности доступа к объекту или другим причинам. Все взаимодействия между Менеджером и Агентом осуществляются на основе использования протокола общей управляющей информации CMIP и сервиса общей управляющей информации CMIS.

Ознакомившись с основными определениями для сети TMN, рассмотрим общую схему управления сетью SDH (рис. 2.41). Схема организационного управления сетью многоуровневая.

Нижний уровень схемы включает SDH сетевые элементы NE, которые обеспечивают транспортный сервис. Функции MAF внутри них осуществляют связь с одноранговыми NE и поддержку управления ими, а также устройствами MD и управляющей системой OS.

Нижний уровень состоит из трех сетевых элементов. В каждом элементе логически выделены три функции: MCF, MAF и NEF, причем MAF каждого элемента может включать Агент (A) или Менеджер (M) или оба этих элемента.

Управляющее сообщение, поступающее по ECC через интерфейсы F и Q или от элемента другой (не SDH) сети, передается с помощью MCF, затем интерпретирутся с помощью MAF и через Агента, интерпретирующего NEF, передается на управляемый объект MO.

Реакция объекта передается обратно через Агента и Менеджера в канал ECC, или через интерфейсы F и Q на средний уровень MD, взаимодействующий непосредственно с OS, которая управляется от EM или NMS. Формат сообщений в такой многоуровневой структуре поддерживается одинаковым, как при движении по горизонтали – NE-NE, так и по вертикали: NE-MD, MD-OS.

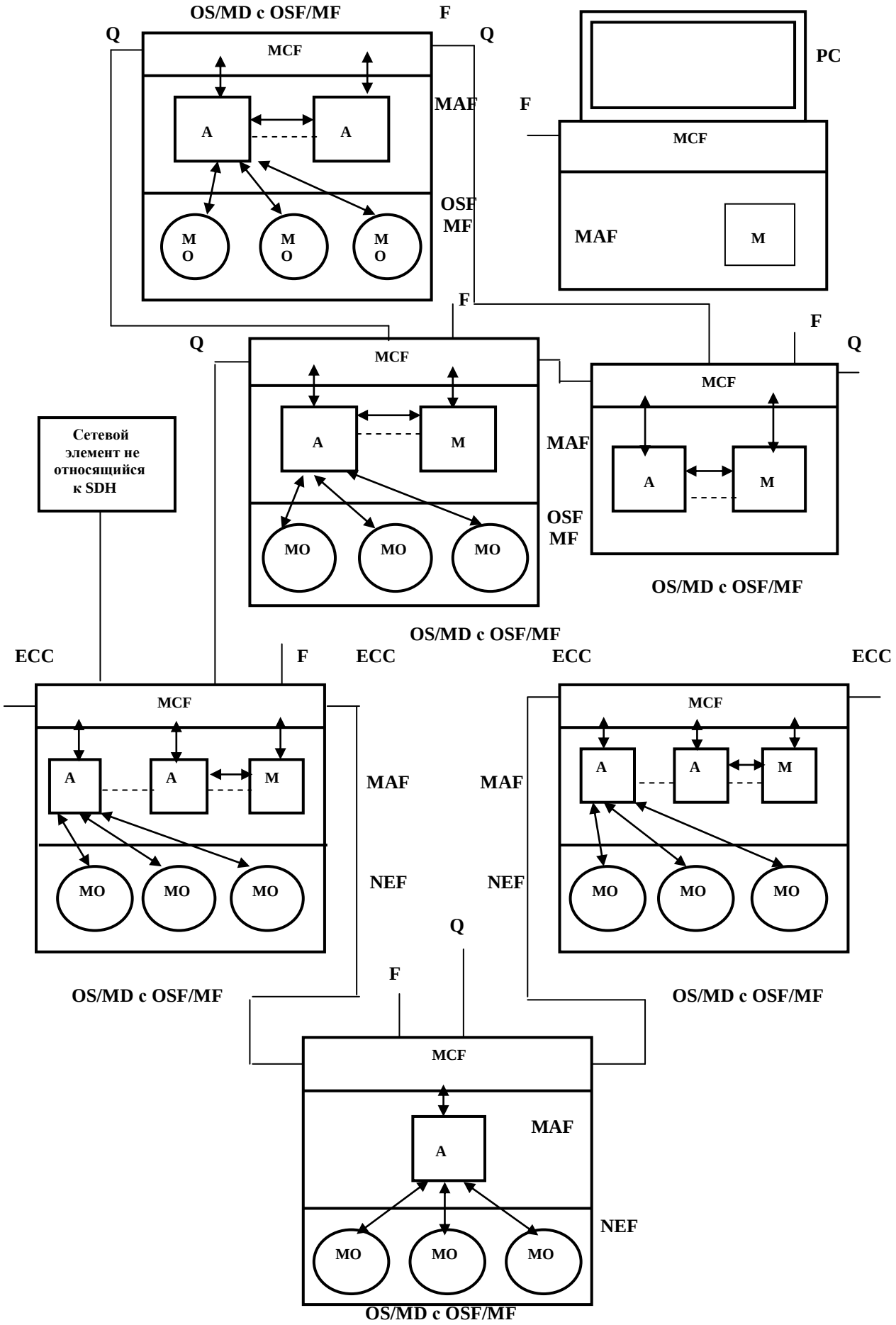


Рис 2.41. Общая схема управления сетью SDH.

На схеме используются следующие обозначения:

MCF – функция передачи сообщения A - агент
MAF – функция управляющего приложения M - менеджер
NEF – функция сетевого элемента MO – управляемый объект
ECC – встроенный канал управления F, Q – интерфейсы

2.2.13. Протоколы взаимного соединения TCM – байты N.

Завершая изучение основных полей заголовков и соответствующих им процессов, внутри классической SDH, рассмотрим процесс мониторинга взаимного соединения TCM (Tandem Connection Monitoring). Процедура TCM была впервые определена в 1996 г. в рекомендациях ITU-T. Необходимость введения процедуры TCM была связана с тем, что байт B3, обеспечивающий контроль четности на уровне маршрута, устанавливается только для начала и конца маршрута и обеспечивает контроль качества сквозного соединения (рис. 2.35). В случае, если маршрут проходит через несколько сетей, принадлежащих разным операторам, требуется не только сквозной, но и посекционный мониторинг параметров качества на ровне маршрута. В этом случае встает вопрос о разделении ответственности за качество на составном маршруте. Если качество падает на сети одного из операторов, технология должна содержать механизм выявления виновного.

Классические средства контроля ошибок по четности и средства секционного мониторинга не обеспечивали этих функций, поэтому была введена дополнительная процедура – TCM. Согласно этой процедуре сетевой узел обеспечивает контроль четности по HO-POH и LO-POH (контроль BIP-N), а затем передает информацию об ошибках предыдущему узлу с помощью байта N1 (для заголовка верхнего уровня) или N2 для заголовков нижнего уровня.

Ситуация особенно критична в случаях появления новых операторов первичной сети или корпоративных сетей (таких, как МВД, ФСБ, РАО ЕЭС и пр.). Такие операторы не имеют собственных сетей широкого охвата и используют арендованный ресурс первичной сети национальных операторов. Для этих операторов процедура TCM является единственным методом контроля качества составного маршрута. Выглядит процедура TCM приблизительно так, как показано на рис. 2.42.

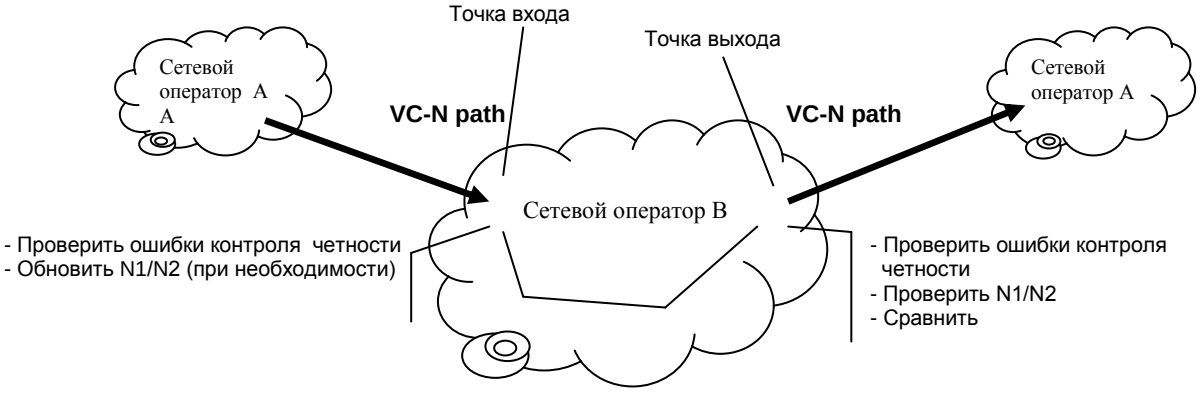


Рис. 2.42. Процедура TCM: пример для SDH.

На рисунке представлена первичная сеть оператора А, который частично использует ресурс другого оператора В. В результате в сети образуется составной маршрут по линии А – В – А. Если качество составного маршрута (в первую очередь по параметрам ошибок четности, фиксируемым в В3) ухудшается, необходимо знать, в какой точке, или другими словами, в сети какого оператора возникает повреждение или ухудшение качества.

ТСМ создает протокол, который позволяет каждому сетевому оператору проверить ошибки, создаваемые его сетью. Это ошибки проверки четности (В3 или BIP-2), которые контролируются в точке входа маршрута в сеть и в точке выхода. Разница, получаемая при сравнении результатов на входе и выходе, представляет собой количество ошибок, добавляемых сетью. Байты N1 и N2 POH используются для выполнения механизмов протокола: среди получаемых данных – количество ошибок проверки четности.

Основная процедура показана на рис. 2.42: в случае, когда число ошибок, отображаемых байтами N1 или N2, отличается от числа, проверенного на выходе, это означает, что сетевой оператор В добавляет ошибки.

Для передачи данных ТСМ отводится поле N1 в составе HP-POH и поле N2 в составе LP-POH, так что процедура ТСМ охватывает как маршрут верхнего уровня, так и маршрут нижнего уровня (напомним, что оба могут быть составными и иметь разную протяженность).

То, что ТСМ образует протокол, означает, что внутри N1 и N2 полей формируется своя цикловая структура, свои поля и пр. Для понимания этого рассмотрим структуру полей внутри ТСМ, представленную на рис. 2.43.

Для лучшего понимания рисунка следует иметь в виду, что протокол ТСМ представляет собой синтез всех рассмотренных процедур и протоколов SDH. Такое построение протокола напоминает матрешку: внутри одного поля имеются отдельные поля, которые по логике напоминают поля верхнего уровня, т. е. технология повторяет саму себя.

multiframe

N1:	IEC	TC REI	OEI	TC-API TC-RDI ODI r eserved

Назначение полей:

IEC (Incoming Error Control) – подсчет количества ошибок на входе в сеть по BIP-8.

OEI (Outgoing Error Indication) – то же на выходе из сети.

TC=REI (Remote Error Indication) – количество ошибок в канале ТСМ.

Специальные сигналы сверхцикловой структуры (multiframe):

TC-API (Access Point Identifier) – идентификатор ТСМ.

ODI (Outgoing Defect Indication) – сигнал о неисправности на выходе из сети.

TC-RDI (RDI in Tandem Connection) –сигнал о неисправности в процессе передачи по каналу ТСМ.

Назначение полей:

BIP-2 – подсчет количества ошибок на входе в сеть по BIP-2.

OEI (Outgoing Error Indication) – то же на выходе из сети.

TC-REI (Remote Error Indication) –количество ошибок в канале ТСМ.

I-AIS (Incoming AIS) – входной сигнал неисправности типа AIS в канале ТСМ.

Специальные сигналы сверхцикловой структуры (multiframe):

TC-API (Access Point Identifier) – идентификатор ТСМ.

ODI (Outgoing Defect Indication) – сигнал о неисправности на выходе из сети.

TC-RDI (RDI in Tandem Connection) –сигнал о неисправности в процессе передачи по каналу ТСМ.

multiframe

N2:

BIP-2	**1**	**I-AIS**	**TC REI**	**OEI**	**TC-API TC-RDI ODI**

Рис. 2.43. Поля протокола ТСМ маршрутов верхнего и нижнего уровней.

Рассмотрим поля более детально:

1. В полях N1 и N2 передаются данные как фиксированного типа: поля **IEC, OEI, TC-REI** количественных значений, так и поля, которые имеют значение только в смысле сверх цикла, т. е. несколько последовательных байтов N1 и N2 объединяются в сверхцикл, и только тогда, в рамках сверхцикла становится понятной информация битов этих полей. Таким образом, внутри ТСМ есть как фиксированные однобайтовые поля, так и расширенные поля.

2. Внутри ТСМ имеются свои идентификаторы маршрута ТСМ **TC-API**, построенные на манер идентификаторов J-x со всеми методическими нюансами.
3. В ТСМ имеются свои сигналы о неисправности различных градаций – **REI, AIS, RDI** и т. д. со всеми методическими принципами, свойственными сигналам о неисправностях.

4. В протоколе ТСМ реализована процедура подсчета ошибок по методике контроля четности.

Таким образом, для понимания ТСМ необходимо понимание всей технологии SDH.

2.2.14. Архитектура мультиплексоров SDH

Обобщенная функциональная схема оконечного мультиплексора синхронной цифровой иерархии определена соответствующими рекомендациями МСЭ-Т (рис. 2.44). Конечно, конкретная аппаратная реализация мультиплексора у различных разработчиков и производителей оборудования может существенно отличаться. Однако, назначение функциональных узлов и блоков, а также связей между ними должно выполняться в соответствии с приведенной схемой.

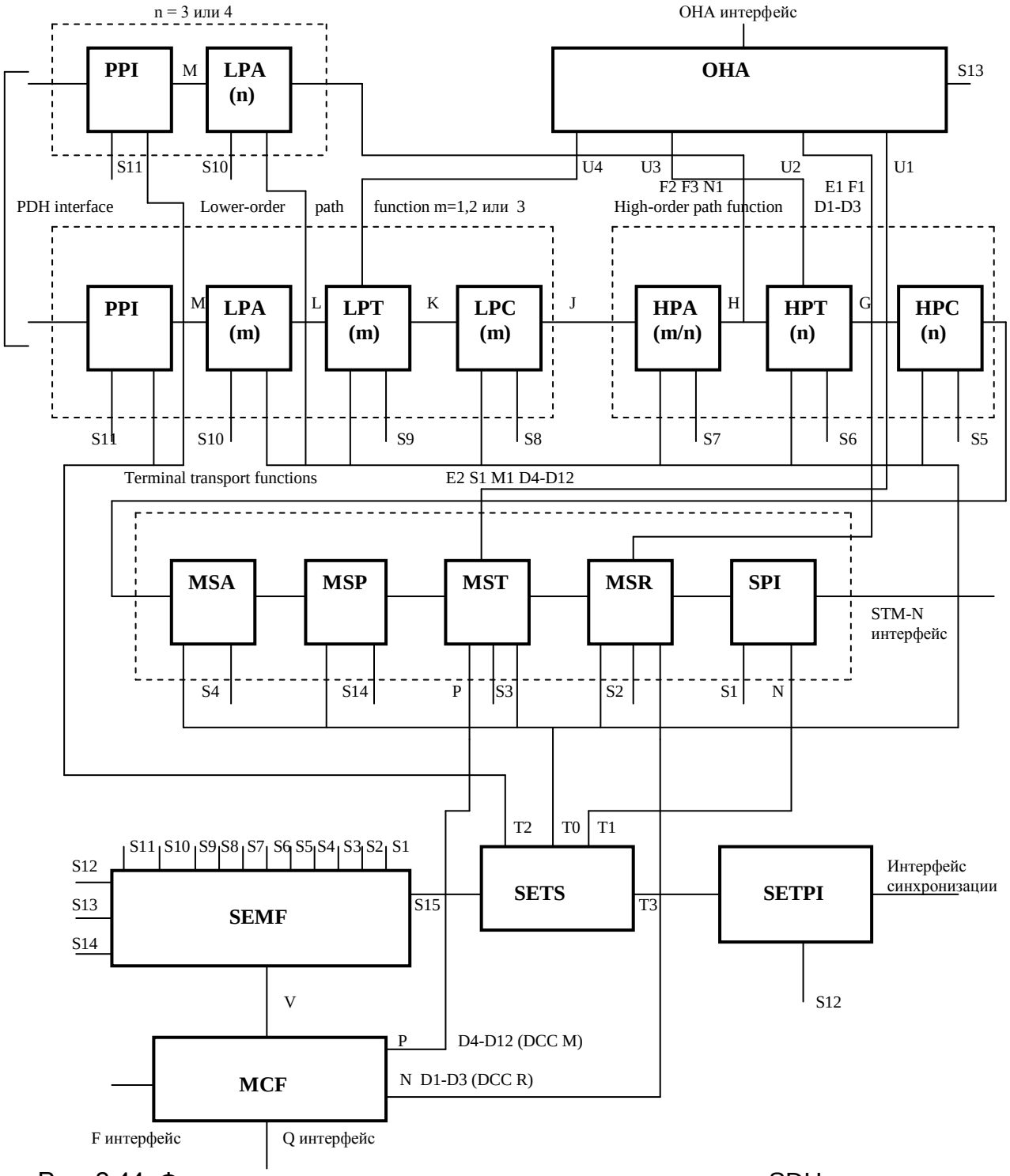


Рис. 2.44. Функциональная схема оконечного мультиплесора SDH.

На рисунке использованы следующие обозначения функциональных блоков:

- PPI (path physical interface) – физический интерфейс тракта;
- LPA (lower-order path adaptation) – согласование тракта низшего порядка;
- LPT (lower-order path termination) - окончание тракта низшего порядка;
- LPC (lower-order path connection) – соединение тракта низшего порядка;
- HPA (higher-order path adaptation) – согласование тракта высшего порядка;
- HPT (higher-order path termination) – окончание тракта высшего порядка;
- HPC (higher-order path connection) – соединение тракта высшего порядка;
- MSA (multiplexer section adaptation) – согласование мультиплексной секции;
- MSP (multiplexer section protection) – защита мультиплексной секции;
- MST (multiplexer section termination) – окончание мультиплексной секции;
- RST (regenerator section termination) – окончание регенерационной секции;
- SPI (SDH physical interface) – физический интерфейс СЦИ;
- OHA (overhead access) – доступ к заголовку;
- SEMF (synchronous equipment management function) – функция управления синхронным оборудованием;
- MCF (message communication function) – функция передачи сообщений;
- SETS (synchronous equipment timing source) – источник хронирования синхронного оборудования;
- SETP (synchronous equipment timing physical interface) – физический интерфейс синхронизации синхронного оборудования.

Приходящие на мультиплексор SDH компонентные потоки через узел PPI, осуществляющий функцию физического интерфейса, поступают в блок LPA, где производится согласование скоростей трибутарного потока и мультиплексора, то есть формируется контейнер C соответствующего уровня. Затем в блоке LPT, осуществляющем функцию окончания тракта, добавляется трактовый заголовок и тем самым формируется виртуальный контейнер VC. В блоке LPC каждому виртуальному контейнеру VC ставится в соответствие свой указатель с образованием трибутарного блока TU, что с помощью выравнивания фазовых соотношений дает возможность осуществлять кросс-коммутацию компонентных потоков нижнего уровня. На этом заканчиваются функции трактов низшего порядка (Lower-order path function).

Функции трактов высшего порядка (Higher-order function) выполняют последовательно блоки HPA, HPT и HPC. HPA осуществляет

мультиплексирование трибутарных блоков TU с образованием групп трибутарных блоков TUG. HPT, добавляя трактовый заголовок, образует виртуальные контейнеры VC верхнего уровня, а HPC реализует возможность их кросс-коммутации.

Функциональный блок MSA с помощью указателя административного блока AU выранивает скрость передачи и фазовые соотношения VC верхнего уровня и секционного заголовка SOH. Блок MSP выполняет функцию защитного аварийного переключения. Далее блоки MST и RST образуют, соответственно, заголовки мультиплексной и регенерационной секции, а узел SPI осуществляет функцию физического интерфейса для агрегатного сигнала STM. Эти четыре блока образуют функцию транспортного окончания (Terminal transport function).

В состав мультиплексора входит функциональный блок доступа к заголовку OHA, имеющий связи со всеми узлами, формирующими трактовые и секционные заголовки. Блок реализует доступ к соответствующим байтам заголовков для реализации функций управления, выделения ошибок, служебных каналов и т. д.

Функции синхронизации выполняют блоки SETS и SETPI. Первый содержит внутренний генератор с устройством удержания частоты (T0), получает сигналы тактовой синхронизации, выделенные из агрегатного (T1) и компонентного сигнала (T2), а также через блок физического интерфейса SETPI имеет связь с внешним источником тактовой синхронизации (T3).

Функциональный блок SEMF реализует функции управления и мониторинга остальными узлами мультиплексора, а с помощью блока MCF, образующим через каналы DCC связь с другими мультиплексорами на сети, имеет возможность организовать удаленный мониторинг и управление сетью мультиплексоров SDH. Поэтому блок SEMF имеет функциональные связи со всеми остальными узлами мультиплексора.

Аналогичным образом выглядит функциональная схема мультиплексора ввода/вывода. Среди разнообразных реализаций мультиплексоров ввода/вывода можно выделить две, наиболее характерные. Это мультиплексор, осуществляющий ввод/вывод компонентных потоков плезиохронной иерархии PDH (рис. 2.45), и мультиплексор с вводом/выводом в качестве компонентных сигналов - потоков синхронной цифровой иерархии SDH (рис. 2.46).

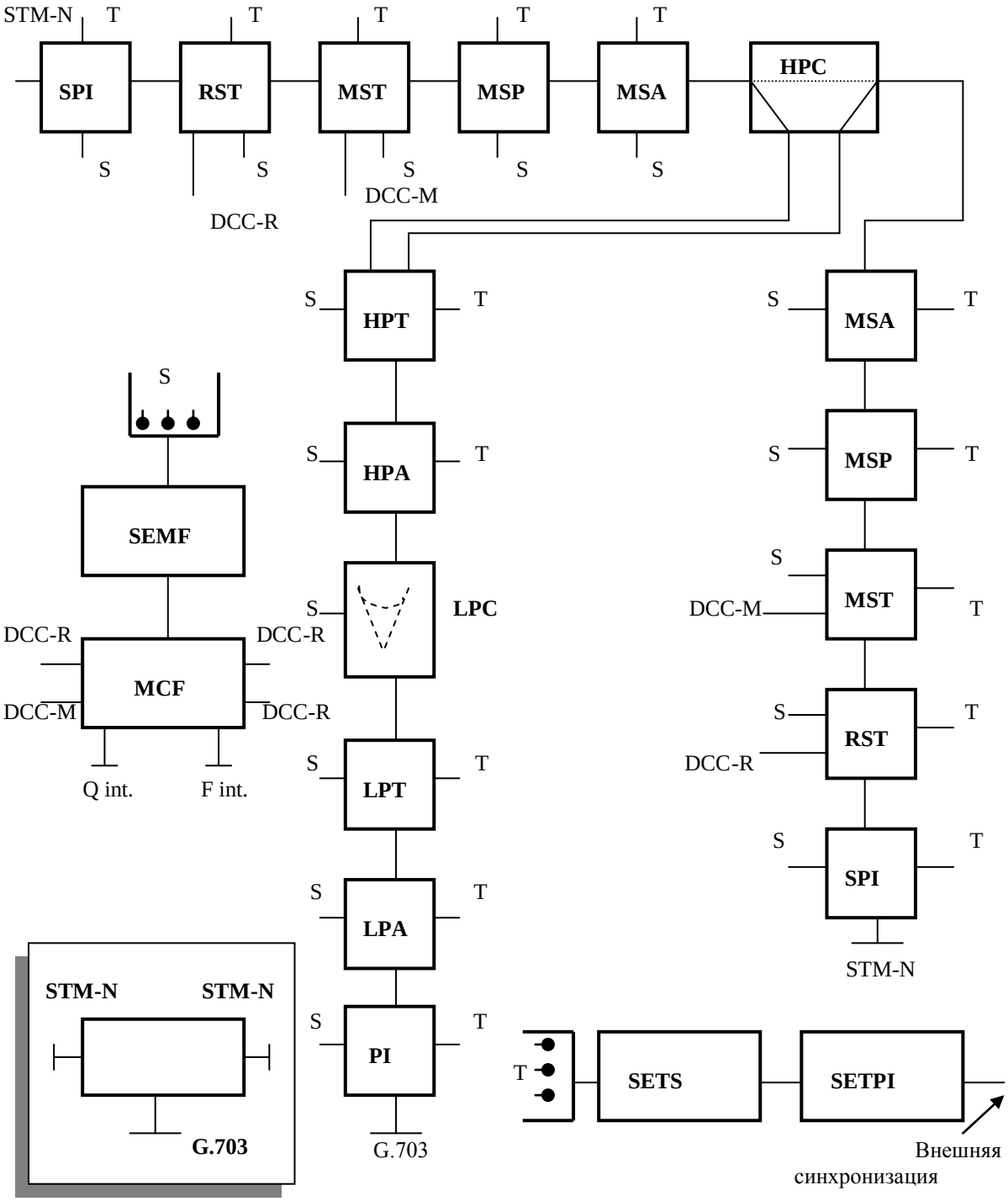


Рис. 2.45. Мультиплекор SDH с вводом/выводом компонентных потоков PDH.

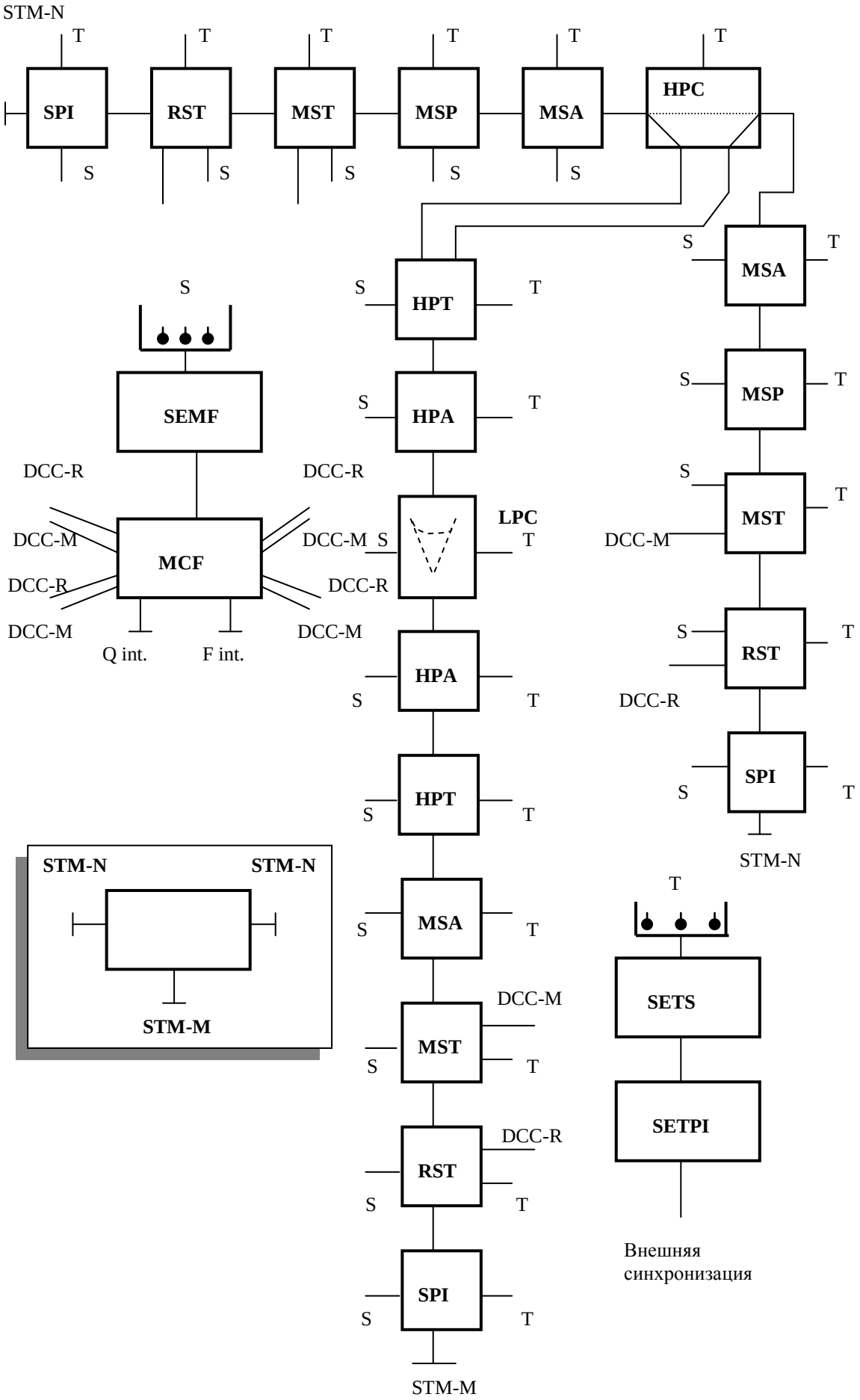


Рис. 2.46. Мультиплексор с вводом/выводом компонентных потоков SDH.

Оба мультиплексора поддерживают продольное направление «Запад» - «Восток» для прохождения сигнала вдоль линии передачи или по кольцу и поперечное направление для выделения либо части компонентных потоков PDH (рис. 2.45), либо компонентного потока SDH более низкого уровня (рис. 2.46). В продольном направлении организуется разборка агрегатного сигнала до верхнего уровня виртуальных контейнеров VC-n с организацией их кросс-коммутации и последующая сборка агрегатного сигнала того же уровня. В поперечном направлении в первом случае осуществляется разборка VC-n до контейнеров нижнего уровня VC-m с возможностью их кросс-коммутации и образование физических интерфейсов компонентных потоков PDH. Во втором случае после функции кросс-коммутации контейнеров нижнего уровня организуется их сборка до контейнеров верхнего уровня и образование сигнала синхронного транспортного модуля с соответствующим физическим интерфейсом STM-M того уровня, который выделяется в поперечном направлении.

2.2.15. Обобщенный взгляд на технологию SDH.

Получив основополагающие знания посмотрим еще раз на технологию SDH (рис.2.47). На рисунке изображена бочка, стянутая для надежности обручами. Так

Рис. 2.47. SDH как бочка, стянутая для надежности обручами.

и в технологии SDH, для повышения надежности работы первичной сети она стянута многочисленными процессами и процедурами контроля. Сама технология разделена на 4 уровня и практически все процедуры реализованы на всех уровнях независимо. Это 7 процедур:

1. Разделение на уровни само по себе.

2. Резервирование передачи информации (поля K).

3. Формирование индивидуальных маршрутов (поля J).
4. Контроль процессов загрузки/выгрузки (поля C).

5. Контроль ошибок при передаче (поля B).

6. Передача и прием огромного количества сигналов о неисправностях (поля G и др.).

7. Посекционный контроль на уровне секций (поля B) и на уровне маршрутов (TCM).

Все эти 7 обручей гарантируют главное достоинство систем SDH: **на настоящий момент это самая надежная и стабильная технология первичной сети.** Платой за такую высокую стабильность и надежность является довольно низкий КПД пропускной способности – от 40 до 45% ресурса тратится на передачу полезной информации, а остальное – на резервирование, функции контроля, управления и пр. Однако, развитие микропроцессорной и оптоволоконной техники способствовало тому, что «труба» SDH по скорости передачи оказалась расширяемой практически до бесконечности.

Глава 3. СИНХРОНИЗАЦИЯ В СЕТЯХ SDH. ДЖИТТЕР И ВАНДЕР.

Любое нарушение синхронизации в системе, построенной на принципах жестко-синхронной работы, приводит к выходу ее из строя. Поэтому синхронизация для системы синхронной цифровой иерархии является очень важным компонентом.

Нарушения в синхронизации мультиплексора МВВ не позволят всей системе SDH нормально работать, т. к. МВВ не сможет найти указатель, не сможет идентифицировать поле нагрузки, произвести процедуру ввода/вывода. Более того, он не сможет правильно переписать заголовок MSOH, а, значит, остановится работа всей системы SDH от уровня мультиплексной секции и ниже.

Таким образом, проблема синхронизации для систем SDH является очень важной, и мы перейдем к ее рассмотрению.

3.1. Общие сведения о синхронизации.

3.1.1. Аллегория «Бассейн».

Лучше всего проблемы систем синхронизации понятны на аллегории «бассейна», известной любому, знакомому с курсом математики начальной школы. На рис. 3.1. представлен бассейн с двумя трубами, одна из которых его

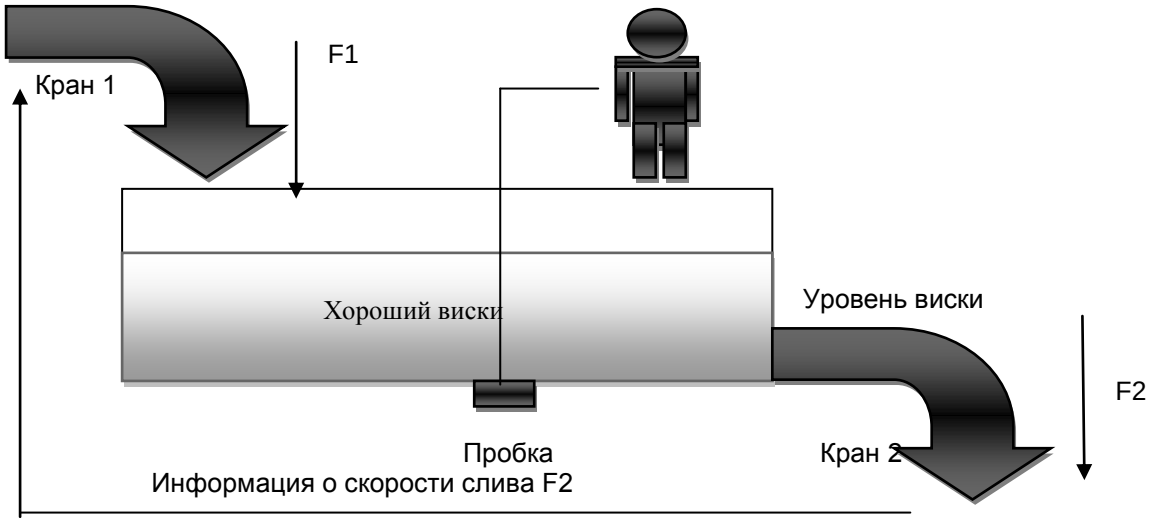


Рис. 3.1. Аллегория «бассейна».

наполняет, а другая – опоражнивает. Скорость налива – F1 , скорость слива F2, и пусть F1 > F2, так что бассейн постоянно наполняется. У бассейна дежурит человек, который имеет цепь, привязанную к пробке бассейна. Когда бассейн полностью заполнится, человек выдергивает пробку, и вся вода сливается в сток.

Усложним теперь эту задачу. Пусть в кранах теперь течет виски, потеря которого не желательна, а у управляющего две цепочки в руках. Когда F1 > F2, и бассейн переполняется, он должен выдернуть пробку и виски выливается наружу. Если же F1 < F2, то бассейн постепенно опустошается, и скоро неминуемо кран 2 начнет засасывать воздух, что может испортить систему. Чтобы этого не произошло, управляющий имеет резервуар с водой и может дополнять ею бассейн. На выходе мы получим разбавленный виски, но система будет спасена.

Все решения проблемы должны осуществляться вокруг бассейна и двух кранов. На самом деле легко понять, что проблема синхронизации в своей основе не так уж и сложна. Например, можно передавать от крана 2 к крану 1 информацию о скорости слива и пытаться подстроить скорость налива F1 по F2. Можно поступить наоборот, пытаясь выровнять F2 по скорости F1. Однако, добиться идеального совпадения F1 и F2 не возможно, так что рано или поздно придется действовать управляющему.

Теперь от аллегории перейдем к рассмотрению вопросов синхронизации, установив сначала соответствия с аллегорией. Передатчик и приемник информации будут соответствовать кранам 1 и 2, бассейн – эластичному буферу, виски – полезной информации, передаваемой по системе передачи, а вода – служебной информации. Управляющий – системе управления проскальзываниями эластичного буфера. Рассмотрим самое важное понятие в системе синхронизации – понятие проскальзываний.

3.1.2. Понятие проскальзываний.

Основным следствием влияния синхронизации на параметры каналов цифровых систем передачи являются проскальзывания. Проскальзыванием называется повторение или исключение группы символов двоичных битов в результате различия между скоростями считывания и записи в буферной памяти. Т. е. проскальзывания – это потеря информации или ее дублирование из-за нарушений в системе синхронизации. Механизм возникновения проскальзываний достаточно прост и представлен на рис. 3.2, в котором легко узнать задачу о двух бассейнах.

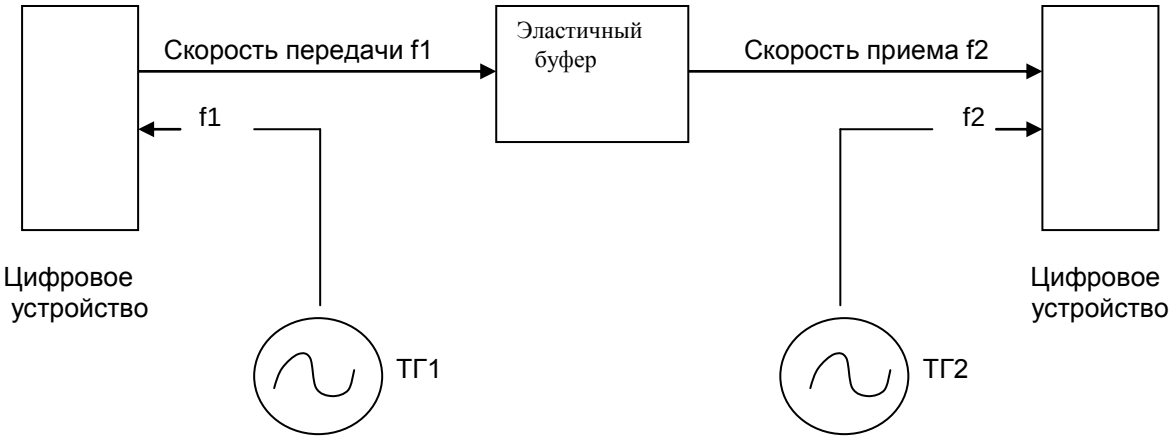


Рис. 3.2. Механизм возникновения проскальзываний.

Цифровое устройство 1 генерирует цифровой сигнал с частотой f1, этот сигнал с частотой f1 записывается в оперативную память эластичного буфера, из которого считывается приемным цифровым устройством 2 с частотой f2. Частоты передачи и считывания определяются частотой задающих тактовых генераторов (ТГ1 и ТГ2). В случае, если f1 > f2, буфер постепенно переполняется, что приводит к потере информации в размере емкости буфера – положительное проскальзывание. Если же f1 < f2, то цифровое устройство 2 рано или поздно начнет считывать информацию с дублированием битов, что приведет к ошибке – отрицательному проскальзыванию.

В отсутствие эластичного буфера проскальзывания возникают по мере накопления фазового сдвига сигналов передачи и приема. В этом случае в зависимости от среднего уровня рассинхронизации будут возникать битовые проскальзывания, т. е. ошибки в считывании бита. Современные цифровые сигналы как правило структурированы на циклы или кадры, поэтому битовые проскальзывания будут нарушать цикловую синхронизацию. Для определенности представим, что потерян первый бит поля V5 LP-POH. В этом случае система считает оставшиеся биты V5 плюс один бит нагрузки и неправильно поймет данные V5. Поле нагрузки в свою очередь будет принято с потерей одного первого бита и один бит будет ложно вставлен из поля стаффинга. Далее все пойдет по цепочке, так что потеря одного бита приведет к потере всей информации на маршруте нижнего уровня. Этого не произошло бы, если бы потерялся весь VC-12. Тогда по крайней мере сохранился бы цикловой синхронизм, т. е. понимание, где и какое поле в поле нагрузки присутствует.

Таким образом, с точки зрения алгоритмов взаимодействия цифровых устройств более желательными являются цикловые проскальзывания, которые приводят к потере цикла информации, но не приводят к нарушению цикловой синхронизации. Например, одно битовое проскальзывание приводит в современных цифровых АТС к потере до 3 циклов информации, что необходимо для восстановления циклового синхронизма. Такие проскальзывания называются неуправляемыми.

Для минимизации нежелательных явлений, связанных с проскальзываниями, используют эластичные буферы размером в один или несколько циклов. Типовая схема такого эластичного буфера представлена на рис. 3.3 и представляет собой почти полную копию бассейна.

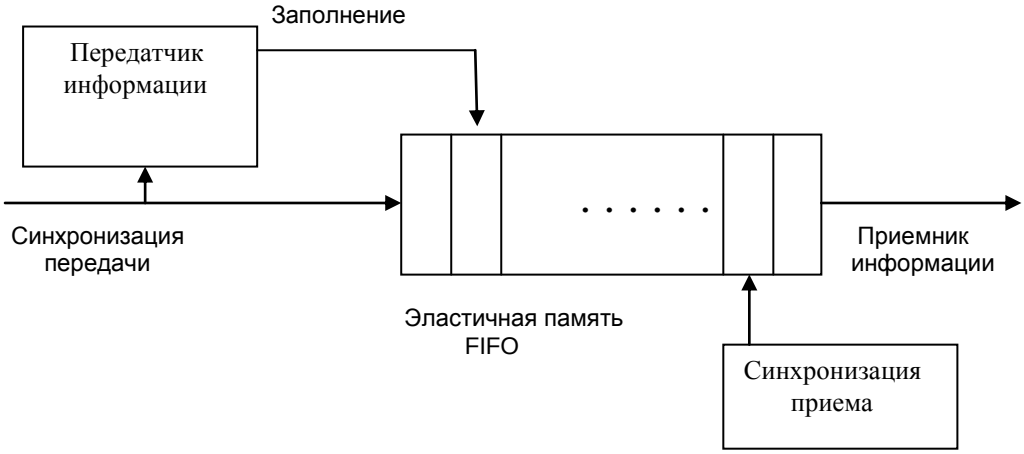


Рис. 3.3. Структурная схема эластичного буфера.

При использовании эластичного буфера реализуется механизм управляемых проскальзываний: в момент переполнения буфера вся информация в нем полностью стирается и буфер опустошается. Это приводит к потере одного цикла информации, но не приводит к потере цикловой синхронизации. Управляемые проскальзывания в настоящее время являются единственно допустимыми в цифровых сетях связи. В дальнейшем под проскальзыванием мы будем понимать именно управляемые проскальзывания.

Вся проблематика построения систем синхронизации – это борьба с проскальзываниями. Любые проскальзывания: отрицательные и положительные, управляемые и неуправляемые приводят к потерям полезной информации. Это всегда нежелательное явление и его стараются избежать.

Проблема полностью решалась бы в случае, если f1 = f2, но это теоретически невозможно, никогда f1 не будет в точности равно f2. Можно только стремиться минимизировать это зло, например, если в системе будет возникать одно проскальзывание в год, то его наверняка никто не заметит.

3.1.3. Общие принципы систем синхронизации.

Для того, чтобы добиться необходимого для нормальной работы цифровой системы передачи более или менее одинаковой частоты задающих генераторов целесообразно подстроить все генераторы сети связи, выравнивая их частоты. Для систем синхронизации все цифровые устройства (рис. 3.2) одинаковы в том смысле, что эта система видит только входящие в них тактовые генераторы.

В результате любая система синхронизации может быть схематично отображена в виде графа, в узлах которого расположены генераторы, соединенные каналами передачи. По этим каналам передаются синхросигналы, информирующие генераторы о параметрах тактовой частоты (рис. 3.4).

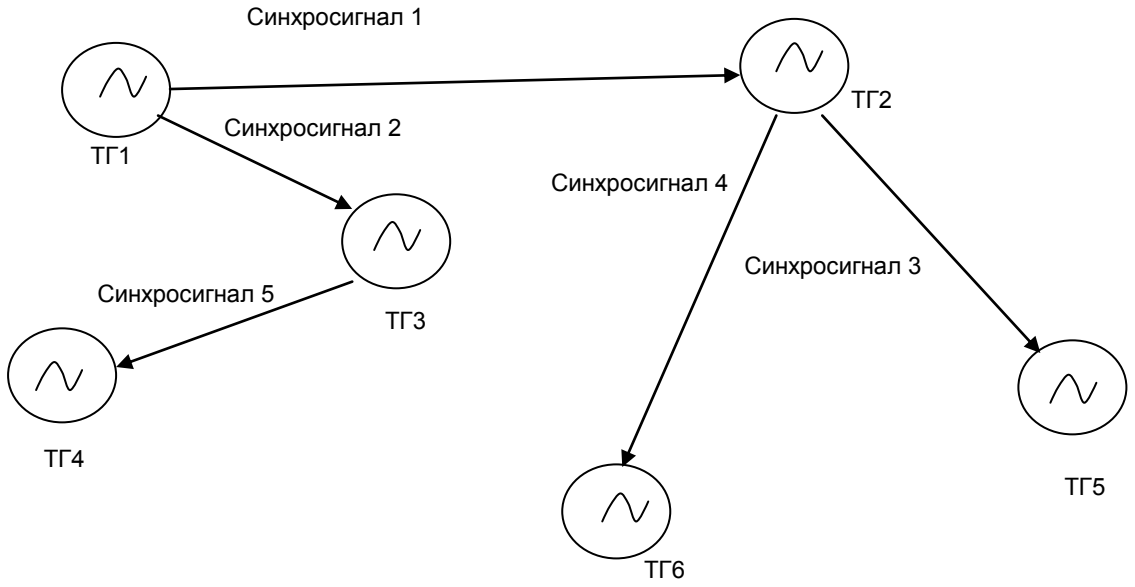


Рис. 3.4. Общая схема любой системы синхронизации.

Таким образом, в состав любой системы синхронизации входят:

- тактовые генераторы устройств;

- каналы и передаваемые по ним синхросигналы;

- сама схема синхронизации.

Рассмотрим компоненты, составляющие систему синхронизации – генераторы, синхросигналы и графы синхронизации. В современных системах связи используется несколько типов генераторов. Генераторы или, как их еще называют, источники синхронизации разделяются на две основных группы: кварцевые источники и атомные источники (рис. 3.5). К первой группе относится три типа источников: обычные кварцевые генераторы, кварцевые генераторы с температурной компенсацией TCXO (Temperature Compensated Crystall Oscillator) и охлаждаемые кварцевые генераторы OSXO (Oven Compensated Crystall Oscillator). Атомные источники разделяются тоже на три типа: водородные

мазеры, цезиевые стандарты и рубидиевые источники. Кварцевые источники используют пьезокерамические свойства кварца, тогда, как атомные источники частоты работают на принципе резонансного лазерного излучения.

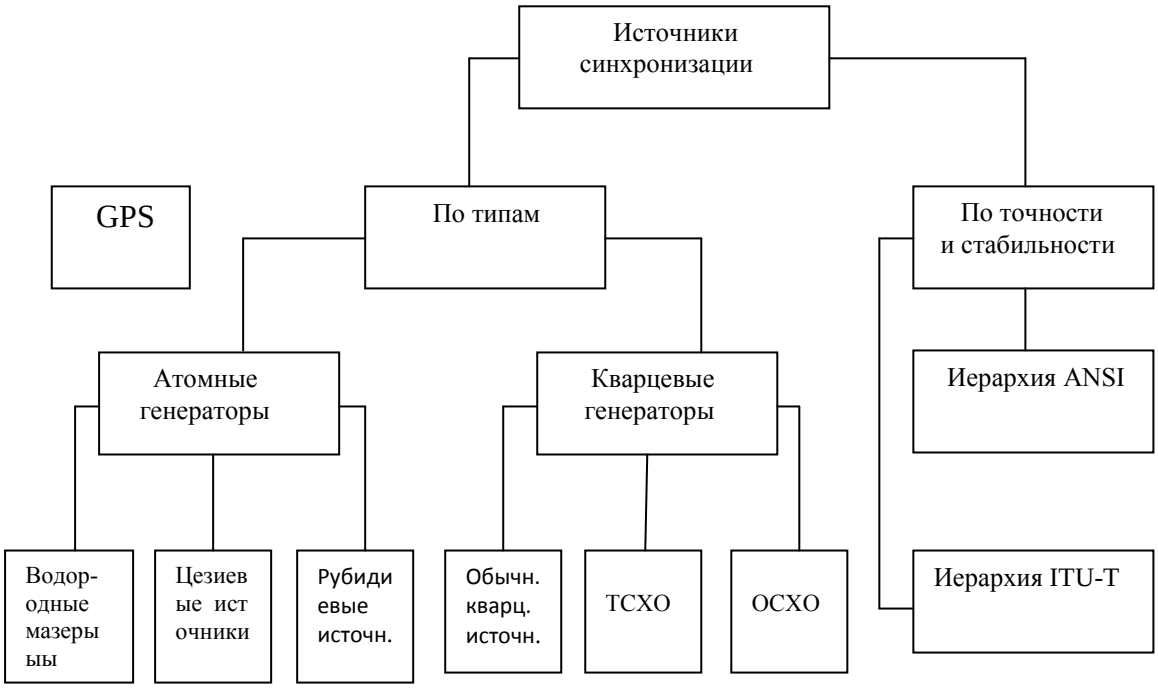


Рис. 3.5. Иерархия источников синхронизации (генераторов).

Отдельной группой стоят источники, использующие систему спутниковой навигации GPS/GLONASS. Поскольку для решения задачи точного позиционирования (определения координат на местности) приемник этой системы должен синхронизироваться с системой спутниковой связи. В результате в качестве побочного продукта на приемнике GPS появляется сигнал со стабильностью $10^{-9} \div 10^{-11}$, что более чем достаточно для телекоммуникационных приложений.

Все приведенные семь основных типов источников синхронизации различаются своими физическими принципами и параметрами точности, имеют свои особенности построения. Среднестатистические данные об основных параметрах этих источников сведены в табл. 3.1. Наибольшую точность и стабильность генерируемого сигнала дают водородные мазеры, затем идут цезиевые стандарты, рубидиевые источники частоты, ТСХО, ОСХО и, наконец, обычные кварцевые генераторы. Пропорционально точности уменьшается стоимость. Высокая стоимость водородных мазеров приводит к тому, что их практически не используют в телекоммуникационных приложениях. В оборудовании связи в основном применяются кварцевые генераторы различной стабильности.

В таблице указано несколько важных параметров генераторов, которые могут быть полезны каждому оператору, выбирающему цифровое устройство для своей сети. Однако, в той или иной степени все параметры генераторов связаны с параметрами частоты. По этой причине существует два основных параметра генератора – это точность и стабильность.

Таблица 3.1. Сравнительные характеристики различных источников синхронизации.

	Тип источника синхронизации				
Характеристики	**Кварцевый обычный**	**ТСХО**	**ОСХО**	**Цезиевый стандарт**	**Рубидиевый источник**
Основная частота Резонатора		10 кГц – 100 Мгц		9192631770 Гц	6834682613 Гц
Обеспечиваемые выходные Частоты		10 кГц – 100 Мгц		1, 5, 10 МГц	1, 5, 10 МГц
Относительный кратковременный дрейф частоты, 1с	10^{-9}	10^{-9}	$10^{-9}-10^{-10}$	$10^{-11}-10^{-13}$	$10^{-11}-10^{-12}$
Относительный долговременный дрейф частоты, 1 сутки	10^{-7}	10^{-8}	$10^{-7}-10^{-9}$	$10^{-13}-10^{-14}$	$10^{-12}-10^{-13}$
Относительный долговременный дрейф частоты, большой временной интервал	10^{-6} в год	$10^{-8}-10^{-7}$ в год	$10^{-9}-10^{-11}$ в год	10^{-13} в год	10^{-11} в месяц
Внешние факторы, воздействующие на параметры	Движение, температура, физические параметры кварца			Магнитные поля, температура	Магнитные поля, температура, атмосферное давление
Причины, влияющие на долговременную стабильность	Старение кварца, старение электронных компонентов, окружающая среда			Старение компонентов	Источники света, окружающая среда

Точностью частоты называется относительное отклонение генерируемой частоты f_a от номинальной частоты f_0, так что

Точность = $\frac{|f_0 - f_a|}{|f_0|}$, например, отклонение в 50 ppm означает допустимую точность генерируемой частоты $5 \bullet 10^{-5}$.

Стабильностью называется свойство данного генератора поддерживать режим генерации номинальной частоты в течение заданного промежутка времени. Параметр стабильности также измеряется в относительных единицах отклонения частоты от номинальной, однако, включает в себя промежуток времени наблюдений, например, 10^{-10} за сутки.

По времени наблюдений различают долговременную и кратковременную стабильность генераторов. Это разделение является оценочным. Параметры стабильности оцениваются в пределах $t_S = 10^3 - 10^4$ с: если параметры стабильности анализируются до t_S, это называется кратковременной стабильностью, если больше t_S, то это долговременная стабильность.

Как видно из табл. 3.2, кварцевые генераторы обеспечивают достаточно высокий уровень кратковременной стабильности, но долговременная стабильность у них довольно низкая. Атомные генераторы характеризуются на несколько порядков более высокими параметрами стабильности. Цезиевые стандарты обеспечивают высокие параметры как долговременной, так и кратковременной стабильности. Рубидиевые генераторы обладают высокими параметрами кратковременной стабильности, но их параметры долговременной стабильности ниже, чем у цезиевых.

Стоимость генераторов прямо пропорциональна их стабильности, так что самыми дорогими являются цезиевые стандарты, затем идут рубидиевые генераторы, кварцевые генераторы ТСХО, ОСХО и, наконец, наиболее дешевыми являются обычные кварцевые генераторы (табл. 3.2).

Таблица 3.2. Основные типы генераторов, используемых в системах связи.

Источник	**Стабильность**	**Габариты**	**Стоимость**
Цезиевый	Высокая	Станционное оборудование	Высокая
Рубидиевый	Средняя	Портативные устройства	Средняя
ТСХО	Средняя	Компоненты	Средняя
ОСХО	Средняя	Компоненты	Средняя
Обычный кварц	Низкая	Микросхема	Низкая

Вторым компонентом системы синхронизации являются синхросигналы. Для передачи информации о генераторе необходимо использовать определенный сигнал, который бы содержал сведения о точной частоте генератора, и этот сигнал должен передаваться по системе связи. Поэтому в зависимости от возможностей транспортной сети используется несколько общеупотребительных синхросигналов:

- цифровой сигнал 2048 кбит/с с кодированием HDB3;

- гармонический одночастотный сигнал с частотой 2048 кГц;

- гармонический одночастотный сигнал с частотой 10 кГц;

- гармонический одночастотный сигнал с частотой 5 кГц;

- сигнал TTL в виде меандра.

Каждый из этих синхросигналов может использоваться в системах передачи для синхронизации. Использование того или иного сигнала зависит только от трех возможностей системы связи:

1. Генератор-передатчик должен иметь возможность передать сигнал.

2. Канал связи с системами передачи должен иметь возможность передать сигнал без искажений на генератор-приемник.

3. Генератор-приемник должен принять сигнал и использовать его для подстройки частоты.

Несмотря на тривиальность вышеперечисленных требований, в них содержаться 90% всех проблем синхронизации, а именно:

1. Проблемы, связанные с передачей без помех синхросигнала.

2. Проблемы искажений синхросигнала в процессе передачи.

3. Проблемы конвертации форматов синхросигналов, когда приемник и передатчик не понимают форматы синхросигналов друг друга.

При передаче синхросигнала по линии связи на него воздействует множество факторов, наиболее существенными из которых являются:

- электромагнитная интерференция, шумы и помехи, воздействующие на цепь синхронизации в приемнике;

- изменения длины тракта передачи, например, удлинение системы передачи при изменении температуры ночью и днем приводит к модуляции частоты синхросигнала;

- изменение скорости распространения;

- доплеровские сдвиги от подвижных оконечных устройств, например при движении спутника по орбите;

- нарушения в формате данных синхросигнала.

В результате воздействия всех этих факторов синхросигнал теряет свои свойства, его стабильность ухудшается и использовать его для подстройки частоты генераторов становится невозможно. Чем большее количество цифровых устройств находится в цепочке передачи синхросигнала, тем хуже по качеству сигнал получит последний. Длина такой цепочки часто называется количеством переприемов по синхросигналу. Таким образом, возникает задача оптимизации структуры системы синхронизации с целью уменьшения количества переприемов по каждому направлению.

Мы переходим к третьему компоненту системы синхронизации – графу системы синхронизации. Это схема, на которой определено какой генератор куда передает синхросигналы. Построение оптимального графа синхронизации представляет собой очень важную задачу. Достаточно представить себе схему из полутора тысяч цифровых устройств, которые мы должны рассматривать в качестве генераторов в системе синхронизации, причем каждый из них имеет свои параметры и может передавать и принимать только определенные синхросигналы.

3.1.4. Построение системы синхронизации.

В мировой практике имеется несколько важных технологических подходов к построению системы синхронизации. Первый из них заключается в разделении всей системы синхронизации на межузловую и внутриузловую системы. В результате возникла концепция интегрированных систем синхронизации BITS. Концепция BITS, представленная на рис. 3.6, охватывает три основных подсистемы: систему межузловой синхронизации (Interoffice Timing), систему внутриузловой синхронизации (Intraoffice Timing) и подсистему контроля и управления качеством синхронизации (QoS).

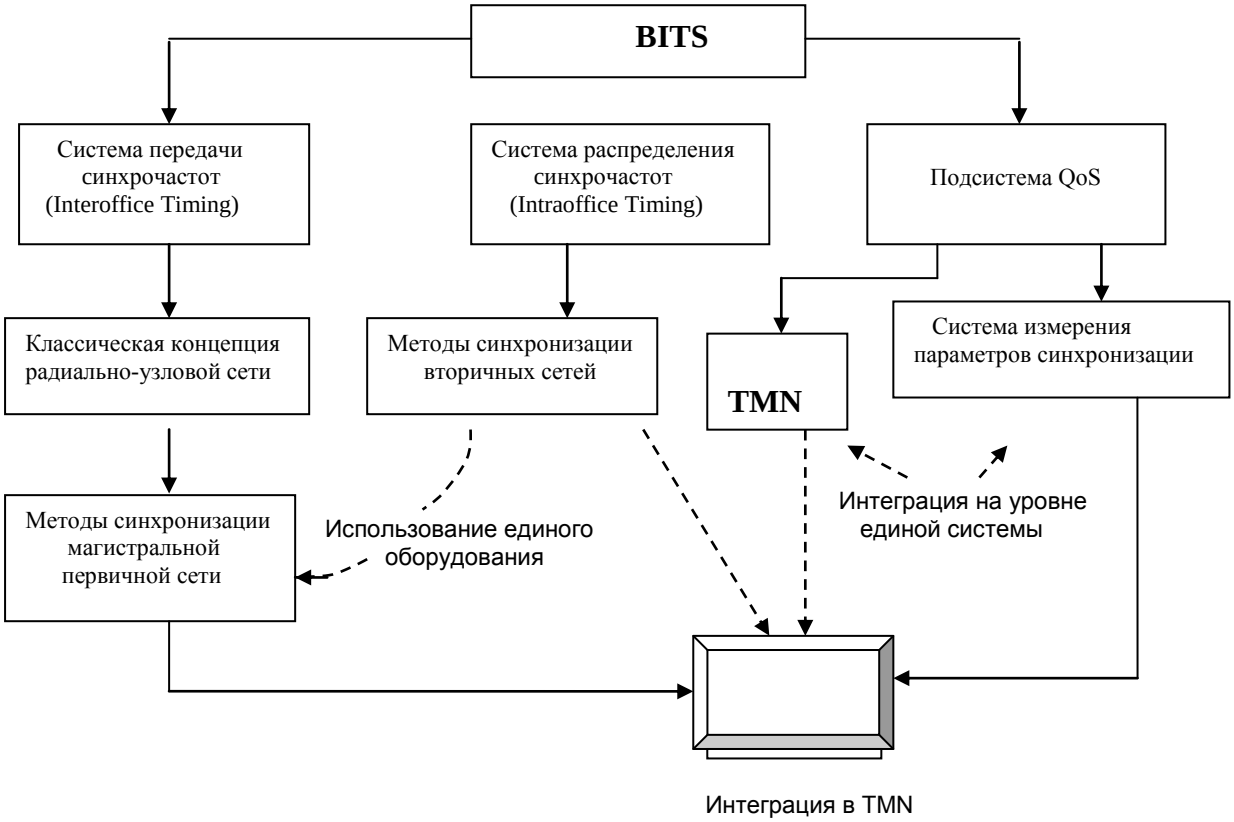


Рис. 3.6. Концепция построения интегрированных систем синхронизации BITS.

Система межузловой синхронизации предусматривает размещение в ключевых узлах сети генераторов синхронизации и построение ситемы распределения синхрочастот по сети с использованием трафиковых или выделенных каналов связи. Эта система является основой любой системы синхронизации, поэтому она наиболее важна при проектировании. Система межузловой синхронизации имеет собственную топологию, часто отличную от топологии сети, и тесно связана со структурой, как первичной, так и вторичной

телекоммуникационной сети. При расширении и реконфигурации сети связи система межузловой синхронизации также должна изменяться и модернизироваться.

Система внутриузловой синхронизации имеет более локальное значение, поскольку она определяет порядок синхронизации различных цифровых устройств в пределах одного узла сети. В систему внутриузловой синхронизации могут входить специальные генераторы, однако в большей степени эта система строится на основе объединения генераторов, входящих в состав цифровых устройств связи, размещенных на узле. В отличие от системы межузловой синхронизации, которая должна проектироваться, строиться и обслуживаться системно, с учетом топологии и процессов, проходящих во всей сети, система внутриузловой синхронизации создается локально, привязываясь к конкретному узлу связи. Модернизация сети связи может требовать модификации системы только в случае, если первая модернизирует конкретный узел либо приводит к изменению параметров синхросигнала, от которого синхронизируется данный узел.

Учитывая, что в настоящее время значительно повысились требования к надежности и качеству систем синхронизации, в состав современной системы включается дополнительно подсистема, которая непосредственно связана с обслуживанием системы синхронизации – *подсистема контроля и управления качеством системы синхронизации (QoS).* Основным назначением этой системы являются управление, диагностика и тестирование системы синхронизации.

Обеспечение высоких параметров качества и надежности системы связи требуют от оператора постоянного контроля за состоянием системы синхронизации. Для осуществления управления системой синхронизации создается система управления, интегрированная в общую платформу TMN, так что оператор имеет возможность контролировать состояние системы синхронизации и осуществлять ее реконфигурацию из единого центра в режиме реального времени. Особенно важные функции выполняет система управления в процессах реконфигурации системы синхронизации. Для этого используются сигналы о параметрах качества системы синхронизации (SSM).

Разделение в концепции BITS всех генераторов сети на межузловую и внутриузловую систему синхронизации значительно уменьшает рассматриваемое количество устройств. Есть узлы сети, которые рассматриваются как отдельные генераторы, и так строится система межузловой синхронизации. На узлах сети имеется большое количество разных цифровых устройств (иногда сотни или тысячи). Синхронизация этих устройств в пределах узла – задача отдельная. Таким образом, в системе межузловой синхронизации мы видим только узлы, а цифровые устройства мы видим в системе внутриузловой синхронизации.

Основная проблема – система межузловой синхронизации, именно она является территориально-распределенной. Для синхронизации отдельных устройств внутри узла модно в конце концов проложить специальный кабель. Но

этого нельзя сделать в системе межузловой синхронизации, где используются только существующие каналы связи.

Синхронизация в сетях SDH. Международные органы стандартизации и, в частности, МСЭ работают над определением характеристик генераторного оборудования СЦИ – SEC (SDH Equipment Clock). **Характеристики SEC** содержаться в нескольких Рекомендациях ETSI и МСЭ-Т, предоставляющих полную спецификацию параметров точности и стабильности, а также подробное функциональное описание. Здесь SEC представлен функциональным блоком источника синхросигнала синхронного оборудования SETS (Synchronous Equipment Timing Sourse).

Источник синхронизации может выбираться блоком SETS среди трех опорных точек:

- T1 – опорный сигнал, выделенный из входного сигнала STM-N;
- T2 – опорный сигнал, выделенный из входнго сигнала ПЦИ;
- T3 – опорный сигнал, полученный из внешнего устройства синхронизации через физический интерфейс синхронизации.

Кроме того, SETS может синхронизироваться от входящего в его состав внутреннего генератора. В сторону передачи SETS обеспечивает синхронизацию:

- всех функциональных блоков в составе оборудования СЦИ через опорную точку T0;
- внешний порт синхронизации через опорную точку T4.

Блок тактового генератора синхронного оборудования может работать в следующих режимах:

- режим захвата синхронизации от входного опорного сигнала(точки T1, T2 или T3), выбранного переключателем;
- режим удержания;
- режим свободных колебаний с точностью частоты $\pm 4{,}6 \times 10^{-6}$.

В зависимости от структуры распределения сигналов сетевой синхронизации существует несколько вариантов или режимов синхронизации блока SETS и распределения его синхросигнала:

- Синхронизация от линейного сигнала. Опорный синхросигнал выделяется из линейного сигнала направления «Восток» или «Запад» (T1). Это обычный режим синхронизации в сетях типа цепочки или кольца.

- Синхронизация от компонентного сигнала. Опорный синхросигнал выделяется из компонентного сигнала, который может быть либо сигналом STM-N (T1), либо сигналом ПЦИ (T2).

- Внешняя синхронизация. Сетевой элемент синхронизируется от выделенного внешнего опорного синхросигнала (T3). Этот режим синхронизации применяется, например, когда сетевой элемент получает синхросигнал от генераторного оборудования сети синхронизации.

- Внутренняя синхронизация. Генераторное оборудование сетевого элемента не получает никакого опорного синхросигнала (режим свободных колебаний или режим удержания.

Общеизвестно, что технология SDH/SONET может реализовать все свои преимущества, лишь опираясь на распределение по сети надежного синхросигнала надлежащего качества. В противном случае операции с указателями могут привести к избыточному значению джиттера и, следовательно, к снижению достоверности передачи информации в транспортируемых компонентных сигналах, особенно при большом числе переприемов.

В настоящее время средства сетевой синхронизации повсеместно признаны прибыльным сетевым ресурсом, позволяющим помимо удовлетворения потребностей СЦИ/СОНЕТ осуществить цифровую коммутацию без проскальзываний, улучшить рабочие характеристики транспортных услуг на основе АТМ и повысить качество множества различных услуг (например, цифровых сетей связи с интеграцией услуг, мобильной сотовой связи и т. д.).
По этой причине большинство ведущих операторов связи организовали национальные сети синхронизации, чтобы доставить общий эталонный (опорный) сигнал синхронизации к каждому узлу сети электросвязи. МСЭ-Т и ETSI выпустили новые стандарты по синхронизации, пригодные для работы современных (включая те, которые базируются на СЦИ/СОНЕТ) цифровых сетей электросвязи. Эти стандарты содержат более строгие и более определенные требования к джиттеру и вандеру на интерфейсах синхронизации, требования к точности и стабильности устройств синхронизации, а также к архитектуре сетей синхронизации.

Синхронизация и цифровая передача в сетях SDH/SONET. В сетях СЦИ используются преимущества сетевой синхронизации для снижения джиттера и вандера в выходных компонентных потоках. Дело в том, что в сложных сетях с несколькими переприемами (загрузкой/выгрузкой) ПЦИ-СЦИ и СЦИ-ПЦИ и при использовании оборудования различных поставщиков, удовлетворить требованиям к фазовым дрожаниям на границах ПЦИ/СЦИ можно только при точной синхронизации всех сетевых элементов СЭ (NE), избегая каких-либо операций с указателями. Поэтому в сетях SDH необходимо синхронизировать не только первичные мультиплексоры и цифровое коммутационное оборудование, но и узлы транспортных сетей.

В сетях СЦИ не рекомендуется передавать синхронизацию в сигналах, размещенных в циклах STM-N (например, 2,048 Мбит/с), так как компонентные сигналы полезной нагрузки синхронного транспортного модуля не могут эффективно передавать тактовые сигналы из-за избыточного джиттера, наблюдаемого при коррекции указателей. Наилучшим и прямым способом

передачи синхросигнала в сети СЦИ служит его передача непосредственно в групповых сигналах STM-N. Тактовый сигнал, выделенный из сигналов STM-N, имеет лучшее качество, которое можно достичь в настоящее время. На него воздействует только джиттер, вносимый линией (например, джиттер, обусловленный тепловым шумом и условиями окружающей среды в оптической линии), а не выравнивание по битам или какие-либо другие преобразования.

Схема синхронизации двух цифровых коммутационных станций в сетях СЦИ показана на рис. 3.7. Внешнее генераторное оборудование SASE (Stand Alone Synchronization Equipment) первой станции (узла) синхронизирует не только генераторное оборудование цифровой коммутационной станции, но и задающий генератор оборудования СЦИ SEC. Таким образом, здесь выходной групповой сигнал является синхронным с ведущим генератором сети. На приемном конце SEC не синхронизируется непосредственно от входящего сигнала STM-N. Специальная функция тактового генератора оборудования СЦИ (переключатель) позволяет выделить тактовый сигнал из входного сигнала STM-N и непосредственно направить его через интерфейс синхронизации 2,048 МГц к генераторному оборудованию SASE на этой станции. Это оборудование SASE распределяет свои сигналы синхронизации по всему оборудованию узла, включая цифровую коммутационную станцию и демультиплексор СЦИ.

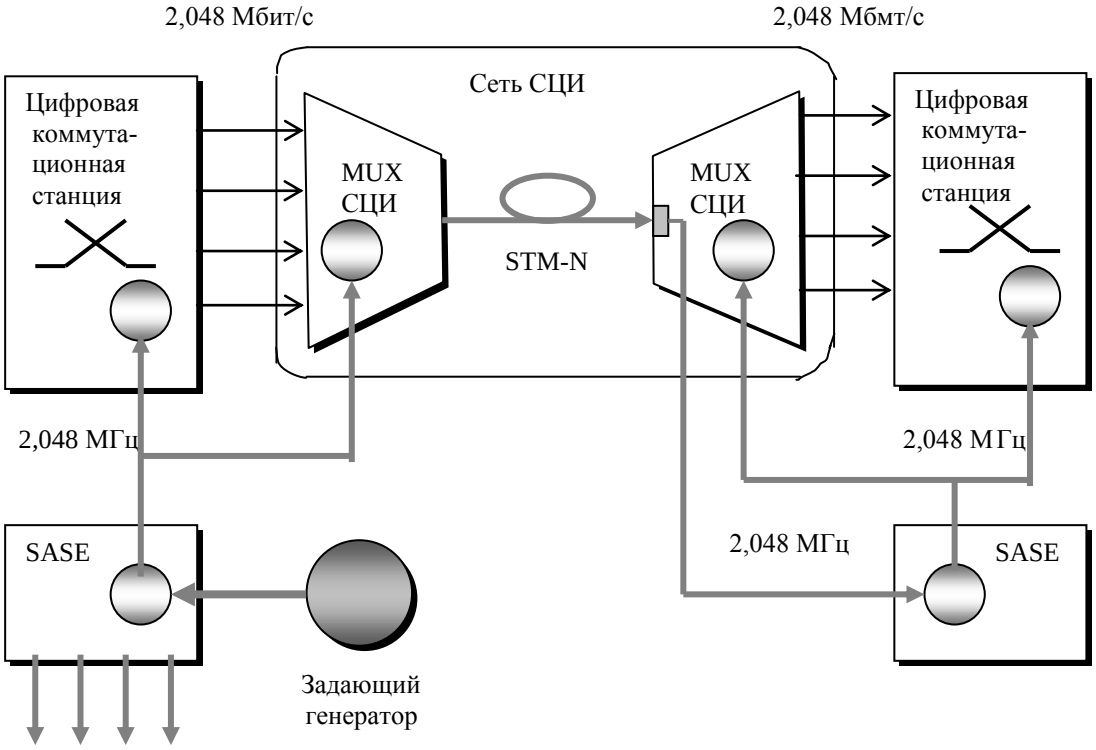


Рис. 3.7. Схема синхронизации двух станций.

Казалось бы, этот способ синхронизации генераторного оборудодования второй станции слишком сложен, но он дает наилучшее решение. Действительно, генераторное оборудование SASE имеет более высокую стабильность и лучшие возможности фильтрации синхросигнала, чем простые генераторы SEC. При использовании этой схемы генераторное оборудование цифровой коммутационной станции и демультиплексора СЦИ во второй станции синхронизируется по более стабильному сигналу синхронизации. Более того, если сигнал STM-N пропадет, SASE обеспечивает достаточно долго выходную частоту

в режиме свбодных колебаний генератора с намного большей точностью, чем точность соответствующей частоты генератора SEC.

В мировой практике существует несколько режимов работы генераторов, определяющие топологию системы межузловой синхронизации. Схемы синхронизации сети могут быть разделены на схемы независимой, принудительной и взаимной работы. На рис. 3.8 показана схема независимой синхронизации, которая используется для плезиохронной работы телекоммуникационных узлов, например при взаимодействии национальных систем связи, каждая из которых имеет свою систему синхронизации.

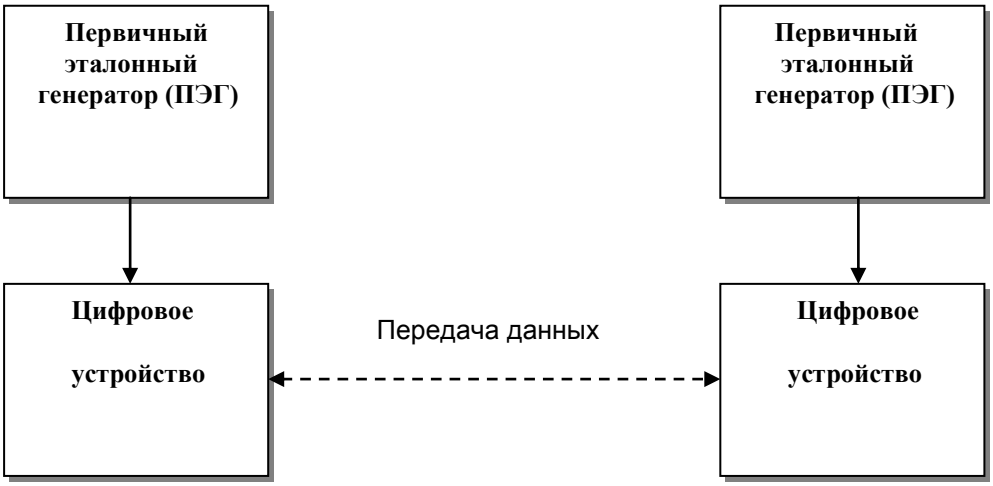


Рис. 3.8. Схема независимой синхронизации.

Согласно схеме цифровое оборудование в сети синхронизируется независимо и взаимодействует друг с другом только через каналы передачи данных (каналы трафика). Различие тактовых частот, неизбежное для такой схемы, будет приводить к появлению в ней проскальзываний. Исключить проскальзывание в такой схеме нельзя, но их частота будет связана с относительной нестабильностью двух генераторов ПЭГ. Например, если взаимная нестабильность генераторов будет находиться в пределе 10^{-13}, то проскальзывания будут происходить не чаще одного раза в полгода. Этого никто не заметит, так что такая схема в данном случае может вполне использоваться.

Другим вариантом построения системы межузловой синхронизации является использование принципа принудительной синхронизации, когда один узел сети синхронизируется от другого. Такая схема принята в международной практике как схема построения систем межузловой синхронизации выделенных сетей или их участков, поскольку обеспечивает наибольшую стабильность работы системы. Принцип принудительной синхронизации предусматривает построение иерархической структуры синхронизации с одним или несколькими первичными генераторами синхросигнала (рис. 3.9). Наличие нескольких графов синхронизации дает возможность резервирования цепей синхронизации. Так, например, на рис. 3.9 показаны как основные пути синхронизации (P – primary), так

и резервные (S – secondary). Каждое устройство в сети может переходить от основного источника синхронизации к резервному в случае потери канала взаимодействия с основным источником. Такая система обладает повышенной надежностью и реализована на всех современных сетях связи. Кроме того, иерархическая топология системы синхронизации соответствует топологии самой системы связи, чем легко достигается взаимодействие обеих сетей.

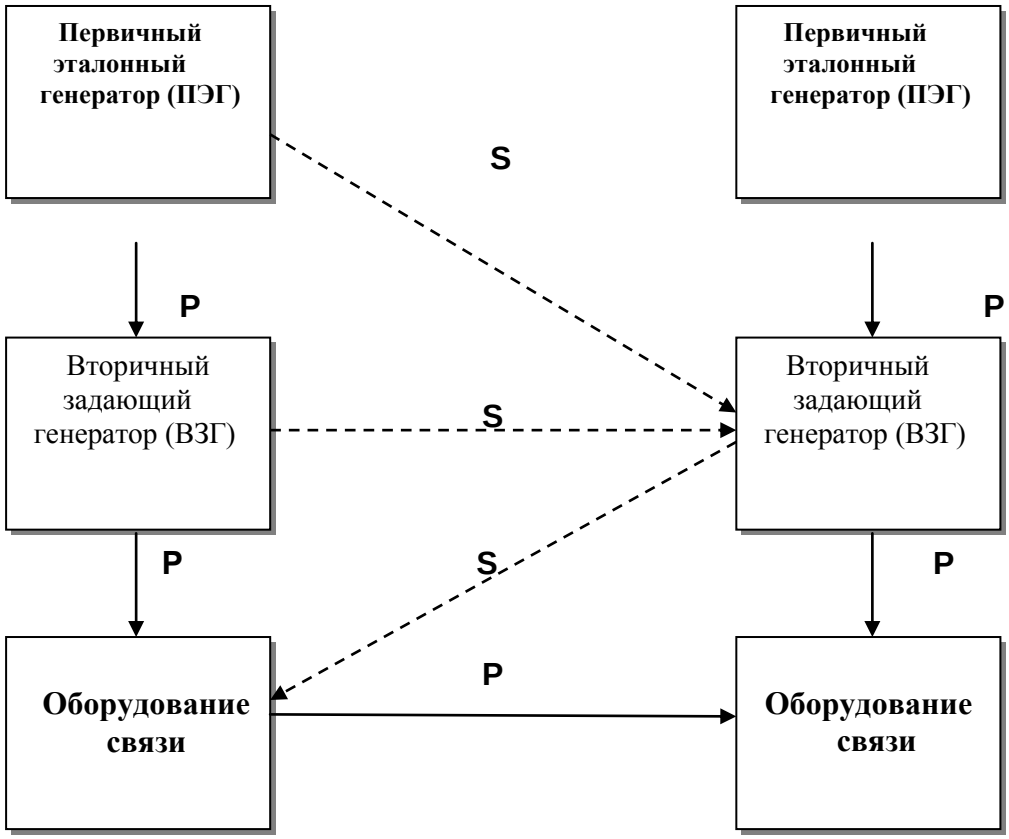


Рис. 3.9. Схема принудительной синхронизации.

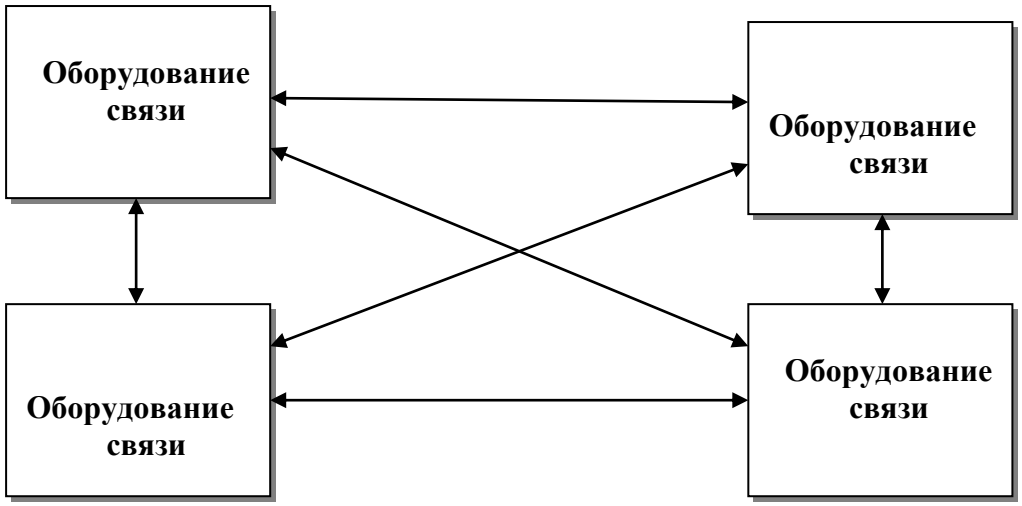


Рис. 3.10. Схема взаимной синхронизации.

Взаимная синхронизация, принцип которой представлен на рис. 3.10, предусматривает синхронизацию равноправных устройств путем усреднения тактовых частот. Например, в схеме рис. 3.10 любое цифровое устройство схемы получает синхросигналы от трех соседних и синхронизирует свой тактовый генератор с усредненным значением частоты соседних устройств. Вариант взаимной синхронизации устройств обеспечивает теоретически максимально точную синхронизацию цифровых устройств. Но в практике построения распределенных систем синхронизации сетей связи этот вариант не нашел большого распространения. Самое главное преимущество – высокая точность – в случае распределенной системы реализуется сложно. Кроме того сбой любого устройства в этой схеме приводит к значительной деградации всей системы синхронизации, а именно сбои и нарушения связи между генераторами очень вероятны в распределенной системе. Поэтому принцип взаимной синхронизации не нашел применения в системах связи и используется только в современной схемотехнике.

Таким образом, все возможные графы синхронизации современных систем связи строятся либо по принципу независимой, либо по принципу принудительной синхронизации. Рассмотрим теперь, каким образом используются в этом случае генераторы. Поскольку основной задачей системы синхронизации является обеспечение равных частот всех генераторов в системе, ясно, что для этой сети должен существовать один задающий генератор, являющийся для нее эталоном. Такой генератор называется первичным эталонным генератором ПЭГ (Primary Reference Source – PRS). Первичный эталонный генератор работает в независимом режиме и формирует эталонный синхросигнал наивысшей стабильности. Обычно в качестве PRS используются цезиевые стандарты, реже – комбинированный источник Rb+GPS (рубидиевый генератор с приемником GPS). Стабильность PRS выбирается максимально возможной и составляет порядка $10^{-12} - 10^{-13}$, иногда даже выше.

От PRC синхросигналы распределяются по каналам передачи по всем генераторам системы синхронизации. С точки зрения системы синхронизации все остальные генераторы будут вторичными задающими генераторами ВЗГ. Все они работают в режиме принудительной синхронизации и образуют многоуровневую иерархию источников синхронизации (рис. 3.9). В зависимости от уровня источник в системе синхронизации должен иметь определенные параметры.

Источники более низкого уровня иерархии берут синхросигнал от источников более высокого уровня, хотя и допускаются связи между источниками внутри одного уровня. В результате каждый источник синхронизации в систем связи синхронизирован по цепи от первичного эталонного генератора. По мере распределения синхросигнала по сети его параметры ухудшаются, так что до низких уровней синхросигнал доходит с параметрами стабильности на 4 – 5, а иногда и больше порядков хуже синхросигнала, генерируемого PRC. Чем длиннее цепочка, тем больше ухудшение параметров синхросигнала. Поэтому при

построении системы синхронизации и ее модернизации одним из основных требований является минимальное количество переприемов синхросигнала для каждого направления.

Чтобы добиться этого иногда требуется разбить систему связи на несколько регионов и разместить в каждом регионе PRS. Тогда для каждого региона строится своя иерархия под управлением PRS, а регионы взаимодействуют друг с другом по схеме независимой (плезиохронной) иерархии. Для повышения надежности внутри каждого региона плезиохронной работы обеспечивают резервирование системы синхронизации, часто регионы взаимно резервируют друг друга на различных уровнях (см. рис. 3.11).

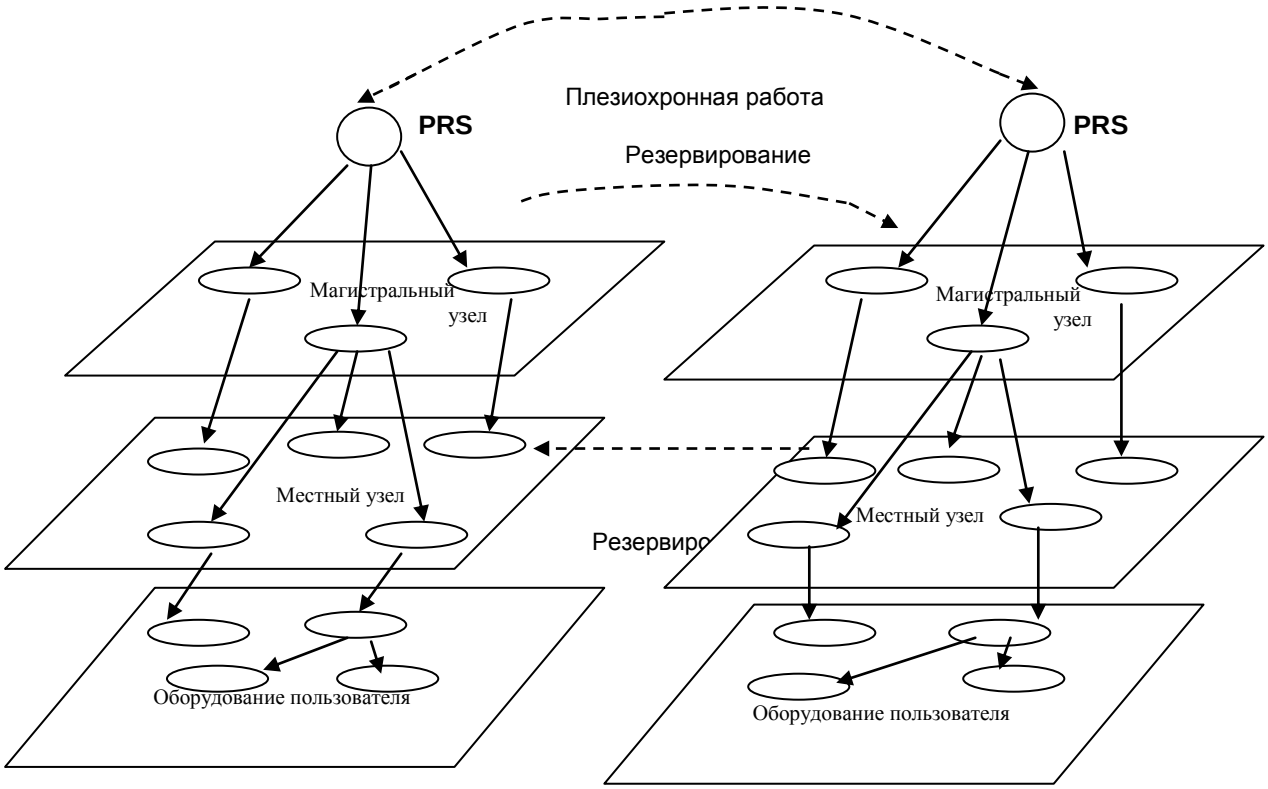


Рис. 3.11. Структура иерархии ITU-T системы межузловой синхронизации.

Так, например, система межузловой системы синхронизации ВСС РФ состоит из 7 регионов плезиохронной работы. Образование жтих регионов может происходить как по причинам технического плана, так и по административно-политическим причинам. В первом случае разделение системы синхронизации на регионы связано с необходимостью сократить цепочки распределения синхросигналов. Для системы синхронизации в России это связано с большой территорией, хотя дробление системы синхронизации на региональные системы лишь косвенно связано с пространственным удалением генераторов друг от друга. Как правило система синхронизации начинает развиваться как единая иерархия с одним PRS. С ростом количества цифровых устройств происходит удлинение цепочек распределения синхросигналов, так что оконечное

оборудование пользователя начинает получать синхросигналы неприемлемого качества. Тогда производят разделение системы синхронизации на два или более региона плезиохронной работы, что дает уменьшение длины цепочек. Затем каждый регион начинает развиваться по тем же законам, что в конечном итоге приводит к дроблению региона и т. д. Происходит процесс территориального дробления системы синхронизации.

Разделение системы синхронизации по регионам плезиохронной работы может происходить и по административно-политическим причинам. Обычно это связано с желанием оператора иметь свою независимую систему синхронизации со своим PRS. Примерами такого разделения являются национальные системы синхронизации, которые взаимодействуют друг с другом по принципу плезиохронной работы. Вторым примером является размещение PRS на территории сетей ведомственных операторов и создание систем синхронизации, совершенно независимых от операторов сети общего пользования.

Из всех предложенных стратегий синхронизации **иерархическая структура «ведущий – ведомый»** получила наиболее широкое распространение при синхронизации современных цифровых сетей электросвязи. Более того, МСЭ-Т и ETSI определили стандартные архитектуры сетевой синхронизации в соответствии с этой стратегией. Эти стандартные архитектуры организованы иерархически в уровнях:

- На уровне 0 одно ведущее устройство синхронизации (или для надежности несколько устройств) генерируют эталонный сетевой сигнал, работая в автономном режиме.

- На нижних уровнях (1, 2, и т. д.) находятся ведомые устройства синхронизации, которые а) синхронизируются по сигналам, поступающим из верхнего уровня и б) синхронизируют устройства синхронизации на нижних уровнях.

Поэтому при нормальной работе все устройства синхронизации сети отслеживаются ведущим устройством синхронизации, а синхронизация передается из одного устройства синхронизации в другое.

Международными стандартами определены следующие **логические функции**, представляющие устройства синхронизации на различных уровнях сетей синхронизации:

- **Первичный эталонный генератор ПЭГ** (PRC – Primary Reference Clock) определяется как функция, которая представляет либо автономное устройство синхронизации, либо устройство синхронизации, которое принимает эталонный сигнал синхронизации от определенного радио или спутникового (например, GPS) сигнала и выполняет его фильтрацию. Таким образом, ПЭГ представляет собой ведущее устройство сетевой синхронизации. Сокращение ПЭГ обозначает также физическое воплощение логической функции (т. е. выделенное устройство синхронизации.

- **Вторичный задающий генератор ВЗГ** (SRC – Secondary Reference Clock) определяется как функция, которая в сетевом узле:

- принимает входные сигналы синхронизации от внешних источников, выбирая один из них;

- фильтрует сигнал синхронизации, выделенный из этого отобранного источника;

- распределяет отфильтрованный сигнал синхронизации по другим элементам в пределах узла;

- может использовать внутренний источник синхронизации, если все внешние эталонные сигналы синхронизации исчезли или ухудшились.

Физическое воплощение логической функции ВЗГ может быть интегрировано в элементе сети СЦИ или на цифровой коммутационной станции ТФОП, но наиболее часто в выделенном оборудовании синхронизации (SASE).

- **Устройство синхронизации оборудования СЦИ (SEC)** определяется как функция, которая в элементе сети СЦИ:

- принимает сигналы синхронизации от внешних источников, выбирая один из них;

- фильтрует сигнал синхронизации, выделенный из этого выбранного источника;

- может использовать внутренний источник синхронизации, если все эталонные сигналы синхронизации исчезли или ухудшились.

Сокращение SEC означает также физическое воплощение логической функции (внутреннее устройство синхронизации элемента сети СЦИ).

Эталонная цепь сети синхронизации. В стандартной архитектуре сети синхронизации «ведущий – ведомый» сигнал синхронизации распределяется от ПЭГ по другим узлам вдоль цепи последовательно соединенных ведомых устройств синхронизации. Для лучшего понимания цепей сети синхронизации важно отметить особенности, которыми отличаются друг от друга ПЭГ, ВЗГ/SASE и SEC:

- ПЭГ – главное устройство синхронизации – работает автономно и должно иметь наивысшую точность и стабильность частоты (не хуже 1×10^{-11}); он соответствует Рек. МСЭ-Т G.811 и ETSI EN 300 462 Часть 6-1;

- ВЗГ/SASE – ведомое устройство синхронизации – распределяет свои сигналы синхронизации в узле и другим узлам –«сыновьям» в архитектуре иерархии «ведущий-ведомый». Его основная функция заключается в фильтрации сигнала синхронизации в сети и выдаче сигнала синхронизации высокой стабильности, если все эталонные сигналы исчезли. Постоянная времени системы ФАПЧ выбирается большой (обычно 1000 с), чтобы отфильтровать как можно больше фазовых помех, Это соответствует Рек. МСЭ-Т G.812 и ETSI EN 300 462 Часть 4-1;

- SEC представляет собой ведомое устройство синхронизации сетевого элемента с низкими требованиями к долговременной стабильности и

относительно малой постоянной времени системы ФАПЧ (обычно не более 1 с). Это соответствует Рек. МСЭ-Т G.813 и ETSI EN 300 462 часть 5-1.

Стандарты ETSI и МСЭ-Т определяют таким образом **эталонную цепь,** показанную на рис. 3.12. Первым устройством синхронизации в цепи является ПЭГ. Цепь узловых устройств синхронизации ВЗГ выстраивается следующим образом: промежуточные ВЗГ от 1 до К – 1 являются транзитными узлами. ВЗГ под номером К может быть транзитным или локальным узлом. ВЗГ взаимно соединены линиями передачи с помощью разного числа устройств синхронизации сетевых элементов СЦИ (SEC).

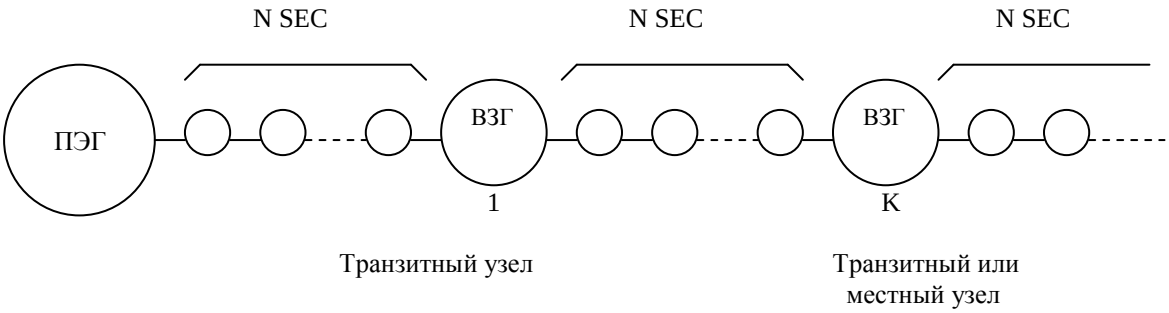


Рис. 3.12. Эталонная цепь синхронизации.

В общем случае характеристики синхронизации будут ухудшаться по мере увеличения числа синхронизированных устройств в последовательном соединении. Чтобы удовлетворить требованиям по качеству синхронизации, самая длинная цепь должна содержать не более К ВЗГ и не более N SEC между любыми двумя ВЗГ, где допустимые значения для эталонной цепи синхронизации составляют: К = 10 и N = 20 (при общем числе SEC в цепи, не более 60). Эти значения были получены путем вычислений и моделирования. Однако на практике в сети синхронизации число элементов сети в тандеме должно быть сведенок минимуму исходя из соображений надежности и качества работы.

3.1.5. Структура графов и топология систем синхронизации.

С ростом количества цифровых устройств на сети решать вопросы синхронизации становилось все труднее и потребовалось применение системного подхода. С этого момента система синхронизации стала учитываться как важный компонент сети связи. Решать вопрос, кто от кого берет синхросигнал, стало возможно только системно, анализируя работу всей сети. На этом этапе были сформулированы несколько довольно простых правил проектирования и расчета систем синхронизации. Первым приемом стало использование графов, уже широко применявшихся при проектировании топологии систем связи. Основное из них заключается в том, что граф синхронизации в отличие от графа топологии сети должен быть *незамкнутым*. Это стало первой элементарной концепцией построения систем синхронизации.

Дальнейший рост количества цифровых устройств на сети привел к тому, что графы синхронизации стали усложняться и потребовалось их упорядочение и

создание первой концепции построения систем синхронизации – радиально-узловой модели системы синхронизации. С этого момента системы синхронизации стали иерархичными, в зависимости от уровня иерархии определялись параметры синхронизации. От простых графов проектировщики перешли к сложным радиально-узловым графам. Появилась концепция межузловой системы синхронизации, внутри узлов вопрос о синхронизации решался традиционно, т. е. методом простого графа, обычно по цепи. В конце концов, схема синхронизации становилась все более разветвленной, что привело к удлинению цепочек синхронизации и, следовательно, к ухудшению параметров синхросигналов. Тогда, для повышения качества синхронизации в узлах стали использовать специализированные генераторы.

Дальнейшее наращивание сложности цифровых систем связи привело к тому, что система синхронизации становится отдельным направлением проектирования систем передачи. На этом этапе окончательно проявилась основная особенность систем синхронизации – граф синхронизации зачастую отличается от топологии самой цифровой сети. Система синхронизации стала проектироваться и создаваться, как наложенная сеть над первичной и вторичной сетями. Началось дробление системы синхронизации на регионы плезиохронной работы, поскольку одним графом межузловой синхронизации оказалось невозможным накрыть всю сеть. В результате для единой топологии сети создается несколько независимых систем синхронизации, каждая из которых имеет свой радиально-узловой граф и эти графы резервируют друг друга.

Наконец следующий этап развития характеризовался появлением концепции внутриузловой системы синхронизации, что объяснялось ростом количества цифровых устройств на узлах сети, когда простая синхронизация по цепочке оказалась недостаточной для приемлемого качества синхросигналов внутри узла. В результате появилась концепция построения интегрированных систем синхронизации BITS. Параллельно с развертыванием систем BITS начали развиваться системы диагностики и управления системами синхронизации, которые объединяются в общую концепцию TMN. В результате к 2000 г. сформировалась в общем виде применяемая и в настоящее время концепция построения и эксплуатации систем синхронизации.

Важной особенностью систем синхронизации является отличие их топологии от топологии системы связи. Целью построения системы связи является достижение как можно более высокой связности трафиковых каналов. Чем больше резервных каналов от пункта А до пункта В, тем надежнее работает первичная сеть. Поэтому топология современной сети связи описывается обычно как совокупность замкнутых графов (рис. 3.13). Система синхронизации, напротив, должна строится в виде незамкнутого графа. Любое замыкание графа системы синхронизации приводит к появлению так называемой петли в в системе синхронизации, когда синхросигнал проходит по замкнутому пути. В этом случае возникает положительная обратная связь, усиливающая отклонения в стабильности синхросигнала, что приводит к деградации всего участка системы синхронизации.

Например, в системе есть петля из трех участков А-В-С (рис. 3.13). В берет синхросигнал f_0 от А, С – от В, а узел А – от С. В этом случае, если в результате температурной нестабильности в частоте А произошло изменение $f_1 = f_0 + \Delta f_1$,

тогда генератор В подстроится , но добавит свою нестабильность в канал $f_2 = f_0 + \Delta f_1 + \Delta f_2$.

Именно этот сигнал узел С будет считать опорным и выровняет по нему свой сигнал с добавкой нестабильности $f_3 = f_0 + \Delta f_1 + \Delta f_2 + \Delta f_3$. Затем этот сигнал попадает на вход А, и процесс идет по возрастающей, система идет вразнос.

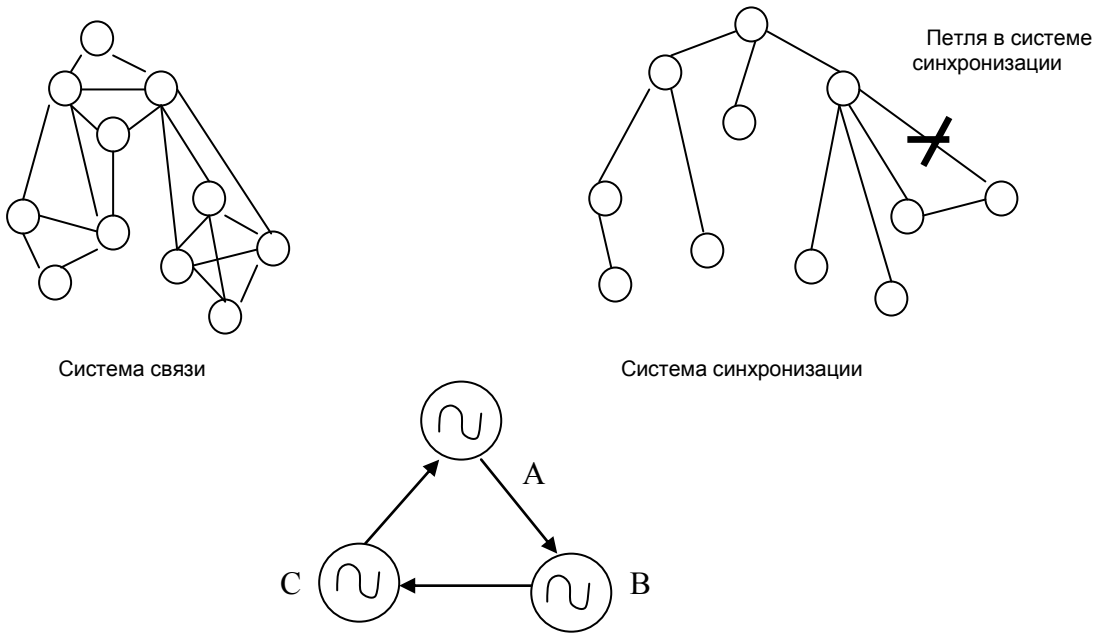


Рис. 2.11. Различие топологии системы связи и системы синхронизации.

Поэтому основным правилом при проектировании топологии систем синхронизации является исключение петель в системе синхронизации, они недопустимы. Таким образом, топология сети трафика и системы синхронизации принципиально различны, и поэтому система синхронизации должна проектироваться отдельно от системы связи. Возникает принцип наложенной сети, когда система синхронизации рассматривается как отдельная автономная составляющая системы электросвязи.

3.2. Джиттер и вандер в сетях SDH.

Рассмотрим теперь непосредственно причины возникновения джиттера в системах SDH и оценим этот параметр с точки зрения его влияния на работу систем SDH.

3.2.1. Понятие джиттера и вандера.

Джиттером или фазовым дрожанием называется явление фазовой модуляции принимаемого сигнала. На практике получили распространение два

основных подхода к определению джиттера – в терминах фазы и в терминах частоты. Учитывая, что параметры частоты и фазы связаны простым известным соотношением

$$f = \frac{d\phi}{dt},$$

оба подхода математически эквивалентны. Подход к описанию джиттера в терминах нестабильности фазы принимаемого цифрового сигнала является распространенным теоретическим описанием процесса. Именно это привело к определению джиттера как фазового дрожан6ия. Однако при практическом измерении параметров джиттера его оценка в терминах фазы оказалось неудобным вследствие объективных трудностей фазовых измерений. В результате появилось прикладное рассмотрение джиттера как вариации частоты принимаемого сигнала. В этом случае основными параметрами джиттера становятся его амплитуда и частота. Такое рассмотрение получило широкое практическое применение в методиках измерений и технологии анализа результатов.

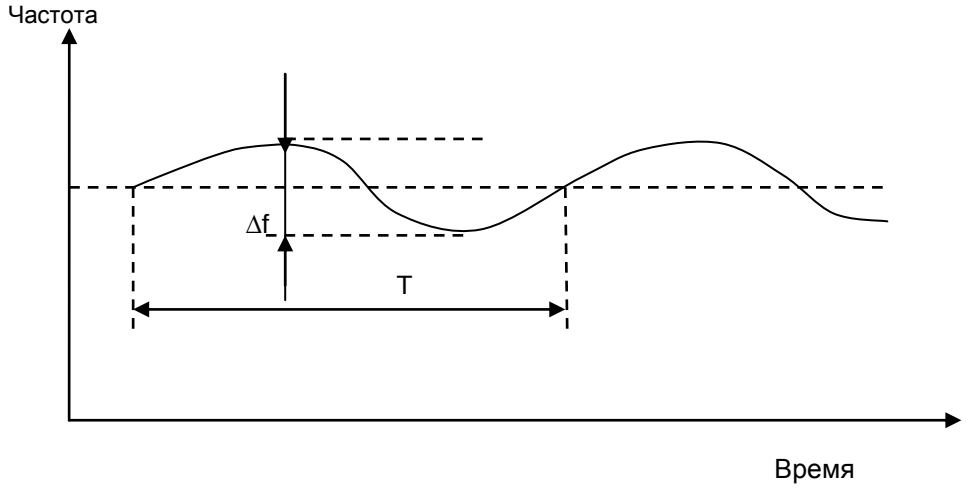


Рис. 3.14. Нестабильность частоты принимаемого цифрового сигнала.

Рассмотрим функцию нестабильности частоты принимаемого цифрового сигнала (рис. 3.14). Для простоты будем считать, что частота сигнала изменяется по синусоидальной траектории. Тогда частота сигнала характеризуется своим средним значением f и девиацией Δf. Если частота f меняется по синусоидальному закону, то должен быть период измерения частоты T. Тогда можно ввести частоту изменения частоты $f_d = \frac{1}{T}$. На основании величины этой частоты различают два типа явлений:

- быстрые колебания частоты, для которых $f_d > 10 Гц$, называют джиттером или фазовым дрожанием;

- медленные колебания частоты с $f_d < 10 Гц$ называют вандером или дрейфом фазы.

Необходимость разделения девиации частоты на джиттер и вандер связана с тем, что эти два параметра обычно возникают вследствие разных причин и по-разному влияют на параметры качества цифровой передачи.

Джиттер как высокочастотная составляющая девиации частоты в большой степени влияет на работу систем фазовой синхронизации, т. е. на петли ФАПЧ. Для простоты можно сказать, что петля ФАПЧ устанавливает фазовую синхронизацию по фронту приходящего импульса для каждого бита. Если этот фронт постоянно дергается, ФАПЧ может сбоить, и тогда начнется сбой фазовой синхронизации, т. е. вместо 1 система может считывать 0, вместо бита N – бит N+1. Появятся битовые ошибки при чтении информации. Если же ФАПЧ справится с восстановлением фазовой синхронизации в условиях воздействия джиттера, то после ФАПЧ джиттер сильно ослабнет и будет почти подавлен.

Вандер влияет совершенно по-иному. Поскольку изменения в частоте менее 10 ГЦ, то это довольно высокопериодичные колебания частоты и их можно рассматривать, как вариации тактовой частоты в системе синхронизации, именно так вандер и действует. Поскольку это низкочастотная составляющая, то на уровне отдельных импульсов она не проявляется – битовых ошибок не будет. Вандер красиво проходит через любые системы передачи и любые ФАПЧ, практически не ослабляясь. Основное его воздействие – это проскальзывание, поскольку вандер как явление опасен в первую очередь для системы синхронизации.

3.2.2. Измерение джиттера и вандера.

Измерение амплитуды джиттера производится в приведенных единицах времени – единичных интервалах (Unit Interval UI). Единичным интервалом называется время, необходимое для передачи одного бита информации при заданной скорости передачи, $J = fT = \frac{f}{f_d}, [UI]$. Таким образом, чем больше скорость передачи, тем меньше временной интервал.

Различают три характеристики измерения джиттера:

- собственный джиттер J;

- максимально допустимый джиттер MTJ;

- передаточная характеристика по джиттеру JTF.

Собственный джиттер измеряется в любой точке цифровой системы передачи, на любом канале первичной сети. ITU-T была принята маска на параметры джиттера (рис. 3.15). На рисунке показаны переменные параметры как по частоте, так и по амплитуде. Они отличаются для каждой частоты передачи,

например, для первичной системы E1 они одни, а для STM-1 – они совершенно другие (табл. 3.3).

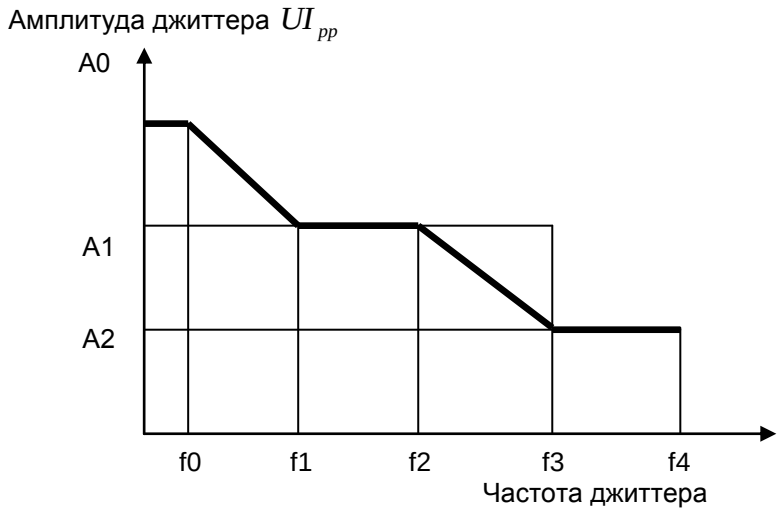


Рис. 3.15. Маска на нормы собственного джиттера в ЦСП.

Таблица 3.3. Нормы на параметры маски рис. 2.13 в зависимости от скорости передачи.

Скорость, кбит/с	**UIpp от f1 до f4**	**UIpp от f3 до f4**	**f1, кгц**	**f2, кгц**	**f3, кгц**	**f4, кгц**
рек. G.823 (для систем PDH)						
2 048	1,5	0,2	0,02	2,4	18	100
8 448	1,5	0,2	0,02	0,4	3	400
34 368	1,5	0,15	0,1	1,0	10	800
139 264	1,5	0,075	0,2	0,5	10	3500
рек**. G.783 (для систем SDH)**						
2 048	0,4	0,075	0,02		18	100
8 448	0,4	0,075	0,1		10	800
139 264	0,4	0,075	0,2		10	3500
рек. G.825 (для систем SDH)						
STM-1	1,5	0,15	0,5		65	1300
STM-4	1,5	0,15	1		250	5000
STM-16	1,5	0,15	5		1000	20000

Максимально допустимый джиттер (MTJ) измеряется с помощью нагрузки узла, тракта или системы джиттером до тех пор, пока не пойдут ошибки. Эта процедура позволяет анализировать устойчивость конкретного устройства к джиттеру на его входе. В зависимости от типа устройства, скорости передачи, условий измерения и пр. разработаны маски MTJ, которым тракт или устройство должны удовлетворять.

Измерение передаточной характеристики по джиттеру также основана на подаче на вход сигнала с джиттером и измерении уровня джиттера на выходе

(рис. 3.16). Тем самым можно определить, ослабляет ли устройство джиттер (тогда JTF отрицательная) или усиливает (JTF положительная), и в какой мере.

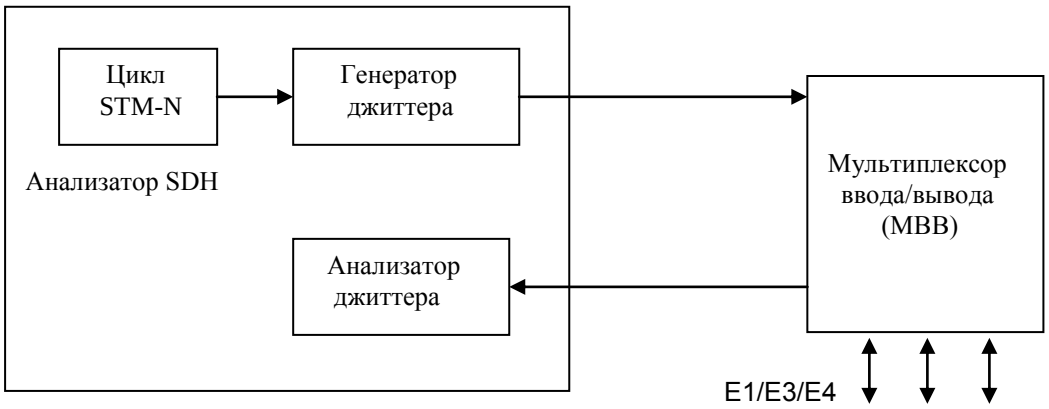


Рис. 3.16. Схема измерений параметра JTF.

Для оценки величины вандера были введены четыре параметра его измерения: TIE, MTIE, TVAR и TDEV. Определим сначала ошибку временного интервала TIE. Для этого рассмотрим передачу и прием цифрового сигнала Ref2, который сравнивается с эталонным сигналом Ref1 (рис.3.17). Как видно из рисунка, сигнал Ref2 имеет сдвиг по фазе относительно эталонного сигнала. Оценить этот сдвиг можно через параметр времени, который получил название ошибки временного интервала TIE (Time Interval Error). При сравнении сигнала синхронизации с эталонным сигналом, измеряются параметры TIE: текущее значение, среднее значение за период измерений, различные зависимости от времени наблюдения и т. д., максимальное значение за период измерения. Измерение TIE осуществляется как в абсолютных единицах (единицы времени), так и в приведенных единицах UI.

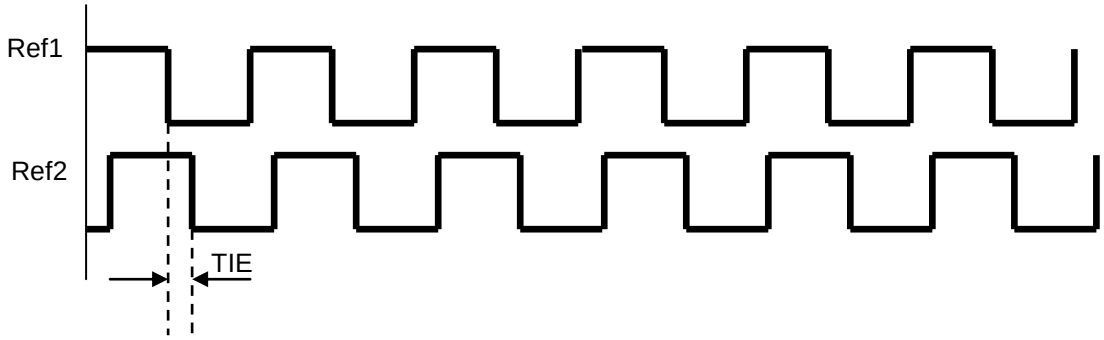


Рис. 3.17. Понятие TIE.

Однако сам параметр TIE не представляет нормативной ценности для анализа параметров синхросигналов. Ценность имеет параметр MTIE, максимальная ошибка временного интервала за определенный период измерения. Рассмотрим произвольный синхросигнал, который сравнивается с

эталонным (рис. 3.18). Будем измерять значение TIE с определенным шагом дискретизации в течение времени T. Введем параметр интервала измерений S, за который осуществляется оценка максимального пикового отклонения TIE. Это отклонение и получило название MTIE (максимальная ошибка временного интервала МОВИ). Таким образом, $MTIE = TIE^{\max}\big|_S - TIE^{\min}\big|_S$. Очевидно, что значение параметра MTIE зависит от размера интервала S. Обычно в качестве характеристики синхросигнала используется зависимость MTIE(S), которая является одной из основных характеристик источников синхронизации.

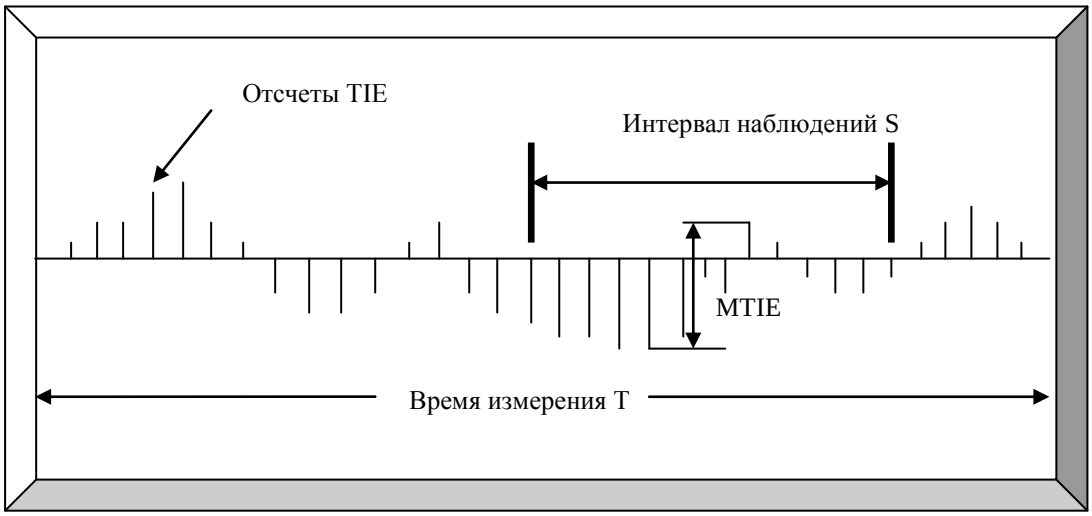


Рис. 3.18. Параметры TIE и MTIE.

Поскольку для измерений параметра MTIE обычно используются интервалы наблюдений S в 1с и более, на этот параметр оказывают влияние как вандер, так и джиттер, однако обычно амплитуда джиттера намного меньше, так что ей можно пренебречь во многих случаях. Таким образом, основным фактором, влияющим на MTIE, является вандер.

Вторым параметром, который принят для нормирования синхросигналов, и, следовательно, для измерения вандера, является временная вариация TVAR (Time Variance) и вариация времени TDEV. По сути это один и тот же параметр, т. к. оба они связаны простым соотношением $TDEV = \sqrt{TVAR}$. В общепринятом смысле параметр вариации TVAR представляет собой дисперсию временных TIE, а TDEV – среднеквадратическое отклонение. С учетом того, что TVAR измеряется в квадратных единицах времени, например в квадратных наносекундах, этот параметр считается неудобным для нормирования параметров синхросигналов, и чаще используется параметр TDEV. TDEV измеряется в единицах времени, например, в наносекундах и является физически более корректным. Этот параметр зависит от времени измерений τ, также как параметр MTIE зависит от величины интервала наблюдений S. Обычно для характеристики устройства или

синхросигнала параметр TDEV дается в виде зависимости $TDEV(\tau)$ со всеми вытекающими аналогиями с параметром MTIE.

3.2.3. Джиттер и вандер в сетях SDH. Работа указателей.

Одним из основополагающих постулатов SDH, включенных в основу самой технологии, является то, что *вне существенных сбоев системы передачи в сети SDH не должен быть потерян ни один бит информации.* Еще на ранних стадиях развития технологии SDH, претендующей на звание самой стабильной и надежной технологии первичной сети, разработчики анализировали возможность реализации этого постулата. Теоретически никаких проблем не должно было возникнуть, т. к. SDH изначально планировалась на основе волоконно-оптических линий связи, в которых вероятность простой битовой ошибки ничтожно мала, слишком велико в них отношение сигнал/шум.

Но далее возник вопрос с проскальзыванием, ведь проскальзывание в любом виде: отрицательное или положительное – приводит к потере информации. Либо часть информации в размере буфера теряется, либо в информационный поток добавляется служебная информация. Отсюда происходит основное противоречие с указанным постулатом и следует единственный вывод*: в системах SDH проскальзывания недопустимы.* Тогда возникает вопрос о компенсации рассинхронизации между передатчиком и приемником. Исключить такую расинхронизацию нельзя, это запрещает соотношение неопределенностей Гейзенберга, которое носит характер фундаментального закона природы. Это означает, что f1 передатчика и f2 приемника, пусть даже ненамного, но различны. Следовательно, необходим некий механизм, альтернативный управляемым проскальзываниям. Этот механизм был предложен в виде активности указателей.

Для пояснения сути механизма вернемся к аллегории «бассейна» (рис. 3.1) и предложим другое, более экономичное решение. Пусть теперь управляющий будет вооружен не цепью, управляющей пробкой в бассейне, а простым ведром. Тогда, в случае, если бассейну грозит перелив, т. е. уровень виски поднимается, управляющий наливает свое ведро и бежит к выходу из крана 2. Там он выливает ведро, бежит снова и т. д. В результате средняя скорость жидкости из бассейна увеличивается, уровень начинает снижаться. Если системе угрожает воздух в бассейне, т. е. скорость слива превосходит скорость налива, то управляющий бежит к крану 2, наливает там ведро, прибегает назад и выплескивает ведро в бассейн, снова бежит к крану 2, наливает ведро и т. д. Поскольку эта процедура уменьшает скорость слива виски, уровень его в бассейне начнет подниматься. Конечно, это постоянные хлопоты для управляющего, но результат налицо: в такой системе не потеряется ни капли.

Возвращаясь к реалиям систем SDH, можно сказать, что проскальзываний можно было бы избежать, если бы мы имели возможность иногда увеличить размер вагона, а иногда уменьшить ее. Именно такая система и была разработана для компенсации рассинхронизации. Свободным ресурсом для

выполнения этой функции была определена третья пара байтов (байты Н3) в поле указателей в составе заголовка SOH. Дело в том, что прямое назначение указателей административного блока: указывать местоположение контейнеров верхнего уровня в поле нагрузки, требует по емкости только первые две тройки байтов указателей Н1 и Н2. Тройка Н3 оказалась избыточной, и именно ее решено было использовать для процедуры компенсации рассинхронизации.

Рассмотрим механизм смещения указателей более подробно. Алгоритмы отрицательного и положительного смещения указателей представлены на рис. 3.19 и 3.20 соответственно. Часто этот механизм называют байтовым стаффингом.

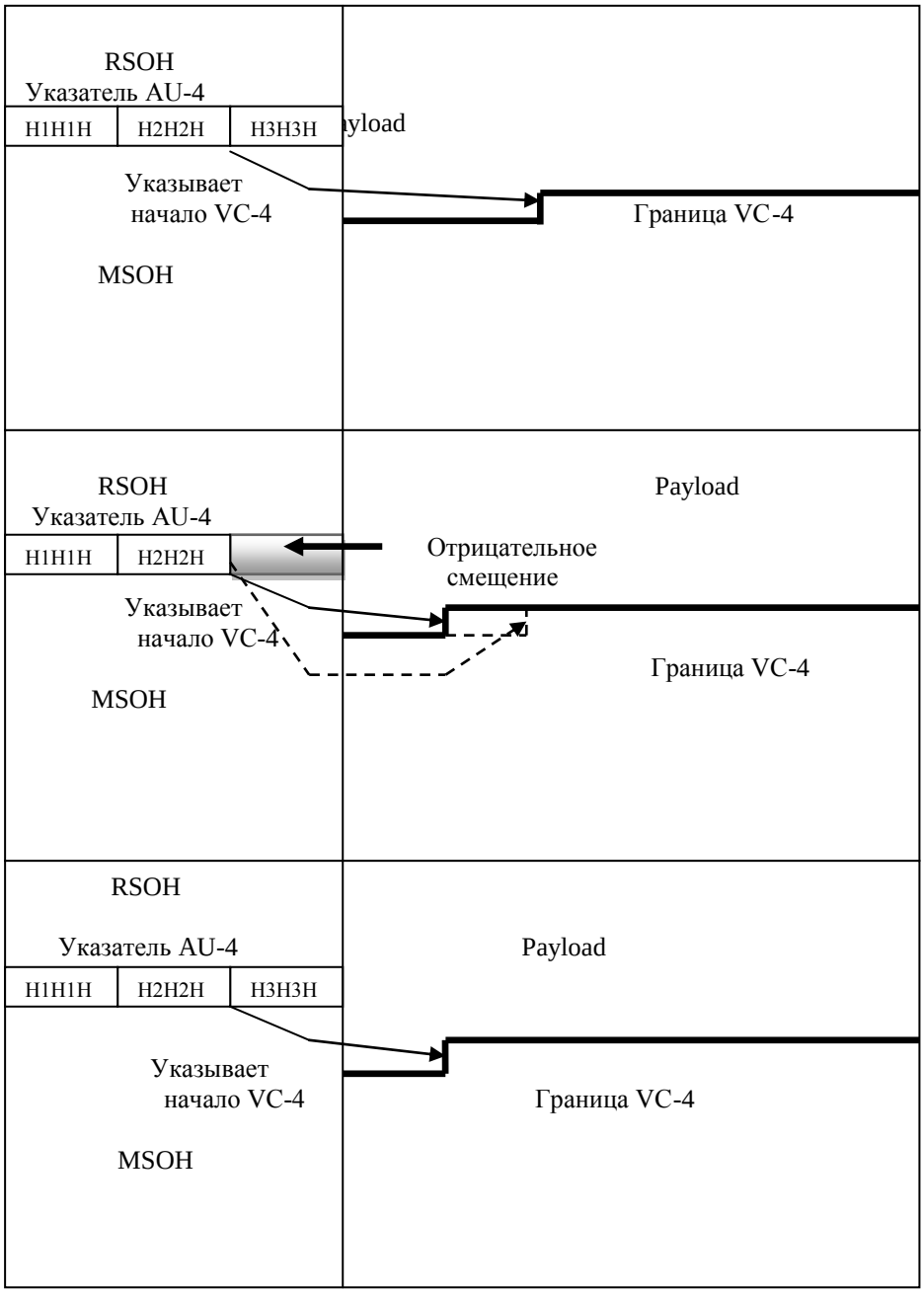


Рис.3.19. Механизм отрицательного смещения указателей.

Механизм байтового стаффинга достаточно прост. В случае необходимости увеличить количество цифровых данных, загружаемых в один контейнер, если скорость принимаемых данных выше номинальной, из указателя удаляется поле байтов Н3 и вместо него загружаются данные. Такое смещение называется отрицательным (рис.3. 19). В случае, если принимаемый мультиплексором потокимеет скорость ниже номинальной, для компенсации рассинхронизации необходимо уменьшить количество цифровых данных, загружаемых в контейнер. В этом случае в поле полезной нагрузки вставляется три дополнительных байта указателя. Такое смещение указателя называется положительным (рис. 3.20). Конечно, размер тройки Н3 намного меньше размера всего поля нагрузки, и, поэтому, диапазон компенсации рассинхронизации ограничен. Однако, размера трех Н3 вполне достаточно при допустимом расхождении скоростей входящих потоков и мультиплексора.

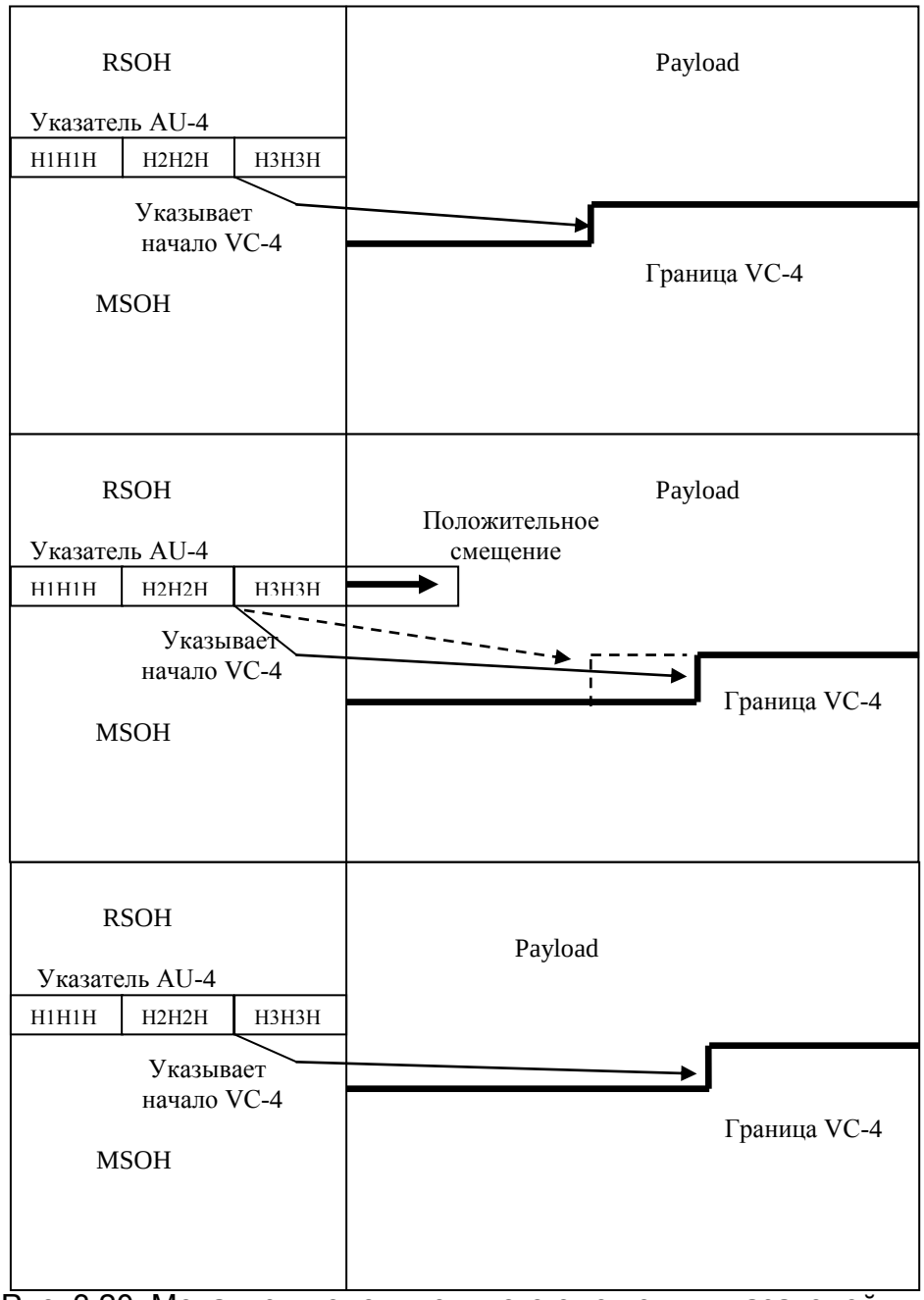
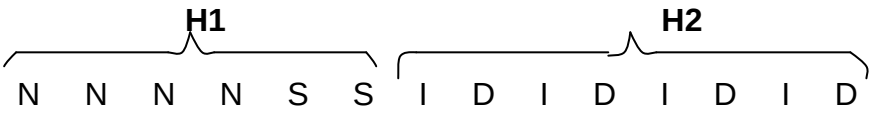


Рис. 3.20. Механизм положительного смещения указателей.

Для реализации того, чтобы ни один бит, загруженный в систему SDH, даже в условиях работы указателей не был потерян, при любом смещении указателей исключается путаница между байтами стаффинга и байтами нагрузки. Указание на смещение указателя передается в составе поля H2 инверсией байтов D и I (рис. 3.21).



Величина указателя

Новые данные	Нормально 0110; инверсия (1001) означает новые данные
Биты наращивания	Инверсия битов означает увеличение
Биты уменьшения	Инверсия битов означает уменьшение

Рис. 3.21. Состав указателя AU-4.

Как видно из рисунка, структура полей указателей H1 и H2 состоит из четырех типов информационных элементов:

NNNN – индикация новых данных. Обычно эти четыре бита имеют значение 0110. В случае радикального переименования указателя биты инвертируются и принимают значение 1001. Это означает что указателю присваивается совершенно новое значение. Радикальное переименование указателя возникает обычно в случае существенного нарушения в системе SDH, например, при разрыве и восстановлении соединения. Простое смещение указателя не вызывает инверсии этих битов.

SS – индикация типа административного блока. Эти два бита служат для индикации типа административного блока в составе транспортного модуля или совместно с указателем для индикации конкатенации (сцепки) виртуальных контейнеров. Например, они принимают значение 10, когда транспортный модуль формируется на основе административного блока AU-4.

ID – биты индикации значения указателя. Эти биты передают информацию о положении нагрузки внутри транспортного модуля. Стандартом допускается максимальное значение величины указателя 782, хотя потенциально 10 бинарных символов могут передать до 1023 значений. В случае смещения указателей биты I и D рассматриваются отдельно.

I – биты индикации положительного смещения указателя. 5 битов I инвертируются при положительном смещении указателя Н3. Решение на стороне приемника о смещении указателя принимается по мажоритарному принципу, т. е. в случае, если хотя бы 3 бита I инвертированы, делается вывод о положительном смещении указателя. Это обеспечивает защиту от ошибки, которая могла бы привести к потере этой важной информации. При инверсии битов I на приемной стороне 3 последовательных байта в поле нагрузки сразу после указателя игнорируются.

D – биты индикации отрицательного смещения указателя. 5 битов D инвертируются при отрицательном смещении указателя Н3. Решение на приемной стороне также принимается по мажоритарному принципу. При инверсии битов D 3 байта указателя Н3 включаются в состав демультиплексируемой нагрузки.

За счет использования таких индикаторов смещения указателей ошибка, связанная с неправильной идентификацией служебного поля указателей практически исключается. Для того, чтобы из 5 подряд следующих битов 3 оказались ошибочными, система передачи должна иметь настолько большой коэффициент ошибок, который исключает работоспособность всей системы в целом.

Таким образом, из описанной процедуры видно, что для компенсации рассинхронизации используется все поле указателей Н3, т. е. смещение поля нагрузки относительно структуры цикла STM-1 на 3 байта. Определим, как такое смещение влияет на появление джиттера в системе SDH. Для этого рассмотрим смещение указателей с точки зрения передачи всего потока полезной информации (нагрузки). На рис. 3.22 представлено несколько последовательных циклов STM-1 с положительным смещением указателя. Абстрагируясь от служебной информации в трактовых заголовках POH, будем считать всю информацию поля нагрузки полезной. На рисунке эта информация выделена серым цветом. По рисунку хорошо видно, что положительное смещение указателя, которая предусматривает вставку трех байтов служебной информации в поле нагрузки, уменьшает скорость передачи. Т. к. поле нагрузки становится немного меньше, эффективная скорость, измеренная за цикл передачи, уменьшается.

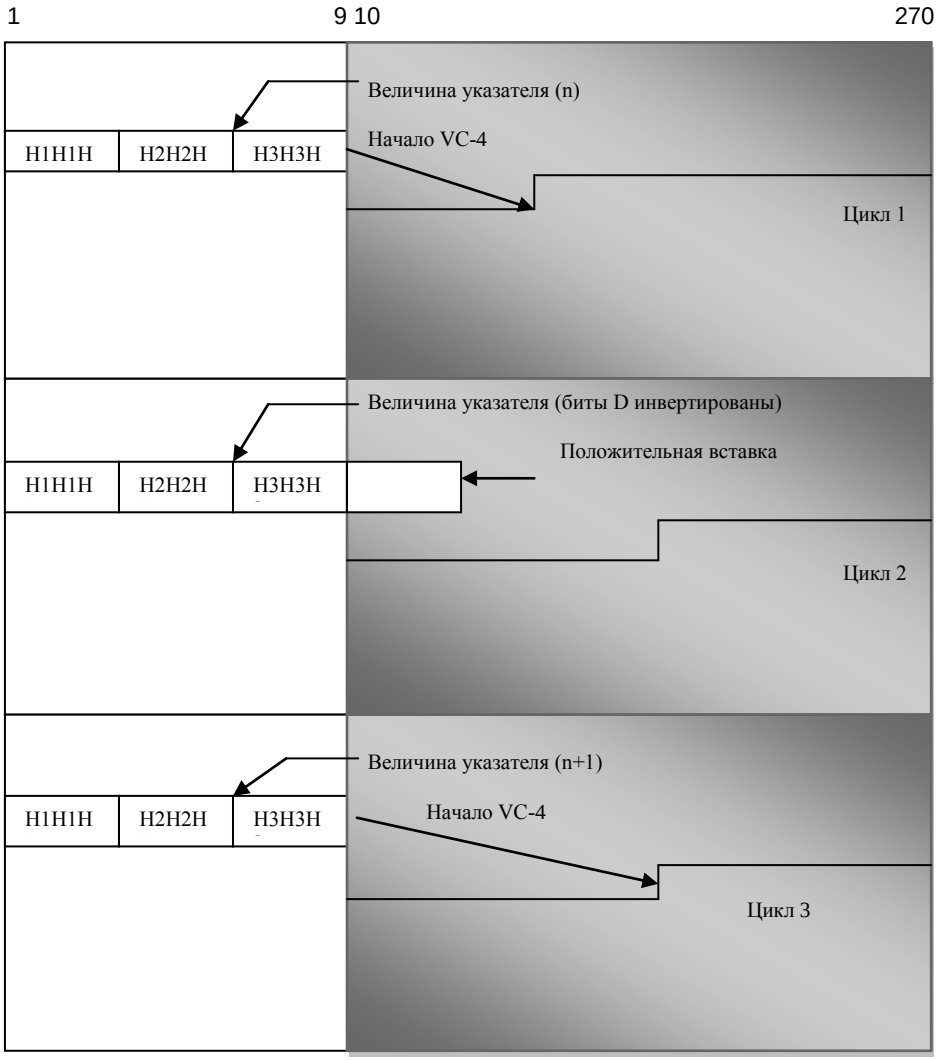


Рис. 3.22. Положительное смещение указателей в поле нагрузки STM-1.

Если построить график эффективной скорости, то можно увидеть уменьшение частоты передачи (рис. 3.23). С помощью этого уменьшения выравнивается уровень в переполненном «бассейне» эластичного буфера. Но в то же время скорость передачи нагрузки связана со скоростью передачи загруженного в систему SDH потока любого уровня. На рис. 3.22 как раз показано, как «плывет» по полю нагрузки цикл полезной нагрузки, он начинает «перетекать». Если теперь проанализировать частоту компонентного потока на выходе из мультиплексора МВВ, то можно заметить биения в частоте его передачи. Конечно, эти изменения частоты не будут носить столь выраженный характер, как на графике, но в целом картина будет довольно похожей. Любое изменение частоты по определению является либо джиттером, либо вандером. Поскольку в данном случае период изменения частоты связан кратно с периодом цикла SDH – 125 мкс, описанное явление вызывает конечно джиттер.

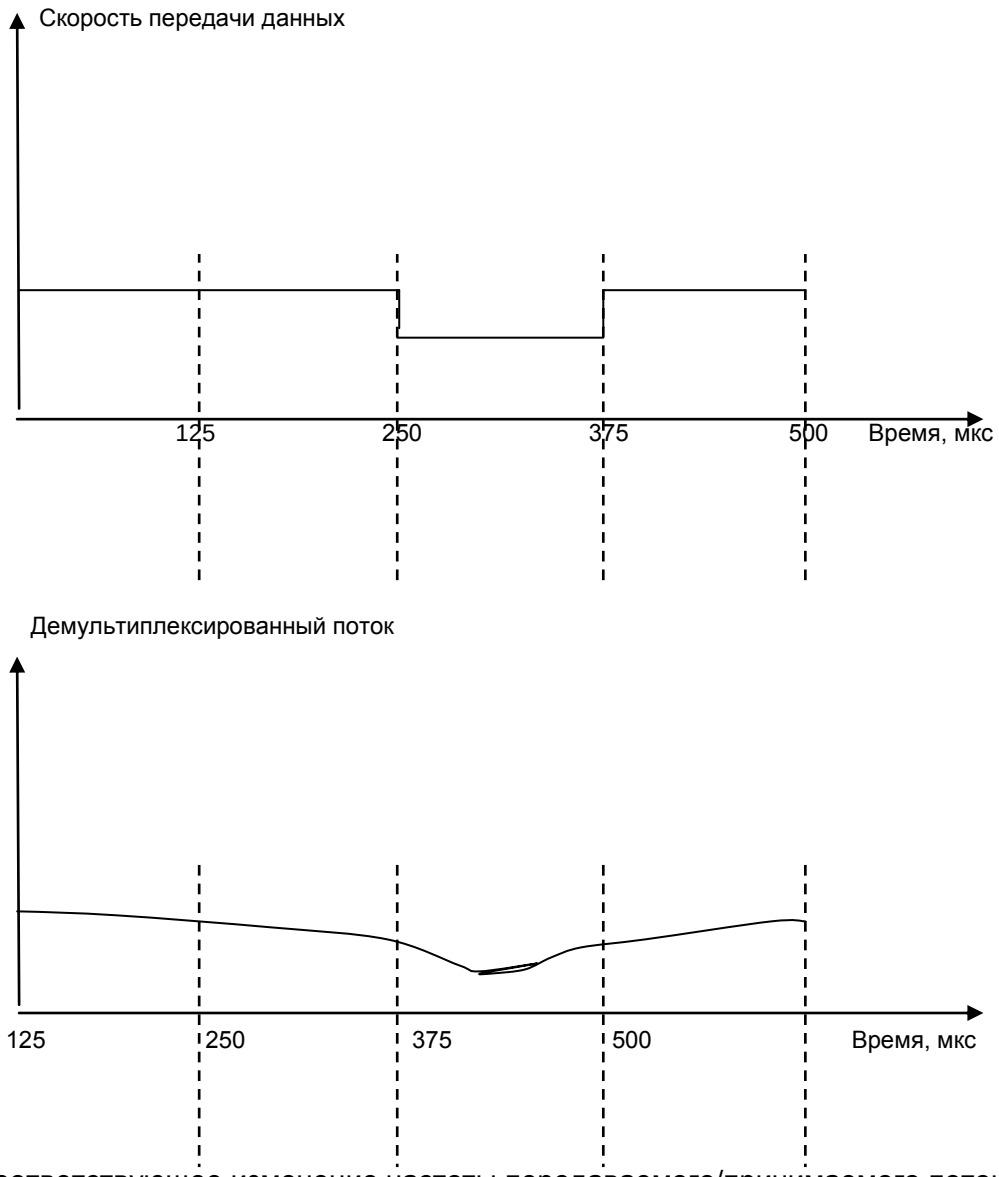


Рис. 3.23. Соответствующее изменение частоты передаваемого/принимаемого потока.

Таким образом, любые смещения указателей приводят к появлению джиттера на выходе из системы SDH. Причем, джиттер возникает только в потоках, загруженных в SDH в то время, как в самой SDH все данные передаются синхронно и имеют четкую синхронизацию по частоте.

Джиттер и вандер представляют собой любые изменения частоты или фазы передаваемого цифрового потока. Отличается джиттер от вандера скоростью изменения частоты, и по этой причине оба явления разделяются по своим последствиям для сети. Джиттер вредит системе передачи непосредственно, тогда как вандер вредит системе синхронизации, а через нее – системе передачи.

Следует отметить, что джиттер может быть как физическим, так и алгоритмическим. Физический джиттер – это явление, связанное с проявлениями физических законов, например, с амплитудно-фазовыми преобразованиями в регенераторах. Причем, физический джиттер, хотя и всегда присутствует в силу своей природы, но совершенно не влияет на работу системы SDH. Более того, по стандартам ITU-T все элементы системы: мультиплексоры или регенераторы должны иметь характеристику JTF<0, т. е. должны выступать как элементы с

подавлением джиттера. Даже если физический джиттер линейного сигнала появится в системе SDH, он уже через 1-2 транзита будет подавлен.
Алгоритмический джиттер не связан с физическими законами, но появляется в результате возникновения процессов внутри системы передачи, описываемых определенными алгоритмами. Механизм смещения указателей в системе SDH как раз и приводит к появлению джиттера на выходе из системы. Причем сам механизм смещения указателей включается только в случае нарушения в системе синхронизации. Если таких нарушений нет, то и алгоритмический джиттер на выходе из системы возникнуть не может.

Интересно, что в проблеме алгоритмического джиттера соединяются оба параметра частотной нестабильности: сам джиттер и вандер. Поскольку вандер непосредственно воздействует на систему синхронизации, он вызывает активность указателей в системе передачи, в результате на выходе из системы появляется и растет джиттер. В качестве примера на рис. 3.24 представлена ситуация воздействия петли в системе синхронизации одного кольца SDH. Петля в системе синхронизации представляет собой существенное нарушение синхронизации в сети SDH, которое начинает прогрессировать, т. е. рассинхронизация в кольце нарастает.

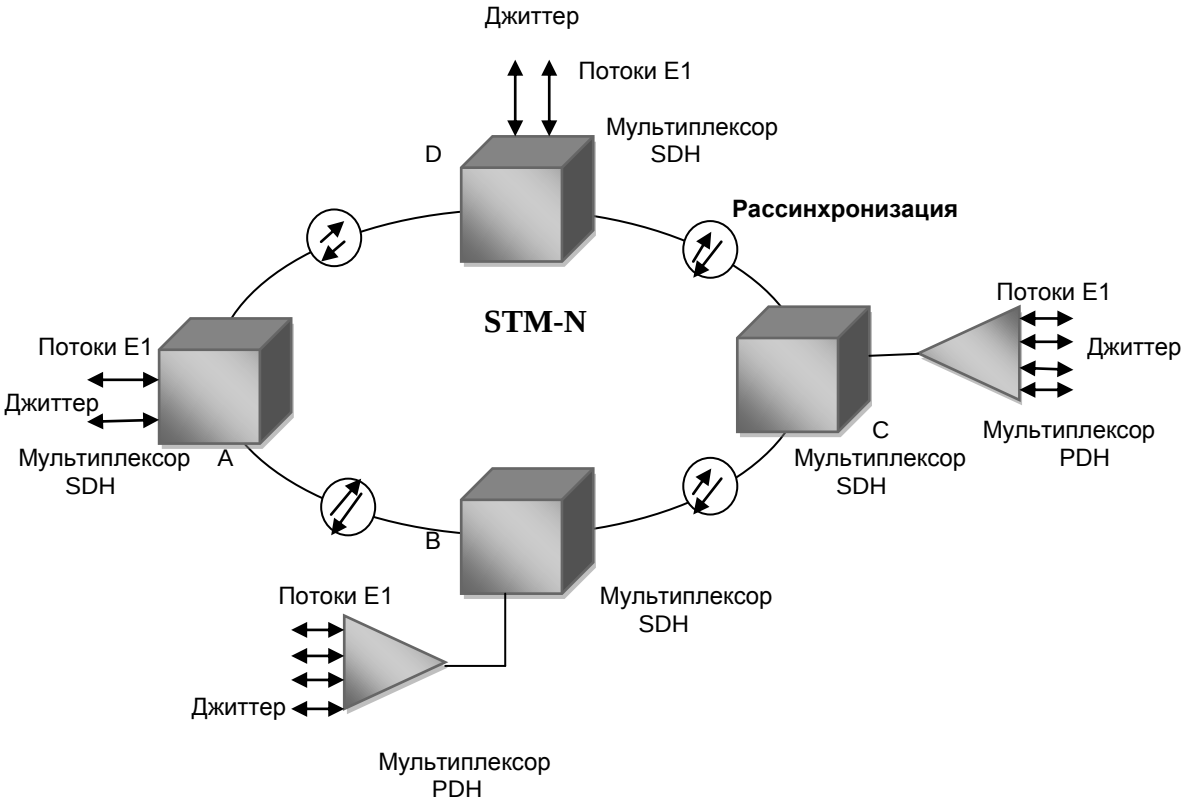


Рис. 3.24. Влияние петли в системе синхронизации на поведение первичной сети.

Для компенсации рассинхронизации в сети SDH возникает активность указателей, которая приводит к постепенному росту джиттера на выходе из системы. С ростом рассинхронизации в случае петли растет по экспоненциальному закону уровень джиттера. Существенно, что в этой ситуации

система управления SDH не обнаруживает нарастания расинхронизации, т. к. это явление не ассоциировано с соответствующим сигналом о неисправности, уровень джиттера выходных потоков будет различным, чем ближе к точке рассинхронизации, тем больше может быть уровень относительного джиттера.

3.3. Системы синхронизации в SDH. Использование SSM.

Основным преимуществом системы SDH, как уже не раз отмечалось, является ее максимальная управляемость и надежность, основанные на целом семействе сигналов о неисправностях, передаваемых по сети. В то же время, среди этих сигналов полностью отсутствуют специальные сигналы по диагностике процессов в системе синхронизации. Чтобы избежать этого недостатка, система управления SDH была дополнена специальными сообщениями о статусе сигналов синхронизации.

3.3.1. Интеграция системы управления и системы синхронизации.

Процесс рассинхронизации, который интересует оператора по причине своего влияния на качество передачи, имеет, как было показано выше, три уровня развития: нарушения в системе синхронизации – активность указателей – появление джиттера на выходе. Поскольку встроенные средства контроля указателей в технологии отсутствуют, было принято решение об интеграции системы управления SDH и системы управления синхронизацией (рис. 3.25).

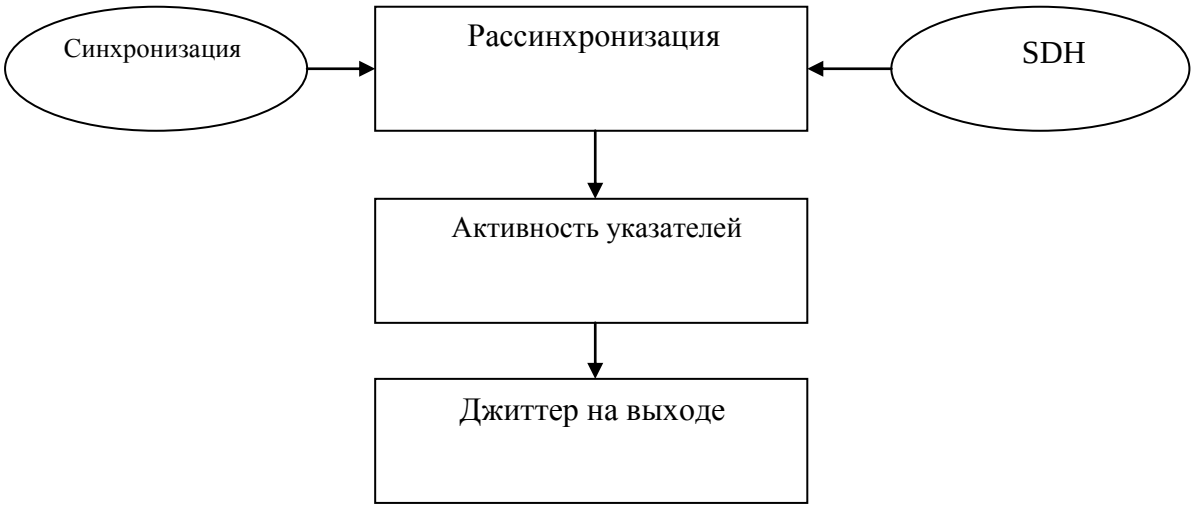


Рис. 3.25. Интеграция системы управления SDH и системы управления синхронизацией.

Рассмотрим механизм взаимодействия системы SDH и системы управления синхронизацией. Этот механизм может рассматриваться как процесс внутри системы SDH. Для реализации этого процесса внутри системы SDH были разработаны специальные служебные сообщения SSM (Synchronization Status

Messages), передаваемые в составе заголовка SOH в байте S1. Современные системы управления синхронизацией и системы управления SDH позволяют контролировать параметры сигналов SSM в режиме реального времени и устанавливать те или иные параметры SSM для каждого тракта. В результате система синхронизации оказывается контролируемой в полной мере со стороны SDH.

3.3.2. Состав сигналов SSM.

Для передачи сигналов SSM используются 4 бита в составе поля S1. Стандарты SDH (основанные на ITU-T) и SONET (основанные на ANSI) выделяют практически одинаковое количество сигналов SSM с учетом разницы в количестве уровней иерархии источников синхронизации по ITU-T и ANSI. Но названия сигналов SSM несколько отличаются. Эти названия, а также соответствующие комбинации битов в составе байта S1 приведены в таблицах 3.4 и 3.5.

Таблица 3.4. Значения сигналов SSM стандарта ANSI – T1X1/3 (TR#33).

Описание	**Англ. обозначение**	**Код**	**Уровень**	**Биты S1 (5678)**
Уровень Stratum 1 (PRS)	Stratum 1 (PRS)	ST1	1	0001
Качество не определено	Synchronized Traceability Unknown	STU	2	0000
Уровень Stratum 2	Traceable Stratum 2	ST2	3	0111
Уровень Stratum 3	Traceable Stratum 3	ST3	4	1010
Источник синхронизации цифрового оборудования	Traceable SONET Minimum Clock	SMC	5	1100
Не использовать для внешней синхронизации	Don’t Use for Sync	DNU	7	1111
Сигнал резервирован системой синхронизации	Reserved	RES	Пользо-вателя	1110

Часть сигналов SSM является чисто информационными в том смысле, что она передает информацию о типе источника синхронизации передающей стороны. Помимо этих сигналов для работы системы управления необходим ряд специальных сигналов, имеющих соответствующие наименования (см. таблицу). К этим сигналам относится сигнал DNU, запрещающий использовать данный линейный сигнал для синхронизации, а также сигнал STU, означающий, что качество источника синхронизации не определено. Оператор системы управления может использовать также сигнал RES (сигнал резервирования данного тракта) для дополнительных задач конфигурирования системы синхронизации. Сообщения DNU, STU и RES играют важную роль в системе управления

синхронизацией, т. к. позволяют управлять ее топологией. Так, например, установка сообщения DNU на заданном тракте означает разрыв графа

синхронизации по данной связи и может эффективно использоваться для оперативного автоматического устранения петель в системе синхронизации. Также это сообщение передается по линейному тракту вверх от узла SDH более низкого уровня иерархии межузловой синхронизации к более верхнему.

Таблица 3.5. Значение сигналов SSM стандарта ITU-T G.704.

Описание	**Англ. обозначение**	**Код**	**Уровень**	**Биты S1 (5678)**
G.811 первичный источник синхронизации (PRC)	G.811 (ANSI-based Stratum 1 PRS)	G.811	2	0010
Качество не определено (существующая система синхронизации)	Quality Unknown (Existing Sync Network)	QU	0	0000
G.812 вторичный источник синхронизации транзитного узла	G.812 Transit (ANSI-based Stratum 2)	G.812T	4	0100
G.812 вторичный источник синхронизации транзитного узла	G.812 Local (ANSI-based Stratum 3)	G.812L	8	1000
Источник синхронизации цифрового оборудования	Synchronous Equip. Timing Source	G.813	11	1011
Не использовать для внешней синхронизации	Don’t Use for Sync	DNU	15	1111
Сигнал резервирован системой синхронизации	Reserved	RES	1, 3, 5-7, 9, 10, 12-14	xxxx

Сообщения RES получили распространение также благодаря предоставления оператору возможности использовать их для передачи информации о наличии источника синхронизации промежуточного уровня иерархии Stratum (например, Stratum 3E). Использование этих сообщений связано с тем, что промежуточные уровни в иерархии Stratum появились после разработки концепции SSM, что и потребовало включения дополнительного сообщения.

Сигнал STU означает появление в байте S1 значений 0000. Системы передачи, не оснащенные функциями SSM, по умолчанию использовали именно эту комбинацию битов, которая затем была включена в технологию SSM для обозначения участков системы передачи, ее не поддерживающих.

3.3.3. Механизм использования SSM сообщений системой управления при резервировании.

Сетевая синхронизация настолько важна, что должна отвечать самым высоким требованиям надежности и готовности. Поэтому устройства синхронизации, как правило, резервируются. Более того, автоматический алгоритм резервирования трактов синхронизации позволяет утройствам синхронизации восстанавливать синхросигнал, следующий, по крайней мере, по двум альтернативным маршрутам синхронизации, организованным по разнесенным, обходным трактам. Эти алгоритмы защиты синхронизации составлены так, что всегда сохраняется иерархия сети синхронизации: устройства синхронизации восстанавливают синхросигнал только от устройств синхронизации верхнего или равного уровня.

При нескольких задающих генераторах в устройствах сетевой синхронизации необходимо иметь некоторый алгоритм выбора, позволяющий восстанавливать передачу синхросигналов после сбоев или отказов по альтернативным путям. ETSI рекомендует следующие основные требования, которые должны учитываться при разработке алгоритма защиты сети синхронизации:

- при защитных переключениях в схеме распределения синхросигналов не должны образовываться петли синхронизации;

- если устройство синхронизации входит в режим удержания, то оно не должно становиться опорным источником для устройств синхронизации с лучшей стабильностью (более высокого уровня иерархии);

- каждый сетевой элемент должен быть синхронизирован от источника с лучшими характеристиками качества;

- должно быть как можно меньше переключений источников синхронизации.

Организации по стандартизации МСЭ-Т и ETSI определили механизмы автоматического выбора опорного источника и самовосстановления синхронизации при отказах. В основу положена схема оценки качества с использованием **сообщений о статусе синхронизации** SSM (Synchronization Status Messages), передаваемых в сигналах синхронизации.

Сообщения SSM транспортируются по сети в битах с 5-го по 8-й байта S1 заголовка мультиплексной секции MSOH цикла STM-N, в них указывается уровень качества синхронизации (Quality Level, QL) для данного сигнала. Переменная QL может принимать 16 значений, от 0 до 15, при этом чем меньше значение QL, тем уровень качества выше (за исключением значения 0 – качество неизвестно, которое мультиплексоры интерпретируют, как эквивалент 15. Кодирование уровня QL обычно производится с помощью четырех значений двоичного кода, соответствующих четырем уровням точности синхронизирующего сигнала, т. е. уровням Stratum 1 (QL = 2, ПЭГ), Stratum 2 (QL = 4, ВЗГ транзитного узла), Stratum 3 (QL = 8, ВЗГ местного узла) и Stratum 4 (QL = 11, SEC). Значение QL = 15 воспринимается как «не использовать для синхронизации» (Do Not Use, DNU), обычно оно служит для указания ведущему мультиплексору не применять ведомый в качестве источника синхронизации. Это делается для предотвращения петель синхронизации.

В режиме по умолчанию, поступающее в заголовке цикла STM-N сообщение SSM принимается мультиплексором и используется при выборе источника синхронизации, а далее в неизменном виде передается в составе заголовка мультиплексной секции следующему мультиплексору. У администратора сети имеется возможность изменить значение QL в поступившем заголовке цикла, так что отправленный следующему мультиплексору заголовок цикла будет иметь новое значение QL.

Администратор также устанавливает для мультиплексора список приоритетов входных сигналов синхронизации, При этом мультиплексор выбирает источник синхронизации по следующему алгоритму – если у нескольких источников равное значение качества синхронизации, то предпочтение отдается источнику с высшим приоритетом, а если у нескольких источников соотношение значений качества QL противоречит указанным в списке приоритетам этих источников, то предпочтение отдается источнику с лучшим (меньшим) значением QL. Если опорный синхросигнал с нужным качеством отсутствует, сетевой элемент (мультиплексор) входит в режим удержания частоты и передает SSM, устанавливая на всех выходах уровень качества своего внутреннего генератора.

Пример автоматической защиты сети синхронизации в кольце SDH с использованием сообщений SSM приведен на рис. 3.26.

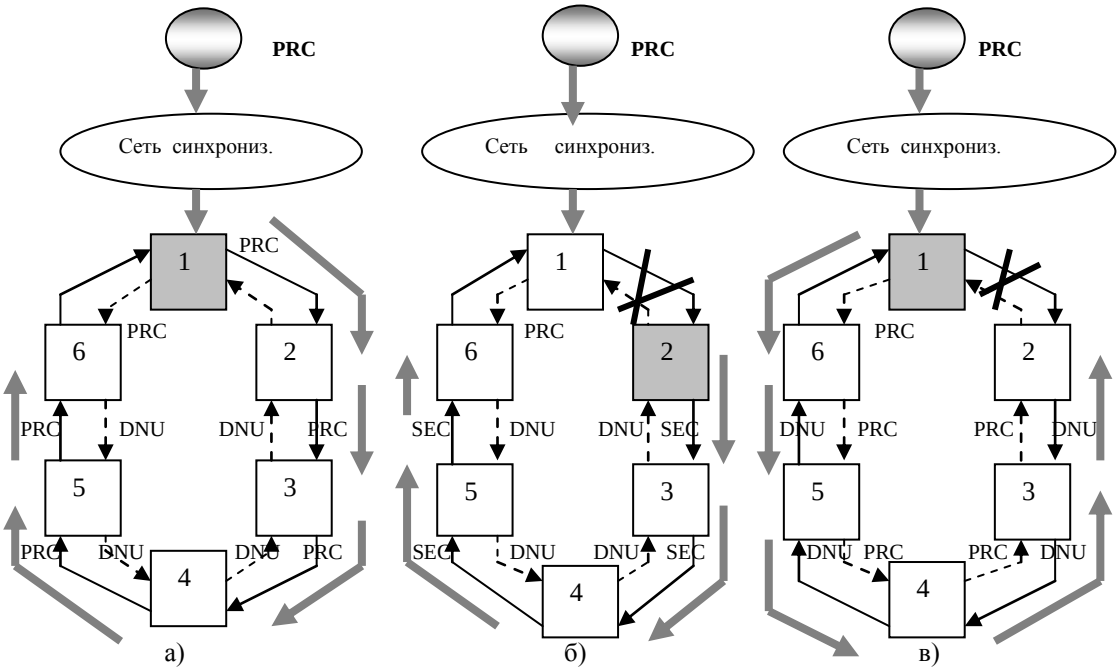


Рис. 3.26. Автоматическая защита сети синхронизации в кольце.

Шесть узлов с мультиплексорами ввода/вывода соединены простым двухволоконным СЦИ кольцом, одно направление которого используется для рабочей нагрузки, а другое для резервной нагрузки. Узел 1 расположен в здании центральной станции, получающей синхронизирующий сигнал через сеть синхронизации от сетевого ПЭГ (PRC). Все узлы кольца, за исключением основного (1), могут выделять синхросигнал из рабочих и резервных трактов, циркулирующий по кольцу в двух направлениях. В примере рис. 3.26а все узлы

находятся в нормальном режиме и включены в рабочий тракт в направлении по часовой стрелке (показано серыми толстыми стрелками). Поэтому один узел по часовой стрелке передает другому сообщение SSM – PRC, которое означает, что синхросигнал отслеживается от сетевого ПЭГ. В направлении против часовой стрелки для предотвращения петель синхронизации передается SSM – DNU (не использовать для синхронизации). Кроме того, узел 1 против часовой стрелки передает SSM – PRC.

После отказа рабочего тракта на участке между узлами 1 и 2 (рис. 3.26 б) устройство синхронизации мультиплексора в узле 2 теряет опорный синхросигнал и входит в режим удержания частоты (Holdover). Затем он начинает передавать к следующему узлу по часовой стрелке сообщение SSM – SEC, извещая все следующие узлы, что с этого момента они получают синхросигнал от внутреннего генератора СЦИ, работающего автономно. Затем узел 3, получив из узла 2 SSM “SEC”, начинает передавать “SEC” к следующему узлу по часовой стрелке и т. д.

Восстановление оптимальной синхронизации (рис. 3.26в) начинается после того, как узел 6, приняв из узла 5 сообщение SSM “SEC”, переключается к узлу 1, из которого получает сообщение SSM “PRC” о высшем качестве синхронизации. Спустя некоторое время, необходимое для полного переключения опорного синала через режим удержания, узел 6 начинает передавать сообщение SSM “PRC” в узел 5 (направление против часовой стрелки), сообщая что его синхросигнал теперь отслеживается от сетевого ПЭГ. Аналогично, узел 5 после получения SSM “PRC” из узла 6 переключает опорный сигнал из узла 4, откуда он принимает SSM “SEC”, на узел 6. Таким же образом, по очереди переключают свой опорный сигнал узлы 4, 3 и 2. В конце этого процесса реконфигурации восстанавливается оптимальная синхронизация: кольцо снова синхронизируется узлом 1, а синхросигнал теперь передается против часовой стрелки по резервным трактам. После устранения отказа кольцо синхронизации по аналогичному алгоритму разворачивается в первоначальную сторону (по часовой стрелке).

Внутри системы SDH сигналы SSM могут меняться по указанию системы управления, либо автоматически в случае загрузки в МВВ специального сценария, который предусматривает изменение SSM при реконфигурации. Конечно, наиболее безопасным режимом является установление значений SSM из центральной системы управления.

Приведенный пример показывает принцип использования технологии SSM, при помощи которой можно обеспечить высокую стабильность работы системы синхронизации при резервных переключениях, а также управление ее топологией. Использование SSM дало развитие специализированным подсистемам управления параметрами систем синхронизации. Наличие сигналов SSM создает стандартизированный транспорт внутри SDH специального назначения для управления топологией системы синхронизации.

3.3.4. Использование TSG/SSU в системе управления синхронизацией.

Построение интегрированных систем синхронизации потребовало расширения функций использования SSM. Дело в том, что при размещении в узлах системы синхронизации автономных генераторов TSG (SSU – Synchronization Supply Unit), они могут выполнять роль независимых генераторов синхросигналов приемлемого качества в случае потери сигнала от задающего генератора. В то же время система управления SDH, внутри которой передаются

сигналы SSM, не имеет информации о наличии TSG в системе, поскольку эти устройства используются независимо. В результате возникает задача подстановки сигналов SSM на участках, где используются TSG.

Рассмотрим пример (рис.3.27), где TSG применяются в режиме подстановки сигналов SSM. Представленная на рисунке схема возникновения петли в системе синхронизации во многом аналогична схеме на рис. 3.26 с той только разницей, что в схеме рис. 3.27 используется TSG. В состав системы передачи в данном случае входят 6 узлов NE (это могут быть мультиплексоры, коммутаторы и т. д.),

объединенные в кольцевую топологию. В системе осуществляется резервирование по методу выделенного резервного кольца. Для улучшения параметров синхронизации и резервирования на узле NE-3 размещается TSG, который осуществляет внутриузловую синхронизацию оборудования этого узла. Использование TSG в данной схеме не исключает возникновения петли в системе синхронизации. Дело в том, что при обрыве кабеля между узлами NE-1 и NE-2 последний переходит на резервный путь синхронизации. Однако TSG в этом случае продолжает выделять сигнал синхронизации от потока, приходящего от узла NE-2, в результате возникает петля синхронизации между NE-2 и NE-3.

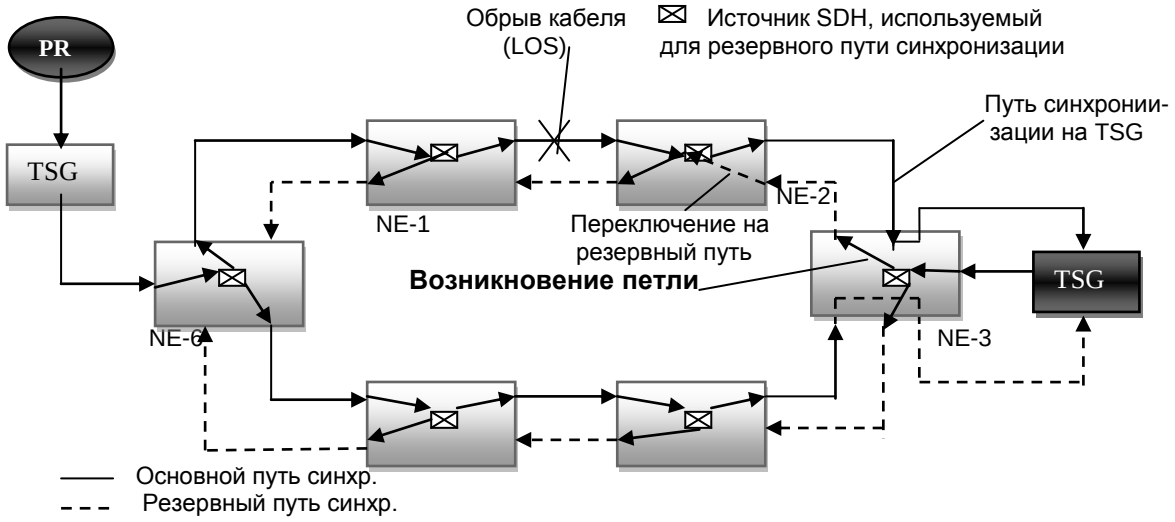


Рис. 3.27. Возникновение петли в системе синхронизации, использующей TSG.

Для предотвращения возникновения петли в системе синхронизации могут эффективно использоваться сигналы SSM (рис. 3.28). В этом случае использование сигналов ST1, SMC и DNU позволяет исключить возможность возникновения петли. Существенной проблемой такой схемы является переключение режимов работы TSG, поскольку последний должен осуществить переход от сигнала синхронизации, выделенного из основного графа, к сигналу, выделенному из резервного графа. Здесь многое зависит от типа сигнала синхронизации. В случае, если мультиплексор NE-3 дает сигнал синхронизации в виде потока E1 с сигналами SSM, реконфигурация TSG может быть выполнена автоматически по анализу SSM. Если же, как это часто бывает, в качестве

синхросигнала используется сигнал 2048 кГц, переключение TSG требует интеграции систем управления SDH и синхронизации.

В качестве примера на рис. 3.29 представлено взаимодействие обеих систем. Для реализации такого взаимодействия необходимо их объединение в рамках единой концепции TMN, поскольку само взаимодействие осуществляется между двумя системами управления на логическом уровне.

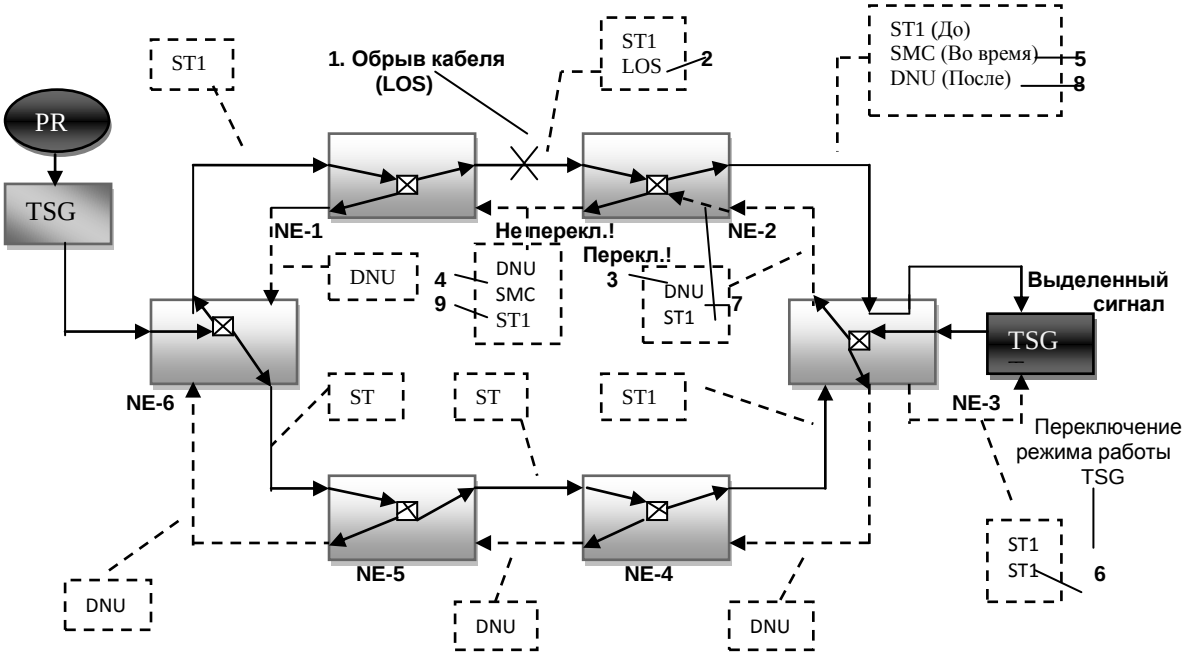


Рис. 3.28. Использование сигналов SSM для устранения петли.

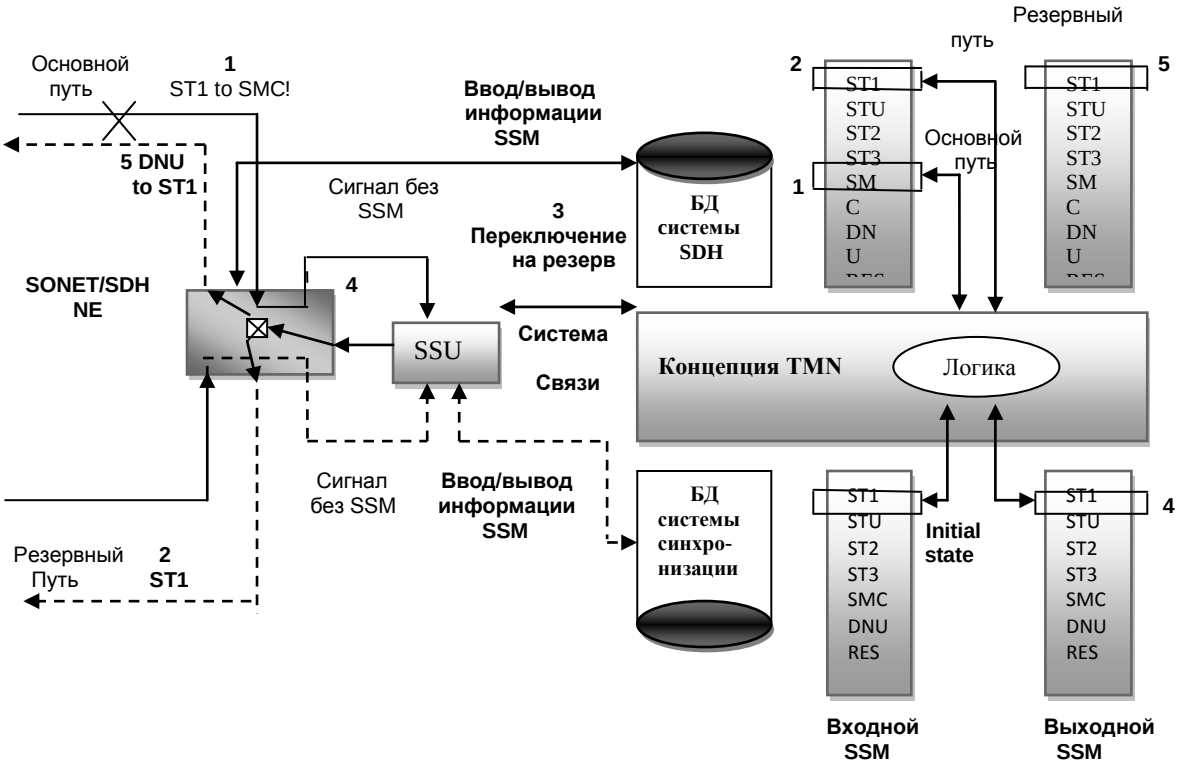


Рис. 3.29. Взаимодействие систем управления SDH и синхронизации.

Как видно из рисунка, в результате взаимодействия систем управления даже при отсутствии в синхросигнале сигналов SSM TSG осуществляет переключение на резервный канал, т. е. в данном случае TSG выступает в

качестве элемента интеграции подсистемы управления синхронизацией и остальной системы синхронизации.

Таким образом:

1. Современные системы управления SDH имеют в своем составе средства по контролю за топологией системы синхронизации с использованием сигналов SSM.

2. Автономные устройства синхронизации также обычно объединяются с системой управления синхронизацией.

Реализация в составе TSG режима подстановки SSM позволяет объединить системы управления SDH и управления синхронизацией на верхнем и нижнем уровне. В результате достигается полная интеграция системы синхронизации и системы передачи (рис. 3.30).

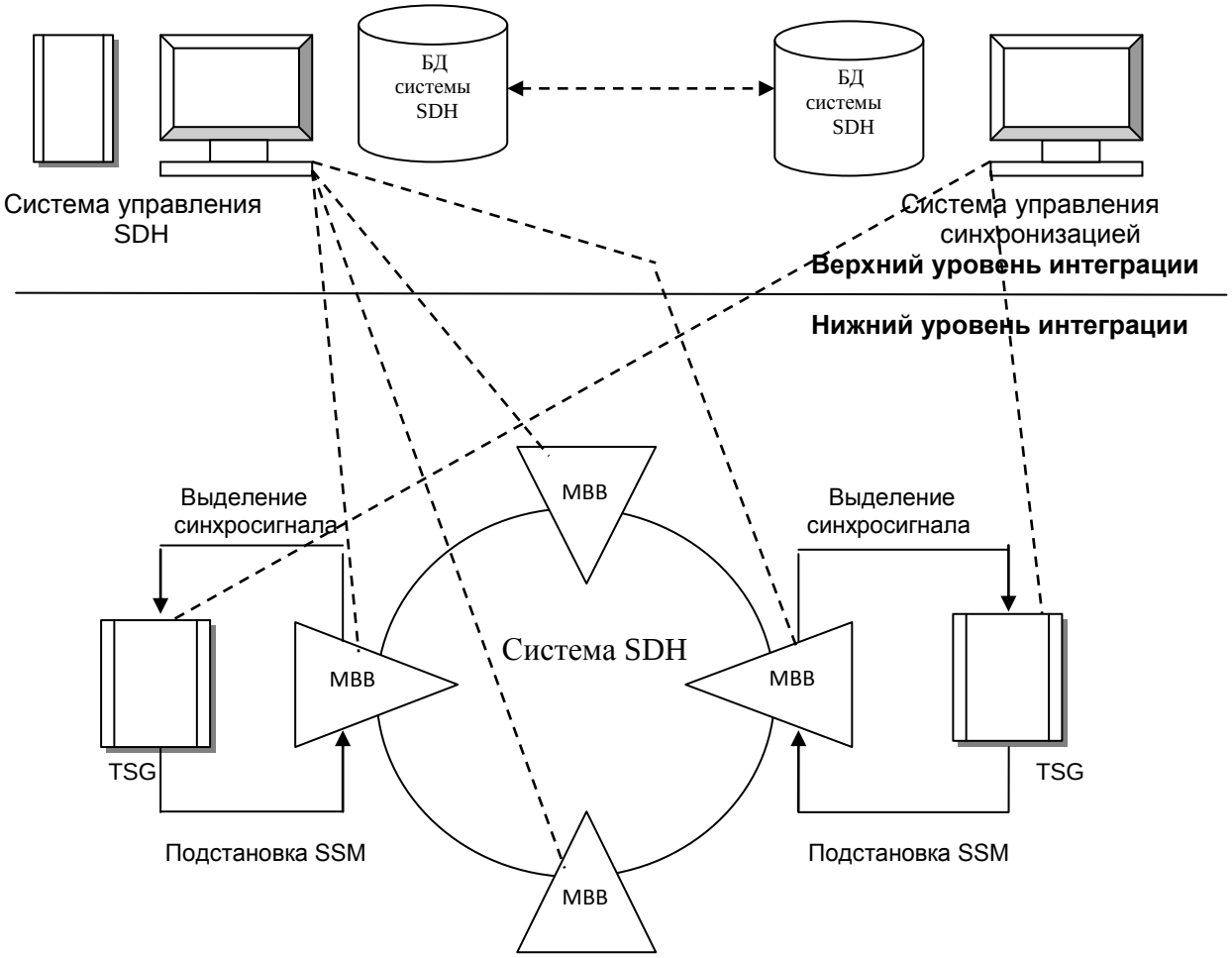


Рис. 3.30. Окончательная интеграция системы синхронизации и системы SDH.

Нижний уровень интеграции в системе определяется единым форматом сигналов SSM, а также наличием TSG, работающих в режимах подстановки сигналов SSM (рис. 3.29). В результате даже при отсутствии интеграции на верхнем уровне управления системами синхронизации и SDH, оператор может быстро реконфигурировать систему синхронизации за счет прописывания вручную значений сигналов SSM на мультиплексорах, одновременно используя TSG в режиме подстановки SSM в качестве дополнительного инструмента управления топологией.

Но в большей степени все преимущества проявляются в случае интеграции как на нижнем, так и на верхнем уровнях. Верхний уровень интеграции соответствует объединению данных БД системы управления и БД системы синхронизации. За счет этого связываются данные о топологии транспортной сети с данными о топологии системы синхронизации. Любые изменения в топологии системы SDH приводят к изменениям в топологии системы синхронизации. В рамках работы системы управления синхронизацией осуществляется постоянная проверка наличия петель методами анализа графов связности топологии системы синхронизации. В случае динамического обмена данными между двумя системами на уровне БД опасность возникновения петель в системе синхронизации полностью устраняется. При реконфигурации сети SDH данные о новой топологии поступают в БД системы синхронизации. Там делается проверка на возникновение замкнутого графа синхронизации. В случае появления петли система синхронизации реконфигурируется, а данные об изменениях в значениях SSM передаются в БД системы SDH. На этом этапе при необходимости система управления SSM делает изменения в режимах работы TSG, меняя установки подставляемых ими сигналов SSM. Система управления SDH изменяет на мультиплексорах значения сигналов SSM, и петля размыкается.

Процесс реконфигурации топологии системы синхронизации в случае объединения систем SDH и системы управления синхронизацией выполняется автоматически. Этот процесс по своему характеру очень напоминает режим APS, когда система передачи SDH реконфигурируется с сохранением всех установок трафика. Именно по этой причине объединить автоматический процесс APS с реконфигурацией системы синхронизации означает полностью избавиться от любых последствий APS и гарантировать одновременно неуязвимость и надежность работы всей сети SDH.

ГЛАВА 4. ПРИНЦИПЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОШИБОК И МОНИТОРИНГ ВЗАИМНОГО СОЕДИНЕНИЯ.

4.1. Измерительные технологии и особенность эксплуатационных измерений.

Первичная сеть связи представляет собой банк каналов, которые затем используются вторичными сетями (сетью телефонной связи, сетями передачи данных, сетями специального назначения и т. д.). Для всех вторичных сетей этот

банк каналов един, откуда и вытекает обязательное требование, чтобы каналы первичной сети соответствовали стандартам.

Следовательно, появляется задача контроля соответствия каналов первичной сети на выходе из систем передачи принятым национальным стандартам. Если не контролировать соответствие каналов стандартам, то возникнет угроза нестыковки вторичных и первичной сети. Например, если оператор строит вторичную сеть телефонии, он размещает несколько АТС, а затем берет из первичной сети потоки Е1 для соединения АТС в сеть. При этом, априори, предполагается, что потоки Е1 все стандартные, а отклонение в их параметрах находятся в пределах допуска. Если потоки Е1 будут нестандартными возникнет угроза нестыковки с АТС, так что телефонной сети не получится.

Чтобы исключить возможность нестыковки, все каналы первичной сети должны (хотя бы выборочно) пройти проверку на соответствие стандарту. Такая проверка называется паспортизацией каналов первичной сети. Паспортизация каналов – это объективно необходимые измерения, без которых не может существовать правильно первичная сеть. Поскольку паспортизация каналов первичной сети должна быть простой процедурой, позволяющей быстро идентифицировать соответствие или несоответствие каналов нормам, объем необходимых измерений очень мал. Обычно он ограничен измерением параметра ошибки BER (Bit Error Rate) с различными вариациями отчетности вокруг этого параметра. Это логично, поскольку параметр BER является единственной универсальной мерой качества для любой цифровой системы связи. Действительно, если информация передается в цифровом виде, т. е. в виде единиц и нулей, то качество системы передачи – это вероятность появления ошибки или BER.

4.1.1. Принципы измерения параметров ошибок.

Измерения параметров ошибок – это самая важная часть практики эксплуатации цифровой системы связи. Коль скоро информация передается в цифровом виде, то единственной мерой качества работы системы связи является параметр ошибки. Эта мера является универсальной в том смысле, что она едина для любых цифровых систем передачи и коммутации. Действительно, вне зависимости от того, какие типы линейного кода используются в системе передачи, на каких принципах построена система коммутации и какие протоколы используются, единой мерой качества цифровой сети является уровень ошибок, который она привносит в передаваемый цифровой поток. По этой причине методы измерения параметра ошибок в цифровых системах связи являются очень важным базовым знанием, без которого понять любые эксплуатационные процессы невозможно. Все технические решения в области эксплуатации направлены на уменьшение параметра ошибок, все измерения соотносятся с параметром ошибок (например, исследуются вопросы о влиянии джиттера на параметр ошибок, кодовых ошибок на параметр ошибок и пр.). Таким образом, измерение параметра ошибок представляет собой ключ к эксплуатационным измерениям.

Общая картина возникновения ошибок иллюстрируется рис. 4.1. Устройство А передает по рабочему каналу устройству В цифровой поток в виде единиц и нулей. Внешние воздействия на канал (шумы, интерференция, сбои в системе связи и т. д.) приводят к нарушению правильной интерпретации принимаемых символов на стороне В. В результате в некоторых случаях вместо 1 устройство В принимает 0 и наоборот.

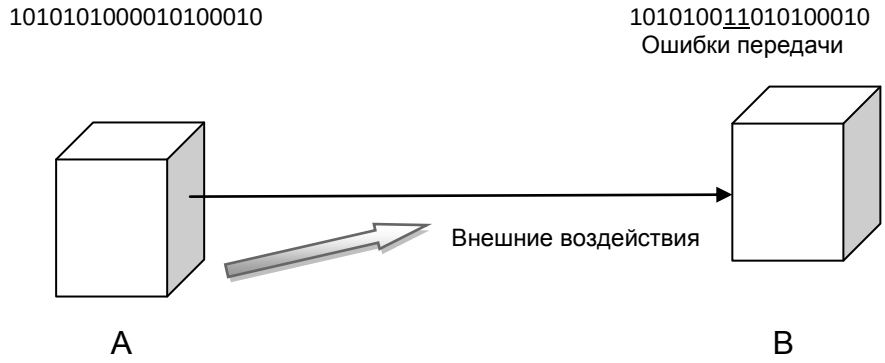


Рис. 4.1. Модель возникновения ошибок в системе передачи.

Ясно, что для того, чтобы измерить параметр ошибок, нужно сравнить принимаемые данные с передаваемыми. Но для этого передаваемая последовательность должна быть известна на приемной стороне, т. е. быть тестовой последовательностью. В этом случае по каналу не может передаваться информация, измерение осуществляется с перерывом связи. В практике измерений в качестве тестовой последовательности, как правило используют псевдослучайные последовательности (ПСП), которые исключают возможности нарушения их синхронизации. Обычно ПСП формируются в виде последовательности полиномиальных коэффициентов, например, 2^6-1, $2^{15}-1$ и т. д. В этом случае на приемном конце нужно знать лишь правило формирования тестовой последовательности.

Несомненным преимуществом использования тестовой последовательности является высокая точность измерения параметра ошибка. В данном случае последний контролируется с точностью до бита. Такой параметр называется Bit Error Rate (BER) или коэффициент ошибок по битам. Этот параметр представляет собой самый точный метод контроля качества цифровой системы передачи. Основным недостатком использования тестовой последовательности является отключение канала от системы передачи на время измерений – измерение с перерывом связи.

При передаче реального трафика на приемной стороне не может быть точного знания об ожидаемой последовательности. В качестве возможного решения для этого случая был предложен метод, представленный на рис. 4.2. Суть метода состоит в том, что передаваемые данные реального трафика разделяются на блоки данных. Затем перед началом передачи по каналу над каждым блоком совершаются специальные вычисления, результат которых

добавляется к блоку и передается на сторону приемника. На стороне приемника В над блоком производятся аналогичные вычисления, результат которых сравнивается с переданным служебным полем со стороны А. Если результаты вычислений не совпадают, делается вывод о присутствии в блоке данных ошибки. Таким образом, можно проводить измерения на реальном трафике без перерыва связи. Единство методики определяется тем, что контроллеры, производящие вычисления на передающей и приемной стороне, действуют по единым правилам расчета.

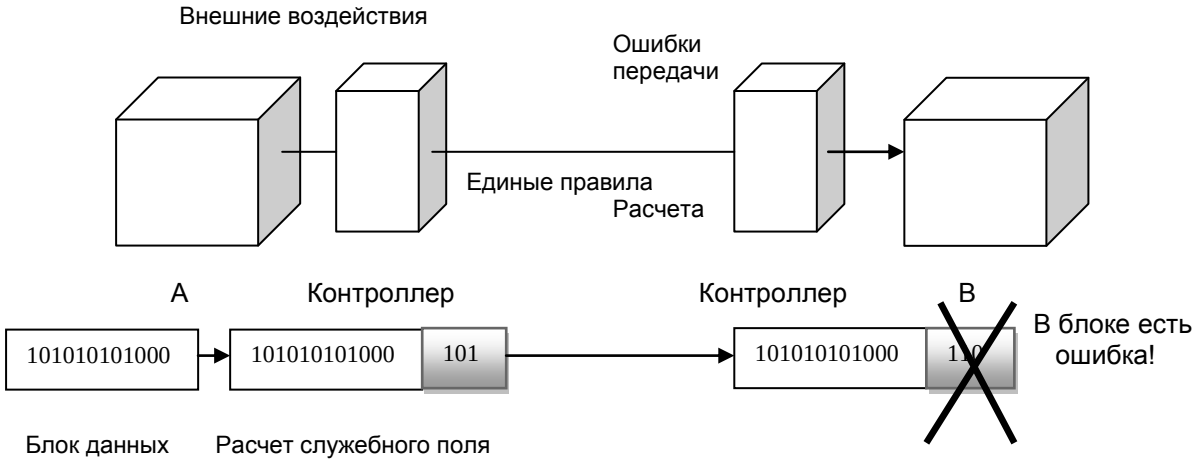


Рис. 4.2. Метод измерения параметра ошибки без перерыва связи.

Служебные данные, в которых отражается результат вычисления, обычно передаются в служебных полях цикла передачи, поэтому такой метод применяется в случае, когда цифровой поток структурирован, т. е. имеет цикловую, кадровую или пакетную структуру. Это – основное требование методики. Если поток, передаваемый по системе передачи, неструктурирован, измерение блоковых ошибок невозможно. Поскольку измерения ошибок делаются в блоках данных, параметр ошибок в этом случае обозначается как BLER (Block Error Rate).

Размер блока определяет точность измерения параметра ошибок. Если в методике контроля BER с отключением канала (с перерывом связи) можно контролировать BER с точностью до бита, то в методике контроля параметра ошибок без отключения канала измерение можно проводить с точностью до блока. Можно показать, что точность измерения BLER и BER различаются до размера блока. Например, если размер блока составляет 100 бит, то точность измерения BLER будет меньше точности измерении BER на два порядка. Измерения BLER оказались настолько эффективными, что были использованы в качестве основного метода встроенных систем диагностики ошибок. В частности, как уже отмечалось, контроль систем передачи PDH осуществляется по CRC, а систем передачи SDH – по BIP.

Рассмотрим теперь краткопринципы нормирования и измерения параметров ошибок в цифровых каналах. Прежде всего, следует понимать, что сами по себе параметры BER и BLER не могут быть использованы для нормирования качества в цифровых системах передачи. Объясняется это тем, что оба параметра

являются интегральными. Дело в том, что параметр BER представляет собой частное от деления общего числа ошибок на общее количество переданных битов $BER = \frac{ErrB}{BITS}$. Такое определение не учитывает природу возникновения ошибок и структуру их распределения. В то же время от структуры распределения битовых ошибок зависит окончательный вывод о том, качественный или некачественный канал системы передачи мы измеряем.

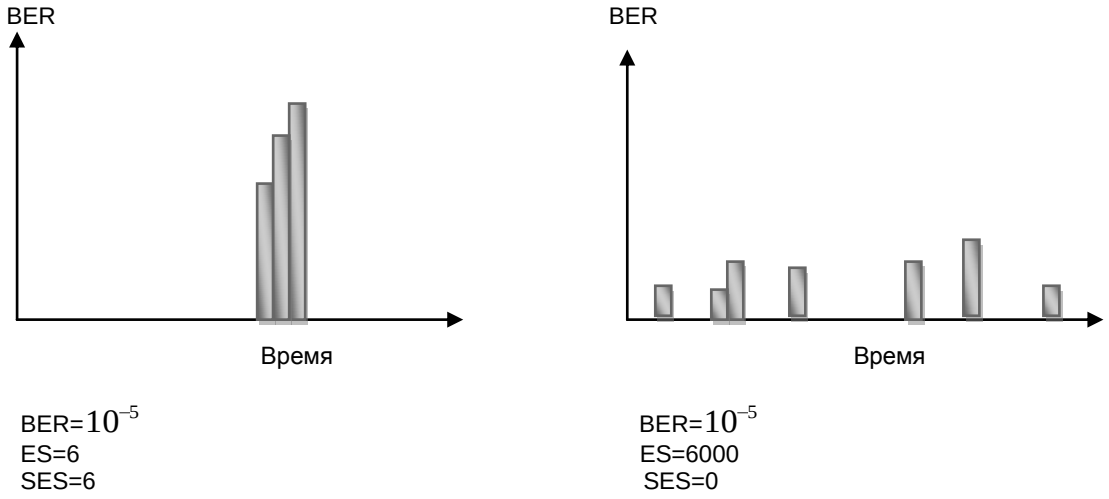


Рис. 4.3. Два варианта распределения сигналов о неисправности с одинаковым параметром BER.

На рис. 4.3 слева представлен «пакет» ошибок, возникающий обычно вследствие наводок на кабель системы передачи. На этом же рисунке справа показан случай появления случайных ошибок, которые обусловлены самим качеством системы передачи и в большинстве случаев не связаны с какой либо определенной причиной. В обоих случаях параметр BER оказывается достаточно высоким, например BER=10^{-5}. Но охарактеризовать практическое качество системы передачи этот параметр не может. В рассмотренных примерах при одинаковом BER канал слева – это качественный канал, поскольку все возникшие в нем ошибки помещаются внутри интервала времени 6 с., а других ошибок в канале нет. Если мысленно вырезать эти 6 с., то мы получим идеальный канал. Наоборот, при BER=10^{-5} для канала справа мы имеем совершенно неприемлемое качество, т. к. появление одиночных ошибок в нем – слишком частое явление.

Таким образом, видно, что интегральная природа параметра BER (следовательно, и BLER) не позволяет использовать его в качестве корректного параметра нормирования характеристики качества. Для полноты картины нужно знать еще и характеристику распределения ошибок. Чтобы оценить распределение ошибок во времени, было предложено считать отдельно секунды с ошибками (ES) и секунды, пораженные ошибками (SES). Секунды с ошибками – это все секунды, в течение которых были ошибки, а SES – это секунды, в течение которых BER был хуже, чем 10^{-3}. Переход от анализа интегрированного

параметра BER к дифференцированным значениям этого параметра в течение односекундных интервалов позволяет учесть распределение параметра ошибок.

Например, на рис. 4.3 представлены значения не только параметра BER, но и соответствующие значения параметров ES и SES. По их соотношению можно оценить кучность возникновения ошибок в измеряемом канале, что для целей эксплуатации оказывается достаточным.

Следует отметить, что относительно измерения BER параметры ES, SES, а также другие параметры (AS, UAS и пр.) являются вторичными, т.к. непосредственно измеряется параметр BER в односекундных интервалах. Но именно эти параметры представляют интерес для оценки качества цифрового канала. Результатом применения описанного метода явилась разработка рекомендаций ITU-T G.821, G.825 и M.2100, на основе которых был написан отечественный стандарт по измерениям в цифровых системах передачи – Приказ Минсвязи РФ №92.

4.1.2. Методики нормирования и контроля качества G.821/G.826/M2100.

Международными стандартами были приняты следующие основные параметры качества цифровых систем передачи: BER – параметр ошибок, ES – количество секунд с ошибками, SES – количество секунд, пораженных ошибками, AS – количество секунд готовности канала и UAS – количество секунд неготовности канала. Параметры ES, SES, AS и UAS могут иметь как абсолютное, так и процентное выражение, как, например, доля секунд с ошибками.

Методика G.821.

Как уже отмечалось, измерения параметра BER требуют использования тестовой последовательности, например ПСП. Рекомендация G.821, посвященная методам измерения BER с перерывом связи, предлагает следующую последовательность обработки результатов (рис. 4.4).

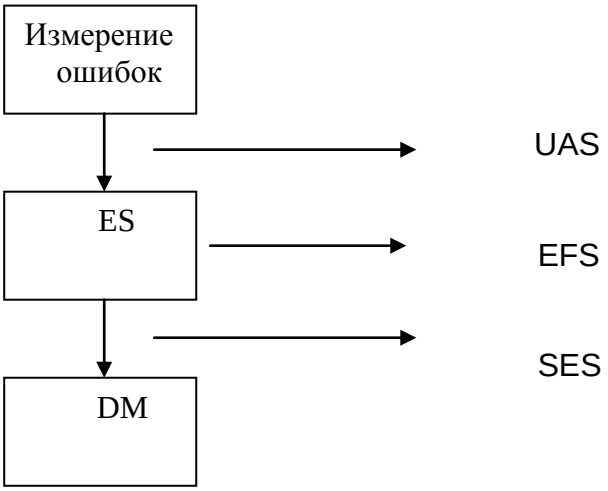


Рис. 4.4. Алгоритм измерения параметров G.821.

Измерения основаны на подсчете количества ошибок и BER в односекундных интервалах. Первым шагом является разделение всего времени проведения измерений на время готовности и время неготовности канала, в результате выделяется параметр UAS (Unavailability Seconds – секунды неготовности канала). Под временем неготовности канала понимается либо время отсутствия сигнала (появление сигнала LOS), либо появление в канале высокого BER хуже, чем 10^{-3} в течение 10 последовательных секунд. В этом случае все 10 секунд и последующие за ними считаются секундами неготовности канала. Решение о переходе канала в состояние готовности принимается после того, как прибор принимает 10 последовательных секунд с параметром BER лучше, чем 10^{-3}. В этом случае все 10 секунд, а также все последующие считаются секундами готовности. Таким образом, все время использования канала разделяется на три периода: время готовности канала, время неготовности канала из-за внешних причин (сигналов неисправности) и время неготовности канала из-за высокого значения параметра BER. Для нормирования качества природа неготовности канала особого значения не имеет, так что все время разделяется на время готовности и время неготовности канала (рис. 4.5).

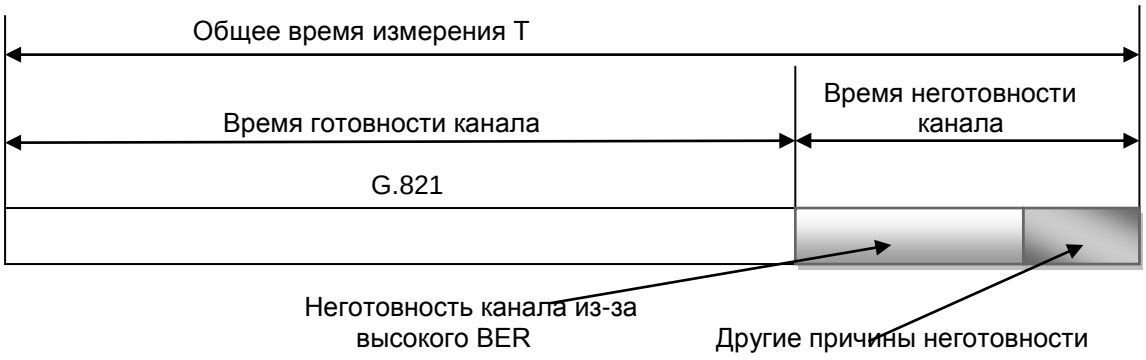


Рис. 4.5. Разделение времени работы канала по параметрам готовности.

После разделения всего времени измерения канала на секунды готовности и неготовности принимается важный методический принцип: все результаты измерения параметров ошибок и, следовательно, все нормы качества для систем передачи выполняются только для периода готовности канала. Время неготовности канала из подсчета ошибок исключается. В этом принципе заключен важный методический смысл.

Допустим, что мы имеем канал, в котором присутствует два типа ошибок:
- статистические ошибки, связанные с работой протяженной системы передачи;
- ошибки, связанные с плохим контактом в кроссе, которые возникают в виде длительных пакетов ошибок.

Нас естественно интересуют в большей степени статистические ошибки, поскольку их устранить чрезвычайно сложно, а иногда просто невозможно. Ошибки же, связанные с кроссовым подключением устраняются легко.

Статистические ошибки появляются редко, в среднем 1 – 2 ошибки за 15 мин. теста, что соответствует BER=$5x10^{-10}$. При подсчете ошибок ErrB согласно

методике G.821 случаи пропадания соединения на кроссе будут отнесены к секундам неготовности канала UAS. Подсчет ошибок в эти периоды не производится, так что мы легко получим данные о величине статистического BER в системе передачи. Влияние же плохого контакта в кроссе будет отнесено в параметр UAS. Если бы подсчет ошибок выполнялся в течение всего времени измерений, мы потеряли бы данные о статистическом BER, поскольку данные об 1 – 2 ошибках просто «утонули» бы в данных, связанных с пакетами ошибок из-за проблемы в кроссе.

Таким образом, методика подсчета ошибок по рек. G.821 позволяет более дифференцировано подходить к подсчету ошибок, уже на первом этапе измерений учитывать их природу.

Итак, первый шаг методики измерения параметров ошибок сводится к двум принципам:

1. Все время использования канала делится на две категории по параметрам готовности и неготовности канала и формируются требования к параметрам готовности и неготовности канала.

2. Подсчет ошибок и расчет BER выполняются только в периоды готовности канала. Только для периодов готовности формулируются параметры качества цифровой передачи.

Затем во время готовности канала производится подсчет секунд с ошибками ES, автоматически рассчитывается параметр секунд без ошибок (Error Free Seconds – EFS).

Для секунд с ошибками рассчитывается параметр BER и вычисляется параметр секунд, пораженных ошибками – SES. На основе анализа SES рассчитывается параметр минут деградации качества – DM (в последний версии рек. G.821 он исключен из спецификации параметров качества).

Совокупность параметров ES, SES и DM представляет собой весь набор параметров качества цифрового канала по рек. G.821. Интересно, что первичный измеряемый параметр BER в спецификацию параметров качества цифрового канала не входит.

Измеряя ES, SES и DM, оператор получает отчет о параметрах качества, но возникает вопрос о нормировании этих параметров, т. е. об определении уровней порогов, при которых должно быть принято решение, качественный или некачественный канал связи проходит тестирование.

В рек. G.821 для целей нормирования была предложена методика гипотетической модели (HRX). В соответствии с этой методикой параметры качества нормируются для некоей гипотетической модели системы передачи, а затем создается алгоритм пересчета норм от гипотетической модели к реальному измеряемому тракту.

Стандартизация и нормирование параметров качества цифровых каналов велись исторически двумя комитетами в составе международного союза

электросвязи (МСЭ) – Международным комитетом по телефонии и телеграфии (МККТТ) – ITU-T и Международным консультативным комитетом по радио (МККР) –ITU-R. В результате их работы была сформирована единая гипотетическая модель на основе подхода к сетям ISDN, т. е. цифровым сетям с доведением цифрового потока от абонента до абонента без аналого-цифровых преобразований. Такая модель получила одобрение МККТТ и носит название эталонного международного коммутируемого соединения ISDN (Hypothetical Reference Connection – HRX). Длина такого соединения международного уровня была принята равной 27 500 км. Было предложено, чтобы в состав HRX могла входить секция радиочастотной системы передачи длиной 2 500 км, параметры которой регламентированы МККР, разработавшим гипотетическую модель радиочастотной цифровой системы передачи (Hypothetical Reference Digital Path – HRDP).

Гипотетическая модель МККР была применена для разработки норм на радиорелейные и спутниковые системы передачи.

Таким образом, в настоящее время все нормы на параметры цифровых каналов ориентированы на две гипотетические модели HRX и HRDP, связанные друг с другом тем, что в состав HRX входит HRDP. Обе модели значительно повлияли не только на стандартизацию норм, но и на саму технологию организации измерений, в частности на параметры времени проведения измерений.

Нормы на параметры цифровых каналов приведены в соответствующих рекомендациях МККТ и МККР, а также в отечественных нормативных документах, в частности в Приказе №92 от 10.08.96 г. «Нормы на электрические параметры цифровых каналов и трактов магистральной и внутризоновой первичных сетей».

Гипотетическая модель ISDN (HRX).

Гипотетическая модель ISDN предполагает нормирование параметров качества для цифрового канала ОЦК 64 кбит/с, сформированного системами передачи и коммутации ISDN. Нормы качества разработаны для составного канала ОЦК от абонента до абонента. При разработке норм МККТТ основывался на следующих положениях:

1. Услуги цифровой связи будущего предполагается предоставлять на основе технологии ISDN, поэтому ISDN была выбрана как эталонная сеть.

2. В качестве основных показателей были выбраны параметры ошибок и готовности, поскольку именно они влияют на качественные параметры передачи речевой информации и данных пользователя.

3. Хотя голосовой трафик более распространен, чем трафик ISDN, требования к нормам качества резонно строить на основе ISDN, т. к. предполагается, что сеть ISDN будет использоваться для передачи сервисной информации даже для услуг

телефонной связи обычного качества. Поэтому сеть ISDN должна удовлетворять универсальным нормам.

В результате рассмотрения параметров качества была сформирована гипотетическая модель тракта ISDN, представленная на рис. 4.6.

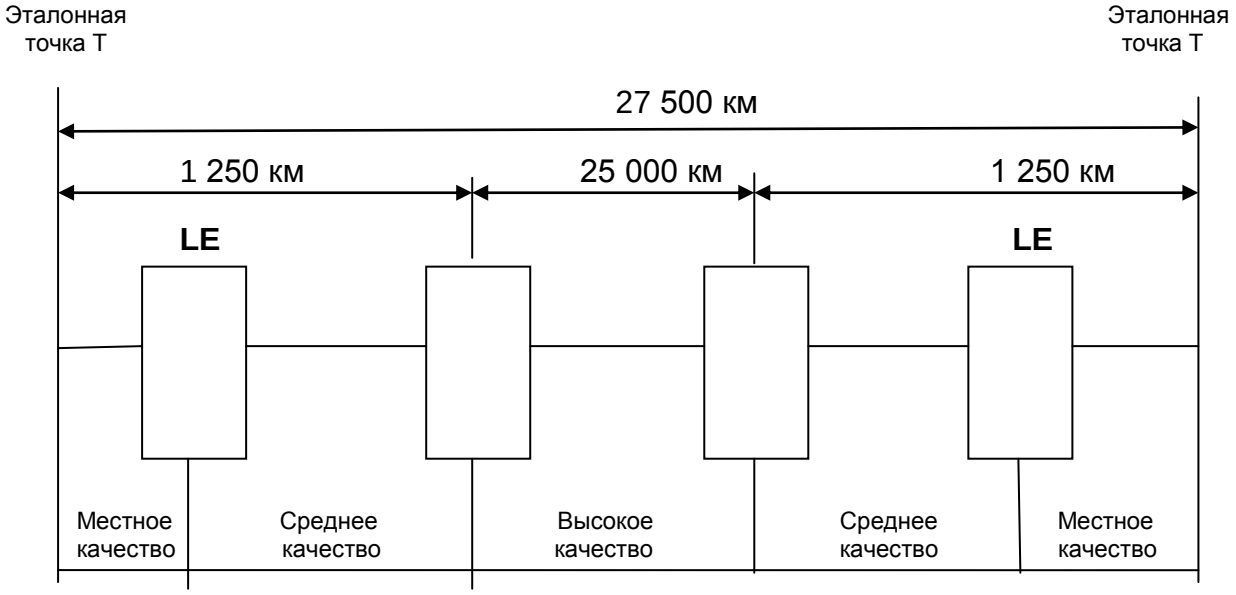


Рис. 4.6. Международное эталонное коммутируемое соединение HRX.

За основу был взят цифровой тракт общей протяженностью 27 500 км. Тракт был разбит на участки местной связи, среднего качества и высокого качества. Была установлена максимальная протяженность участков от абонента до цифровой системы передачи магистральной первичной сети – 1 250 км и протяженность цифрового тракта магистральной первичной сети – 25 000 км (этот параметр соответствует длине HRDP). Тракт от абонента до магистральной первичной сети включает в себя участок местного качества (от точки Т до ближайшего коммутационного узла LE и участок среднего качества от коммутационного узла до узла магистральной первичной сети, где могут использоваться системы передачи местной первичной сети или системы коммутации вторичных сетей. Полученная таким образом модель описывает нормы на параметры качества международного коммутируемого соединения ISDN (HRX). Нормы на характеристики ошибок в таком международном соединении содержаться в рек. ITU-T G.821.

По времени было предложено разделение требований к параметрам ошибки на три категории: для минут низкого качества (категория А), для пораженных ошибками секунд SES (категория Б) и для секунд с ошибками ES (категория В). Эти категории представлены в табл. 4.1 вместе с сформированными применительно к модели HRX нормами на параметры ошибок в составном цифровом канале 64 кбит/с.

Нормы на параметры цифрового тракта учитывают тип трафика, передаваемого в тракте. Так, например, рек. G.821 определяет следующие параметры BER для канала, по которому передается речь и данные (табл. 4.2).

Таблица 4.1. Три категории качества ITU-T для международного соединения ISDN 64 кбит/с (рек. G.821).

Часть	Нормы на BER	Условия
А	BER<10^{-6} при T_0=1 мин	>90% одноминутных интервалов имеют 38 или менее ошибок
Б	BER<10^{-3} при T_0=1 с	> 99,8% односекундных интервалов имеют менее 64 ошибок
В	BER=0 при T_0=1 с (EPS)	> 92% секунд

Общее время измерений Т=1 месяц.

Примечания:

1. Термины «минуты низкого качества», «секунды, пораженные ошибками» и «секунды с ошибками» использованы в качестве удобной и краткой классификации эксплуатационных норм. Их использование не означает приемлемости или неприемлемости этого уровня качества.

2. Одноминутные интервалы получены после исключения времени неготовности и сильно пораженных ошибками секунд из общего времени и последующего последовательного группирования остальных секунд в блоки из 60 секунд. Базовые односекундные интервалы получают, исходя из фиксированного периода времени.

3. Временной интервал, на котором определяются процентные нормы, не нормирован, т. к. этот период может зависеть от конкретного применения. Период порядка одного месяца предлагается в качестве стандартного периода.

4. По практическим соображениям при 64 кбит/с минута, содержащая четыре ошибки (что соответствует коэффициенту ошибок 1,04x10^{-6}) не считается минутой низкого качества. Однако это не следует рассматривать как снижение нормы коэффициента ошибок.

5. Секундой неготовности канала считается секунда, в течение которой было отмечено более 64 ошибок.

6. Для проведения практических измерений обычно используют 10-минутные интервалы.

Таблица 4.2. Нормы на параметры ошибок для международного соединения ISDN.

T_0 =1 мин для передачи речи		T_0 =1 с для передачи данных	
BER в интервале 1 мин	% минут готовности	BER в интервале 1 с	% минут готовности
> 10^{-6}	< 10%	> 0	< 8% (ES)
< 10^{-6}	> 90%	0	> 92% (EPS)

Теоретическая модель радиочастотной системы передачи HRDP.

Требования по параметрам готовности и параметрам канала цифровой передачи международного соединения ISDN (HRX) получили дальнейшее развитие при разработке норм на параметры радиочастотных трактов систем передачи на основе гипотетической модели тракта радиосистемы HRDP. На основании данных, приведенных в рек. G.821, были сформулированы следующие основные параметры:

1. Длина HRDP была принята равной 2 500 км, что соответствует рис. 4.6.

2. Поскольку для HRX было установлено требование по параметру BER магистрального участка высокого качества – 1 ошибка на 10^{10} символов на 1 км, то для тракта HRDP было установлено значение параметра ошибки 2,5x10^{-7}, не включая вклад мультиплексного оборудования. Было установлено, что такое значение параметра BER должно выполняться в течение 99% от общего времени работы канала.

3. МККТТ установил ному на параметр EFS от LE до LE равную 95%. Соответственное нормирование параметра EFS для HRDP дало значение EFS= 99,5%.

4. Окончательные требования по параметру BER были определены в рек. 594 МККР, где были установлены следующие требования:

BER>10^{-7} не более, чем 1% времени любого месяца;

BER>10^{-3} не более, чем 0,05% времени любого месяца.

Таким образом, принципы нормирования, изложенные выше, использовались и при формулировании норм на параметры HRDP.

Пересчет параметров гипотетической модели в параметры реального канала.

Сформулированные МККТТ и МККР гипотетические модели используются для определения норм на параметры качества канала. Но методика нормирования параметров цифровых каналов с использованием гипотетическихмоделей включает не только разработку норм на параметры эталонных трактов, но и методику пересчета параметров эталонного тракта в параметры реального канала.

В настоящее время наиболее часто с этой целью используется принцип линейной аппроксимации результатов по длине реального участка. В качестве примера рассмотрим методологию пересчета, описанную в докладе 930 МККР по расчету параметров реальной радиочастотной системы передачи. В соответствии с предложенной методикой параметры радиочастотной системы длиной L могут быть определены следующим образом:

BER>L/2500 x 10^{-7} не более чем L/2500% времени любого месяца

BER>10^{-3} не более чем L/1500 x 0,05% времени любого месяца.

Анализ методики расчета параметров цифровых трактов, изложенной в отечественном Приказе № 92, также показывает, что используются методы линейной аппроксимации (в ряде случаев с весовыми коэффициентами).

Основным недостатком методологии G.821 является необходимость ее расширения для определения параметров цифровых систем передачи со скоростями выше 64 кбит/с. Кроме того, рекомендация изначально была ориентирована на использование метода измерений с перерывом связи, что представляет собой довольно односторонний вариант нормирования. В дальнейшем эта методика была дополнена методикой рек. G.826, ориентированной на измерение блоковых ошибок BLER.

Методика G.826.

Методика G.826 была разработана как расширение методики измерения битовых ошибок по BER на область блоковых ошибок BLER. Рек. G.826, опубликованная впервые в 1923 г., является развитием G.821и учитывает ее недостатки. Основными принципами методологии являются:

- применимость к цифровым системам передачи со скоростями выше 64 кбит/с;
- учет основных скоростей передачи, используемых в современных цифровых системах PDH/SDH;
- определение параметров измерений без перерыва связи, т. е ориентация на эксплуатационные измерения работающих систем.

Согласно рек. G.826 предусмотрено измерение следующих параметров: EB, ES, SES, BBE. Результатами измерений являются относительные параметры ESR, SESR, BBER. Рекомендацией установлены следующие допустимые значения параметров (табл. 4.3.):

Таблица 4.3. Параметры цифровых систем передачи по G.826.

Скорость, Мбит/с	**1,5 - 5**	**>5 - 15**	**>15 - 55**	**>55 - 160**	**>160 - 3500**
Размер блока	2000-8000	2000-8000	4000- 20 000	6000- 20 000	15 000- 30 000
ESR	0,04	0,05	0,075	0,16	не определено
SESR	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
BBER	$3x10^{-4}$	$2x10^{-4}$	$2x10^{-4}$	$2x10^{-4}$	$1x10^{-4}$

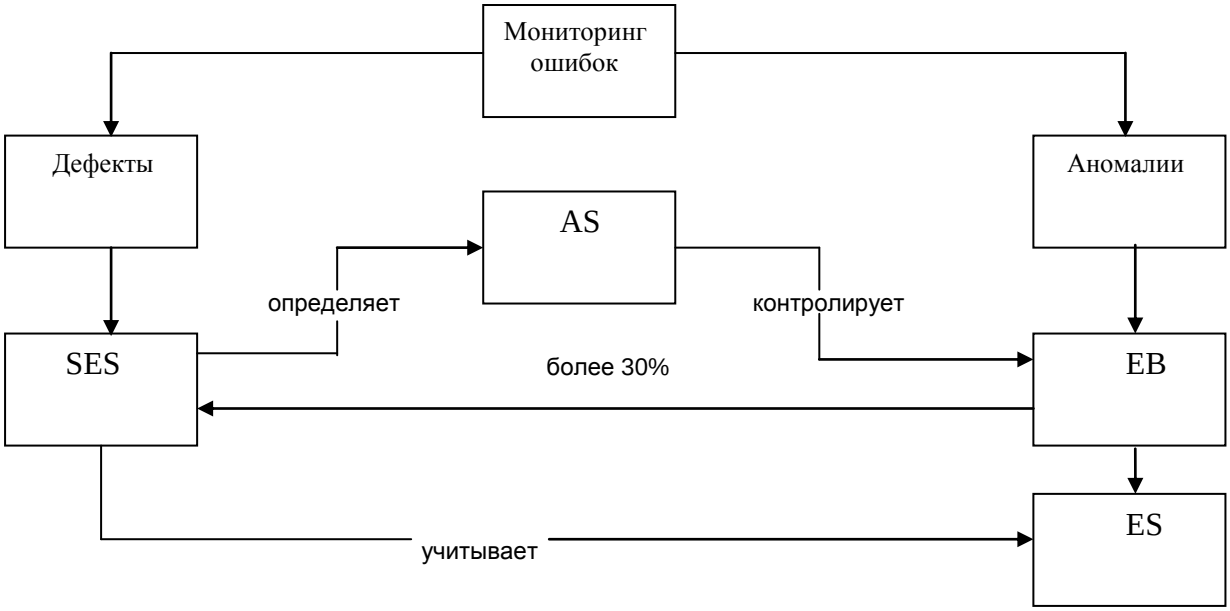


Рис. 4.7. Алгоритм измерения параметров G.826.

Алгоритм измерения параметров по рек. G.826 представлен на рис. 4.7. Суть метода состоит в том, что в системе осуществляется постоянное измерение ошибок в процессе эксплуатации. В результате мониторинга обнаруживается две категории неисправностей: дефекты, что соответствует сигналам о неисправностях, и аномалии, что означает появление блоков данных с ошибками (Error Blocks – EB). По результатам EB измеряется параметр секунд с ошибочными блоками (ES). Если количество EB составляет более 30% от всех блоков, то делается вывод о том, что данная секунда является секундой, пораженной ошибками (SES). Определение времени готовности канала (AS)

делается аналогично методике G.821 по параметру SES. Количество EB и BBER подсчитывается только в минуты готовности канала.

Совокупность методик G.821 и G.826 полностью определяют параметры качества цифровых систем передачи при любых условиях эксплуатации и применительно к любым методикам измерений, соответственно G.821 – с отключением канала, G.826 – в режиме мониторинга канала.

Единственным недостатком комбинированной методики является отсутствие эксплуатационной специфики, поскольку заложенное здесь время проведения измерений составляет 30 дней. Этот период обеспечивает корректную объективность результатов измерения, включая специфические особенности радиочастотных цифровых систем передачи. На практике, однако, измерения в течение такого длительного периода проводятся довольно редко. Эксплуатационные измерения в большинстве случаев выполняются оперативно, потому что для проведения измерений у инженеров есть несколько часов, а иногда и меньше. По этой причине потребовалась доработка методики и включение в нее эксплуатационных норм, которые также называют оперативными. Обычно для эксплуатационных измерений считается достаточным для получения объективных результатов проведение измерений в течение 24 часов, а иногда даже 15 минут, что определено в рек. M2100.

Эксплуатационные методики M.2100/M.2101.

Методика M.2100/M.2101 была разработана с целью расширения методики G.821/G.826 для целей эксплуатации. Отличительной особенностью методик M.2100/M.2101 является ориентация на индикационные измерения, когда в качестве результатов измерения делается вывод о прохождении или не прохождении теста, а не получение количественных величин параметров. В качестве основных параметров для измерений были выбраны параметры ES и SES.

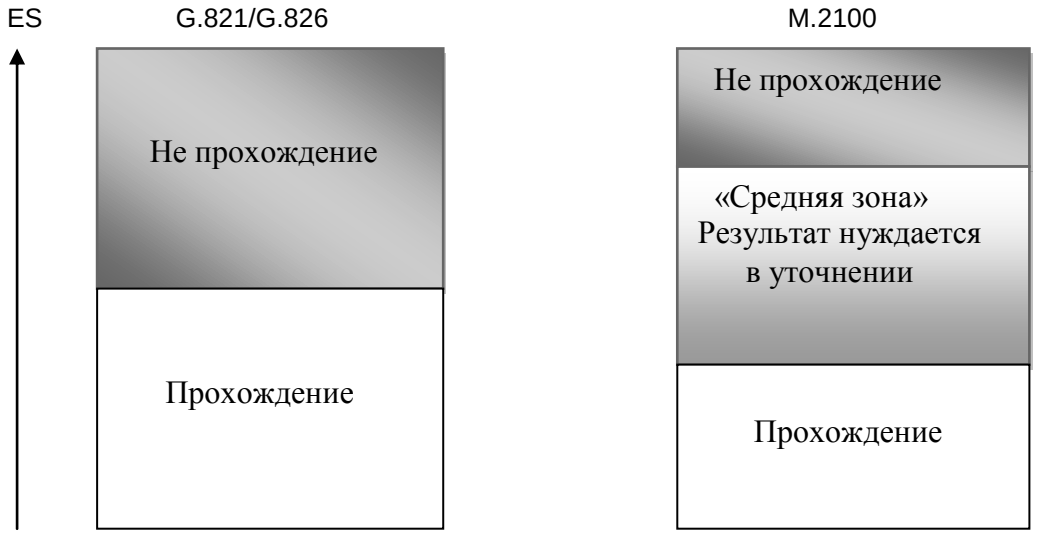


Рис. 4.8. Методика индикационных измерений M.2100.

Рекомендация М.2100 была впервые опубликована в 1993 г. и определила параметры пороговых значений при проведении измерений для цифровых систем передачи PDH. Развитие цифровой первичной сети и внедрение технологии SDH привело к необходимости доработки методологии и появления рекомендации М.2101, где определены пороговые значения при проведении измерений систем передачи SDH.

Второй важной особенностью методологии М.2100/М.2101 является уменьшение времени проведения измерений до 15 мин. с последующими измерениями в течение 24 час, если результат кратковременного измерения окажется в «средней зоне» (рис. 4.8).

Наконец, третьей отличительной особенностью методологии М.2100/М.2101 является использование не одного, как в G.821/G.826, а двух пороговых значений для выделения «средней зоны». Если результат измерения в нее попадает, он нуждается в дополнительном уточнении методами долговременного анализа по методике G.826.

Создание многофункциональных приборов измерения параметров качества привели к появлению нового подхода – метода гистограмм-хронограммного анализа. Но несмотря на всю прогрессивность этого метода, рекомендации G.821/G.826/M.2100/M.2101 остаются востребованными в настоящее время как единственный принятый всеми операторами метод паспортизации параметров качества. Он используется как для нормирования, так и для отчетности параметров качества.

Переход операторов к новым методам нормирования качества услуг на основе соглашения о качестве обслуживания (SLA) мало что изменил в методах измерений и нормирования. Только теперь нормы на параметры качества могут устанавливаться по взаимной договоренности между операторами, но набор параметров в SLA остается прежним: это те же параметры ES, SES, UAS и т. д.

4.2. Система SDH как объект измерений.

Рассмотрим общие принципы измерений в системах SDH, которые применяются для контроля различных подсистем и различных процессов в них.

Для понимания эксплуатационной проблематики следует учитывать важную особенность систем SDH, которая заключается в том, что системы SDH не являются системами Plug&Play (включи и играй). Т. е. все поля, все процессы и все функции в сети SDH должны прописываться вручную, так что ошибка и неправильные действия в установке параметров могут повлиять на работу сети. Если оператор хочет прописать маршрут от пункта А до пункта В сети, он должен сделать соответствующие изменения на всех транзитных узлах сети. И хотя в последнее время этот процесс очень хорошо автоматизирован с помощью системы управления, это лишь оптимизация процесса. Сам же процесс ориентирован на тщательную установку параметров, максимальную детализацию

и минимальную автоматизированность в рамках самой технологии. С другой стороны отсутствие принципа Plug&Play позволяет гарантировать самое важное преимущество технологии SDH – предсказуемость поведения и, как следствие, высокую надежность и стабильность работы.

Еще одной специфической особенностью SDH как объекта измерений является наличие в ней нескольких существенных для эксплуатации процессов. Необходимость учитывать эту специфику при эксплуатационных измерениях приводит к переориентации анализа с отдельных измерений к контролю процесса в целом. Сама же задача контроля процесса включает не только измерения как таковые, но также данные о технологии (как должен развиваться процесс), параметры тех или иных полей заголовков для данной конфигурации сети, данные от системы управления и непосредственные результаты измерений (рис. 4.9). Все перечисленные данные должны рассматриваться параллельно в процессе анализа, так что задача контроля процессов приводит к многоуровневому анализу системы SDH.

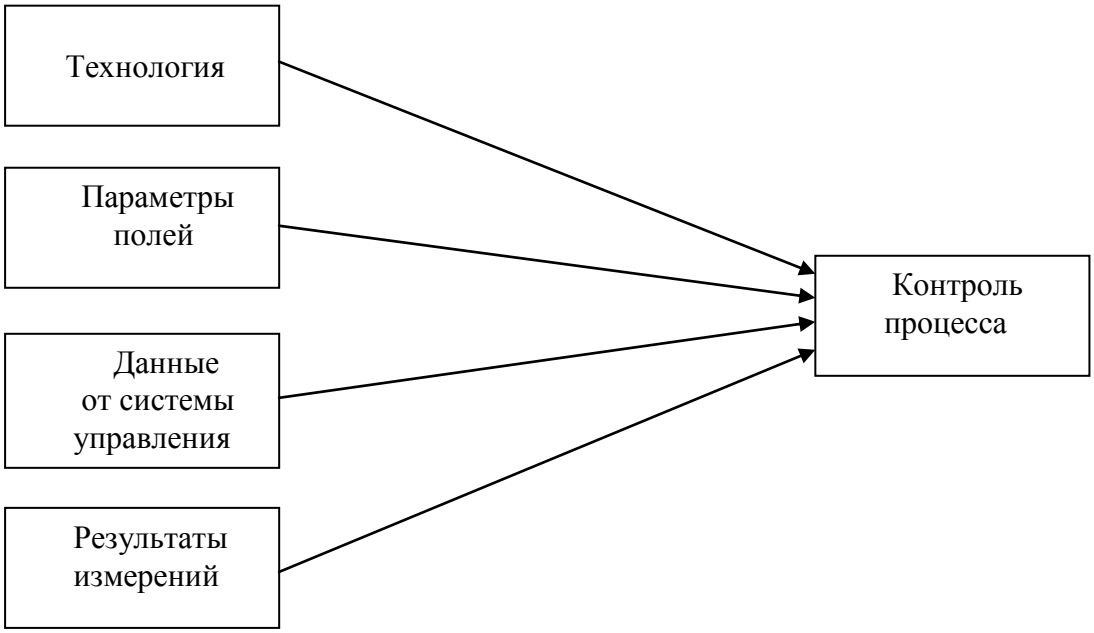


Рис. 4.9. Задача контроля процессов в системе SDH приводит к необходимости всестороннего анализа различных компонентов системы передачи.

4.2.1. Многоуровневый принцип процесса измерений.

Многоуровневое построение системы SDH проникает вовсе принципы работы и имеет следующие уровни:

1. Секционный уровень
2. Уровень маршрута верхнего уровня
3. Уровень маршрута нижнего уровня.

В соответствии с этими уровнями происходят и эксплуатационные процессы в системе передачи. Как следствие резонно использовать такое многоуровневое построение для классификации технологии измерений, включив в рассмотрение также несколько дополнительных уровней методического назначения. Вариант многоуровневой классификации измерений параметров представлен на рис. 4.10. Здесь выделено четыре уровня анализа системы SDH: секционный, маршрутов верхнего и нижнего уровней и уровень нагрузки. Для каждого уровня могут быть определенные параметры измерений, приведенные в табл. 4.4. Дополнительными уровнями измерений будут также уровень тракта (маршрута) в целом, а также по совокупности всех трактов – уровень сети.

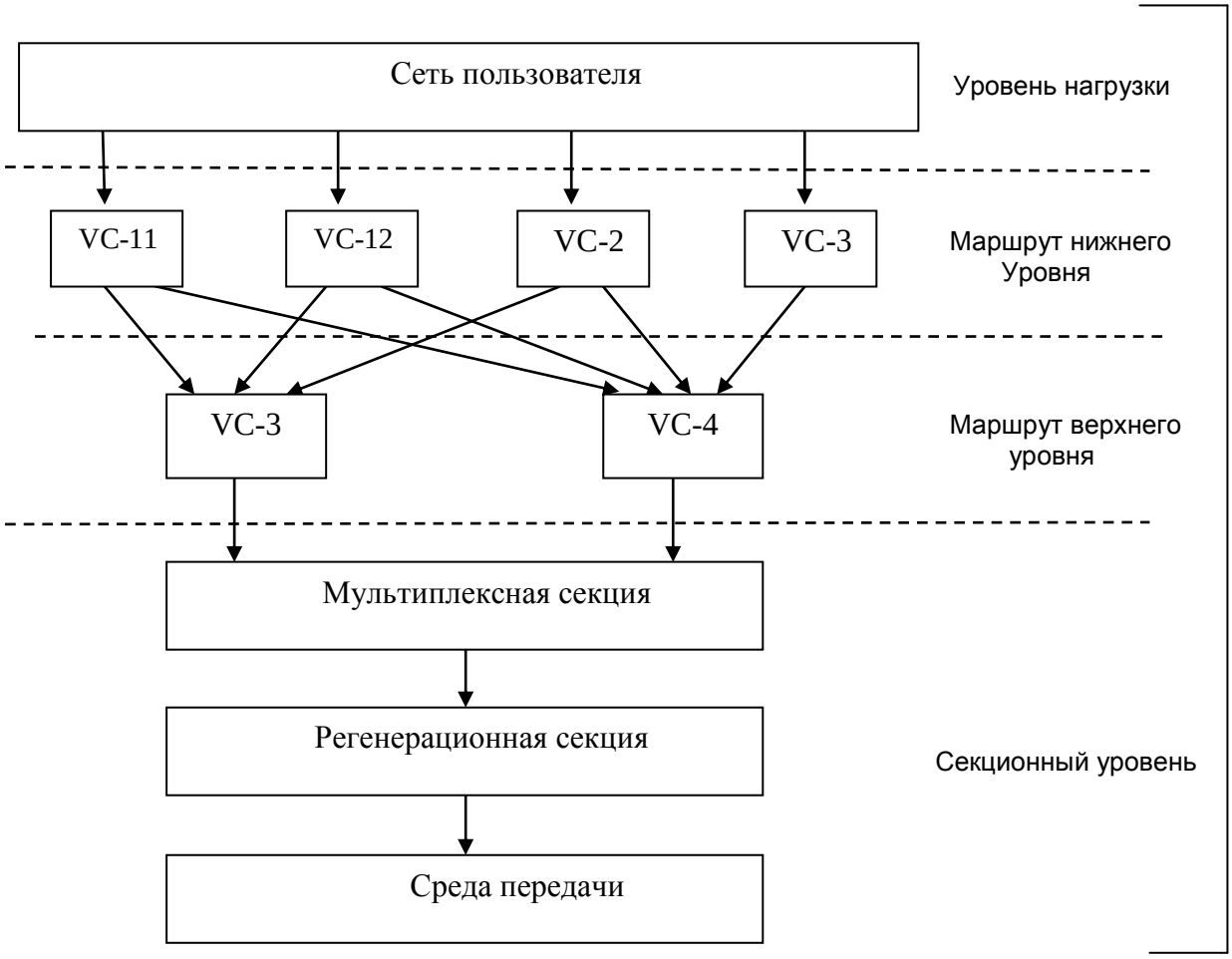


Рис. 4.10. Архитектура системы SDH.

Существенно, что измерение параметров ошибок, а также другие параметры, составляющие основу измерительной технологии PDH, включены в систему SDH на уровне нагрузки. Таким образом, приведенная классификация учитывает эффект «матрешки»; все методические наработки для систем PDH оказываются составной частью технологии SDH на уровне нагрузки.

Разделение технологии измерений в системах SDH на уровни позволяет ввести определенный порядок в описание принципов измерений. Ценность этой классификации в случае эксплуатационного анализа процессов в системе

передачи намного меньше, т. к. часто тот или иной процесс охватывает сразу несколько сетевых элементов и несколько уровней построения технологии. В любом случае при проведении измерений желательно представлять на каком уровне они происходят.

Таблица 4.4. Примеры измерений в системе SDH по различным уровням.

Уровень	Измерения
Секционный уровень	Параметры оптического и электрического интерфейса. Сообщения о неисправности Параметры ошибок Контроль автоматического переключения Анализ джиттера и вандера линейного оптического сигнала
Маршрут верхнего уровня	Сообщения о неисправности Параметры ошибок Анализ указателей
Маршрут нижнего уровня	Сообщения о неисправности Параметры ошибок Анализ указателей
Уровень нагрузки	Процессы загрузки/выгрузки Параметры электрического интерфейса Джиттер нагрузки Анализ параметров загружаемых и выгружаемых потоков PDH
Анализ параметров маршрута в целом	Анализ прохождения виртуального контейнера по системе передачи Анализ логического взаимодействия устройств в составе маршрута Анализ процессов генерации, передачи и анализа сообщений о неисправностях
Анализ параметров сети SDH	Анализ системы синхронизации, активности указателей, компенсации рассинхронизации, компенсации активности указателей Анализ параметров качества системы передачи (надежность, оперативность, реконфигурации, производительность и т. д.) Анализ параметров системы управления

4.2.2. Принципы мониторинга полей заголовков.

Для завершения вопросов о специфике измерений в системах SDH рассмотрим общие принципы мониторинга заголовков. Как уже отмечалось, по своей структуре поля заголовков могут быть трех видов: однобайтовые фиксированные поля, поля расширенного вида и поля-каналы данных.

Наиболее простым методом отображения и контроля полей является отображение текущего состояния данных каждого поля в 16-ричном исчислении. Такая простая визуализация полей реализована практически во всех анализаторах SDH (рис. 4.11) и очень популярна у инженеров.

SOH

A1	A1	A1	A2	A2	A2	J0	X	X
B1			E1			F1	X	X
D1			D2			D3	X	X
H1	Y1	Y2	H2	11	12	H31	H32	H33
B2	B2	B2	K1			K2		
D4			D5			D6		
D7			D8			D9		
D10			D11			D12		
S1	Z1	Z1	Z2	Z2		E2	X	X

HP-POH

J1
B3
C2
G1
F2
H4
F3
K3
N1

TU

V1
V2
V3
V4

LP-POH

V5
J2
N2
K4

Рис. 4.11. Визуализация полей заголовков синхронных сигналов (анализатор SDH).

По виду такое представление данных часто называется матрицей заголовков. Как следует из рис. 4.11, матрица включает в себя все основные заголовки STM-1: SOH, HP-POH, TU, LP-POH. Каждое поле на матрице обозначено в соответствии со своим обозначением по стандартам SDH. Непосредственное значение поля в текущий момент отображается 16-ричными данными, так что оператор может просматривать любые поля в составе заголовков цикла STM-1. Если поле является однобайтовым фиксированным, как например, поля A1=FF, то его значение остается неизменным. Переменные поля постоянно меняют свое содержимое, причем скорость обновления информации на экране значительно уступает реальной скорости обновления данных.

Несмотря на наглядный вид представления заголовков в виде матрицы, детальный анализ этого представления показывает, что оно малоэффективно для непосредственной работы с оборудованием. Действительно, на матрице существуют пустые поля, которые не специфицированы в стандарте. Из остальных полей большая часть данных оказывается бесполезной, поскольку относится либо к полям расширенного вида, либо к полям-каналам, так что данные в ячейке матрицы несут лишь мгновенные значения поля, вырванные из общего контекста.

Если отфильтровать однобайтовые фиксированные поля, то из всей матрицы останется одна «планка (рис. 4.12). Такое представление, конечно, не имеет классического вида в соответствии со стандартом. Зато в него включены все поля, данные которых имеют действительную эксплуатационную ценность. К таким полям относятся поля SOH: C1, S1, поля POH: C2, G1, поле указателей H4 и поля K всех уровней: K1, K2, K3 и K4, поскольку вне зависимости от представления

данных (а допускается два представления SOH+HP-POH и SOH+LP-POH в зависимости от задачи анализа заголовков) байты резервного переключения должны рассматриваться на всех уровнях параллельно.

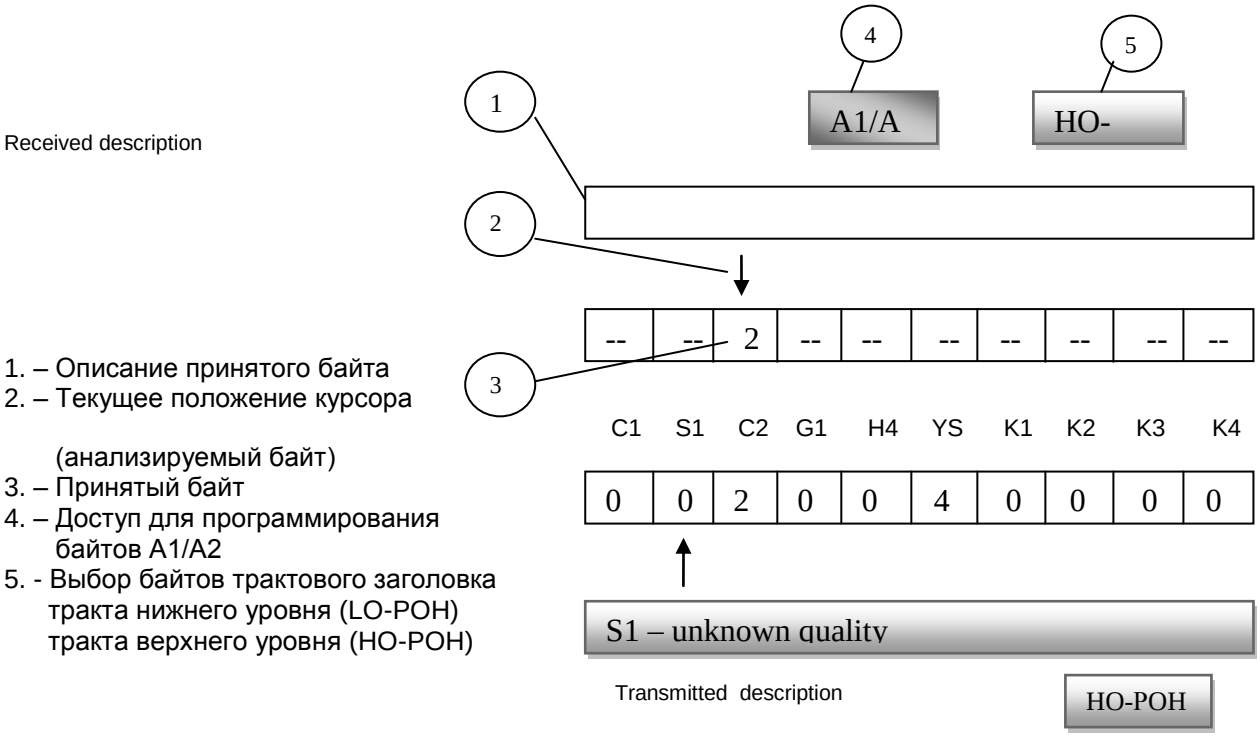


Рис. 4.12. Усеченное представление основных полей вносит дополнительные подсказки, не уменьшая ценности наблюдаемых данных.

Компактное представление данных по однобайтным фиксированным полям имеет еще и то преимущество, что оно допускает размещение на одном экране не только данных о наблюдаемых величинах, но и данные, генерируемые прибором и дополнительные два поля подсказки о том, что означает то или иное значение поля. Например, на рис. 4.12 курсор подведен к байту S1=0, что соответствует неизвестному качеству источника синхронизации (Unknown Quality). Наличие подсказок позволяет не напрягать память в запоминании значений каждого поля. При матричном представлении данных реализовать на экране подсказку из-за его ограниченного размера было бы сложно.

Расширенные поля заголовков невозможно отобразить в матричном виде, поскольку данные в этих полях передаются не отдельными байтами, а по совокупности нескольких последовательных байтов. Поэтому для мониторинга таких полей необходимо объединить последовательные байты разных циклов, выделить из них циклически повторяющуюся информацию и уже после этого отобразить. Обычно для мониторинга таких полей используется специальный экран прибора. В качестве примера на рис. 4.13 представлен вариант отображения данных в полях идентификаторов J-x.

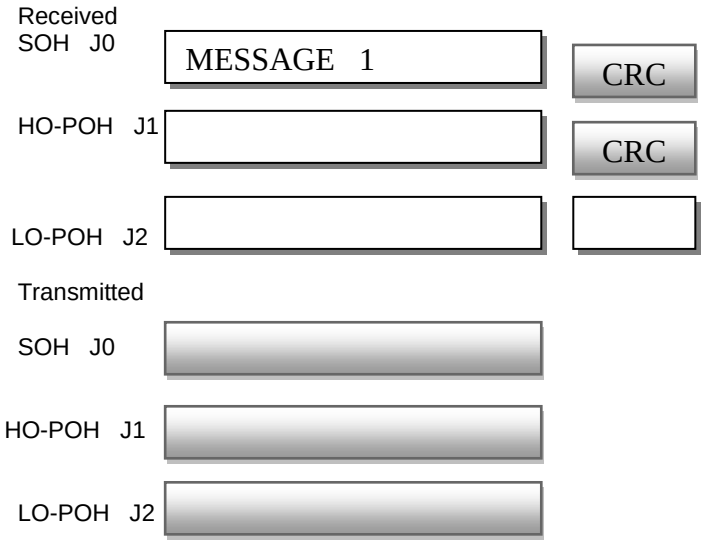


Рис. 4.13. Отображение расширенного поля идентификатора J0.

На рисунке показано, что расширенное поле идентификатора J0 отображается как одно слово MESSAGE 1. Это слово выделяется из нескольких последовательных заголовков SOH, принимаемых прибором. Емкость экрана позволяет в данном случае отобразить значение не только одного идентификатора, но и двух других, так что получается дополнительный специализированный экран контроля полей всех идентификаторов.

С развитием систем передачи SDH совершенствовались и методы анализа полей заголовков. Рассмотренные выше методы представляют собой только первый шаг развития методики анализа и отображения заголовков. Приведенные методы имеют ряд недостатков.

1. Такими методами невозможно отобразить данные полей-каналов.

2. В случае, если нас интересует не абсолютное значение поля, а его изменение в результате определенного процесса, эта методика будет бесполезна.

3. Применение рассмотренной методики затруднено для систем передачи на скорости выше STM-1. Например, в системе STM-16 нужно отобразить одновременно 16 полей идентификатора J0, а в системе STM-64 это будет 64 поля.

По этим причинам в настоящее время разработана методика контроля полей заголовков с использованием триггеров и различных методов сбора данных с определенных полей заголовков. Рассмотрим подробнее эту методику на примере экранных меню анализатора Victoria COMBO.

Чтобы обеспечить выбор полей заголовков, подлежащих контролю, в анализаторе используется уже знакомое нам матричное представление заголовков (рис. 4.14). Но здесь имеются две модификации этого представления. Во-первых, поля на матрице теперь оказываются интерактивными. Нажатие мышью на то или иное поле выделяет это поле для дальнейшей работы по его анализу. Выделенные поля отображаются тенью (на рис. выделено поле D4). Во-вторых, представление на рис. 4.14 в полной мере соответствует требованиям высокоскоростных систем SDH. Внизу матрицы добавлено поле OH Page Number , которое отображает номер матрицы заголовков. Например, для потока STM-1 существует только одна матрица, для потока STM-4 – четыре матрицы, а для потока STM-64 – 64 матрицы. Перелистывая страницы с матрицами, инженер может отметить на них все интересующие его поля.

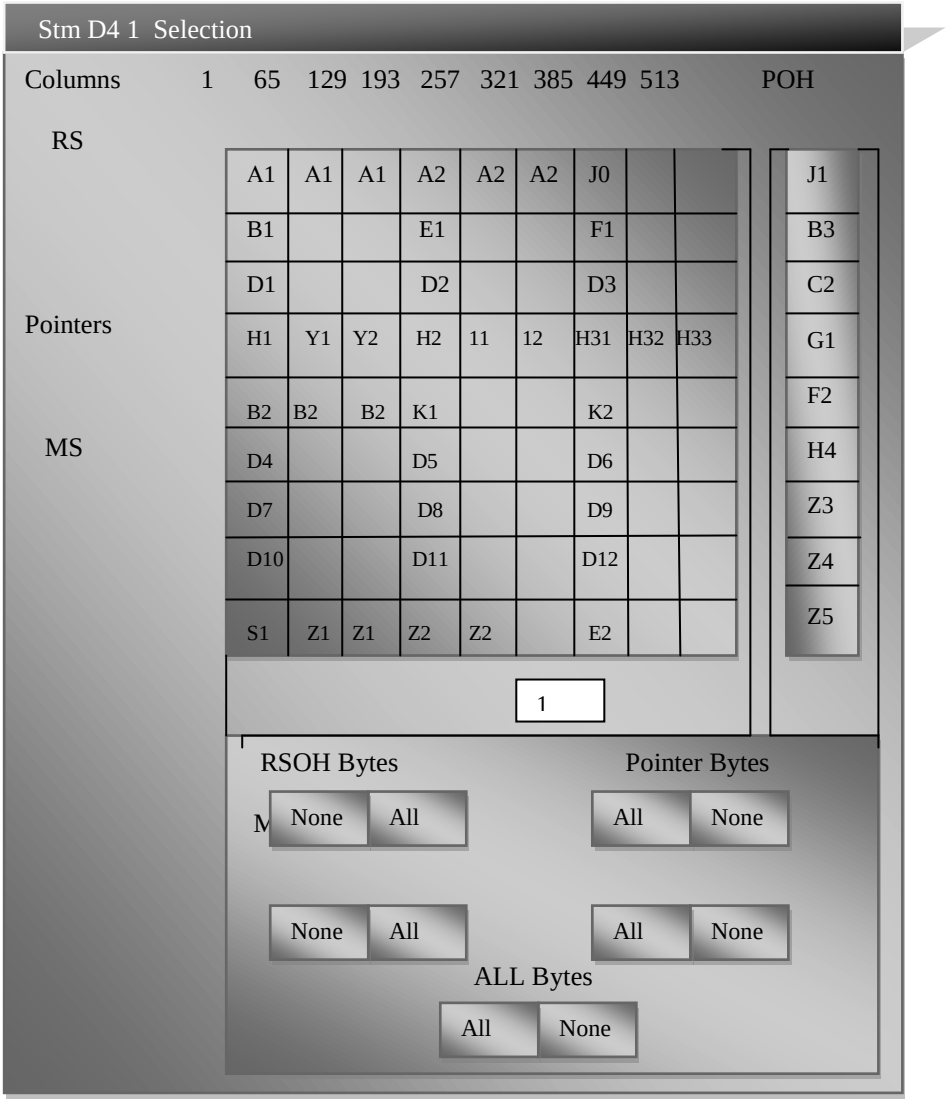


Рис. 4.14. Развитие методики матричного отображения данных полей заголовков.

После отметки всех интересующих полей инженер должен указать, каким образом нужно собирать данные с этих полей. Для этого следует обратиться к

меню сбора информации (рис. 4.15). Это меню устанавливает правила сбора данных с выделенных заголовков. При этом существует три метода сбора данных:

1. Непрерывный сбор данных, когда все данные в 16-ричном формате из выбранного поля загружаются в специальный файл.

2. Ручной режим сбора, когда начало и окончание сбора данных происходит по команде инженера.

3. Режим использования триггера, когда начало сбора данных происходит при возникновении определенных условий в системе передачи.

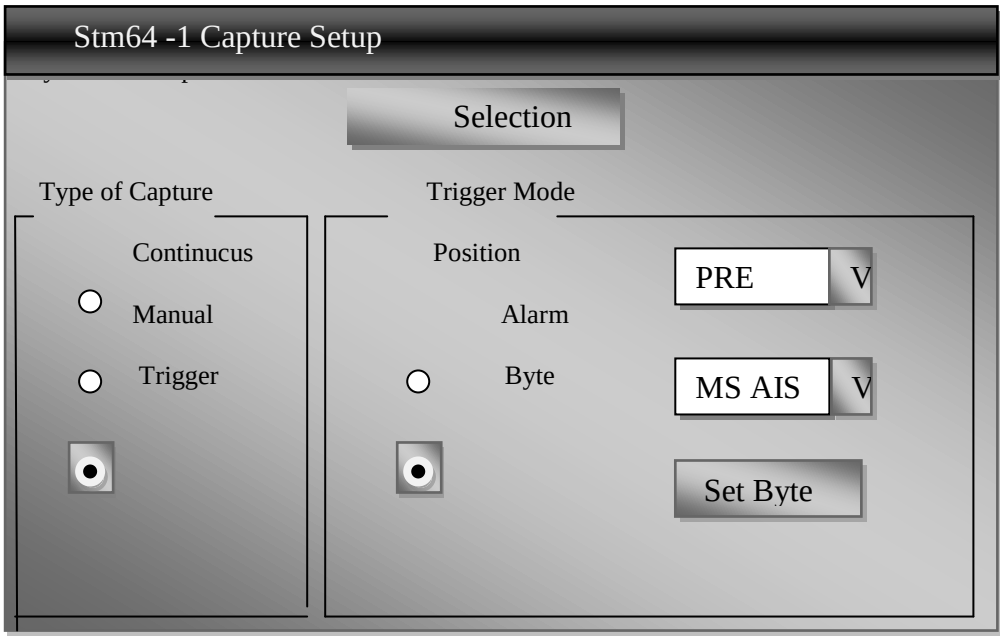


Рис. 4.15. Меню сбора информации из полей заголовков.

По своему типу различают три варианта триггеров:

1. Предварительный триггер (Pre-Trigger – показан на рис. 4.12) осуществляет загрузку N полей заголовков перед возникновением условия срабатывания. Он удобен для поиска причины возникновения неисправности в системе передачи.

2. Последующий триггер (Post-Trigger) загружает N полей заголовков после возникновения условий срабатывания. Он используется для анализа последствий каких-либо неисправностей в системе передачи.

3. Комбинированный триггер (Mid-Trigger) осуществляет загрузку N/2 полей до возникновения условия и N/2 полей после возникновения условия. Он может использоваться в различных комбинированных задачах.

Для понимания условий работы триггера важно понимать метод задания условий срабатывания. Как показано на рис. 4.15 условием может быть определенный сигнал о неисправности, например MS-AIS или HP-RDI. Кроме того, в качестве условия может быть определенное значение определенного поля. В качестве примера установки такого триггера на рис. 4.16 показано меню установок

поля запуска триггера. Для того, чтобы задать условие срабатывания триггера в этом случае инженер выбирает поле запуска (на рис. 4.16 это поле К1) и задает определенную логику реакции триггера на поле запуска, например, равенство или неравенство значения поля заданной величине. На рис. 4.16 показано, что выбрано условие равенства поля К1 секционного заголовка SOH первого транспортного модуля величине К1=А (в 16-ричном формате) или К1=00001010 (в двоичном формате). В этом случае триггер срабатывает, когда К1=А. Кроме равенства или неравенства полей возможно задание условия срабатывания триггера по маске бинарных символов, также представленной на рис. 4.16. Маска представляет собой установку на срабатывание триггера при появлении определенных символов в заданном поле. Например, если в поле К1 четвертый символ будет равен 1, то триггер сработает.

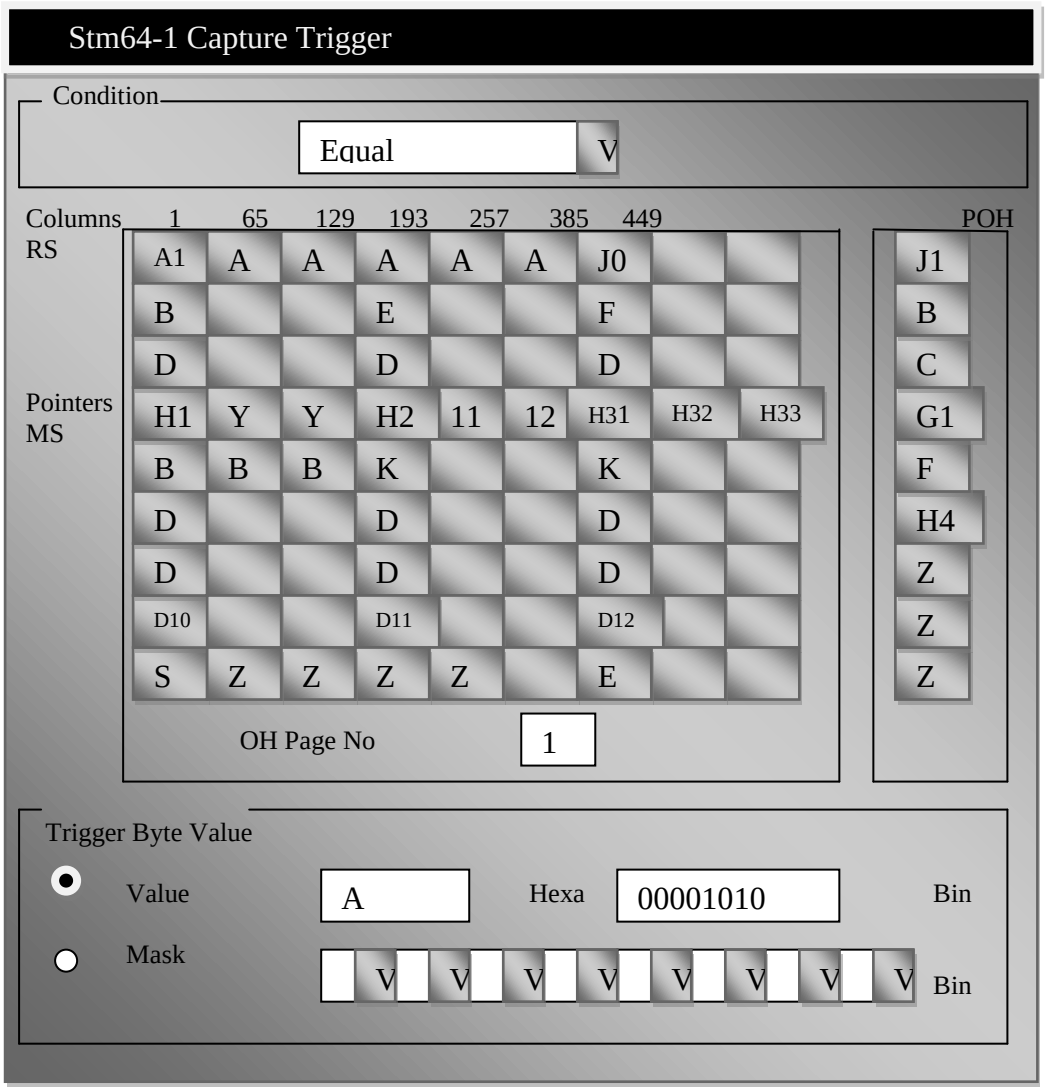


Рис.4.16. Меню задания условия срабатывания триггера.

В качестве итога рассмотрения работы триггеров еще раз представим себе запрограммированную последовательность записи заголовков на рис. 3.14-3.16. При появлении в заголовке SOH транспортного модуля №1 потока STM-64 значения К1=А срабатывает триггер, который записывает N полей перед (значение PRE) возникновения К1=А из поля D4 транспортного модуля №1 (рис.

4.14). Данные загружаются в текстовый файл в 16-ричном или бинарном формате. Казалось бы, что данная методика является очень громоздкой и сложной в настройке. Но она позволяет решить любые задачи мониторинга полей заголовков. Например, задача контроля данных в потоках DCC (байты D SOH) может быть решена очень просто. Прибор обеспечивает запись данных в указанных полях, и остается только написать соответствующий декодер на основе данных о формате сообщений DCC, используемых производителем.

При переходе от анализа полей к анализу процессов рассмотренная методика тем более имеет высокую ценность. Использование триггера и настройка условий его срабатывания является очень полезным инструментом в исследовании любых процессов в системе передачи. Наличие триггера позволяет решать очень сложные задачи поиска корреляций между полями различных уровней и даже различных транспортных модулей. Любой процесс в системе – это взаимосвязь различных сигналов (в данном случае полей). Таким образом, поиск корреляций и есть ключ к исследованию процессов.

Можно сказать, что методика, использующая всего три типовых экрана, позволяет решить любые задачи, связанные с мониторингом заголовков в системе SDH любого уровня: от простого отображения значений поля до поиска сложнейшей корреляции. С учетом всей сложности задачи три типовых экрана (рис. 4.14-4.16) – это сравнительно компактное представление данных. В настоящее время это самая современная методика анализа заголовков.

4.3. Принципы контроля качества при необходимых измерениях.

Необходимые измерения всегда связаны с вопросами контроля качества в системах связи. Обычно измерения такого типа называют паспортизацией каналов, трактов, систем и пр. Наличие средств проведения необходимых измерений – обязательное условие успеха политики контроля качества оператора. С необходимыми измерениями связаны также функции контроля работы оператора со стороны карательных органов государства, например, Госсвязьнадзора, который в соответствии с принципами своей деятельности, вмешивается в работу оператора только на уровне необходимых измерений. И по этой причине необходимые измерения всегда жестко регламентированы стандартами и нормами на системы связи и их компоненты.

4.3.1. Нормы Приказа №92.

В настоящее время для первичной сети России действует один стандарт – нормы Приказа №92 МС РФ. Приказ №92 основан на международных рекомендациях ITU-T G.821/G.826/M.2100, а также включает в себя требования на джиттер. Далее мы будем рассматривать вопросы контроля качества только в контексте измерения параметров ошибок, а именно измерения параметров битовых и блоковых ошибок с предоставлением отчетов в форме соответствия нормам Приказа №92.

Для проведения необходимых измерений в большинстве случаев нужны очень простые измерительные средства. Большая часть точек демаркации между

операторами, связанных с необходимыми измерениями – это точки аренды потоков Е1. Соответственно для проведения измерений вполне достаточно обычного анализатора ИКМ сигнала (рис. 4.17). В настоящее время отечественные производители выпускают анализаторы ИКМ стоимостью чуть больше тысячи долларов, так что для проведения технической политики в области контроля качества у операторов нет экономических ограничений.

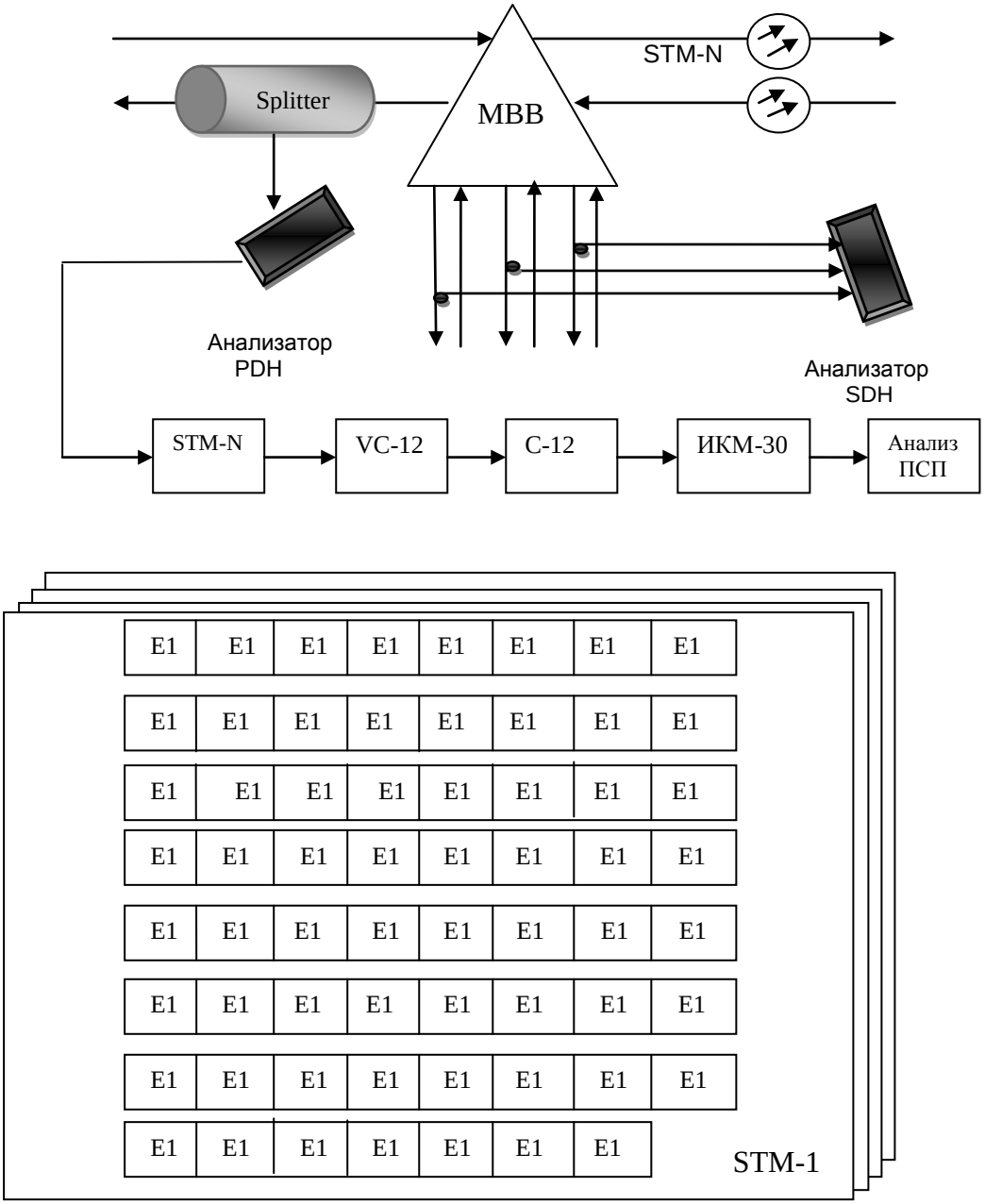


Рис. 4.17. Два способа измерения параметров ошибок: на выходе из МВВ с помощью анализатора ИКМ или внутри SDH с помощью анализатора SDH.

Анализаторы SDH могут использоваться для проведения измерений в качестве удобного устройства доступа к определенным VC-12. Анализатор SDH, подключенный в точку мониторинга, выделяет из транспортного модуля определенный виртуальный контейнер VC-12, выделяет его нагрузку C-12, “разбирает» его содержимое, выделяет ПСП и производит измерение в соответствии с Приказом №92. Удобство использования анализатора SDH в этом случае состоит только в том, что при одной точке подключения он обеспечивает быстрый доступ к любому потоку PDH нижнего или верхнего уровня.

Рассмотрим принципы проведения измерений с использованием анализаторов ИКМ и SDH. Использование анализаторов ИКМ – это наиболее простой способ проведения необходимых измерений. В отечественных анализаторах ИКМ функция контроля качества обычно обозначается как «Измерения G.821/G.826» или измерения параметров ошибок. В импортных анализаторах та же функция обычно обозначается как Performance (Производительность). Отображение результатов измерений соответствует стандарту, т. е. включает все параметры, установленные рек. G.821/G,826/M.2100. Наиболее распространенным отечественным анализатором является анализатор BERcut. В зависимости от того, используются ли при измерениях ПСП (рек. G.821) или принцип измерения блочных ошибок (рек. G.826), анализатор отображает основные параметры соответствующих рекомендаций: AS, UAS, ES, SES, DM, BBE и пр.

После проведения измерений оператор получает отчет по всем перечисленным параметрам. Кроме того, для удобства добавлены важные интегральные параметры количества кодовых ошибок (CODE), количества битовых ошибок (BIT) и соответствующие им отношения CODER и BER при измерениях по рек. G.821 и количества блоков с ошибками EB при измерениях по рек. G.826. С измерениями параметров качества эти величины не связаны и в отчетах по качеству не используются, но видеть их на экране оказывается удобным и практичным. Во многих простых анализаторах отчет по рек. M.2100 не отображается как отдельный отчет по той причине, что, если провести измерения по рек. G.826 в течение 15 мин., то отображенные результаты будут в точности совпадать с данными по рек. M.2100.

Значительную часть работы оператора при измерении качества составляют не сами измерения, а пересчет универсальных норм параметров качества в реальные нормы на измеряемый канал определенной длины. Именно по этой причине существенную часть Приказа №92 составляет описание метода пересчета параметров на основе линейной аппроксимации. Чтобы облегчить работу оператора в анализаторах иногда реализуется функция пересчета параметров по отношению к эталонной модели HRX. В этом случае в меню установки показано, что инженер может установить процент соответствия своего канала эталонной модели. Тогда анализатор автоматически пересчитывает параметры рек. G.821/G.826/M.2100 и отображает результаты измерений не

только в виде абсолютных значений, но и в виде простого соответствия нормам «Прошло/Не прошло». Такая функция значительно упрощает труд оператора, если измерения производятся на более или менее типовых трактах, для которых можно установить одно значение процента соответствия HRX.

Удобство использования простых анализаторов ИКМ для паспортизации качества цифровых систем передачи состоит в том, что это самый дешевый способ измерения параметров. Портативные анализаторы ИКМ очень распространены и используются инженерами связи повсеместно. Для эксплуатации современных систем связи анализатор ИКМ не менее важен, чем мультиметр в сумке техника. Их всегда можно привезти в любую точку сети и провести измерения.

Но при измерении качества с использованием анализаторов ИКМ есть один недостаток. Это малая канальность измерений. Обычно приборы этого класса являются 1 – 2 канальными, а система передачи SDH, используемая для передачи потоков E1, включает в себя до Nx63 потоков E1, где N – уровень иерархии. Т. е. для проведения измерений по контролю качества на системе передачи STM-64 требуется измерить более 4 тыс. потоков E1. По этой причине в последнее время становится все более популярным более экономный вариант контроля качества с использованием анализаторов SDH. При проведении необходимых измерений анализатор SDH выступает как многоканальный анализатор ИКМ, который в считанные секунды может обеспечить доступ к любому загруженному в SDH потоку и провести измерения. Существует две схемы использования анализатора SDH для организации измерений качества в цифровой системе передачи (рис. 4.18).

Как показано на рисунке, анализаторы SDH могут использоваться как для проведения измерений по рек. G.821 с использованием ПСП, так и для проведения измерений по блоковым ошибкам в соответствии с рек. G.826/M.2100. При измерениях по рек. G.821 анализатор SDH должен работать в паре с анализатором ИКМ, другим анализатором SDH или любым источником ПСП. Источник ПСП (на рис. – анализатор ИКМ) загружает ПСП в один из контейнеров системы передачи SDH, например, VC-12, который передается по системе. В мониторинговых точках анализатор SDH находит соответствующий поток и измеряет параметры битовых ошибок. В результате оператор получает отчет по рек. G.821. В соответствии с методикой, использование ПСП в данном случае обязательно, поэтому анализатор SDH работает в паре с генератором ПСП.

Измерения по рек. G.826 делаются на основе анализа блоковых ошибок. В этом случае не требуется генерации и анализа ПСП, и поэтому анализатор SDH может работать автономно, без пары. Анализатор обеспечивает выделение нагрузки, например, потока E1 из потока STM-N и производит все необходимые измерения по рек. G.826/M.2100.

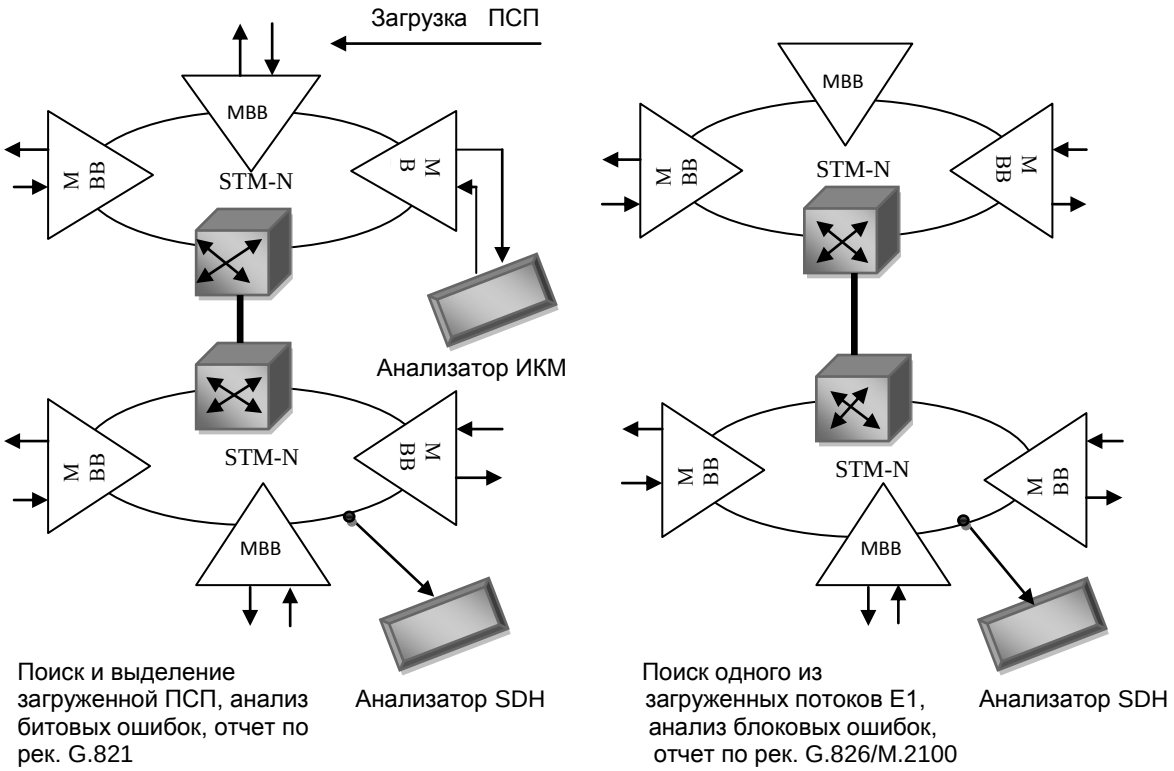


Рис. 4.18. Два варианта использования анализатора SDH для измерений на сети.

Поскольку методика рек. G.821 нормирует параметры качества канала до скоростей передачи до первого уровня иерархии PDH включительно, использование анализаторов SDH не вносит никаких изменений в методику. Анализатор SDH обеспечивает только поиск и обнаружение тестового потока в соответствии с заданной нумерацией и проведение измерений по тем же методикам, что и анализатор ИКМ. В меню установок, как и в случае с анализатором ИКМ, инженер задает уровень соответствия измеряемого потока эталонной модели цифрового канала (кнопка HRX%). Для обеспечения дополнительной гибкости пересчета в меню имеется еще один пороговый коэффициент (кнопка Threshold «Порог). Обычно это значение программируется на 1 , но оно может быть изменено, чтобы смягчить или ужесточить нормы на данный канал. Этот коэффициент используется, как правило, при проведении измерений по заданным SLA параметрам. Длительность измерений может задаваться перед началом измерений в ручном или автоматическом режиме. В результате анализатор дифференцировано подстраивает нормы рек. G.821 к нормам на заданный канал. Результаты измерений включают стандартные параметры качества ES, SES, US, DM, а также два параметра AE, BE, выходящих за пределы рекомендации. На экранном меню наглядно видна колонка, обеспечивающая интерпретацию измеренных величин “OK/BAD” («Прошло/Не прошло»).

Аналогично выглядят экранные меню установки параметров и результатов измерений по рек. G.826. Но поскольку эти измерения основаны на мониторинге блоковых ошибок, методика допускает определенное расширение. В этом случае в качестве тестовых блоков можно использовать дополнительные поля SDH (табл. 4.5).

Таблица 4.5. Варианты тестовых полей для мониторинга по рек. G.826.

Тип	Блок
RS	STM
MS	STM, исключая RSOH
HO POH	VC-3, VC-4
LO POH	VC-3, VC-12
FAS	слово FAS
CRC	сверхцикл CRC 2 Мбит/с

В потоке ИКМ-30 для этой цели обычно используется поле контрольной суммы CRC-4, реже – контроль ошибок в заголовке FAS. В системах передачи SDH можно добавить заголовки регенерационной и мультиплексной секции, а также заголовки нижнего и верхнего уровня. В меню установок параметров измерений устанавливаются пороги для каждого параметра. Данные об измеренных **параметрах** канала отображаются в виде численных значений и относительных величин, а также для каждого параметра имеется интерпретация значения в трех вариантах: OK/BAD/Deg («Прошло»/»Не прошло»/»Ухудшено»). Также, как и в случае с измерениями по рек. G.821, в перечень измеряемых параметров включены два дополнительных параметра ABE и BBE, назначение которых аналогично рассмотренным выше параметрам BE и AE.

Проведение измерений по рек. M.2100 учитывает тот факт, что для этой методики имеются два порога для параметров цифрового канала. Состояние «Прошло» и «Не прошло» имеет разные пороги. Поэтому для каждого параметра устанавливается два порога. Также как и в меню измерений по рек. G.821, установка параметров измерений по рек. M.2100 начинается с установки соответствия канала эталонной модели HRX (кнопка HRX%). Но установка коэффициента Threshold разделяется на два коэффициента. Кнопки OK Threshold (порог нормы) и Bad Threshold (порог неисправности) в верхнем правом углу используются для ввода коэффициентов, которые позволяют определить пороги техобслуживания (ISM) S1 и S2 по M.2100. В результате при проведении измерений каждый параметр интерпретируется в соответствии с тремя вариантами OK/BAD/Deg («Прошло»/»Не прошло»/»Ухудшено».

Также как и в случае с измерениями по рек. G.821 и G.826, в меню измеряемых параметров добавляются два новых параметра BE и AE, которые выходят за рамки рек. M.2100 и имеют несколько отличную от рек. G.821 интерпретацию. Отличие это связано с тем, что измерения могут проводится в разных полях. Общее же значение параметров соответствует рассмотренному выше для рек. G.821.

4.3.2. Переход к соглашению о качестве обслуживания SLA.

Развитие сетей передачи данных и переход сетей к новому поколению (NGN) существенно обострили проблему нормирования параметров качества. Технологии «пост АТМ» эры позволили операторам предоставлять очень широкий спектр различных услуг.

В это же время бурно развивались технологии передачи и коммутации, так что процесс нормирования их параметров начал отставать от высокого темпа прогресса. В результате нормирование параметров качества стало очень острой проблемой. Для решения ее появилась следующая методика: в случае необходимости доработать параметры качества под конкретную ситуацию или при отсутствии параметров качества между двумя сторонами готовится соглашение о качестве обслуживания (SLA – Service Level Agreement), которое определяет нормы качества для каждой конкретной точки (обычно это точка демаркации).

Появление SLA значительно изменило отношение операторов к проблеме контроля качества. Так в новой редакции рек. МСЭ-Т Е-800 обозначено, что «Качество услуг – это степень соответствия услуг, предоставляемых пользователю, договору между поставщиком и пользователем». Тем самым SLA становится универсальной мерой качества услуг. SLA изменяет саму философию контроля качества. Если раньше параметры точек демаркации нормировались в соответствии только с национальными стандартами, и операторы должны были ждать появления новых стандартов на те или иные технологии, то теперь SLA представляет собой продукт договоренности между сторонами, что является более гибким и дифференцированным решением проблемы нормирования качества.

Разницу между применением национальных стандартов и SLA можно проиллюстрировать на довольно простом примере. Представим себе, что «АБВ банк» хочет подключиться к услуге одной из банковских систем платежей, для чего обращается к местному оператору первичной сети с просьбой предоставить ему в аренду канал Е1. Но при этом он требует высочайшей надежности канала в 0,9999. В то же время стандарт Приказа №92 предусматривает надежность канала (отношение времени готовности к общему времени использования) в 0,998, что хуже на порядок. Оператор указывает на нормы национального стандарта и утверждает, что его каналы соответствуют национальному стандарту, и, следовательно, он не может гарантировать надежность лучше, чем 0,998. Но «АБВ банк» готов даже переплатить за качество, только надежность должна быть

требуемой, а иначе он уйдет к альтернативному оператору, который обещает такую надежность. В результате перед оператором городской первичной сети стоит выбор, соответствовать закону или потерять заказ или согласиться на специальные условия, оговоренные в договоре. Так возникает SLA, параметры которого жестче, чем параметры национального стандарта. И SLA оказывается более общим принципом нормирования параметров каналов, чем национальный стандарт.

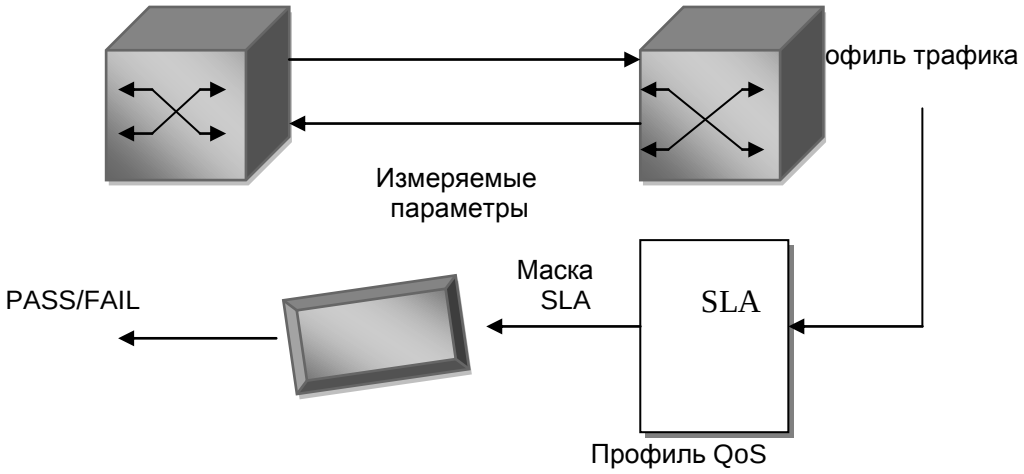


Рис. 4.19. Процедура необходимых измерений на сети при SLA.

С точки зрения необходимых измерений в первичной сети переход к SLA существенно изменяет саму процедуру измерений (рис. 3.19). Теперь при проведении необходимых измерений следует руководствоваться тремя группами исходных данных:

1. Профиль трафика (в случае первичной сети это тип измеряемого канала по классификации оператора).

2. Профиль качества (QoS), задаваемый в соответствии с конкретным SLA для данного канала.

3. Измеренные параметры качества.

Поскольку SLA может содержать помимо стандартных параметров качества ряд дополнительных (например, для потока ИКМ – девиацию частоты передаваемого сигнала), то измерение параметров уже привязывается к SLA по номенклатуре измеряемых параметров. Само соглашение SLA устанавливает допустимые значения этих параметров, тем самым формируя маску SLA. Маска SLA накладывается на данные, измеренные прибором, после чего в качестве результата измерений выдается однобитовый ответ соответствия или несоответствия канала заданному SLA.

Отличие процедуры рис. 4.19 от методов измерения параметров систем SDH в соответствии с требованиями национального стандарта состоит в следующем:

1. Параметры измерения качества не фиксированы, некоторые параметры могут быть добавлены, другие – удалены из спецификации измерений.
2. Время проведения измерений и допустимые величины также могут изменяться от канала к каналу, подстраиваясь под определенное SLA.

В то же время, как и в классической методике в результате делается вывод о соответствии или несоответствии канала заданному профилю качества, т. е. на выходе измерений инженер получает данные типа PASS/FAIL («Прошло»/»Не прошло»).

4.3.3. Сетевые средства контроля качества и роль измерений QoS в современных системах эксплуатации и OSS.

Рассматривая проблемы контроля качества, тесно связанные с проведением необходимых измерений, следует обратить внимание на проблему построения современной системы эксплуатации. Организация технической эксплуатации сетей связи отечественных операторов должна осуществляться с использованием основных принципов, изложенных в рек. МСЭ-Т М.10, М.20, М.21, М.60, М.70, М.495, руководящих документах отрасли по технической эксплуатации различных видов оборудования связи, а также требований к системе эксплуатационной поддержки оборудования электросвязи, определяемых Приказом Минсвязи РФ и МАП РФ №№2, 23 2001 г. В соответствии со всеми перечисленными документами существует разделение автоматизированной системы эксплуатации (АСОТЭ) на две основных подсистемы: подсистему автоматизированного управления (АСОТУ) и подсистему автоматизированного обслуживания (АСОТО).

Основными функциональными подсистемами АСОТО являются:

- подсистема поддержания и восстановления работоспособности;

- информационно-измерительная подсистема;

- подсистема обеспечения эксплуатационными запасами.

Концепция построения подсистемы управления (АСОТУ) в последнее время значительно эволюционировала как в области стандартов, так и в области непосредственных программно-аппаратных средств реализации. В настоящее время происходит переход от стратегии построения систем управления (TMN) к стратегии управления процессами в системе связи (OSS). Наиболее востребованными для отечественных операторов являются следующие подсистемы OSS:

- подсистема управления неисправностями (Fault Management), соответствующая подсистеме управления сетевыми элементами.

- подсистема автоматического конфигурирования цифрового оборудования (Provisioning Management), обеспечивающая реконфигурацию сети в зависимости от процессов, в ней происходящих.

- подсистема управления услугами (Service Management) – система, обеспечивающая добавление или отключение услуг для различных категорий абонентов;

- подсистема технического учета ресурсов (Inventory Management) – система, обеспечивающая автоматический учет линейно-кабельного хозяйства, материальных ценностей и ресурсов сети.

- подсистема контроля и управления параметрами качества (SLA Management).

- подсистема контроля за выполнением задач по устранению неисправностей (Trouble Ticketing).

- подсистема управления нарядами на активацию услуг (Order Management).

- подсистемы поиска несанкционированного доступа (Fraud Management).

- подсистема управления безопасностью (Security Management).

- подсистема учета использования ресурсов (Accounting Management).

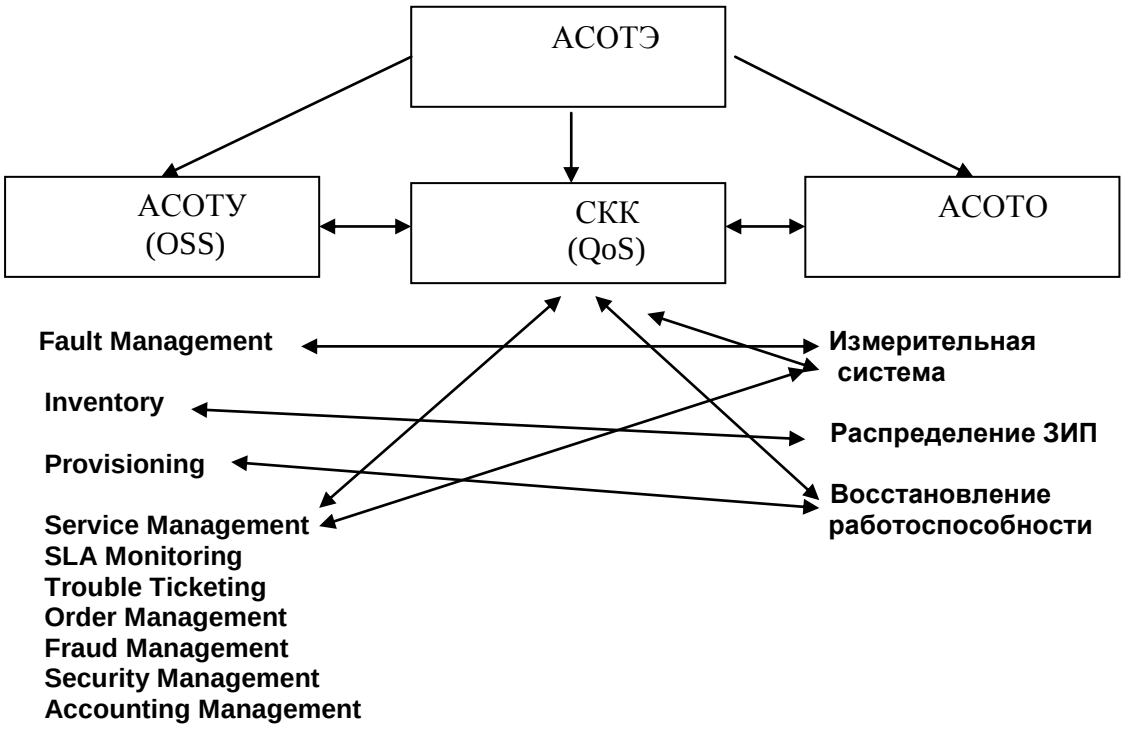


Рис. 4.20. Структура современной системы эксплуатации (АСОТЭ) и подсистемы, входящие в нее.

Развитие современных принципов построения систем связи выдвигает на первый план вопрос контроля качества услуг в сети связи. Вообще система контроля качества (СКК или QoS) является третьей подсистемой АСОТЭ, основанной на различных принципах построения политики контроля качества оператора. Как показано на рис. 4.20 все указанные подсистемы и их компоненты тесно взаимосвязаны друг с другом.

Например, поиск неисправностей требует использования подсистем управления Fault и измерительных приборов. Контроль качества услуг может осуществляться и с помощью системы управления Fault и Service, и с использованием информационно-измерительной компоненты АСОТО, и на основе политики в области качества СКК. Можно найти и другие связи подсистем в рамках интегрированной системы эксплуатации.

Необходимые измерения составляют самый важный компонент всех перечисленных подсистем.

Во-первых, поскольку необходимые измерения основаны на измерительных приборах или измерительных системах, они являются неотъемлемой частью измерительной подсистемы АСОТО.

Во-вторых, необходимые измерения тесно связаны с проблемой контроля качества, следовательно, они являются одним из инструментов в проведении оператором политики в области качества и являются составной частью подсистемы QoS.

В-третьих, необходимые измерения должны входить в состав подсистемы Fault Management поскольку в целом подсистема Fault Management опирается на встроенные системы диагностики, объединенные в единую систему управления OSS.

В-четвертых, в подсистеме SLA Monitoring в случае первичной сети необходимые измерения – это единственно возможный вариант проведения контроля качества, т. к. встроенные средства диагностики обычно фиксируют неисправности, но не измеряют блоковые ошибки.

4.4. Эксплуатационные измерения в системах SDH.

Эксплуатационные (дополнительные) измерения ориентированы на внутренние точки демаркации в системе передачи. Они не связаны с проблемой качества и поэтому вполне естественно являются дополнительными. Это те измерения, которые выполняет оператор внутри своей сети, чтобы гарантировать ее работоспособность и соответствие нормам качества на выходе. Ни один карательный орган, ни один стандарт или другой законодательный акт не имеют права вмешиваться в принципы построения сети оператора или внутренние проблемы его сети. Если оператор придерживается мнения, что для работы его сети никаких эксплуатационных измерений выполнять не нужно – это его право. Ответственность оператор несет только во вне сети, внутренние же проблемы должны быть скрыты коммерческой и технологической тайной и собственной технической политикой.

Сложная взаимосвязь эксплуатационных процессов внутри сети с параметрами качества сигналов на выходе дополняется тем, что любые процессы внутри системы передачи связаны друг с другом, и одновременно каждый из них может влиять на параметры качества. В результате один процесс может «запустить» другой процесс, третий и т. д., и каждый из появившихся процессов будет влиять на параметры потоков на выходе.

Указанная сложность еще дополняется тем, что эксплуатационный процесс может охватывать различные параметры работы системы SDH и включать в себя сигнальный обмен на различных уровнях построения технологии, достаточно вспомнить принцип каскадной генерации сообщений о неисправностях.

Таким образом, эксплуатационные измерения внутри системы SDH не могут быть однозначно привязаны к необходимым измерениям. Как следствие, они не могут быть формализованы в рамках каких-либо фиксированных методик или рекомендаций. Можно говорить только о вариантах проведения тех или иных измерений, подходах или частных методиках, которые могут использоваться или отвергаться оператором в зависимости от его точки зрения. Поэтому описание эксплуатационных измерений объективно носит рекомендательный и дискуссионный характер. В этом заключается методическая сложность описания - его нельзя отнести к перечислению отдельных подходов или методик.

Переход от перечисления к всестороннему анализу эксплуатационных процессов представляет собой попытку преодолеть методическую сложность описания эксплуатационных измерений. Единственной проблемой такого подхода может быть ограниченное понимание эксплуатационных процессов в современных системах SDH. Но само наличие вектора исследования системы как совокупности процессов позволяет эффективно дополнять анализ, включая в него новые процессы. Наиболее существенными для работы системы SDH эксплуатационными процессами, влияющими на работу всей сети, являются:

1. Процесс маршрутизации каналов.
2. Процесс возникновения ошибок и неисправностей.
3. Процесс нарушения в работе системы синхронизации.
4. Процесс резервного переключения.
5. Процесс организации и использования протокола взаимного соединения.

Здесь нас должны интересовать не все эксплуатационные процессы в системе передачи, а только деструктивные процессы, которые в конечном итоге могут негативно влиять на параметры качества на выходе из системы. Кроме того, нас должны интересовать только внутренние демаркационные точки сети SDH, а обычно они находятся на уровне потоков STM.

4.4.1. Процесс маршрутизации потоков.

Исследование эксплуатационного процесса маршрутизации потоков по сети SDH представляет собой самый важный вопрос эксплуатации, вопрос, определяющий вообще функционирование системы SDH как системы передачи. Важность проблемы маршрутизации потоков подчеркивается еще и тем, что в эксплуатационном процессе маршрутизации участвуют практически все механизмы работы SDH (рис.4.21).

Можно почти приравнять контроль системы SDH и контроль процессов маршрутизации потоков, если не учитывать понятие внутренних демаркационных точек. Эти точки возникают только при условии транзитной маршрутизации потока через несколько систем передачи разных производителей. Такая ситуация называется составным маршрутом (рис. 4.22).

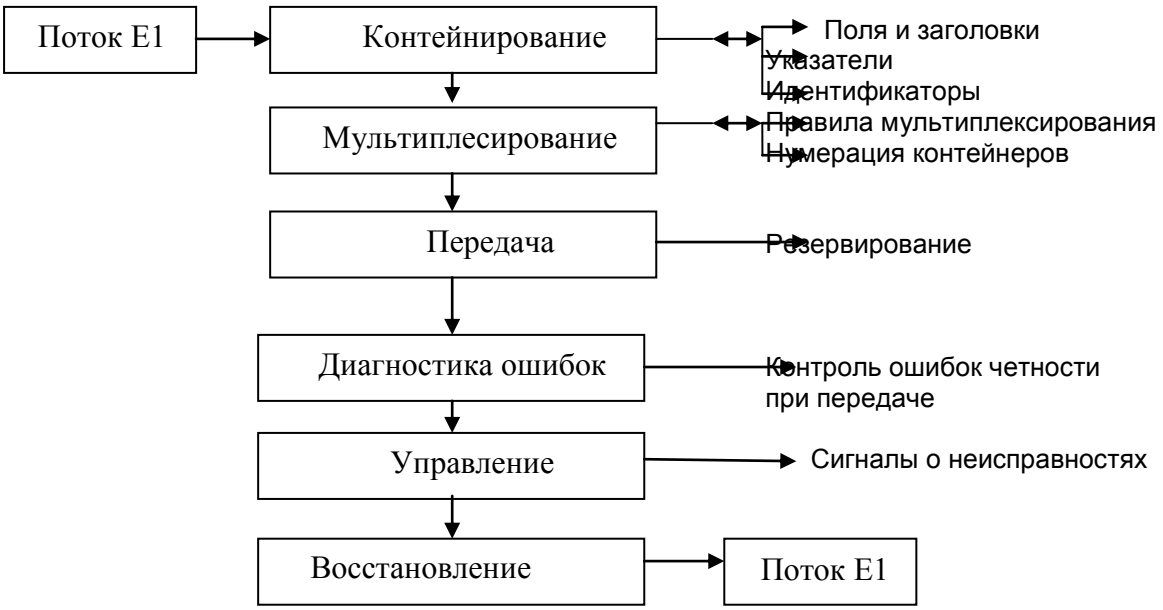


Рис. 4.21. Эксплуатационный процесс маршрутизации потоков и используемые в нем механизмы SDH.

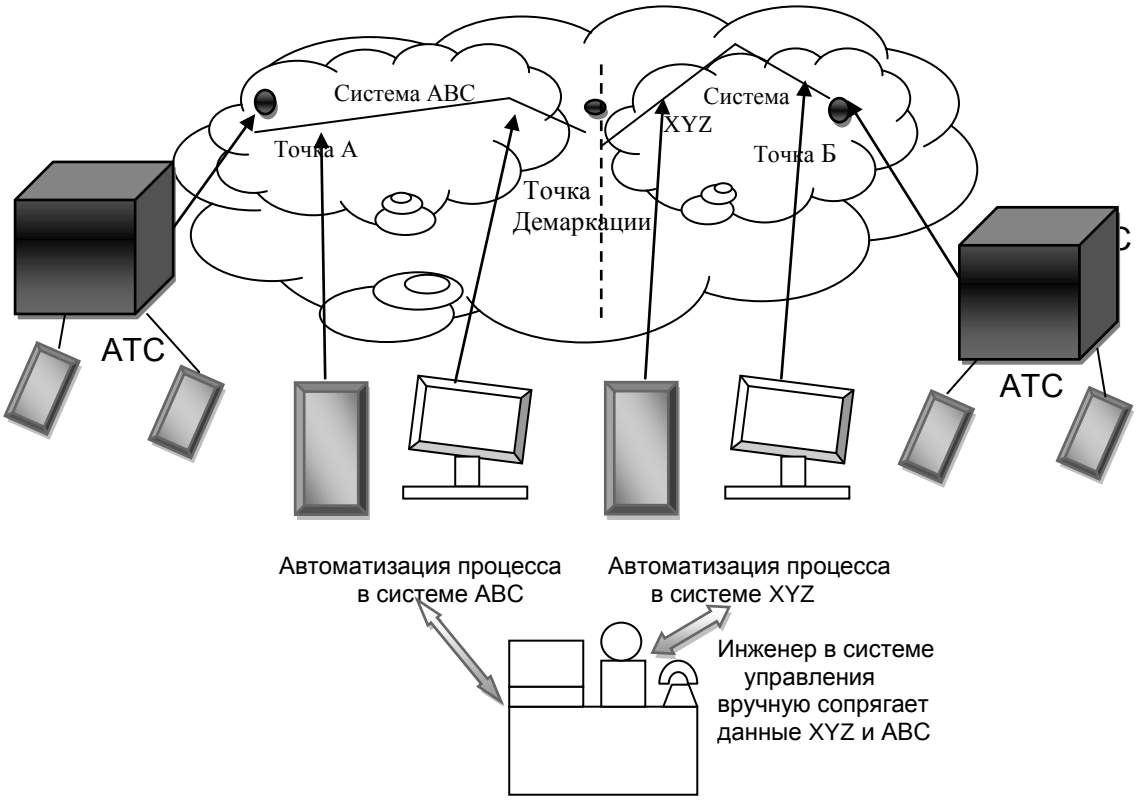


Рис. 4.22. Формирование составного маршрута и возникновение проблемы.

В самом общем виде оператор должен «прописать» передачу потока E1 от точки А до точки Б на сети. Оказывается, что маршрут проходит через две зоны, находящиеся под управлением систем ABC и XYZ разных фирм-производителей

оборудования SDH. Поскольку технология SDH не является технологией “Plug&Play” , то процесс формирования составного маршрута не может быть автоматизирован. Автоматизация процесса будет проведена только в рамках работы отдельных систем управления. Здесь оператору достаточно задать точку начала и конца маршрута в пределах своей системы, и система управления сделает всю рутинную работу за него, так что ошибка в формировании маршрута невозможна. Но наш маршрут составной, он включает в себя две подсистемы SDH и две совершенно разных системы управления, пуст даже с аналогичной функциональностью. А «сращивание» маршрута в точке демаркации должен выполнять оператор вручную, устанавливая соответствие между различными полями заголовков контейнеров в одной и другой системе.

Предположим, что составной маршрут не «составляется» и контейнер из одной системы передачи не «проходит» в другую. В то же время системы ABC и XYZ подтверждают готовность частей маршрута, но общий маршрут не возникает. Тогда после проверки оператором правильности своих действий следует начать измерения в точке демаркации, сопоставляя данные в точке демаркации с данными из центра управления. Ведь если оператор допустил по невнимательности возникновение «не стыковки», то эта же невнимательность может быть препятствием к поиску причины допущенной неисправности. Теперь становится понятной роль измерительного прибора в точке демаркации: информация от него может помочь оператору и повысить оперативность устранения неисправности.

Прибор должен быть подключен к системе передачи через мониторинговые точки или разветвители и выполнять измерения в режиме мониторинга потока STM-N. Такое подключение не приведет к отключению всего магистрального канала для проведения измерений, и все остальные маршруты не пострадают. Анализатор SDH должен быть подключен в режиме мониторинга и фиксировать все неисправности в системе передачи. Алгоритм поиска неисправности в точке демаркации должен выглядеть следующим образом (рис. 4.23).

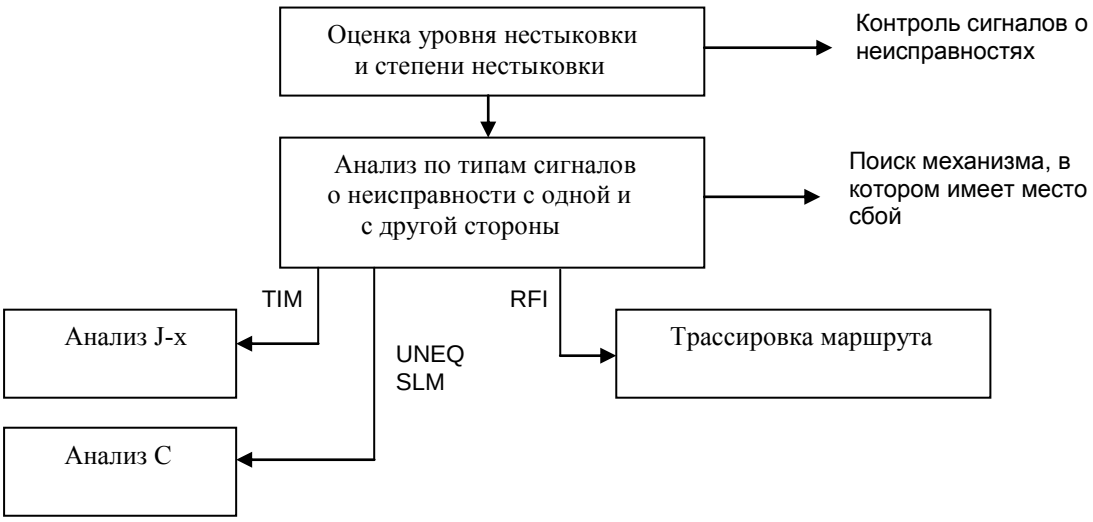


Рис. 4.23. Алгоритм поиска неисправности при нарушениях в составном маршруте.

4.4.2. Процесс возникновения ошибок и неисправностей. Трассировка системы SDH.

Рассмотренный выше деструктивный эксплуатационный процесс имеет радикальный характер. В случае ошибки в полях заголовков составной маршрут совсем нельзя создать. Помимо этого в системе связи часто возникают мягкие деструктивные процессы, когда система работает штатно, но в ней имеются ошибки или сигналы о неисправностях минорного значения. Тогда возникает задача определения первопричины возникшей ошибки, чтобы тем эффективнее ее устранить и обеспечит лучшие параметры качества работы системы передачи в целом.

В системах SDH для обеспечения полноты функциональности системы управления используется механизм каскадной генерации сигналов о неисправности и ошибок различного уровня. Кроме того, сами ошибки различаются по своему типу – есть механизм контроля ошибок четности разного уровня, отдельные подсистемы контроля ошибок при передаче идентификаторов, ошибки внутри заголовков разного уровня и пр. Все это в комплексе, во-первых, значительно увеличивает количество измеряемых параметров и, во-вторых, выдвигает на первый план задачу поиска первопричины, которая порождает генерацию целого каскада ошибок и неисправностей.

Например, для анализа ошибок используются следующие параметры (табл. 4.6):

Таблица 4.6. параметры ошибок в системе передачи SDH.

№	Параметр	Расшифровка
Ошибки в системе передачи		
1	ECOD	Ошибки в кодировании линейного сигнала
2	EFAS	Ошибки в цикловой структуре
3	B1	Ошибки в байте B1
4	B2	Ошибки в байте B2
5	HP B3	Ошибки в байте B3 на уровне маршрута верхнего уровня
6	LP B3	Ошибки в байте B3 на уровне маршрута нижнего уровня
7	BIP-2	Ошибки четности по BIP-2 в заголовке V5
8	BER	Битовые ошибки

Связанные с ошибками сигналы о неисправностях		
9	OOF	Нарушение цикловой синхронизации
10	MS REI	Обнаружение ошибки в заголовке мультиплексной секции
11	HP REI	Обнаружение ошибки в заголовке маршрута верхнего уровня
12	LP REI	Обнаружение ошибки в заголовке маршрута нижнего уровня
13	SLIP	Обнаружение проскальзывания в канале цифровой передачи
Итого 13 параметров		

Таким образом, только для простого подсчета ошибок используются 8 параметров ошибок. Если добавить сюда еще более 30 параметров различных сигналов о неисправностях, то задача поиска первопричины какой-либо неисправности покажется довольно сложной.

Наиболее эффективным современным методом поиска и исследования процессов возникновения ошибок в условиях высокой размерности описания является метод поиска и анализа корреляций (зависимостей). Корреляции используются в технике для определения взаимосвязи между различными параметрами системы. Они позволяют исключить из рассмотрения связанные (коррелированные) параметры и тем самым уменьшить объем анализируемых данных. Кроме того, поиск связей между различными параметрами позволяет исследовать тот или иной процесс и найти его первопричину.

Без анализа корреляций высокая размерность описания параметров не позволит обнаружить причину возникновения тех или иных явлений, нужные данные просто «утонут» в общем объеме информации. По этой причине метод поиска и анализа корреляций становится очень популярным в технике, что обусловлено высоким ростом размерности описания телекоммуникационных систем. На методе поиска и анализа корреляций основаны принципы оптимизации работы современных систем управления OSS и принципы работы территориально-распределенных измерительных комплексов (ТРИК).

Конечно, проведение корреляционного анализа в математическом смысле при эксплуатационных измерениях исключено, т. к. не каждый современный инженер искушен в методах математической статистики. Но вместо этого можно эффективно использовать возможности графического описания, которые дает метод гистограмм-хронограммного анализа (ГХА), который можно выполнить на современных анализаторах SDH. На анализаторе, например, Victoria три параллельных окна отображения: одно окно хронограммы и два окна свозможностью переключения режимов хронограммы или гистограммы. Таким образом, анализатор может работать в трех режимах: одна хронограмма и две гистограммы, две хронограммы и одна гистограмма и три хронограммы.

Высокая эффективность метода ГХА для поиска причин минорных неисправностей в системе передачи привела к появлению понятия трассировки

системы передачи. И в мировой практике, и у нас среди наиболее квалифицированных специалистов ГХА стал одним из самых важных инструментов анализа системы передачи SDH. Сочетая в себе отображение всех параметров ошибок и сигналов о неисправностях, дифференциальное отображение данных и отображение истории процессов, ГХА действительно оказывается одним из совершенных инструментов в современных методах измерений. Поэтому в подражание методам анализа протоколов в системах коммутации, гистограмм-хронограмму процессов в системе передачи стали называть трассой, поскольку она полной мере отражает эволюцию системы передачи со временем.

Трассировка систем передачи с использованием ГХА выявила очень интересную проблему эффективности использования трассы. Как в анализе протоколов для оптимизации размера трассы используется фильтрация, в ходе которой ненужные сообщения удаляются из рассмотрения, функция фильтрации применяется и для трасс SDH. Эквивалентом фильтрации в трассах SDH является настройка прибора под спецификации тех сигналов о неисправностях, которые могут встретиться в данной сети. Для удобства настройки все сигналы о неисправностях разбиваются на группы, причем, сигналы о неисправностях PDH разбиваются по уровню потока, с которым они связаны, а сигналы SDH разделяются по уровням, на которых они возникают. В результате получается 16 групп сигналов о неисправностях в системе SDH (табл. 4.7).

Таблица 4.7. Основные группы сигналов о неисправностях.

Класс сигналов	**Группы**
Сигналы о неисправности в PDH (в нагрузке)	Группа передачи потока E1 (2 Мбит/с) Группа передачи потока E2 (8 Мбит/с) Группа передачи потока E3 (34 Мбит/с) Группа передачи потока E4 (140 Мбит/с)
Сигналы о неисправности SDH	Сигналы физического уровня (LOS,LOF и т.д.) Сигналы RSOH Сигналы MSOH Сигналы AU/HP Сигналы TU/LP Сигналы группы G.832 Сигналы группы G.804
Сигналы, связанные с тестированием сети PDH/SDH	Сигналы, связанные с передачей/приемом ПСП Сигналы, связанные с проскальзыванием
Сигналы, связанные с ATM	Сигналы, связанные с нагрузкой ATM Сигналы, связанные с передачей ATM в прямом направлении Сигналы, связанные с передачей ATM в обратном направлении

Фильтрация сигналов о неисправности на трассе реализована практически во всех анализаторах SDH, поддерживающих режим измерений в соответствии с ГХА. Фильтрация трассы может дать много полезного при анализе того или иного процесса. Устраняя лишние сигналы, оператор уменьшает перегруженность экрана прибора. Например, если нас интересует процесс возникновения ошибок на уровне маршрута верхнего уровня, то целесообразно на трассе оставить сообщения только физического уровня, уровня мультиплексной и регенерационной секции и уровня маршрута верхнего уровня. Все остальные сигналы никак не могут повлиять на уровень маршрута HP. В результате из 16 групп сигналов о неисправности на трассе останутся только 4, и соответствующие данные хронограммы могут уместиться на одном экране прибора. Тогда поиск корреляции значительно упростится.

4.4.3. Процесс нарушения в работе системы синхронизации.

Поскольку система SDH является синхронной системой передачи, нарушения в системе синхронизации негативно отражаются на работе всей системы. При возникновении по тем или иным причинам нарушения в системе синхронизации SDH внутри системы передачи включается механизм компенсации рассинхронизации за счет активности указателей. Активность указателей ведет к появлению джиттера на выходе системы передачи. В свою очередь джиттер на выходе из системы передачи (на уровне потоков E1) воздействует на цепи ФАПЧ приемников ИКМ, так что в результате могут возникать проскальзывания или пакетный BER в каналах.

Таким образом, весь алгоритмический процесс, связанный с нарушениями в системе синхронизации разделяется на 4 стадии (рис. 4.24):

1. Непосредственно сама рассинхронизация, т. е. нарушения в частоте передаваемого и принимаемого цифрового сигнала.
2. Активность указателей как компенсаторный механизм внутри SDH.
3. Появление джиттера на выходе из сети как следствие активности указателей.
4. Появление проскальзываний и BER в цифровых каналах PDH (например, E1) из-за возникшего джиттера.

На каждой из перечисленных стадий существуют свои методы и свои параметры измерений:

1. Рассинхронизация – это несовпадение частот передачи и приема цифрового сигнала. Следовательно, на верхнем уровне контроля процесса

1. нас интересуют относительные изменения частоты двух сигналов – передачи и приема. Основным параметром измерения выступает частота цифрового сигнала. Группа соответствующих измерений связана с отдельной задачей - аудитом систем синхронизации (TCC), и для ее решения используются специализированные приборы и методики.

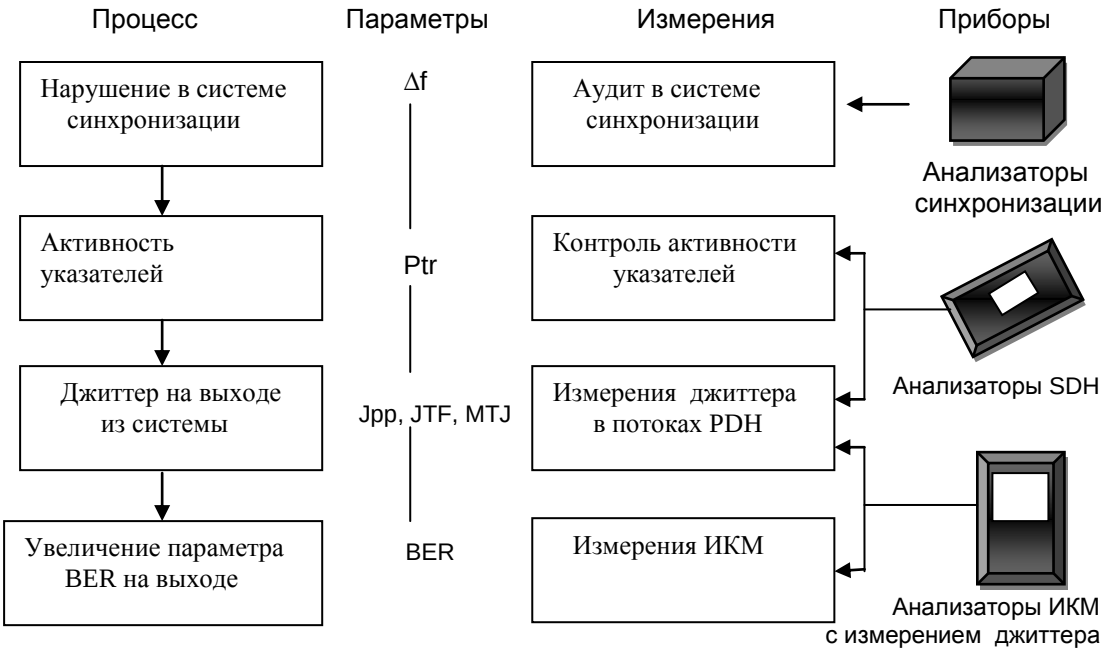


Рис. 4.24. Эксплуатационный процесс нарушения работы системы синхронизации и соответствующие уровни контроля этого процесса.

2. Активность указателей связана с контролем полей и процессов в заголовках системы SDH, который выполняется в ходе обычных эксплуатационных измерений с использованием анализаторов SDH.

3. Контроль джиттера на выходе из системы передачи выполняется специализированными анализаторами ИКМ или комбинированными анализаторами PDH/SDH. Такие измерения относятся к классу эксплуатационных и проводятся в ходе работы служб эксплуатации.

4. Контроль BER в загруженных и выгруженных из системы SDH потоках E1 выполняется простейшими анализаторами ИКМ в ходе эксплуатационных или необходимых измерений в системах передачи.

Все перечисленные группы мало соотносятся друг с другом и пересекаются только на третьей стадии при измерении джиттера на выходе из системы. Но все четыре группы измерений выполняют в системе эксплуатации одну и ту же функцию – они обеспечивают идентификацию процесса нарушения в системе синхронизации.

Оценки различных методов можно свести в одну таблицу (табл.4.8). Даже самый беглый взгляд на табл. 3.8 показывает, что для практики эксплуатации систем SDH наибольшую ценность имеют две категории измерений: контроль активности указателей (2 группа измерений) и системный анализ BER (4 группа). Они имеют явную практическую ценность, поскольку благодаря им делается самое важное – мы находим точку возникновения рассинхронизации. Причем в отличие от 1 группы измерений проблемная область находится оперативно, в течение нескольких минут – часа на одно измерение. Несомненным преимуществом является и стоимость соответствующих решений.

Таблица 4.8. Сравнение различных методов контроля процесса рассинхронизации в системе SDH.

Параметр	**Аудит синхронизации**	**Контроль активности указателей**	**Анализ джиттера**	**Анализ** проскальзы-**ваний и BER**
Обнаружение факта рас-синхронизации	+	+	+	+
Идентификация точки рассин-хронизации	+	+	-	+
Измерение уровня рассин-хронизации	+	-	-	-
Точность измерений	Высокая	Низкая	Низкая	Низкая
Стоимость измерений	Высокая	Средняя	Средняя	Низкая
Длительность измерений	1 час – 72 суток на измерение	От 1 мин. до не-скольких часов	От 1 мин. до не-скольких часов	От 1 мин. до не-скольких часов
Приборная база	Специализи-рованный ана-лизатор ТСС	Обычный ана-лизатор SDH или анализатор ИКМ с функ-цией измерения джиттера	Анализатор SDH	Сетевой анализатор ИКМ

По сравнению с этими практическими измерениями аудит в системе синхронизации является дорогим и медленным способом поиска нарушений. Если в системе существует несколько ошибок в установках на оборудовании, то методами групп 2 и 4 можно в течение 1 – 2 часов найти первую точку нарушения. Затем после анализа ситуации операторы устраняют ошибку и еще раз проверяют состояние сети, чтобы идентифицировать эффект от операции, посмотреть, нет

ли вреда в процессе манипуляции с оборудованием и пр. В результате обнаруживается еще одна рассинхронизации, и все это – в течение одного

рабочего дня. В случае проведения аудита синхронизации на каждое измерение необходимо отводить минимум несколько часов, а общее решение проблемы затянется на месяцы.

Измерения группы 3 также не очень много дают для анализа процессов рассинхронизации. Самое важное для устранения проблемы – поиск точки рассинхронизации – в случае методики измерения джиттера в большинстве случаев невозможен. А значит, эта методика имеет малую ценность для службы эксплуатации, которая должна найти точку возникновения проблемы, но и как можно быстрее ее устранить, чтобы не нарушились параметры качества на выходе из сети.

Таким образом, наилучшими инженерными решениями по контролю систем синхронизации в процессе эксплуатации SDH являются анализ указателей или проведение системных измерений на выходе из системы передачи. Такие измерения не требуют специализированных измерительных средств, дешевы и эффективны в использовании.

5. ПРЕДПОСЫЛКИ К ПОЯВЛЕНИЮ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ - NG-SDH.

Мировые телекоммуникации пережили уже несколько научно-технических революций. Первая революция имела чисто технологическое значение и была связана с переходом от аналоговых принципов передачи и коммутации к цифровым. Эта революция, начавшаяся во всем мире в 60-х годах прошлого века, уже к 90-м привела к появлению совершенно новых технологий. Ее особенность заключается в том, что до самого последнего момента она не охватывала всего общества и проходила в рамках только отрасли телекоммуникаций.

Вторая революция в телекоммуникациях была обусловлена появлением систем сотовой связи. От первой революции ее отличило то, что она охватила всю человеческую цивилизацию. Идея того, что в любом месте в любое время два человека могут связаться друг с другом, оказалась настолько привлекательной, что сотовая связь стала одной из нематериальных ценностей общества. Такая глубокая поддержка населения не могла не привести к бурному течению новой революции. Ее результатом явилось то, что в настоящее время процент «сотовизации» сетей связи многих европейских стран значительно превосходит покрытие услугами проводной «классической» связи.

Третья революция, которая уже началась и постепенно набирает ход – это переход к глобальному информационному обществу (ГИО). Эта революция в корне отличается от двух предыдущих тем, что она не только охватывает все общество, но и изменяет основы его устройства, меняя вообще ориентиры, ценности и пр. Так, например, информационные ресурсы в процессе перехода к ГИО становятся стратегическими наравне с запасами руды, нефти и газа. Сфера коммуникаций оказывается едва ли не основной для развития бизнеса, экономические модели и модели производства все более виртуализируются и т. д.

Одним из направлений внедрения новых виртуальных технологий в жизнь является обеспечение максимально широкого доступа населения к информационным ресурсам общества и всей мировой цивилизации. Отсюда возникает необходимость модернизировать все современные системы связи: от магистральных сетей до конечного терминала. В мировой и отечественной практике новая революция получила название сетей нового поколения (Next Generation Network) или NGN.

5.1. Новые требования к системам передачи SDH.

5.1.1. Рост уровня пакетного трафика.

Революция NGN основана на изменении приоритетов от голосового трафика и коммутации каналов в пользу трафика данных и коммутации пакетов. Действительно, доля трафика передачи данных в настоящее время динамично растет и постепенно становится доминирующей в современных системах связи (рис. 5.1).

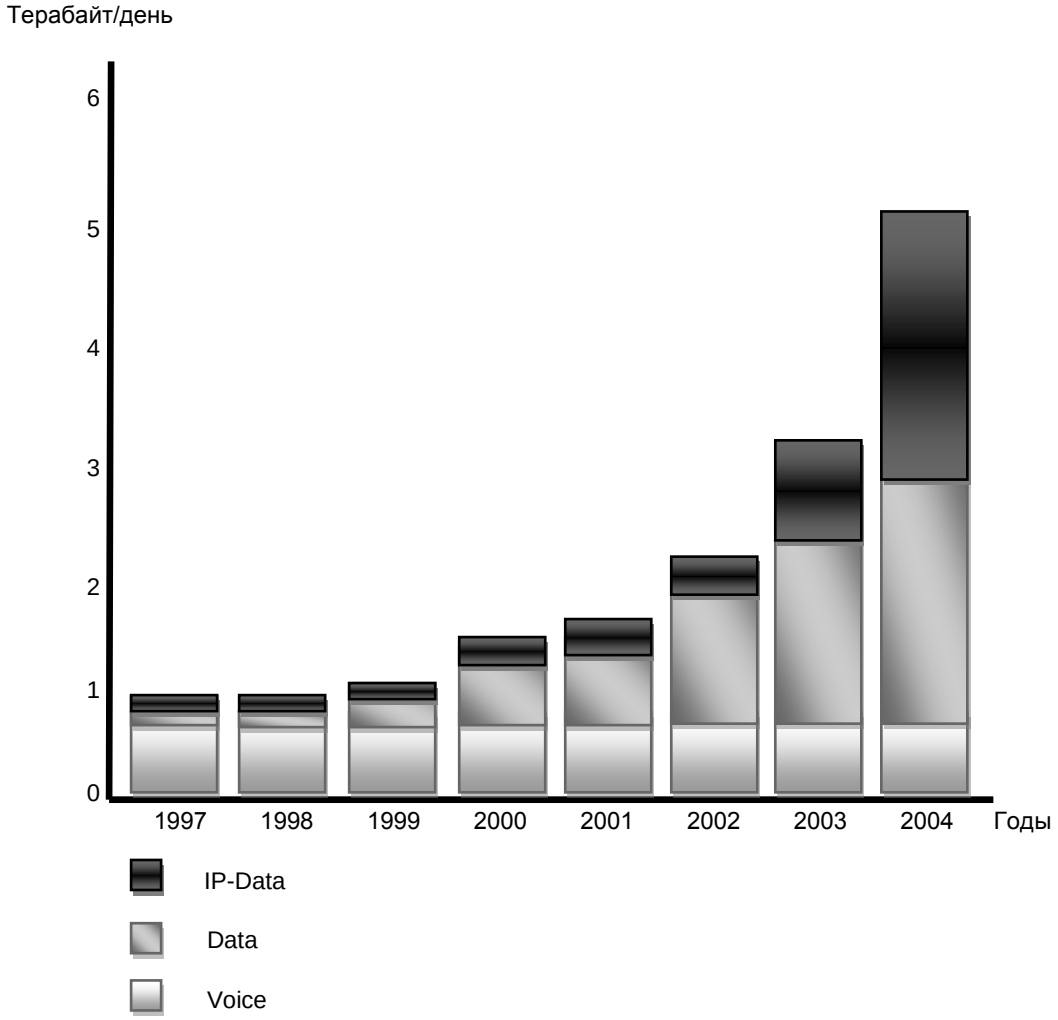


Рис. 5.1. Одна из качественных оценок развития трех групп трафика на сетях.

Как показывают качественные и количественные оценки, динамика развития голосового трафика в общемировом масштабе в среднем стабильна, так что уровень голосового трафика практически не меняется. В противоположность ему, доля трафика данных, и в особенности доля трафика IP растет экспоненциально, и трафик данных начинает превалировать на сетях Европы уже с 2003 – 2004 г.г. , а с 2004 г. доля трафика IP превышает долю голосового трафика.

Вследствие этого революция NGN вполне оправдана идеологически, а к системам SDH нового поколения выдвигается новое требование: технология NGSDH должна поддерживать передачу пакетного трафика, причем быть максимально адаптированной ко всем уровням передачи пакетного трафика, и в первую очередь, трафика IP.

5.1.2. Появление разнородных типов трафика и принцип конвергенции.

Вторая особенность сетей NGN, по крайней мере, на современном этапе развития технологии, - это еще и большое разнообразие протоколов, профилей трафика, подходов и пр. Можно сказать, что разнообразие технических решений, порожденных началом новой революции, останется актуальным как минимум на ближайшее десятилетие.

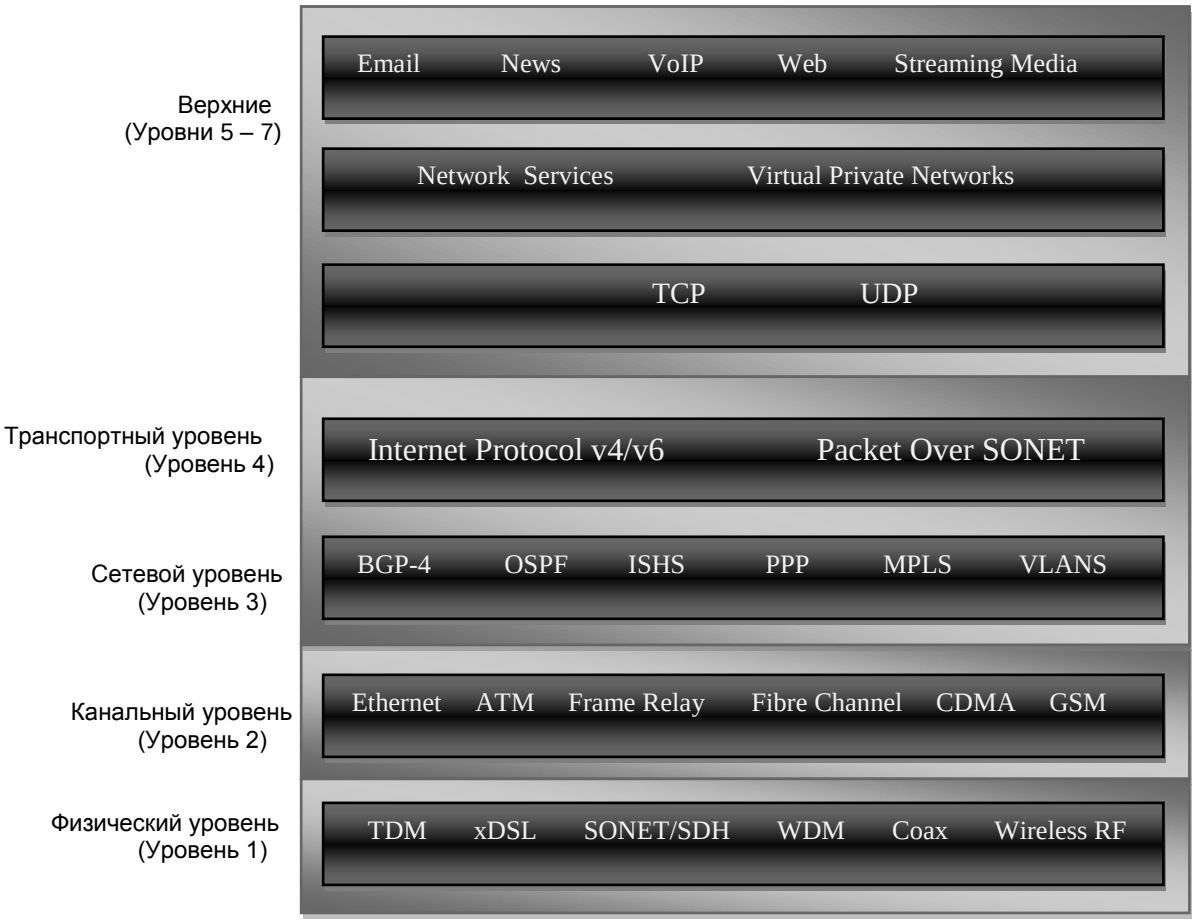


Рис. 5.2. Разнородные технологии NGN.

Технологии NGN охватывают не только традиционные уровни для систем связи: физический, канальный и сетевой. NGN, как революционная концепция, предусматривает изменение всех уровней модели OSI. Причем в процессе бурного развития технических решений для каждого уровня и даже для каждой отдельной задачи появляется сразу несколько альтернативных решений. Соответственно любая проблема имеет поливариантное решение. Устаревшие и слабые решения и технологии уходят с рынка, но интенсивность «смертности» технических решений значительно уступает интенсивности генерации новых, в результате общее количество решений постоянно увеличивается. В общем случае на голову операторов падает довольно большой пласт новых технологий всех уровней (рис. 5.2).

В последнее время на арену современных концепций вышел новый принцип конвергенции или взаимопроникновения технологий. Упрощенно этот принцип можно пояснить как тезис, что в современных сетях NGN должна быть предусмотрена возможность технологий по принципу «все через все», т. е. в равной степени возможны решения TDMoIP и IPoTDM и т. п. Для будущего развития любой современной технологии телекоммуникаций учитывать принцип конвергенции представляется очень важным. Применительно к технологии SDH этот принцип в современной трактовке можно обозначит тезисом: Современная концепция NGSDH должна быть адаптирована ко всем существующим и перспективным протоколам и профилям трафика всех современных т5ехнологий NGN.

5.1.3. SDH как технология транспорта.

Революция NGN принесла помимо общего изменения приоритетов и большого разнообразия решений, протоколов и пр. еще и изменение самих принципов построения системы электросвязи. Если раньше система связи разделялась на первичную сеть и вторичные сети, которые использовали ее каналы, то, поскольку в сетях NGN основной приоритет отдается не коммутации каналов, а коммутации пакетов, сама структура системы электросвязи должна была претерпеть изменения.

Если понятие канала становится не приоритетным, то нет никаких оснований стандартизации каналов первичной сети, и само понятие первичной сети становится аморфным. Первичная сеть как каркас всей системы электросвязи оказалась неэффективным системным понятием. Теперь деление системы связи было проведено не по линии раздела каналы/услуги или передача/коммутация, а по линии пользователь/сеть. В результате появилось понятие транспортной сети и сети доступа (рис. 5.3). Транспортная сеть NGN – это совокупность сетевых элементов, которые обеспечивают передачу трафика и предоставление услуг. Сеть доступа – это совокупность сетевых элементов, обеспечивающих доступ абонентов к ресурсам транспортной сети.

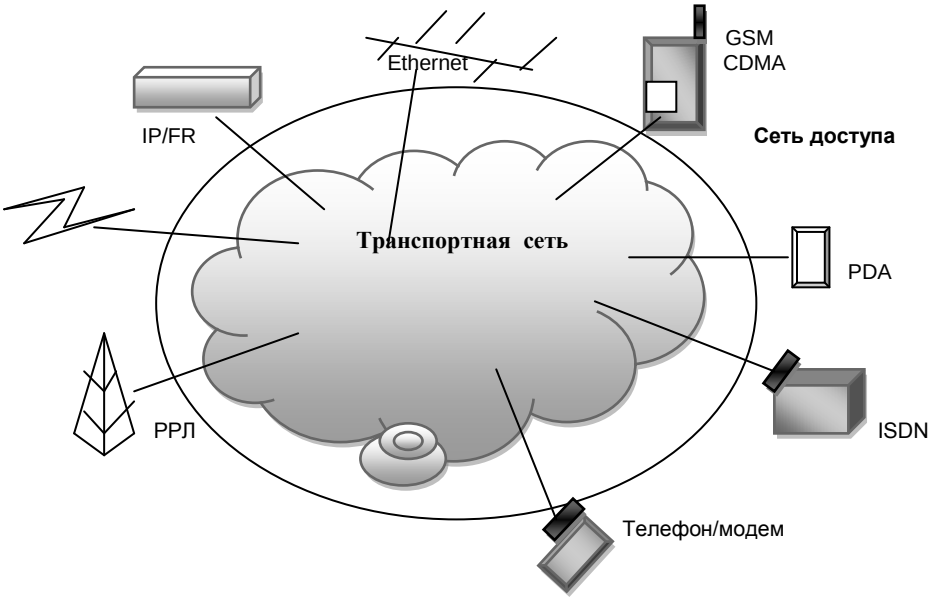


Рис. 5.3. Структура современной системы NGN.

Интуитивно ясно, что деление сети на транспортную сеть и сеть доступа представляет собой более широкое и менее строгое деление, чем разделение на первичную и вторичную сеть. Следовательно, решения в области транспортных сетей и сетей доступа будут менее формализованы и менее стандартизованы. Имеет место традиционный для NGN плюрализм технологий: любая технология, обеспечивающая передачу трафика и/или предоставление услуг, может считаться транспортной. Аналогично, любая технология, обеспечивающая доступ абонентам к ресурсам транспортной сети, может считаться абонентской или технологией доступа.

Такие широкие трактовки технологии транспорта и технологии доступа уже сейчас породили большое разнообразие решений обоих типов. Наиболее популярными технологиями в области транспорта являются: SDH (теперь уже NGSDH), ATM, MPLS/IP, Frame Relay (FR), WDM, магистральный Ethernet (например, 10Gigabit Ethernet), CATV/HDTV, Fibre Channel. Популярные технологии доступа более многочисленны, т. к. включают в себя не только технологии абонентского NGN, но и классические абонентские технологии: PDH, Frame Relay (FR), ISDN, абонентский Ethernet, IP, xDSL, FTTx/POH, телефонные каналы и модемная связь, Wi-Fi, WLL, HPNA, VDSL, CATV/HDTV, Fibre Channel.

Все перечисленные технологии конкурируют друг с другом в соответствии с поливариантной природой сетей NGN, причем на одной и той же сети могут эффективно соседствовать и взаимно проникать (принцип конвергенции) различные технологии. Сама же система связи нового поколения становится довольно разнообразной и сложно структурированной. В ней можно выделить сегменты транспортной сети и системы доступа, но часто даже сложно провести

четкую границу между теми и другими. Таким образом, не только технологии транспорта и доступа не являются жестко стандартизованными, но и сама граница между той и другой частью системы связи представляется чисто условной и может передвигаться в процессе изменения политики оператора или в связи с течением научно-технического прогресса.

Совершенно ясно, что технология NGSDH должна претендовать на место среди транспортных технологий. И как любая транспортная технология, она должна успешно сопрягаться с существующими и перспективными сетями доступа.

5.1.4. Преимущества и недостатки использования NGSDH на транспортной сети.

Если NGSDH позволит связать различные сегменты сетей доступа, то она в полной мере может претендовать на место среди транспортных сетей NGN в том смысле, который отражен на рис. 5.3. Рассмотрим единую принципиальную схему взаимодействия сегментов сетей через NGSDH (рис. 5.4). Как видно, схема использования NGSDH в данной категории решений – это создание «коридора» между двумя сегментами с интерфейсами Ethernet/GE на выходе.

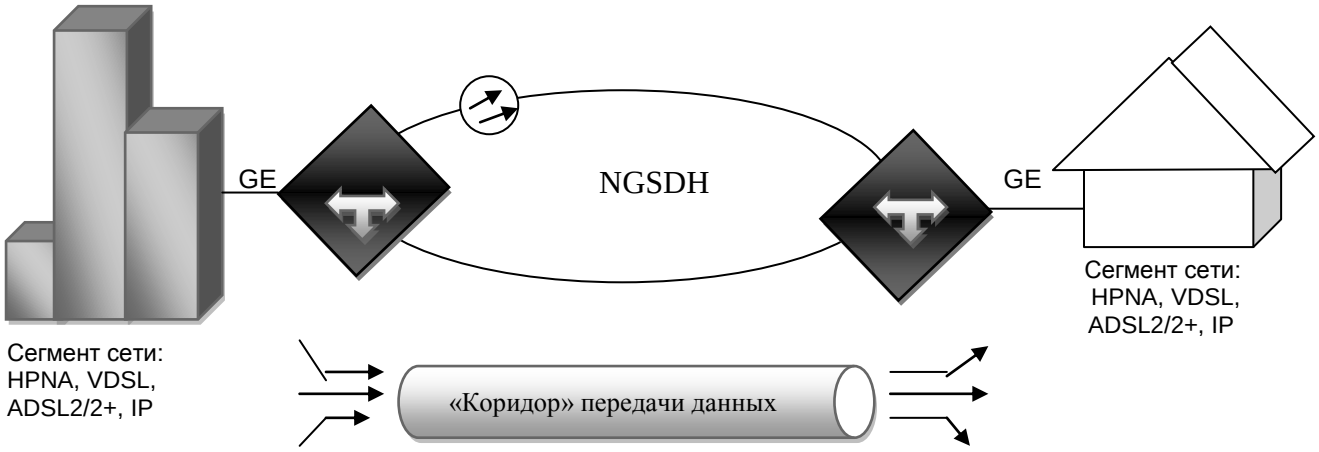


Рис. 5.4. Общая схема использования NGSDH для формирования «коридора» между сегментами сетей IP.

Это решение может успешно применяться для создания корпоративных сетей передачи данных городского и даже национального уровня. Все преимущества решения рис. 5.4 проявляются в случае выполнения трех условий:

1. Система NGSDH уже развернута и используется оператором для задач классической SDH. Решение оказывается выгодным только в случае оптимизации использования уже существующего транспорта SDH.

2. В системе NGSDH имеется запас пропускной способности, достаточный для формирования коридора требуемой ширины.
3. Сама система NGSDH успешно сопрягается с сегментами по интерфейсу Ethernet/GE.

Действительно, рассмотренная схема даст эффект только в случае, если стоит задача оптимизации использования уже существующего транспорта. Если хотя бы одно из перечисленных условий не выполняется, то речь идет не об оптимизации, а о развертывании нового сегмента транспортной сети. В таком случае поливариантность NGN даст несколько технических решений. Это может быть модернизация существующей сети SDH и расширение ее пропускной способности, но это может быть и строительство новой магистральной сети на основе MPLS или 10GE. Что будет более перспективно решать самому оператору.

Теперь предположим, что в результате выполнены все три условия:

1. Имеется система SDH необходимого охвата.

2. В системе имеется существенный излишек пропускной способности.

3. Имеются клиенты для применения схемы рис. 5.4.

В этом случае налицо революционная ситуация, которая объективно требует перехода от классической SDH к NGSDH. Любой оператор в этом случае согласится на модернизацию своей сети, в особенности, если она будет простой и быстрой.

Отсюда мы получаем новое требование к системам NGSDH. Использование NGSDH оправдано в первую очередь в контексте постепенного перехода от классической SDH к NGSDH, и этот переход должен быть минимально затратным. Здесь важно понимать, что сам феномен NGSDH – это не новая технология, а попытка адаптации классической SDH к новым условиям и требованиям NGN. Эта специфика нашла отражение и в стандартах NGSDH, и в принципах работы и эксплуатации этих сетей.

Еще раз рассмотрим схему рис. 5.4 с точки зрения того, как она соотносится с теми принципами, на которых основана классическая SDH. В табл. 5.1 приведено сравнение системы SDH как технологии первичной сети и NGSDH в контексте схемы рис. 5.4. Как следует из приведенного сравнения, схема рис. 5.4 изменяет только параметры канала и параметры интерфейса. Сама схема функционирования системы передачи не изменяется. Таким образом, NGSDH – это не новая технология систем передачи, это реформирование классической SDH, которое не затрагивает основных принципов функционирования системы передачи. Основное направление перехода от систем SDH к NGSDH лежит в последовательной адаптации SDH к условиям, определяемым революцией NGN.

Таблица 5.1. Сравнение технологий классической SDH и NGSDH.

Функции	Классическая SDH	NGSDH
Основное назначение	Обеспечит между двумя точками канал первичной сети	Обеспечить между двумя точками коридор передачи трафика IP
Параметры канала в сети	Стандартный канал иерархии PDH уровней E1, E3, E4	Коридор пропускной способности nxVC-12
Пропускная способность	Фиксированная	Фиксированная
Параметры интерфейсов доступа	Интерфейс PDH рек. G.703	Различные интерфейсы, наиболее часто 10/100/1000 BaseT

Таким образом, NGSDH не является принципиально новой технологией, а представляет собой попытку адаптации технологии SDH к новым требованиям транспортных сетей NGN. То есть NGSDH не изменяет принципов функционирования SDH, а лишь заменяет фиксированные каналы иерархии PDH виртуальными коридорами различной пропускной способности.

5.1.5. Влияние концепций оптических технологий FTTx на NGSDH.

В настоящее время рост популярности оптических кабелей в сфере телекоммуникаций изменяет структуру сетей доступа и пропускную способность абонентских сетей. Связано это в первую очередь с развитием семейства FTTx (Fiber Transport To), что в переводе означает «Оптика до…». Соответственно вместо x добавляются различные пункты доведения оптического транспорта до пользователя:

FTTB (Fiber To Building) – Оптическая система передачи до дома

FTTC (Fiber To Curb) – Оптическая система передачи до распределительной коробки

FTTCab (Fiber To The Cabinet) – Оптическая система передачи до распределительного шкафа

FTTP (Fiber To The Premises) - Оптическая система передачи до сегменте сети

FTTO (Fiber To The Office) – Оптическая система передачи до офиса

FTTH (Fiber To The Home) – Оптическая система передачи до квартиры

FTTU (Fiber To The User) – Оптическая система передачи до конечного пользователя

Все известные варианты использования оптического кабеля в качестве среды передачи в настоящее время применяются в абонентских оптических сетях (рис. 5.5). Более того, специфика использования оптического кабеля порождает новые принципы построения систем передачи информации, например, пассивные оптические сети (PON), представленные на рис.5.5.г.

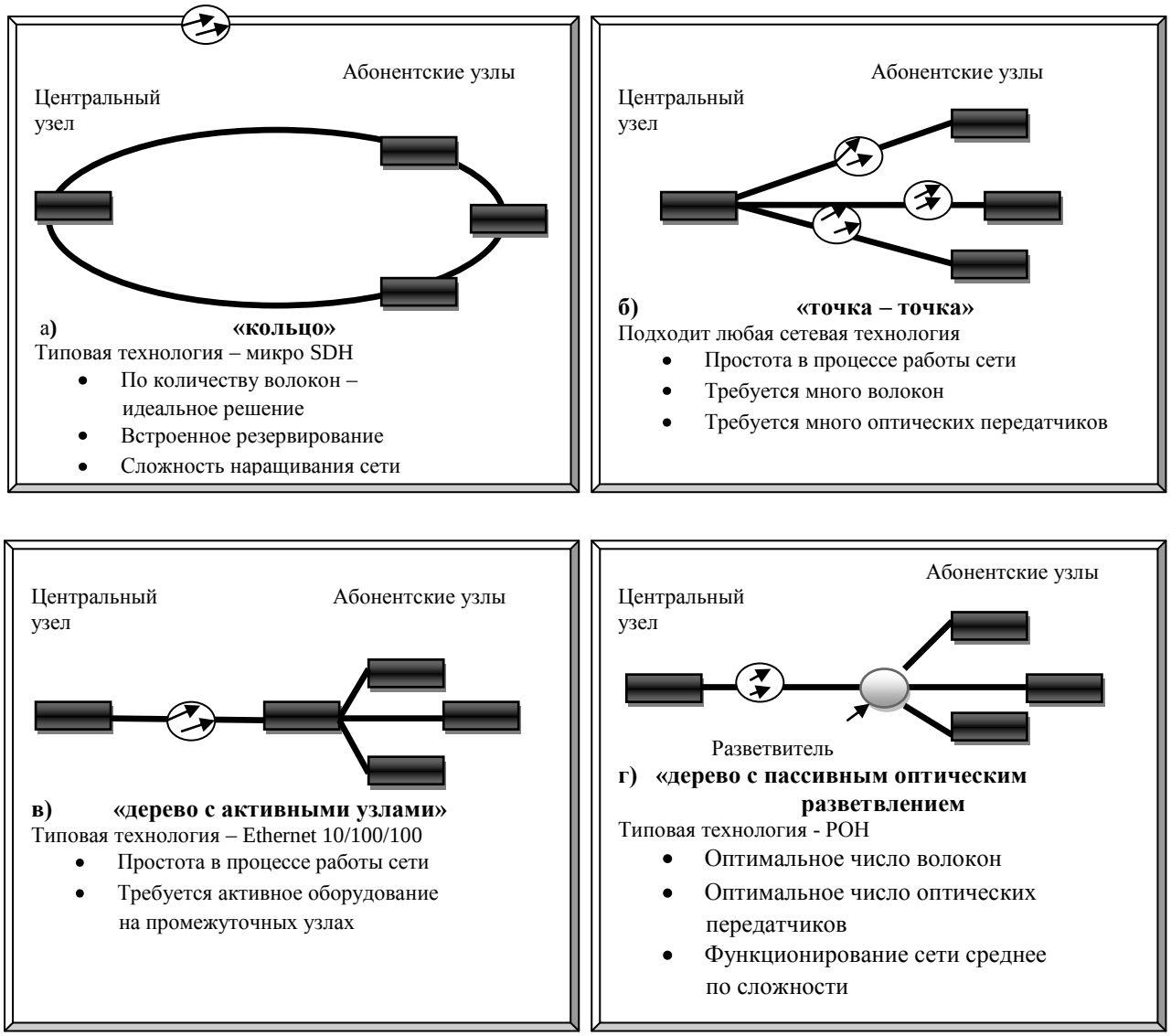


Рис. 5.5. Различные варианты топологии использования оптических кабелей в абонентской кабельной сети.

Как влияет концепции FTTx на современное развитие систем SDH? Ы технологии FTTx речь идет только о физическом уровне сети, это просто констатация сферы использования оптических кабелей. Сверху над физическим уровнем оптического транспорта находятся различные технологии: от технологии пассивных оптических сетей PON на базе IP и ATM, до систем доступа на основе технологии SDH и NGSDH. Но поскольку технология FTTx меняет лицо абонентских сетей и сетей доступа, возникает вопрос о том, какие требования могут быть предъявлены со стороны FTTx к технологии NGSDH.

Первый ответ лежит на поверхности и связан с пропускной способностью абонентских сетей. Поскольку концепция FTTx рассчитана на передачу и прием со

стороны пользователей сигналов с высокой скоростью передачи вполне логично, что технология транспортных систем передачи должна адекватно реагировать на этот вызов. Поэтому самое главное требование со стороны сетей FTTx к NGSDH как транспортной технологии – это обеспечение самой высокой пропускной способности транспортной сети. В условиях перехода к FTTx в абонентских сетях будущее NGSDH за системами уровня STM-64 и выше.

Второе влияние концепции FTTx на системы NGSDH менее прозрачно. Существенно, что именно с развитием абонентских оптических сетей появилась тенденция использовать SDH в качестве технологии доступа, поскольку технология FTTx обеспечивает физический уровень таких сетей. Коль скоро мы признаем будущее за оптическими абонентскими кабелями, то следующим шагом является признание технологии SDH, как наиболее отработанной для оптического транспорта технологии, в качестве технологии абонентского доступа. Таким образом, с появлением концепции FTTx появляется возможность использования технологии NGSDH в качестве технологии доступа. Но такое применение технологии представляется в настоящее время дополнительным.

5.1.6. Концепция WDM/DWDM.

Развитие сверхвысокоскоростных систем передачи на основе оптических систем со спектральным разделением каналов состоит в переходе от передачи на одной длине волны с разделением каналов методом временного мультилексирования (TDM) к передаче данных на разных длинах волн в пределах одного окна прозрачности оптоволоконного кабеля. За счет мультилексирования по длинам волн (WDM) удается достичь высочайшей скорости передачи. Если пределом для систем TDM стали системы уровня STM-256 (40 Гбит/с), то системы WDM в настоящее время обеспечивают от 8 до 100 несущих, а общая пропускная способность таких систем достигает нескольких терабит в секунду на одном волокне.

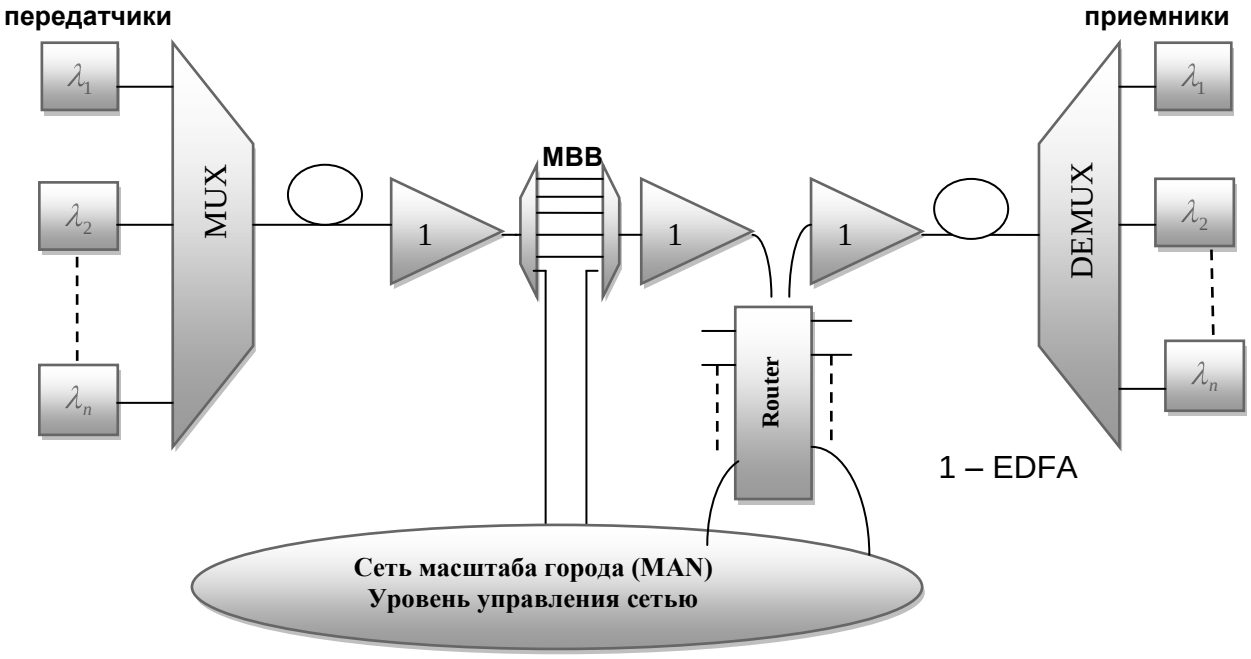


Рис. 5.6. Структура системы WDM.

Структура системы передачи WDM условно представлена на рис. 5.6. В основе сети лежит использование мультиплексора, обеспечивающего объединение сигналов с различными оптическими длинами волн в единый композитный сигнал, и демультиплексора, выполняющего обратное преобразование. Следовательно, в основе технологии WDM – технология канального уровня. Функции сетевого управления, а также обработки каналов лежат на мультиплексорах ввода/вывода.

В настоящее время системы WDM получили распространение не только в качестве технологии магистральных систем передачи, но и как технологии транспортных сетей городского и районного масштаба. Стоимость решений WDM год от года уменьшается, следовательно, уменьшается стоимость каждого канала. Распространение получили два типа магистральных систем: с 40 и с 100 несущими на одном волокне. Все это вместе дало основание многим операторам транспортных сетей говорить о том, что «труба» современных систем передачи может расширяться практически бесконечно, поскольку ее размер заведомо превышает существующие и перспективные объемы передаваемого трафика.

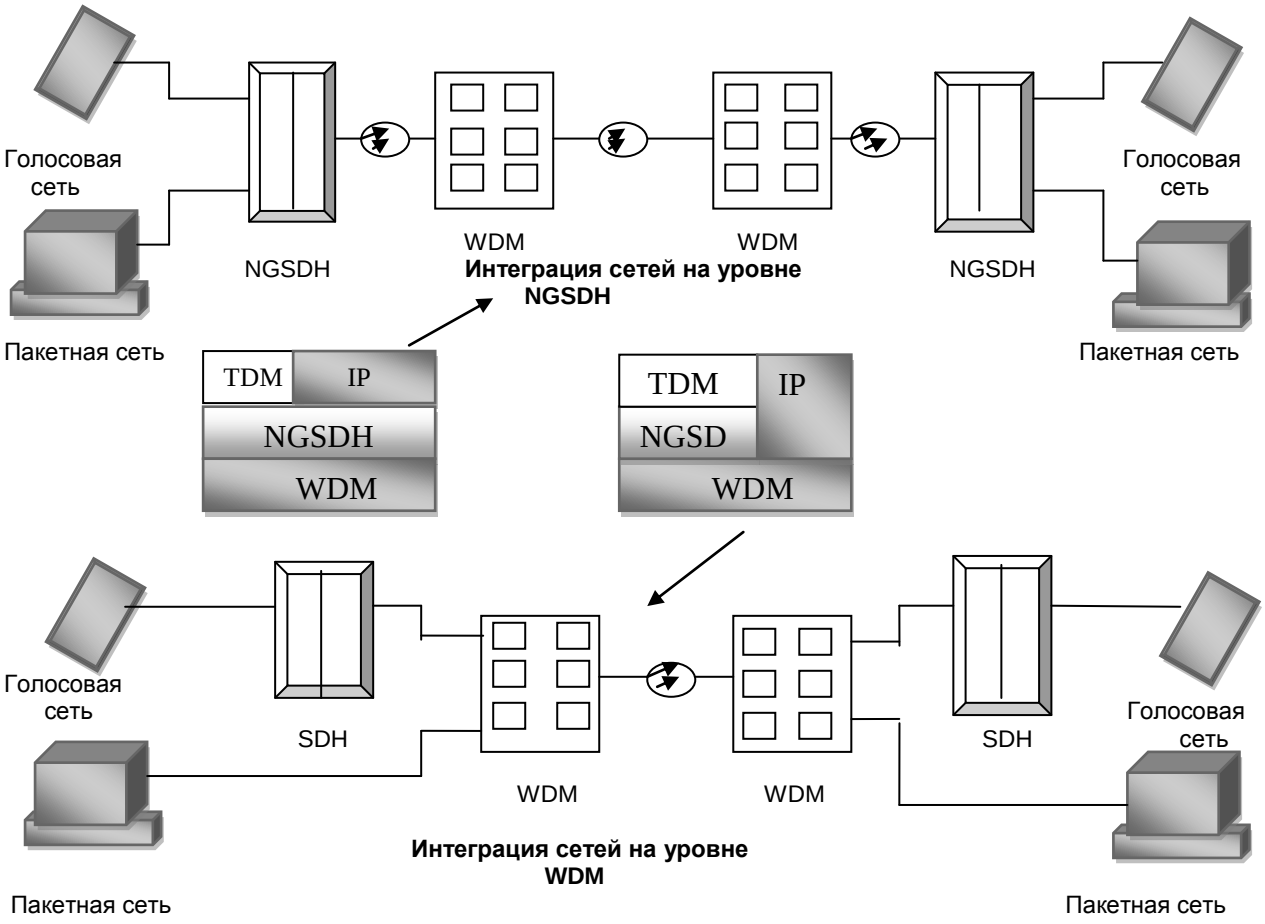


Рис. 5.7. Различные варианты объединения пакетного и голосового трафика в транспортной сети.

Несмотря на то, что WDM – это технология только канального уровня, в отличие от других технологий NGN, она также существенно поменяла расстановку сил на рынке решений систем передачи. Если принять концепцию WDM в качестве стратегии развития современных высокоскоростных систем передачи, то объединение в единой транспортной сети голосового и пакетного трафика может происходить не только на уровне NGSDH, но также на уровне WDM (рис. 5.7). Действительно, WDM обеспечивает несколько каналов передачи оптического сигнала. Тогда можно объединять пакетный и голосовой трафик на уровне NGSDH. Но можно построить на основе одной и той же системы передачи WDM две параллельные сети: одну для голосового трафика на основе классической SDH, другую – для передачи данных, например, на основе 10 GE. Сети интегрируются на основе единого оптического трафика WDM и разделяются с помощью оконечных мультиплексоров.

Таким образом, технология NGSDH как технология высокоскоростного транспорта имеет альтернативы и конкурирующие технологии. Ее развитие должно учитывать конъюнктуру рынка. Как и всякая технология NGN, технология развития транспортно сети не дает однозначного ответа, предлагая поливариантное решение. Что лучше для оператора? Это зависит от его понимания, от прогнозов развития сетей, даже от пристрастий местных системщиков. Решения в широком смысле этого понятия сосуществуют на рынке. Это сосуществование будет актуально не только на этапе развертывания высокоскоростных транспортных сетей, но и на этапе дальней шей эксплуатации сетей.

5.2. Основные направления развития систем NGSDH.

5.2.1. Направления развития NGSDH.

Основная стратегия развития современных систем передачи – постепенный переход от классического деления «первичная сеть – вторичные сети» к мультисервисной концепции «транспортная сеть – сети доступа». В связи с этим, основным направлением совершенствования сетей SDH является постепенный переход к транспортным сетям нового поколения путем постепенной адаптации к передаче пакетного трафика. Это – основная стратегия (mainstream) современной технологии SDH. Указанное направление стало основным, поскольку оно предусматривает модернизацию сетей SDH без необходимости замены технологии. На схеме (рис 5.8) оно показано жирной стрелкой.

Помимо основного направления совершенствования технологии SDH существуют и «боковые ручейки» развития технологии, в которых сама концепция SDH либо претерпевает существенные изменения, либо используется как вспомогательное средство.

Очень важным направлением развития современных систем передачи является расширение их пропускной способности. Революция в области

транспортных сетей, начатая технологией WDM, продолжает развиваться и далее, порождая группу новых технологий DWDM, OTN, GPLS, OBS и др. Технология SDH, являясь просто одной из возможных, первой среди равных, участвует в общем процессе развития высокоскоростных систем передачи и адаптируется к соответствующим процессам. Принцип конвергенции требует взаимопроникновения и тесного взаимодействия между разными технологиями. Конечно, такое положение NGSDH не может считаться основной стратегией развития, скорее условиями жизни технологии на рынке. Тем не менее, трение между NGSDH и другими технологиями высокоскоростных оптических систем передачи изменяет саму технологию NGSDH, так что не считаться с указанным направлением развития нельзя.

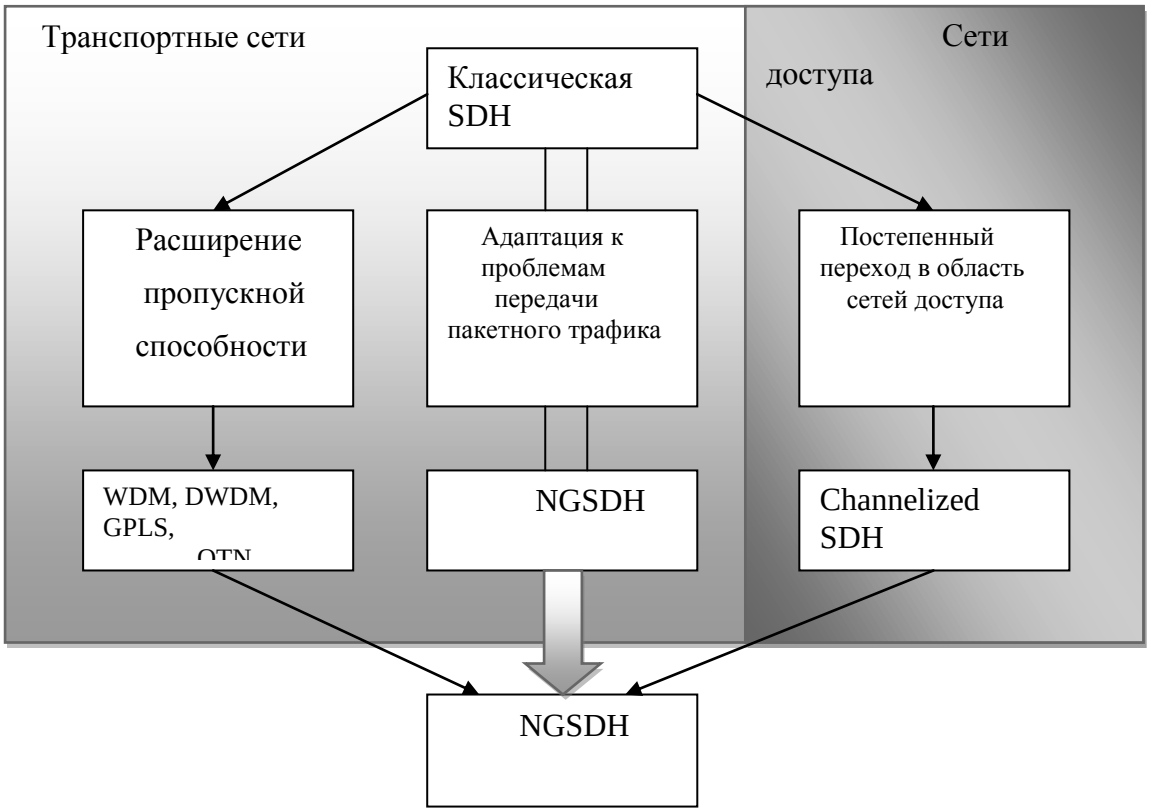


Рис. 5.8. Основные направления развития технологии NGSDH.

Третье направление развития технологии SDH связано со значительным удешевлением решений классической SDH. В результате технология SDH постепенно переходит из транспортных сетей в область сетей доступа. Основным направлением здесь выступает использование классической SDH для целей вторичных сетей. Например, многие компании-производители начали оснащать свои АТС городского типа интерфейсами для соединительных линий уровня STM-1 вместо традиционных E1.

Таким образом, выделить три основных направления развития технологии SDH на современном этапе, причем два из них связаны с транспортными сетями, а одно – с сетями доступа. В mainstream попадает только одно направление, связанное с адаптацией технологии SDH к передаче мультисервисного трафика.

5.2.2. Проблемы передачи высокоскоростного трафика.

Первая проблема, с которой столкнулись разработчики технологии SDH, состояла в необходимости передачи высокоскоростного трафика.

Таблица 5.2. Некоторые технологии NGN и соответствующие им скорости передачи данных.

Технология	Скорость передачи данных, Мбит/с
Ethernet	10 Мбит/с
Fast Ethernet	100 Мбит/с
Gigabit Ethernet	1,25 Гбит/с
Fibre Channel	1,06 Гбит/с, 2,12 Гбит/с, 10 Гбит/с
ESCON	200 Мбайт/с или 1,6 Гбит/с

Первый же взгляд на условия функционирования современных транспортных сетей (табл. 5.2) показывает, что технология классической SDH оказывается совершенно неадаптированной к скоростям передаваемого трафика. По основному своему назначению технология SDH как технология первичной сети, должна обеспечить формирование канала передачи. Данные же в классической SDH передаются в контейнерах С-12, С-3 и С-4 со скоростями Е1 (2 Мбит/с), Е3 (8 Мбит/с), Е4 (140 Мбит/с). Совершенно очевидно, что из перечисленных в таблице технологий только Ethernet и Fast Ethernet могут передаваться по классической SDH без модификаций. Высокоскоростные мультисервисные технологии не имеют соответствующего транспорта в рамках классической SDH.

Таким образом, нужно было разработать техническое решение этой проблемы, адаптировав систему SDH к передаче высокоскоростных цифровых сигналов. Оказалось необходимым расширить «трубу» самой технологии SDH.

5.2.3. Первая попытка решения – конкатенация.

Исторически первым вариантом решения стал механизм конкатенации (Contiguous Concatenation) в системах классической SDH. В смысле аллегории поезда этот механизм заключается в том, что для перевозки большого ящика объединяется несколько вагонов. Конкатенация стала настолько распространенным явлением, что вошла в стандарты схем мультиплексирования в системах классической SDH. В результате применения процедуры конкатенации на разных скоростях на выходе появляются не только стандартные контейнеры С-12, С-3 и С-4, но и конкатенированные контейнеры С-4-4с, С-4-16с, С-4-64с и С-4-256с. Значок «с» обозначает метод последовательной конкатенации (Contiguous

Concatenation). Соответствующие емкости виртуальных контейнеров VC-4-Nc представлены в табл. 5.3.

Таблица 5.3. Емкости конкатенированных контейнеров VC-4-Nc.

Тип VC-4	**Емкость, кбит/с**	**Размер интервала выравнивания (Justification Unit)**	**Транспорт SDH**
VC-4	149 760 кбит/с	3 байта	STM-1
VC-4-4c	599 040 кбит/с	12 байтов	STM-4
VC-4-16c	2 396 160 кбит/с	48 байтов	STM-16
VC-4-64c	9 584 640 кбит/с	192 байта	STM-64
VC-4-256c	38 338 560 кбит/с	768 байтов	STM-256

Сравнивая данные табл. 5.2 и 5.3, можно отметить, что применение конкатенации принципиально решает вопрос о передаче высокоскоростного трафика в сети SDH.

Рассмотрим теперь, как конкатенация изменяет используемые в системе SDH поля заголовков и чем отличается поток STM-N, содержащий конкатенированный, например, поток C-4-4c от стандартного потока STM-N.

На рис. 5.9 представлены варианты контейнирования 4xVC-4 и VC-4-4c. Как следует из рисунка конкатенация предусматривает объединение заголовков маршрута нескольких контейнеров C-n. Конкатенация как процесс «слипания» нескольких контейнеров в один предусматривает, что объединяются поля нагрузки. Но тогда значение VC-POH для присоединенных контейнеров VC-4теряется. В случае 4xVC-4 логично используется 4 заголовка VC-POH по одному для каждого виртуального контейнера. В случае VC-4-4c достаточно использовать один заголовок POH. Поскольку структура SDH должна сохраняться, обычно поле оставшихся 3 заголовков POH заполняется фиксированными данными наполнителя. Таким образом, процедура конкатенации изменяет структуру заголовков POH классической SDH.

Второе изменение, вносимое технологией конкатенации в SDH, является некоторая модификация назначения и структуры полей указателей административной группы, поскольку слипание устраняет необходимость поиска отдельных контейнеров в поле нагрузки. Кроме того, само применение конкатенации было вызвано необходимостью передачи высокоскоростных потоков, так что нет никаких оснований для дробления конкатенированного VC-4-4c на контейнеры меньшего размера, например VC-12.

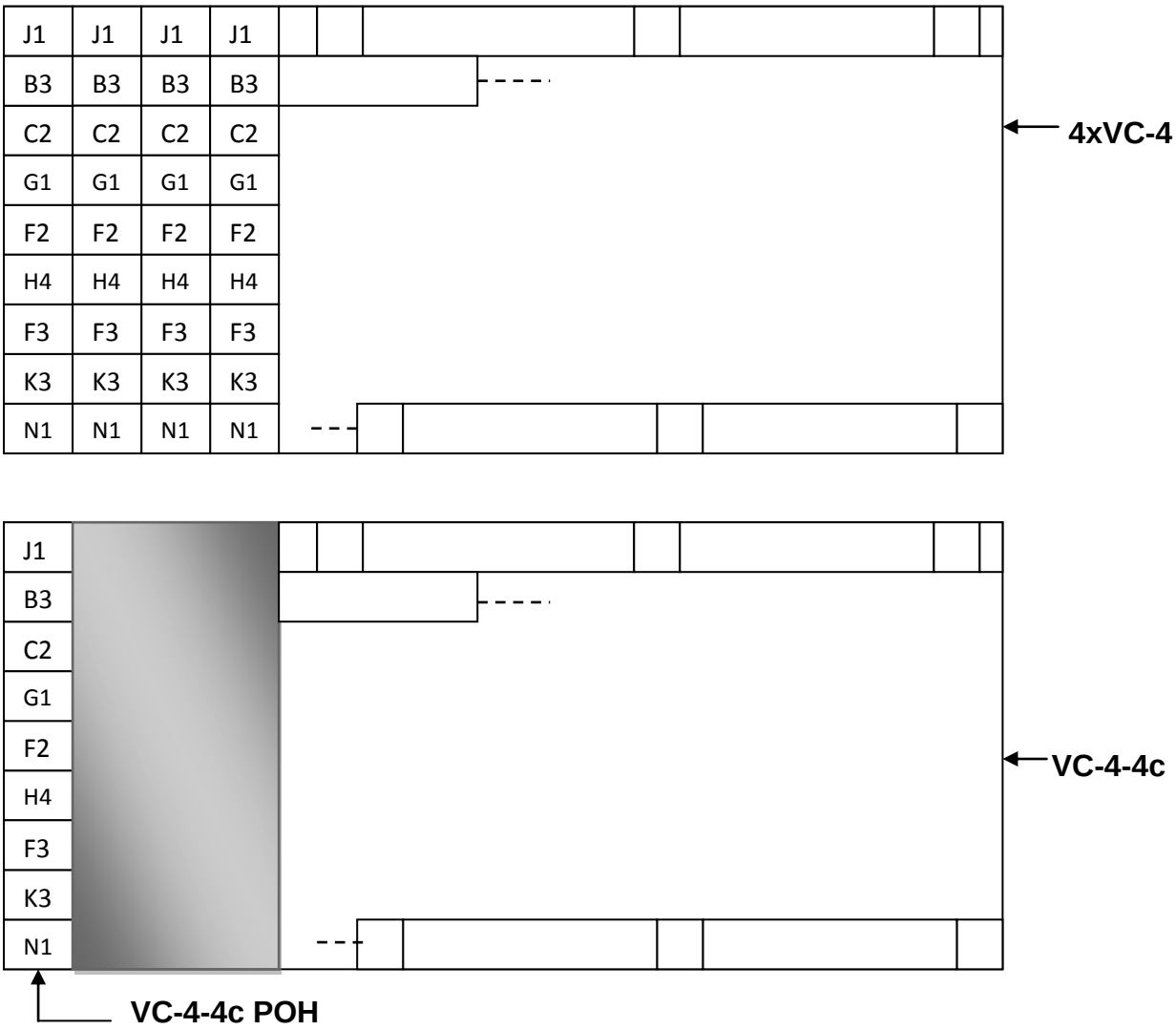


Рис. 5.9. Отличие схем конкатенирования 4xVC-4 и VC-4-4c.

Рассмотрим, каким образом изменяются указатели AU в случае конкатенации. Указатели конкатенированных AU-4 устанавливаются равными фиксированной величине «1001» в битах 1 – 4. Биты 5 и 6 неспецифицированы, а биты с 7 по 16 устанавливаются равными 1. В составе указателей имеется индикатор конкатенации, который должен показать, что указатели первого AU-4 выполняет все функции указателей для AU-4-4c.

Также, как и в стандартном AU-4 указатель состоит из трех полей по 3 байта: H1, H2 и H3. Биты с 1 по 4 полей указателей содержат флаг новых данных NDF (New Data Flag). Биты с 7 по 16 представляют значение указателя от 0 до 782, которое в случае STM-4 должно умножаться на 12. Это значение указывает местоположение начала контейнера VC-4-4c в поле нагрузки. Если положение VC-4-4c в поле нагрузки изменяется, соответственно изменяется значение указателя. Как и в классической SDH указатели выполняют также функцию компенсации рассинхронизации. Для этой цели используется поле H3.

Теоретически процедура конкатенации позволяет создавать «коридоры» разной пропускной способности. На рис. 5.10 показаны варианты коридоров размерности VC-4, VC-4-4c< VC-4-16c и комбинированного размера в рамках одного потока STM-16. Как видно из рисунка, процедура конкатенации позволяет разделить общий ресурс системы передачи SDH на любые сегменты. В реальной практике комбинированные варианты типа четвертого варианта рис. 5.10 встречаются довольно редко. Чаще конкатенированные потоки используют симметрично, например, вся система передачи делится на потоки nxVC-4-Nc.

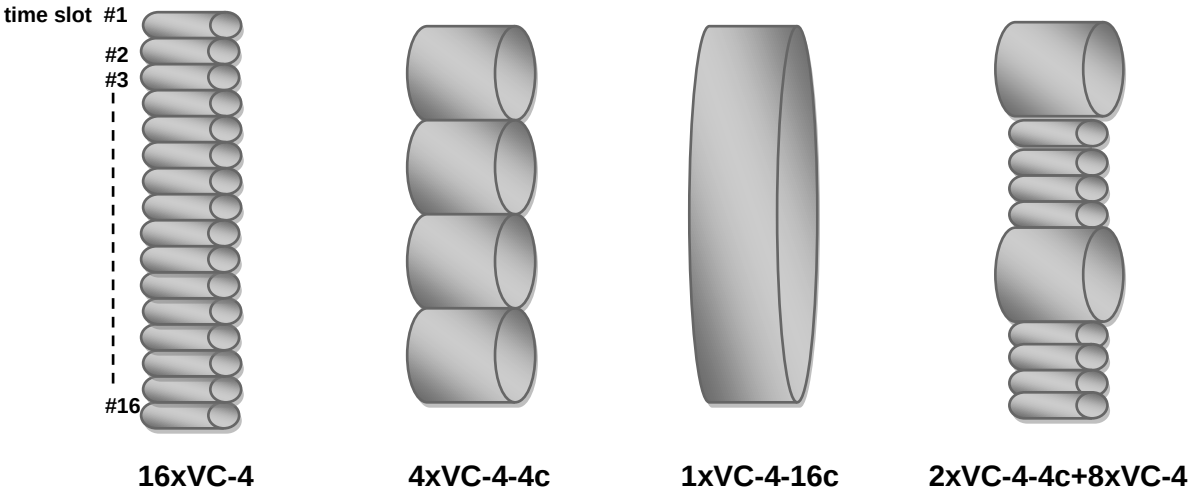


Рис.5.10. Различные варианты коридоров в потоке STM-16.

Таким образом, конкатенация позволяет решить один из важных вопросов NGSDH – обеспечение передачи высокоскоростных потоков в рамках классической SDH. Для этого конкатенация использует минимальное преобразование технологии SDH, сохраняя ее структуру и принципы работы.

5.2.4. Виртуальная конкатенация – VCAT.

Решение проблемы передачи высокоскоростного трафика в системах SDH в виде конкатенации имеет один важный недостаток. Это решение существенно снижает КПД самой системы передачи. Например, формирование коридора для передачи трафика Gigabit Ethernet (1,05 Гбит/с) методами конкатенации требует использование контейнеров VC-4-16c, что соответствует скорости 2,5 Гбит/с. В результате ресурс системы SDH используется только на 42%. Если посмотреть на другие приложения, то эффективность использования ресурса SDH также невысока (табл. 5.4). Такое положение вещей можно было бы терпеть, если бы технология SDH сама по себе не имела проблем с эффективностью использования ресурса.

Достаточно вспомнить, что в системах SDH используется резервирование передаваемого потока 1:1. Это означает, что КПД систем SDH уже по самой идее составляет 50%. За счет использования заголовков, которые занимают место при

передаче данных, КПД классической SDH становится еще меньше и достигает 42 – 45%. Если теперь еще уменьшить КПД за счет использования процедур конкатенации, то мы получим для случая технологии GE производительность системы 17,6%. Это ниже КПД паровоза ранних лет выпуска.

Таблица 5.4. Оценка эффективности использования ресурса SDH в случае применения конкатенации и VCAT.

Приложение	**Применение конкатенации**	**Применение VCAT**
Ethernet (10 Мбит)	VC-3 – 20%	VC-12-5v – 92%
Fast Ethernet (100 Мбит)	VC-4 – 67%	VC-12-47v – 100%
ESCON (200 Мбайт)	VC-4-4c – 33%	VC-3-4v – 100%
Fibre Channel (1 Гбит)	VC-4-16c – 33%	VC-4-6v – 89%
Gigabit Ethernet (1000 Мбит)	VC-4-16c – 42%	VC-4-7v – 85%

Решение было найдено с помощью принципа виртуальной конкатенации (VCAT). Идея VCAT состоит в том, чтобы вместо «прямого» соединения контейнеров использовать виртуальное соединение (рис. 5.11). В оконечном мультиплексоре поток GE разбивается (Splitting) и упаковывается (Mapping) в контейнеры VC-4. Затем контейнеры передаются по сети как обычные контейнеры SDH автономно. На другом конце мультиплексор демультиплексирует нагрузку (Demapping) и объединяет контейнеры (Recombining) в единый поток GE. Тем самым при формировании коридора можно набирать его размер кратно VC-4.

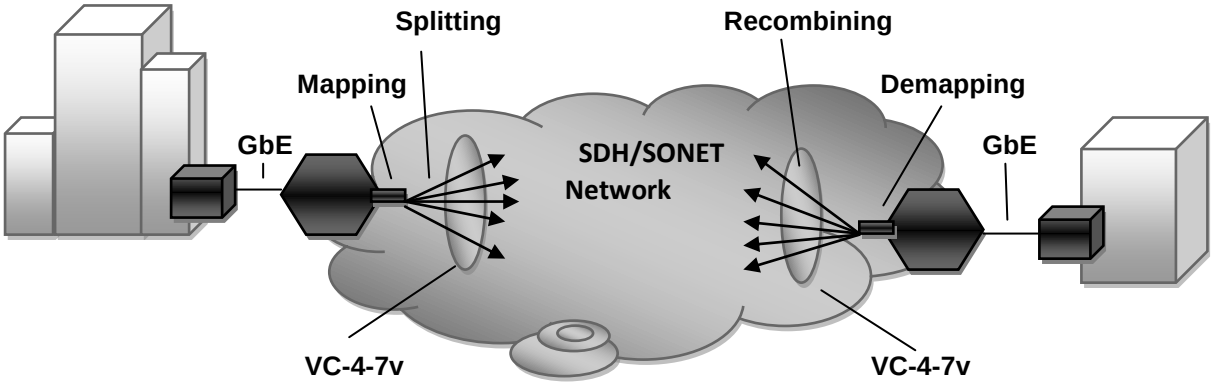


Рис. 5.11. Формирование коридора для передачи трафика GE методами VCAT.

В рассмотренном случае при формировании коридора для GE можно эффективно объединить 7 контейнеров VC-4, и в результате эффективность такого объединения составит 85%, что уже вполне приемлемо. Если рассмотреть другие технологии мультисервисных сетей, то эффективность применения VCAT

для них также не вызывает сомнений (см. табл. 5.4). Удобство VCAT состоит в том, что эта процедура допускает мягкое внедрение в системы классической SDH без необходимости существенного преобразования самой системы. Действительно, из рис. 5.11 видно, что сама процедура VCAT может быть реализована только на двух оконечных мультиплексорах. Остальная сеть «не чувствует» применения VCAT, т. к. по ней передаются стандартные контейнеры.

Таким образом, VCAT еще меньше, чем конкатенация изменяет структуру классической SDH, одновременно предлагая более эффективное решение. Но обе технологии обеспечивают принципиальное решение вопроса о передаче высокоскоростного трафика в сети NGSDH.

Следует заметить, что вопросы контроля работы и надежности транспортной сети на основе NGSDH были решены еще на этапе SDH, и решены эффективно. Вместе с тем, в процессе интеграции технологии SDH с сетями NGN важным условием успеха наравне с надежностью и управляемостью является стремление к увеличению эффективности использования ресурса транспортной сети. Таким образом, движущей идеей развития NGSDH является стремление к максимальному КПД использования ресурса кабельной системы передачи.

5.2.5. Проблемы передачи пакетного трафика.

Второй большой проблемой интеграции SDH в NGN является передача пакетного трафика по системе, приспособленной к коммутации каналов. По этой причине само устройство технологии и процессов в ее составе ориентировано на понятие канала, которому характерно постоянство скорости передачи.

Идеология NGN – это идеология трафика от сетей с коммутацией пакетов. Пакетному трафику свойственна высокая неравномерность скорости, статистический характер распределения параметров. Возникает вопрос, каким образом можно совместить эти два свойства и при этом реализовать принцип максимальной эффективности использования ресурсов системы передачи.

На этот раз вызов, брошенный NGN технологии NGSDH, очень суров и не допускает принятия простых решений. Философский дуализм коммутации пакетов и коммутации каналов преследует цифровые технологии связи с самого их рождения потому, что актуальность передачи и коммутации пакетного трафика исторически появилась после развертывания сетей с коммутацией каналов. Так что в большинстве случаев этот философский вопрос возникает в такой форме: как оптимально передать пакетный трафик по сети с коммутацией каналов и в этом смысле вызов от технологий NGN к NGSDH является традиционным. Рассмотрим в историческом контексте, какие варианты решений были разработаны на этом пути.

а*). Первая попытка решения – PoS.*

Первым вариантом проблемы решения передачи по системе SDH пакетного трафика стала попытка решить проблему уже имеющимся арсеналом решений: либо с использованием технологии HDLC, либо с использованием методов ATM (рис. 5.12). Такая схема получила название PoS (Packet over SDH). Второй вариант в настоящее время представляется затруднительным по причине последовательного успешного вытеснения технологии ATM с рынка стеком технологии на базе IP.

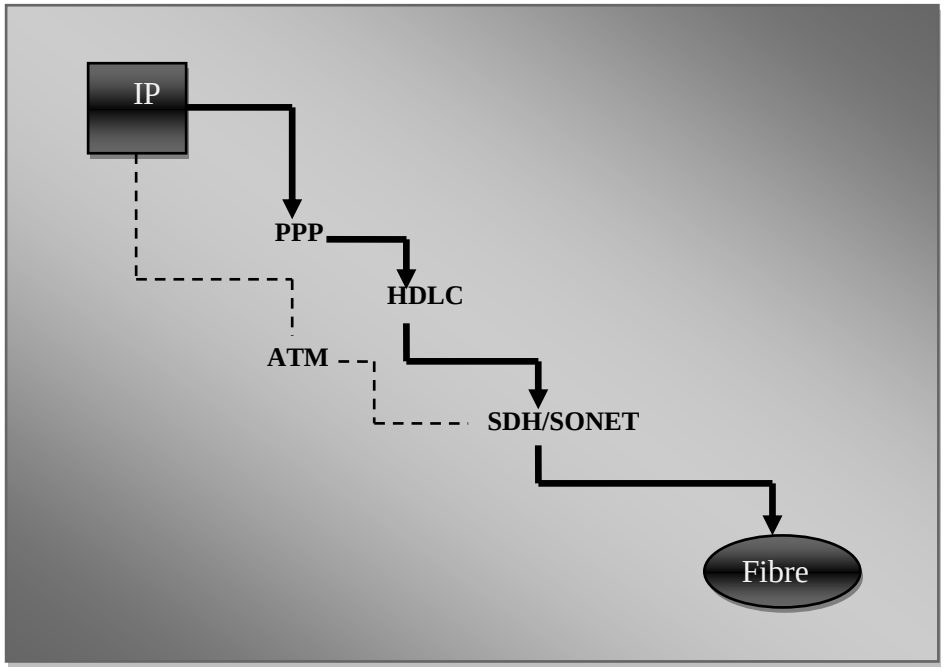


Рис. 5.12. Варианты передачи пакетного трафика через сеть SDH.

Рассмотрим вариант прямой загрузки пакетного трафика в систему SDH. Следует сразу оговорить, что нас интересует в первую очередь пакетный трафик IP и Ethernet, поскольку эти две технологии в настоящее время покрывают более 90% всех возможных случаев трафика передачи данных.

Нас интересует коридор между двумя точками сети, по которому передается трафик IP. Для выполнения этой задачи был разработан и стандартизован в рек. RFC 1661 протокол PPP (Point-To-Point Protocol, «протокол точка-точка»).

Первоначально применявшийся для модемной передачи данных, этот протокол идеально соответствует специфике нашего случая. Протокол имеет ряд важных функций, таких как контроль связности канала передачи данных IPи пр, которые целесообразно использовать для PoS. Так что на первом этапе данные IP преобразуются в кадры протокола PPP.

Вторым шагом (рис. 5.12) является преобразование кадров протокола PPP в формат кадров HDLC (рис. 5.13). Необходимость такого преобразования определяется тем, что протокол HDLC представляет собой специально разработанный формат под передачу данных, ориентированный на соединение.

Именно протокол HDLC составляет по этой причине основу всех современных протоколов передачи данных для сетей с коммутацией каналов: X.25, Frame Relay, ATM, ISDN, SS7 и др.

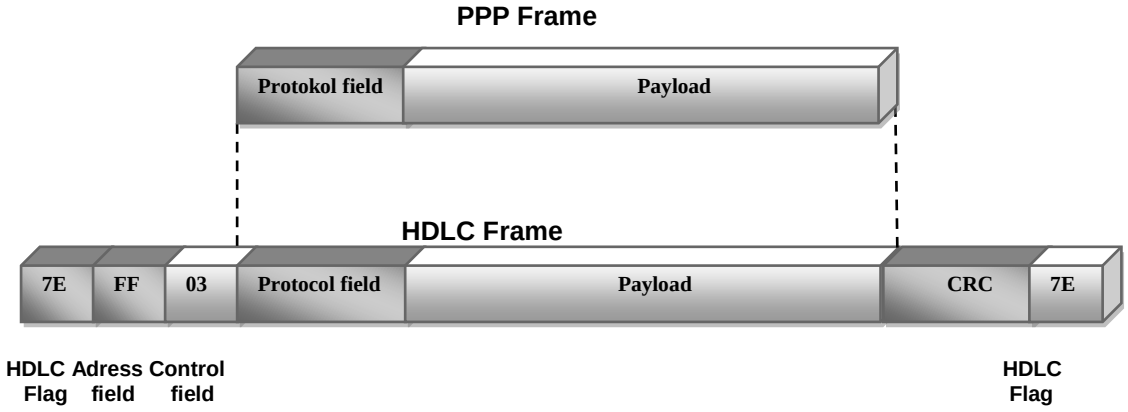


Рис. 5.13. Преобразование кадров PPP в формат кадров HDLC.

Формат кадра HDLC предусматривает поле информационных данных переменной длины. Кадры HDLC разделяются друг от друга специальными полями – флагами (на рис. 5.13 показано значение флага в 16-ричном исчислении). Поскольку IP дейтаграммы, передаваемые по системе SDH, могут иметь самый широкий разброс по длине поля, соответственно и кадры PPP также будут переменной длины, именно структура HDLC позволяет разделить два различных по длине кадра данных. Кроме того, немаловажным преимуществом протокола HDLC является то, что в составе кадра присутствует поле контрольной суммы FCS (на рис. 5.13 – CRC по названию механизма контроля ошибок). Это поле позволяет контролировать блоковые ошибки в кадрах. В отличие от ATM или ISDN в системе PoS используется упрощенная версия протокола HDLC. Адресное поле и поле управления имеют фиксированные значения FFи 03, соответственно. Кадр PPP загружается в информационное поле кадра HDLC.

Третьим шагом процесса PoS является загрузка кадров HDLC в виртуальные контейнеры SDH. Таким образом, дейтаграмма IP проходит несколько стадий обработки, прежде, чем поступает в систему SDH(рис. 5.14):

- Форматирование кадра PPP
- Расчет контрольной суммы FCS
- Добавление байтов стаффинга для выравнивания скоростей и формирования кадра HDLC
- Процедура загрузки кадров HDLCв систему SDH
- Передача контейнеров PoS по сети SDH

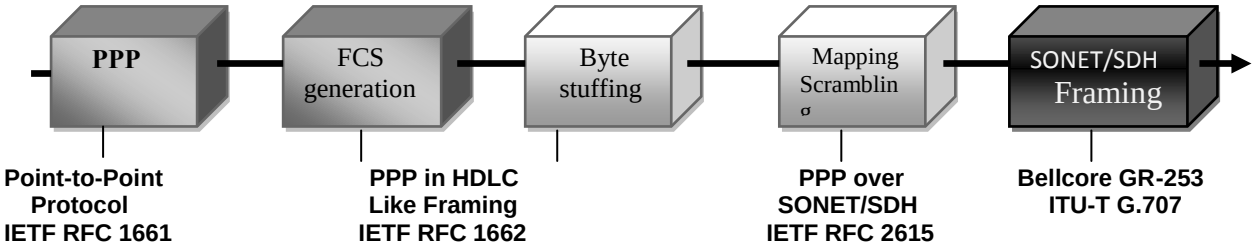


Рис. 5.14. Общая схема загрузки данных IP в систему SDH.

Все перечисленные процедуры имеют соответствующие стандарты, указанные по шагам на рис. 5.14.

К числу достоинств алгоритма PoS можно отнести его значительную простоту. Действительно, пакетизация любого трафика в виде кадров HDLC решается специализированными серийно выпускаемыми микросхемами. Основным недостатком алгоритма PoS является низкий КПД использования ресурса системы. На рис. 5.15. показано типичное заполнение транспортного модуля SDH трафиком PoS. Свободное пространство заполняется «пустыми» полями в виде 16-ричной последовательности 7E, эквивалентной по длине флагу кадров HDLC. На рисунке светлые поля 7E представляют флаги кадров HDLC, темные поля 7E – пустые кадры.

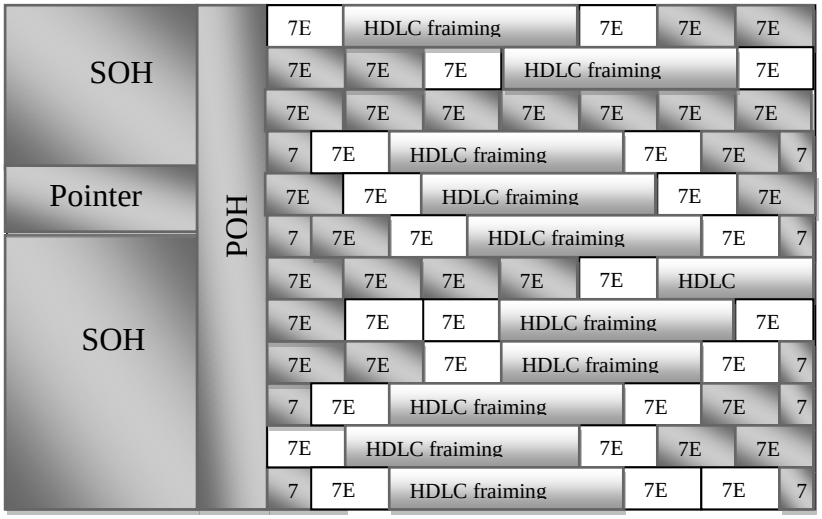


Рис. 5.15. Структура загрузки HDLC в систему SDH.

Приведенная иллюстрация показывает довольно низкую эффективность использования ресурса NGSDH. Причиной этого является сам алгоритм выравнивания скорости. Пакетный трафик является крайне неравномерным, поэтому вписать его в фиксированный объем канала NGSDH возможно только, если принять какой-то метод выравнивания скоростей. В алгоритме PoS никакого специального способа выравнивания скоростей придумано не было. Просто сам ресурс канала NGSDH выбирается из условия, чтобы максимальный всплеск трафика не вызывал перегрузки и потери информации. Для этого предполагается значительный объем заполнения пустыми полями, что и сказывается на КПД системы PoS в целом.

б). Вторая попытка решения – LAPS/X.86.

Дальнейшее развитие технологии PoS привело к появлению алгоритма LAPS (рис. 5.16). Суть изменения подхода сводится к тому, чтобы не использовать схему загрузки

IP → PPP → HDLC → NGSDH

а непосредственно загружать пакеты Ethernet в систему NGSDH

IP → Ethernet → HDLC → NGSDH

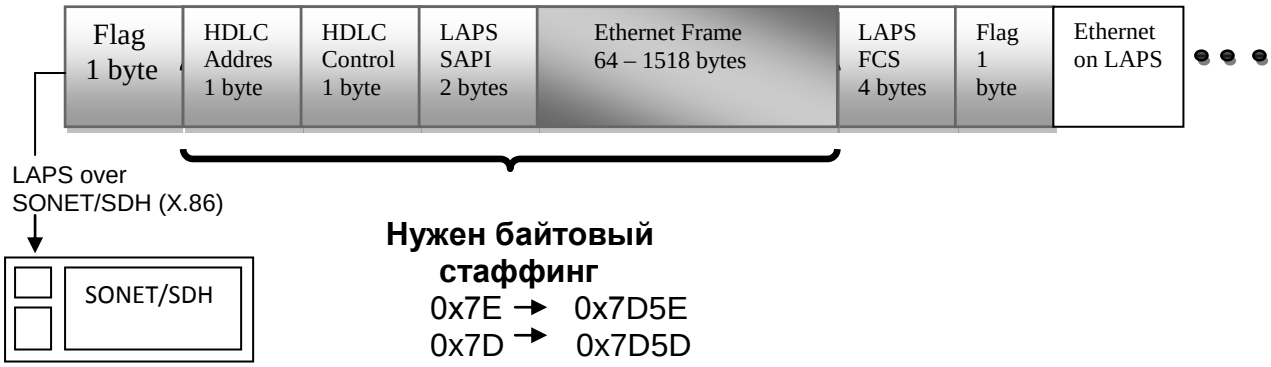


Рис. 5.16. Процедура LAPS/X.86.

Как следует из приведенных схем, сам метод загрузки при переходе от PoS к LAPS никак не изменился, так что процедура LAPS имеет все тот же недостаток, а именно крайне низкую эффективность использования ресурса NGSDH. Само название алгоритма LAPS (протокол доступа к каналу SDH) имеет преемственность с другими протоколами на основе кадровой структуры HDLC:

- LAPD (протокол доступа к каналу D), принятому в качестве протокола второго уровня для ISDN. Эволюция этого протокола расширила его применение на технологии ОКС7 и Frame Relay.
- LAPS (протокол доступа к каналу B), используемому в технологии передачи данных по цифровым коммутируемым телефонным сетям. Этот протокол используется в системах ISDN и Frame Relay.

Единственным дополнительным преимуществом по сравнению с PoS для протокола LAPS можно считать то, что он был стандартизован в рек. ITU-T X.86. Но в полной мере реализоваться на рынке не смог, т. к. был вытеснен более новым решением на базе GFP.

в). Третья попытка решения – SAR/ATM.

Повышение эффективности использования ресурса NGSDH связано с процедурой выравнивания скорости передаваемого трафика. Впервые процедура выравнивания скоростей для эффективной загрузки пакетного трафика в сеть NGSDH была применена в рамках технологии ATM (рис. 5.17). Основой этой технологии является принцип передачи данных в виде ячеек фиксированного размера в 53 байта. Как следствие, любые пакетные данные (например, кадры Ethernet размера от 64 до 1518 байт) разделяются на блоки размера по 48 байт и передаются по сети ATM. Эта процедура называется сегментированием данных, а соответствующий уровень технологии ATM называется SAR (Segmentation Reassembly – уровень сегментации и объединения.

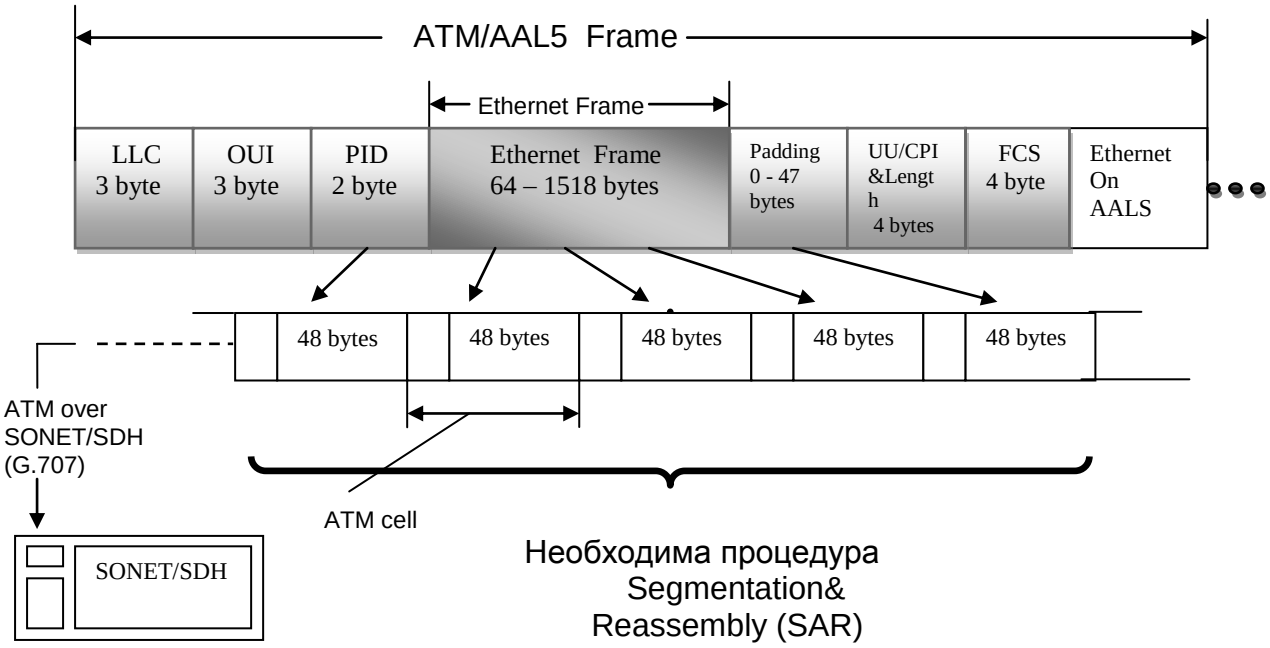


Рис. 5.17. Процедура выравнивания скоростей в алгоритме ATM.

В результате сегментирования в систему SDH поступает последовательность ячеек фиксированного размера. Такой трафик не имеет неравномерности и идеально подходит для передачи по системе NGSDH. Как это часто случается, первая попытка выравнивания скоростей оказалась самой эффективной с точки зрения использования ресурса NGSDH. К сожалению, реальная техническая реализация алгоритма SAR оказывается сравнительно дорогой из-за своей сложности.

Кроме того, технология ATM не выдержала конкуренции со стороны производителей оборудования но основе IP. Изначально разработанная под задачи NGN в распределенных магистральных сетях, технология ATM обеспечивала максимальную эффективность в решении многих вопросов (контроль и обеспечение качества, удаленный доступ, преобразование протоколов обмена и пр.). Но технический прогресс пошел в другом направлении, бурное развитие технологий IP и Ethernet привело к тому, что сама по себе передача данных потеряла актуальность. Парадигмой сетей передачи стала передача данных в формате IP и Ethernet. В результате появились решения, ориентированные не на передачу данных в широком смысле, а именно на востребованные потребителями прикладные задачи. Эти решения в процессе конкуренции вытеснили решения ATM с рынка.

Таким образом, несмотря на определенные преимущества процедуры SAR/ATM, этот метод передачи пакетного трафика в NGSDH в настоящее время вместе с PoS и LAPS уходит в прошлое.

г). Четвертая попытка решения – GFP.

Как объединить функции выравнивания скоростей со спецификой передачи данных в формате IP/Ethernet и при этом избежать излишней сложности алгоритмов класса SAR? Именно эту задачу удалось решить в рамках протокола GFP (General Framing Protocol). Алгоритм работы процедуры GFP представлен на рис. 5.18.

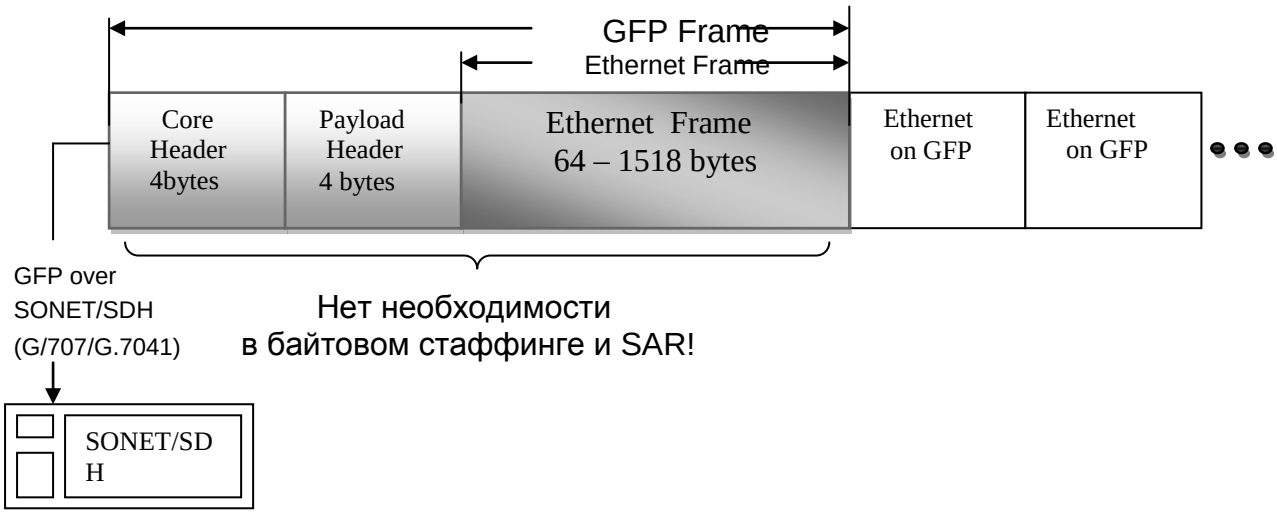


Рис. 5.18. Схема работы процедуры GFP.

В основу алгоритма GFP были положены несколько принципов:

- Пакетный трафик передается в виде кадров GFP
- Процедура формирования кадров GFP должна быть максимально простой, чтобы избежать излишней сложности и дорогой реализации
- Заголовки кадров GFP должны иметь фиксированный размер для удобства их обработки
- GFP не должен быть связан с уровнями контроля/обеспечения качества и управления пропускной способностью системы передачи
- Процедура выравнивания скоростей должна быть максимально простой
- GFP должен быть максимально адаптирован к специфике мультисервисного трафика NGN.

Разработанный на перечисленных основаниях алгоритм GFP оказался довольно сложным и не может быть описан в нескольких словах (он будет рассмотрен несколько позже). Пока можно принять, что GFP установил эффективный баланс между сложностью реализации (дешевле, чем SAR) и эффективностью использования ресурса NGSDH (лучше, чем PoS/LAPS). GFP обеспечивает сравнительно высокую эффективность выравнивания скорости, т. е. выполняет функцию «размазывания» неравномерного трафика, за счет чего устраняется избыточность в ресурсе.

Ряд дополнительных преимуществ протокола GFP перед LAPS обеспечили ему абсолютную конкурентоспособность на рынке технологий. Таким образом, четвертая попытка решения проблемы передачи пакетного трафика по сети NGSDH была признана во всем мире удачной, а GFP рассматривается как наиболее эффективное решение современной технологии NGSDH.

5.2.6. Управление шириной коридора. LCAS.

Использование VCAT позволяет формировать в системе NGSDH различные коридоры с разным назначением. По принципу «матрешки» система NGSDH должна вбирать в себя всю функциональность классической SDH. В результате объединения пакетного трафика и трафика коммутации каналов (TDM) мы получаем следующую модель системы передачи NGSDH (рис. 5.19).

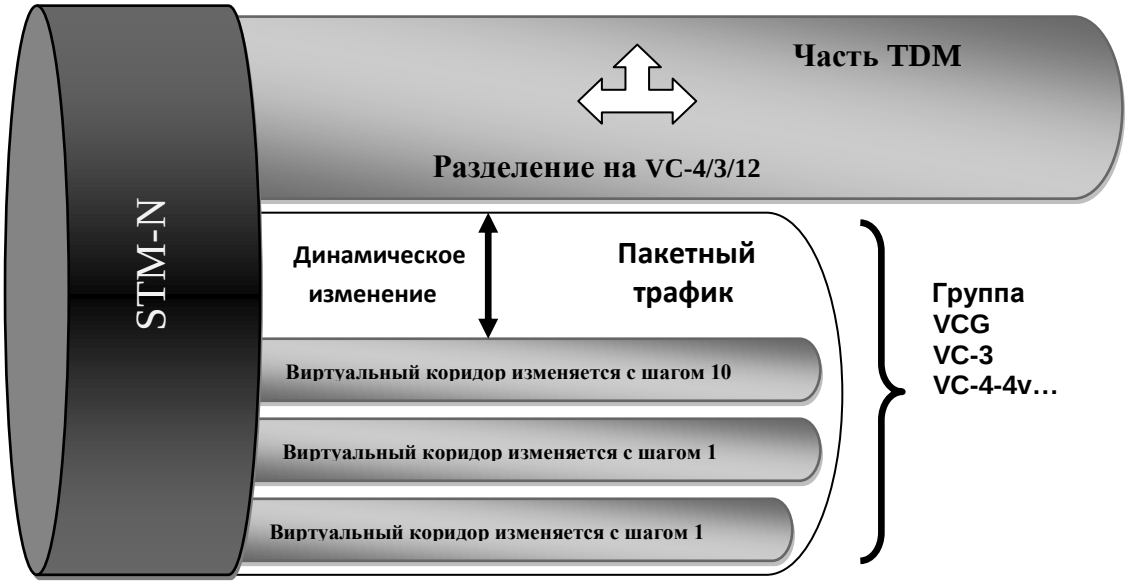


Рис. 5.19. Модель тракта системы передачи NGSDH.

Весь ресурс тракта системы передачи STM-N делится между каналами передачи трафика TDM и виртуальными коридорами передачи пакетного трафика. Работа системы NGSDH в части TDM полностью соответствует принципам классической SDH. Ресурс, отведенный под передачу пакетного трафика, разделяется между виртуальными коридорами, образованными с использованием процедуры виртуальной конкатенации (VCAT). Это могут быть и стандартные контейнеры, например VC-3, и коридоры VCAT, например VC-4-4v. Совокупность коридоров образует виртуально-конкатенированную группу (VCG). Использование метода GFP позволяет оптимальным образом использовать пространство каждого виртуального коридора.

Однако, в такой системе не хватает гибкости. Дело в том, что для эффективной работы системы NGSDH необходимо не просто обеспечивать тот или иной ресурс для подсистемы TDM и подсистемы передачи пакетного трафика,

но еще и установить механизм изменения размеров коридоров и соотношения частей TDM и пакетной части. Сети NGN – сети высокой динамики развития. Рост трафика в современных пакетных сетях и особенно в сети Интернет имеет взрывоподобный характер. Поэтому, если в процессе работы сети необходимо из одной точки в другую проложить виртуальный коридор емкостью в 10 Мбит/с, то это не значит, что так и будет несколько лет. Очень может быть, что уже через неделю нужно будет расширить коридор до 20 Мбит/с и т. д. Более того на следующем этапе развития сетей может понадобиться динамическое изменение размера виртуальных коридоров в реальном времени. Чтобы NGSDH не устарела после окончания разработки стандартов, было предложено внедрить механизм динамического изменения размера виртуального коридора. Этот механизм получил название LCAS (Link Capacity Adjustment Scheme – схема регулирования размера канала).

Упрощенная схема функционирования LCAS представлена на рис. 5.20. В основе LCAS лежит использование внутри системы NGSDH определенной системы сигнализации, которая позволила бы расширять или сужать размер виртуального коридора под управлением команд из центра управления сетью.

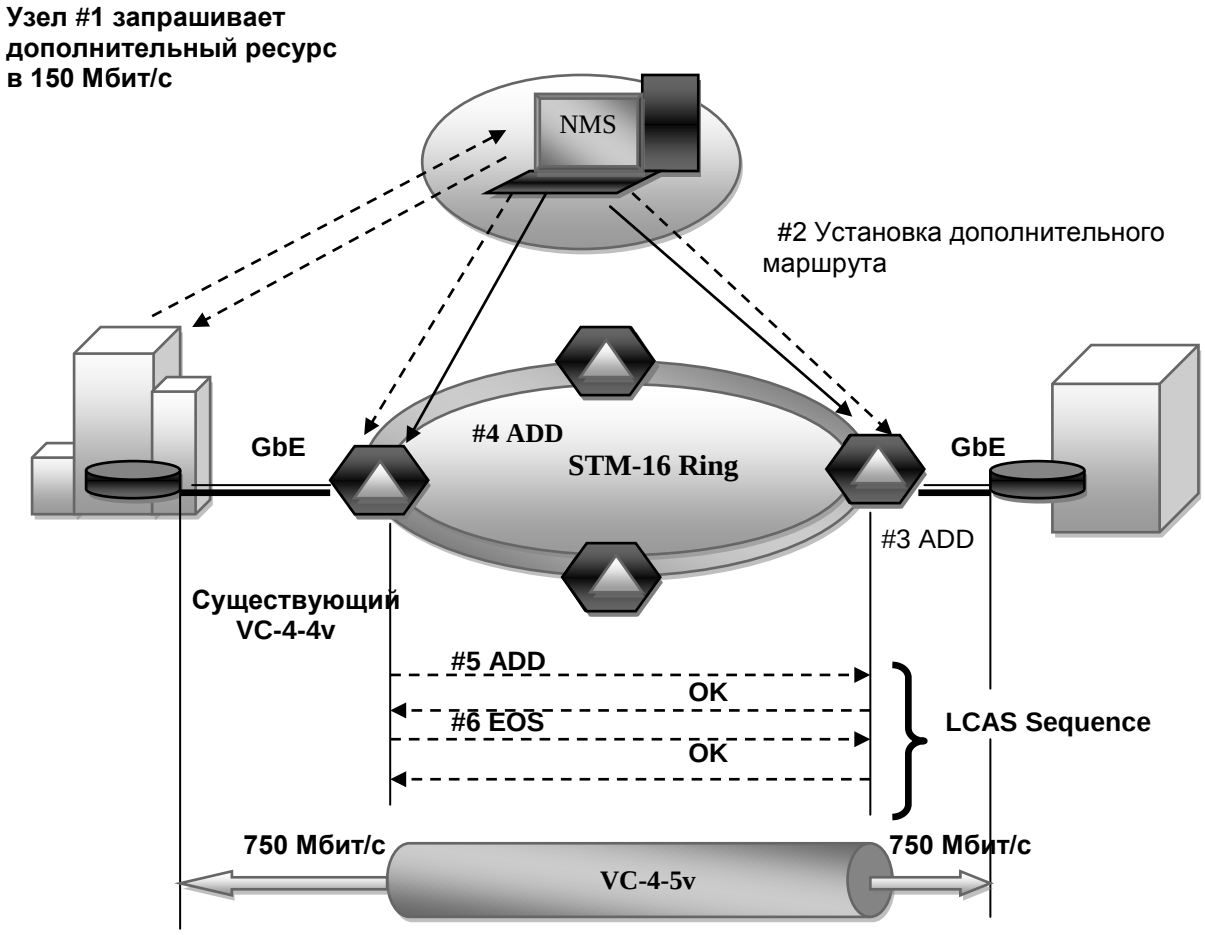


Рис. 5.20. Принцип работы LCAS.

На рисунке представлена ситуация, когда на сети уже имеется виртуальный коридор емкостью VC-4-4v, т. е. размер коридора составляет 600 Мбит/с. Точка подключения оконечных пользователей имеет интерфейс GE, т. е. 1 Гбит/с полезной нагрузки, следовательно, «бутылочное горло» в случае увеличения трафика пользователя будет находится в виртуальном коридоре. Если предположить, что уровень трафика действительно вырос, возникает необходимость расширения виртуального коридора. Оно выполняется под управлением центра NMS системы NGSDH. Когда узел №1 запрашивает расширение виртуального коридора на 150 Мбит/с, центр NMS дает команду мультиплексорам №3 и №4 добавить в соответствующий виртуальный коридор еще один контейнер VC-4. Оконечные мультиплексоры начинают обмен сигналами LCAS. В результате виртуальный коридор расширяется до уровня VC-4-5v, что соответствует 750 Мбит/с.

Таким образом, LCAS представляет собой систему сигнализации, направленную на осуществление автоматической коммутации на уровне контейнеров. Какие же преимущества дает эта система сигнализации по сравнению с механизмами, действующими в классической SDH. Действительно, используя механизмы классической SDH и VCAT, можно реализовать функции, подобные LCAS. Например, под управлением центра NMS можно прописать новый маршрут между узлами №№3,4 рис. 5.20. Изменив установки VCAT самих оконечных мультиплексоров, NMS также расширит коридор. Но в этом случае коридор расширится скачкообразно, т. к. NMS должен перезагрузить установки VCAT заданного коридора, связь может быть потеряна. LCAS предусматривает более мягкую процедуру расширения коридора, поэтому соединение между пользователями NGSDH не подвергается негативным воздействиям.

Еще одно преимущество LCAS заключается в разделении процесса управления шириной коридора между NMSи мультиплексорами NGSDH. Обмен сигнализацией осуществляется самими MBB NGSDH, а команду на установку изменения коридора дает NMS. Разделение функций позволяет снять избыточную нагрузку с NMS. Это особенно важно в случае, разветвленной транспортной сети с несколькими тысячами виртуальных коридоров, большая часть из которых постоянно меняется. В этом случае для NMS вполне достаточно будет функций управления и планирования общим ресурсом всей транспортной сети. Система управления может не справиться с объемом работы, если будет управлять каждым расширением и установками каждого мультиплексора. В этом случае LCAS оказывается жизненно необходимой технологией для обеспечения разумного компромисса между централизованными и распределенными средствами управления сетью.

Важно также обратить внимание, что LCAS является разумным дополнением к VCAT. Без VCAT сама процедура LCAS не имеет смысла. Одновременно, LCAS никак не зависит от использования GFP, поскольку эти подсистемы выполняют разные функции в NGSDH.

5.2.7. Современная модель NGSDH.

Рассмотрев все основные направления развития NGSDH, обобщим перечисленное на примере современной модели работы NGSDH, представленной на рис. 5.21.

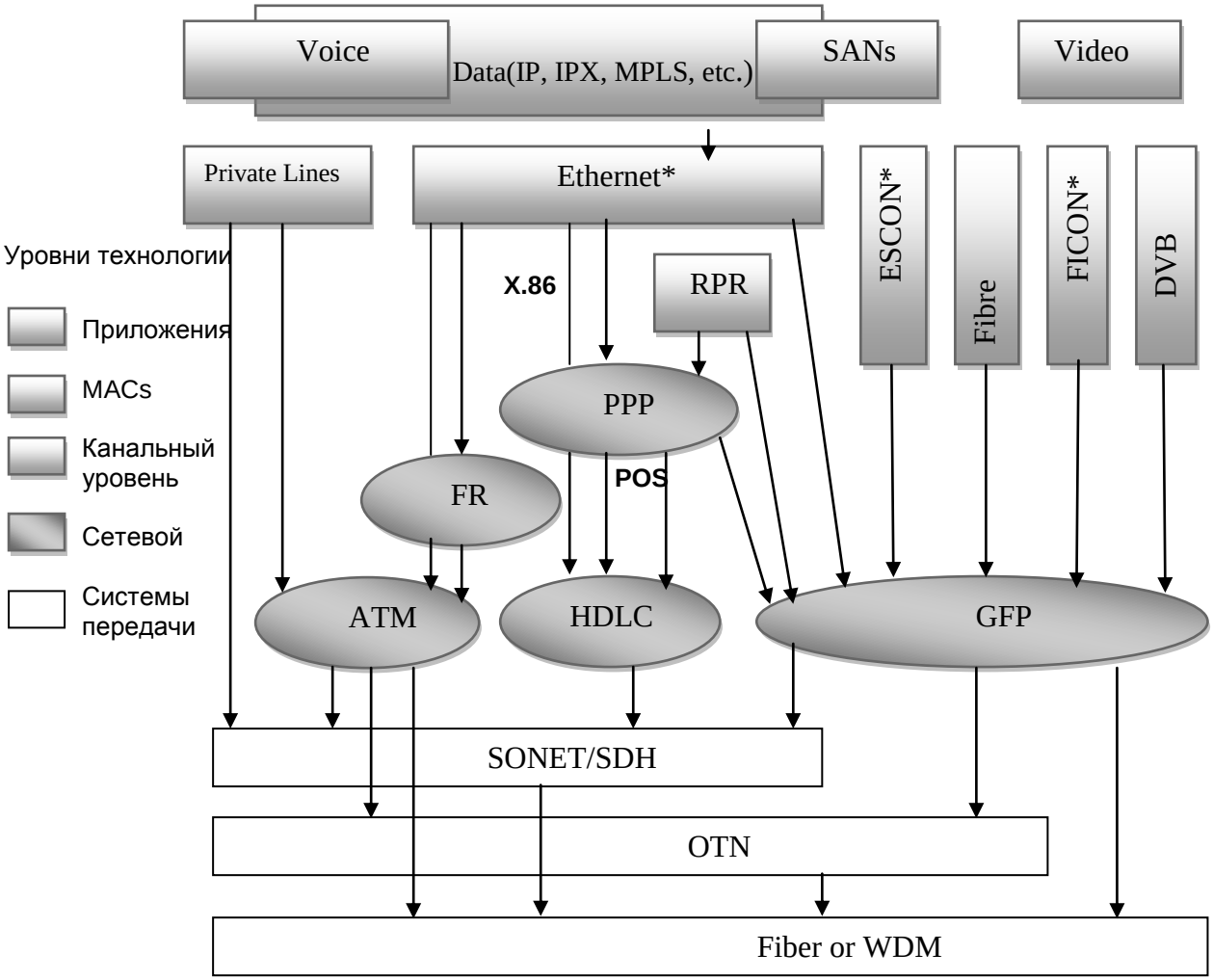


Рис. 5.21. Современная модель NGSDH.

Как уже отмечалось, основными требованиями к транспортным сетям NGN является передача разнородного трафика. На рис. 5.21 в качестве источников такого трафика представлены технологии ESCON, Fibre Channel, FICON, DVB, Ethernet, RPR, а также арендованные каналы (Private Lines). Все перечисленные технологии взаимодействуют с NGSDH на канальном уровне или на уровне MAC, что эквивалентно в сетях NGN канальному уровню. Перечисленные технологии передают трафик от различных приложений (передача голоса, передача данных в форматах IP, IPX, MPLS и пр., передача видео, а также данных от систем хранения информации SAN).

Для указанных приложений система NGSDH должна сформировать каналы взаимодействия фиксированной или переменной пропускной способности. Таким образом, в модели NGSDH ей отводятся функции сетевого уровня.

В самом низу модели находится уровень систем передачи. На физическом уровне это может быть просто ВОЛС или ВОЛС, расширенная за счет использования технологии WDM. На уровне систем передачи это могут быть системы классической SDH или оптические системы передачи OTN. Допускаются также и комбинированные системы передачи SDHoOTN.

Область решений сетевого уровня на рис. 5.21 наглядно демонстрирует поливариантность решений NGN. На рисунке представлены все рассмотренные ранее схемы построения NGSDH:

ATM → *Транспортный уровень*
FR → *ATM* → *Транспортный уровень*
PPP → *HDLC* → *Транспортный уровень (PoS)*
GFP → *Транспортный уровень*

Это означает, что в реальной практике действительно допустимо использование любой из перечисленных схем NGSDH, разные схемы сосуществуют в рамках единой поливариантной модели NGN. Но, наибольшую эффективность использования ресурса системы передачи в настоящее время имеет объединенное решение

VCAT ⟺ LCAS ⟺ GFP

В этой триаде каждый компонент выполняет свою роль:

- VCAT позволяет повысить эффективность использования ресурса системы передачи
- GFP эффективно адаптирует пакетный трафик к загрузке в системы SDH
- LCAS добавляет гибкости и позволяет повысить динамику использования сети

Именно такую триаду можно считать современной моделью NGSDH, отбрасывая другие технологии как устаревшие. Таким образом, самая последняя версия архитектуры NGSDH представляется в виде рис. 5.22. Здесь схематично показана технологическая связь между трафиком Ethernet (а это 90% современного трафика передачи данных) и системой SDH. Трафик Ethernet проходит преобразование в кадры GFP и затем методом VCAT загружается в сеть SDH. Подсистема LCAS является только дополнением VCAT, так что на схеме сегмент LCAS составляет только часть поля сегмента VCAS.

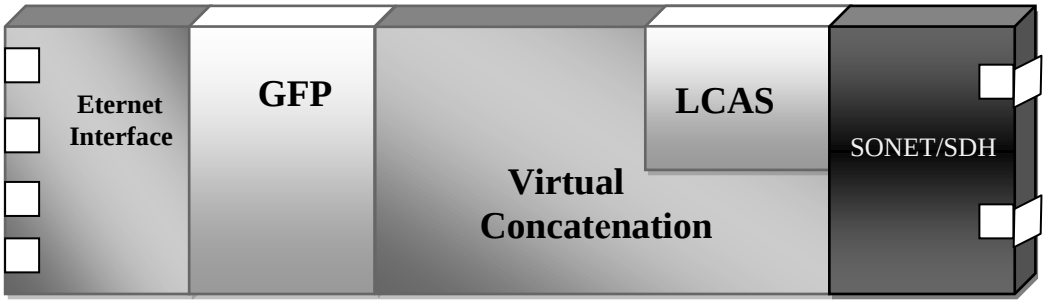


Рис. 5.22. Архитектурная модель NGSDH для EoS.

5.3. Структура протокола GFP.

GFP является самым громоздким изменением, внесенным пакетным трафиком в сети SDH. Основным назначением GFP является линеаризация пакетного трафика, т. е. преобразование неравномерности трафика в форму, удобную для загрузки и передачи по сети SDH.

Универсального решения задачи объединения совершенно разнородных сетей нет, и, скорее всего такое решение невозможно. Поэтому в разное время придумывались более или менее эффективные частные решения для различных задач. GFP – всего лишь одно из таких решений, разработанное под специфику транспортных сетей SDH/OTN. И чем более разработчики GFP стремились достичь эффективности этого протокола, тем более громоздким вышло окончательное решение. Поэтому сложная и громоздкая архитектура GFP это плата за эффективность его работы. Здесь мы рассмотрим лишь основные принципы GFP. Полное его описание приводится в рек. ITU-T G.7041/Y.1303.

5.3.1. Общие основы GFP.

Итак, GFP (General Framing Protocol) должен обеспечить линеаризацию (или выравнивание) пакетного трафика для последующего удобства загрузки его в транспортную сеть NGSDH, ориентированную на коммутацию каналов. Какой же трафик нужно линеаризовать при помощи GFP? Оказалось, что целесообразно разделить весь трафик современных пакетных сетей на протокол-ориентированный трафик (PDU-based) и блок-ориентированный трафик (block-code oriented).

Для трафика PDU (Protocol Data Unit) характерна высокая неравномерность скорости передаваемой информации. К этому относится трафик любых сетей передачи данных, использующих для обмена протоколы. Например, к классу трафика PDU относится трафик IP, PPP/IP, Ethernet, Frame Relay и пр. Блок-ориентированный трафик представляет собой пакетный трафик в виде блоков, который передается с постоянной скоростью. Обычно это трафик от систем хранения информации (SAN – Storage Area Networks). К этой группе относится трафик от сетей Fibre Channel или ESCON/SBCON.

Можно сразу отметить, что основной проблемой в GFP является выравнивание трафика PDU, поскольку блок-ориентированный трафик передается с постоянной скоростью и поэтому мало отличается от трафика TDM классической SDH. GFP (рис. 5.22) представляет собой прослойку между пакетными сетями IP, Ethernet и др. и NGSDH. Удобно разделить ее на два слоя (рис. 5.23).

<table>
<tr><td>Ethernet</td><td>IP/PPP</td><td>Другие протоколы</td></tr>
<tr><td colspan="3">GFP – Параметры, зависящие от клиента
(Зависят от нагрузки)</td></tr>
<tr><td colspan="3">GFP – Параметры, зависящие от клиента
(Зависят от нагрузки)</td></tr>
<tr><td>SDH VC-n</td><td>Другие технологии</td><td>OTN ODUk</td></tr>
</table>

Рис. 5.22. Разделение протокола GFP на два слоя.

Слой, который ближе к системам NGSDH, можно рассматривать как универсальную часть GFP, которая не зависит от специфики передаваемой нагрузки. Этот слой будем называть основные параметры GFP. Наоборот, слой, который ближе к разнородным сетям передачи данных, должен позволять индивидуальную адаптацию к специфике того или иного протокола. Этот слой будем считать клиент-ориентированным в том смысле, что клиентами NGSDH выступают сети передачи данных с разнородным трафиком.

Таким образом, в такую модель включены все вопросы преобразования пакетного трафика и загрузки его из сети передачи данных внутрь протокола GFP. Но сам алгоритм GFP оказывается неоднородным. Сначала пакетный трафик преобразуется в соответствии со спецификой отдельных сетей передачи данных и их протоколов, тем самым трафик унифицируется. Затем унифицированный на верхнем уровне модели трафик преобразуется в соответствии с общими принципами и алгоритмами GFP. Этот двухшаговый алгоритм обработки трафика нашел отражение в определении задач GFP по рек. ITU-T G.7041, где указано на две категории задач, выполняемых этим протоколом:

- Определение формата данных при их загрузке в GFP/NGSDH
- Определение процедур загрузки и передачи сигналов GFP

Легко догадаться, что первая задача связана со спецификой трафика, тогда как вторая соответствует унифицированным алгоритмам работы GFP.

Для того, чтобы окончательно определиться со структурой GFP, разделим весь протокол на три части:

- Общую часть протокола, соответствующую нижнему уровню модели на рис. 5.22, будем называть подсистемой GFP-C (в рек. G.7041 нет отдельного выделения уровня GFP-C, но там используется эквивалентное понятие «Общий уровень протокола»)
- Часть протокола, связанную с передачей трафика PDU, отнесем к системе сигнализации GFP-F (Frame-Mapped GFP)
- Часть протокола для передачи блок-ориентированного трафика назовем GFP-T (Transparent GFP)

В результате модель рис. 5.22 несколько видоизменится и преобразуется в более простую модель протокола GFP (рис. 5.23).

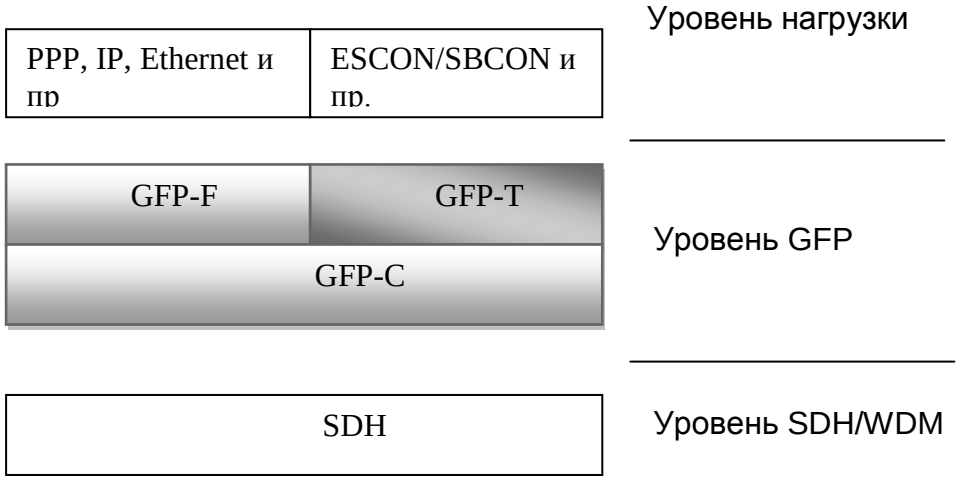


Рис. 5.23. Структура протокола GFP.

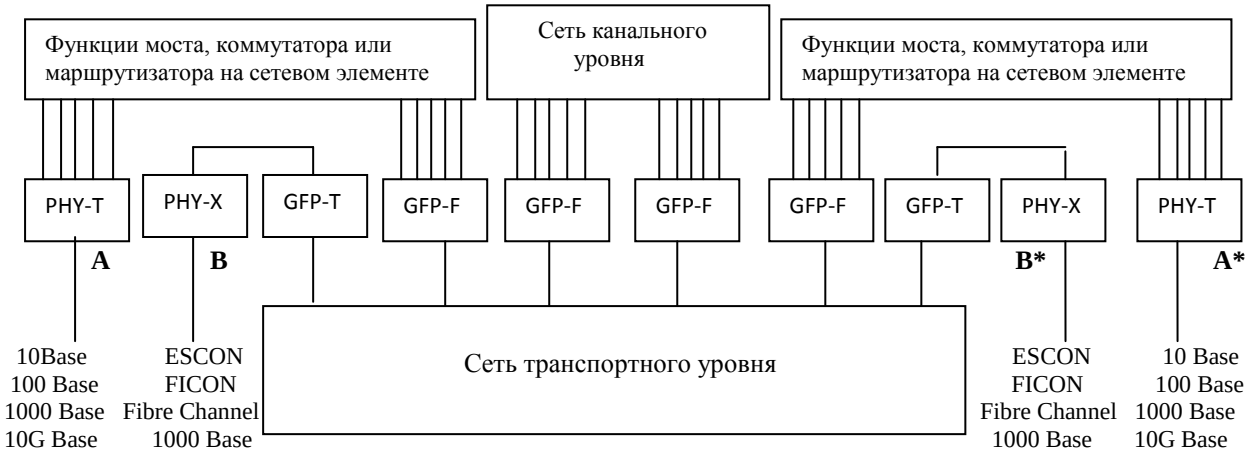


Рис. 5.23. Модель взаимных связей в системе NGSDH.

В соответствии с таким делением уровней протокола GFP была разработана модель связей в системе NGSDH(рис. 5.24). На рисунке схематично показано несколько пар возможных соединений в системе NGSDH. Например, связь по линии A – A* представляет собой связь двух устройств PDU (например,

пользователей Ethernet) через сеть NGSDH. Пользователи взаимодействуют по интерфейсам 10/100/1000 Base-T с сетевым элементом (мультиплексором МВВ сети NGSDH, который выполняет преобразование Ethernet/GFP-F. Затем кадры GFP-F передаются по сети NGSDH (связь C – C*) и там преобразуются сетевым элементом в интерфейс 10/100/1000 Base-T в точке A*. Аналогично на рисунке представлена связь между двумя сетями SAN по линии B – B*.

Теперь от рассмотрения общих принципов работы GFP перейдем к детальному рассмотрению работы разных уровней этого протокола.

5.3.2. Подсистема GFP-C.

Подсистема GFP-C является частью протокола GFP, которая не зависит от типа передаваемой нагрузки. В GFP-C предполагается существование двух типов кадров:

- Клиентские кадры GFP, передающие полезную нагрузку
- Кадры управления GFP

Основная информация протокола GFP передается в клиентских кадрах, Поэтому именно они имеют довольно сложную архитектуру. Кадры управления намного проще.

Структура клиентского кадра GFP-C.

Структура клиентского кадра представлена на рис. 5.24. Как и все поля в технологии SDH, клиентские кадры GFP-C имеют байтовую архитектуру, т. е. все поля кадра кратны 8 битам и представлены в виде одной строчки на рисунке.

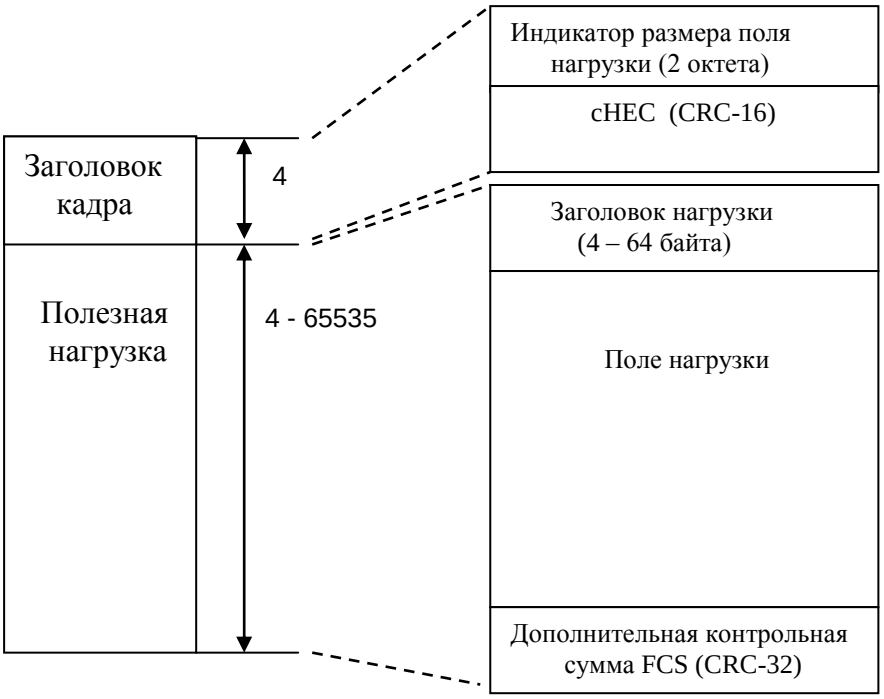


Рис. 5.24. Структура клиентского кадра GFP-C.

Клиентский кадр GFP-C состоит из поля заголовка и поля полезной нагрузки. Размер поля заголовка составляет 4 байта (октета), два из которых отводятся под индикатор поля нагрузки PLI (Payload Length Indicator), а два – под контрольную сумму CRC-16 в заголовке cHEC. В зависимости от типа поле полезной нагрузки имеет переменный размер от 4 до 65535 октетов. Как показано на рис. 4.24 в состав поля полезной нагрузки входят заголовок нагрузки (от 4 до 64 байтов), непосредственно поле нагрузки и контрольная сумма FCS размером 4 байта, необходимая для контроля ошибок с использованием CRC-32. Рекомендацией ITU-T G.7041 поле FCS считается дополнительным, оно может и отсутствовать.

Для обеспечения целостности всего клиентского кадра GFP-C особое внимание в протоколе отводится заголовку кадра. Очевидно, что возникновение ошибки в поле PLI приведет к неправильному считыванию всего кадра GFP. Поэтому для контроля ошибок в заголовке кадра используется не просто алгоритм CRC-16, а его модификация cHEC. Технология HEC была разработана под приложения ATM, и с тех пор применяется в различных телекоммуникационных системах, где важна достоверность передаваемых данных. Суть HEC состоит в том, что этот алгоритм обеспечивает не просто идентификацию блоковой ошибки, как CRC, но также позволяет корректировать возникновение единичной битовой ошибки. В случае появления более чем одной ошибки HEC идентифицирует многобитовую ошибку. Можно рассматривать HEC как помехоустойчивое кодирование, применяемое в современных системах передачи. Описание алгоритма HEC приведено в рек. ITU-T V.41. Следует отметить, что использование HEC позволяет корректировать возможные ошибки в поле PLI, поэтому можно гарантировать сохранность всего кадра GFP-C.

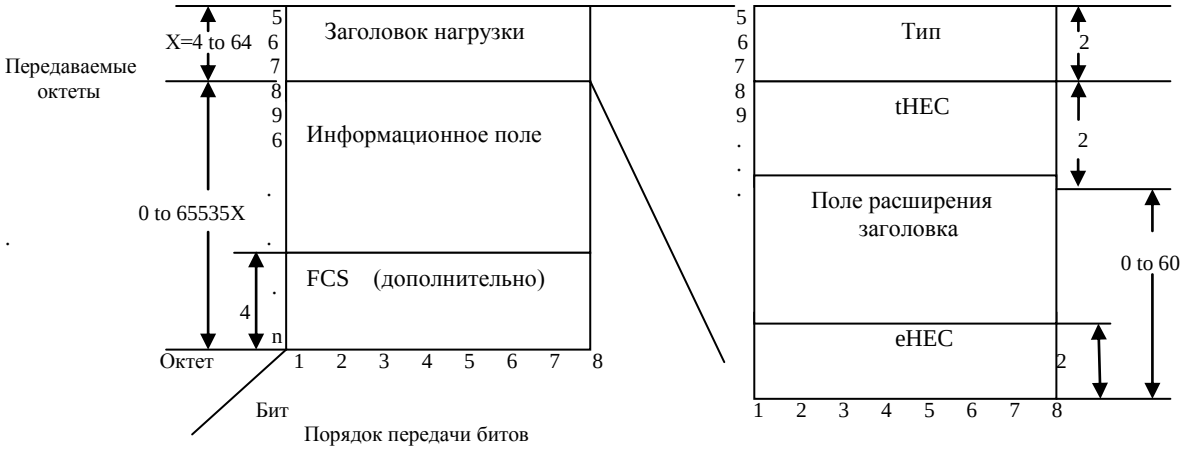


Рис. 5.25. Структура поля полезной нагрузки.

Рассмотрим теперь поле полезной нагрузки клиентского кадра (рис. 5.25). Оно имеет переменный размер, варьируемый в очень широких пределах. Большой размер поля полезной нагрузки определяется тем, что существуют

приложения, требующие передачи кадров большого размера, например, дейтаграмм IP и кадров Ethernet. Влияние этих двух технологий потребовало, чтобы поле полезной нагрузки было как минимум 1600 байт. С запасом на перспективу стандарт предполагает размер поля полезной нагрузки до 65535 байт, что превосходит все современные и перспективные требования по передаче данных. Нижний предел поля полезной нагрузки определяется размером заголовка полезной нагрузки – 4 байта. В этом случае, если мы имеем «пустой» GFP кадр, поле полезной нагрузки будет состоять только из заголовка.

На рис. 5.25 детально рассмотрена структура заголовка. Заголовок полезной нагрузки, также как и заголовок кадра GFP, является составным и использует поля HEC. Его размер может быть переменным – от 4 до 64 октетов. Минимальный заголовок нагрузки состоит из двух обязательных полей по 2 октета: поле типа нагрузки (поле Type) и поле контроля и корректировки ошибок (типа HEC). Остальные поля заголовка нагрузки (до 60 октетов) являются дополнительными и могут не присутствовать в составе заголовка. Эта часть заголовка получила название поля расширения заголовка (Extension Header). Поле расширения представляет собой довольно большой массив информации, который определяется назначением поля расширения. Для передачи разнородной нагрузки NGN нужно передавать большой объем дополнительных данных, связанных с этой нагрузкой, например, идентификаторы виртуальных каналов, адреса передатчика и приемника, номер порта, класс обслуживания, дополнительные сигналы о неисправностях и т. д. Именно для передачи такой информации и используется поле расширения. Поэтому само поле может иметь большой размер – до 60 октетов. Для контроля и корректировки ошибок в этой части поля заголовка используется все та же процедура HEC. Данные контрольной суммы передаются в 2-октетном поле eHEC.

Наличие или отсутствие поля расширения заголовка и его формат определяется в поле Type. В этом поле указывается также наличие или отсутствие контрольной суммы FCS у всего поля полезной нагрузки (рис. 5.25).

Рис. 5.26. Структура поля типа нагрузки (поля Type) для заголовка нагрузки GFP-C.

Рассмотрим сначала обязательные поля заголовка нагрузки, а именно поле Type. Структура этого двухоктетного поля представлена на рис. 5.26. Для удобства рассмотрения на рисунке показаны номера октетов с учетом всей нумерации кадра GFP-C, так что поле Type начинается с пятого октета. Но при этом для рассмотрения поля Type целесообразно перенумеровать 16 битов этого поля так, как показано на рисунке (от 0 до 15). Легко заметить, что нумерация

внутри поля и порядок передачи битов в системе NGSDH совершенно противоположен.

Как следует из рис. 5.26, в составе поля Type заголовка полезной нагрузки присутствуют 4 поля:

- Идентификатор типа нагрузки – PTI (Payload Type Identifier)
- Идентификатор наличия контрольной суммы FCS – PFI (Payload FCS Identifier)
- Идентификатор наличия поля расширения заголовка нагрузки – EXI (Extension Header Identifier)
- Идентификатор нагрузки - UPI (User Payload Identifier)

Рассмотрим кратко назначение указанных полей, поскольку они непосредственно представляют ценность для эксплуатации NGSDH.

Поле PTI состоит из 3 битов и определяет тип клиентского кадра GFP-C. Данные пользователя передаются со значением PTI=000, данные управления передаются со значением PTI=100, остальные значения зарезервированы за будущими изменениями технологии GFP. Таким образом, в настоящее время действуют два типа полезной нагрузки, определяемые полем PTI.

Поле PFI – это значение бита №12. Оно имеет единственное назначение: указать на присутствие поля FCS в составе поля нагрузки (рис. 5.24 – 5.25). Соответственно, PFI=1 означает, что FCS есть, а PFI=0 – что FCS отсутствует.

Поле EXI определяет статус поля расширения заголовка нагрузки. Само поле расширения является необязательным, поэтому в поле Type нужно определить статус этого поля. EXI имеет размер в 4 бита, что соответствует максимально 16 значениям. В настоящее время используется только три значения, так что возможны три варианта поля расширения:

- EXI=0000 означает, что поле расширения отсутствует. В рекомендации такой кадр называют кадром с нулевым расширением заголовка.
- EXI=0001 означает линейный заголовок кадра (Linear Frame). Это значение используется в случае, когда мы имеем дело с передачей информации по схеме «точка – точка», например, для передачи нагрузки PPP и т. п.
- EXI=0010 означает кольцевой заголовок кадра (Ring Frame). Такие заголовки расширения используются для передачи трафика от систем с кольцевой топологией (типа Token Ring, FDDI, RPR и пр.).

Поле UPI представляет собой поле из 8 битов, которые определяют тип передаваемой нагрузки. Это поле не имеет конкретных значений, и его интерпретация зависит от значения поля PTI. Для данных пользователя (PTI=000) поле UPI имеет свои значения, для кадров управления (PTI=001) – свои. Таким образом, рассмотрение UPI можно производить только вместе с PTI.

Итак, все перечисленные 4 поля полностью определяют тип передаваемой нагрузки. Можно определенно говорить, что каждому типу GFP-кадра

соответствует определенная маркировка (PTI, PFI, EXI, UPI). Эта маркировка едина для всех клиентских GFP-кадров и, как мы увидим, значительно облегчает понимание процессов передачи данных в GFP.

Рассмотрим теперь, как работают разные типы маркировок. В качестве примера на рис. 5.27 представлены два типа кадров, часто используемых в сетях NGSDH. Слева на рисунке представлен вариант кадров с нулевым полем расширения, что соответствует маркировке PTI, PFI, 0000, UPI (EXI=0000). Как видно из рисунка, в этом случае поле заголовка представляет собой минимально возможное поле в 4 октета: два поля Type и два поля tHEC.

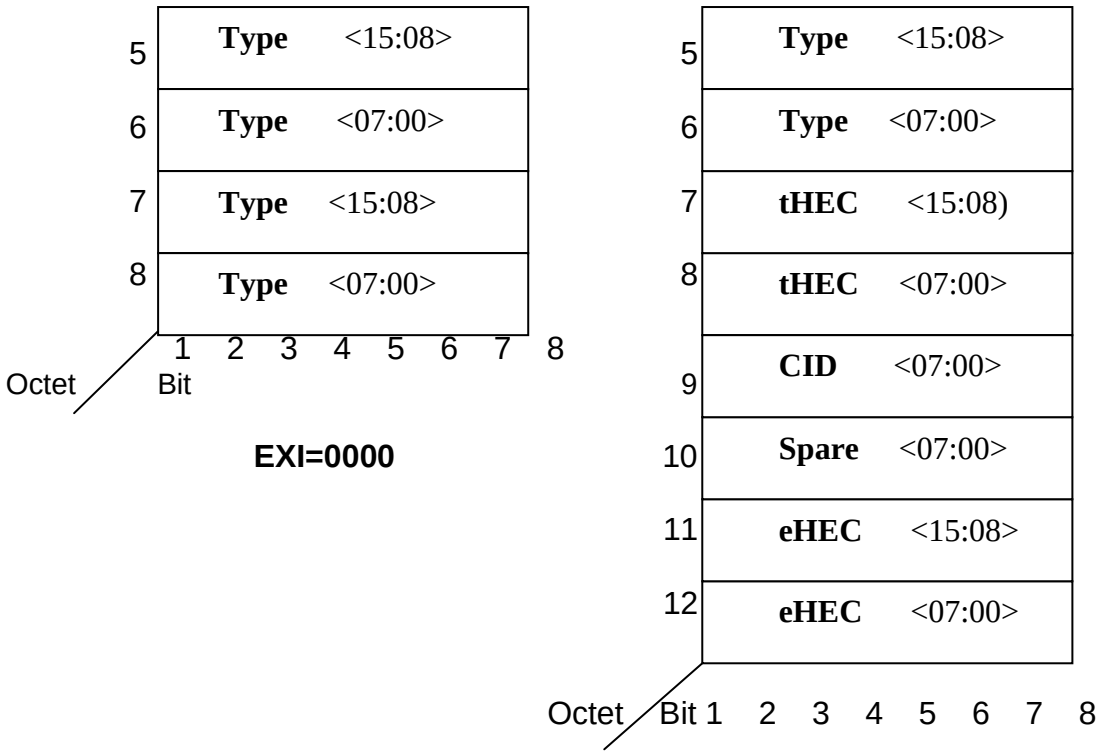


Рис. 5.27. Два наиболее распространенных варианта заголовков нагрузки: без поля расширения и с линейным полем расширения.

Справа на рисунке показано поле с линейным заголовком расширения PTI, PFI, 0001, UPI (EXI=0001). Представлена ситуация, когда в точке мультиплексирования GFP имеются несколько независимых каналов, которые должны быть объединены в один транспортный маршрут. Как видно из рисунка, поле заголовка в этом случае имеет размер в 8 октетов:

- Два октета для поля Type
- Два октета для поля tHEC
- Один октет для поля идентификации канала CID (Channel ID)

- Два октета eHEC для контроля и коррекции ошибок в поле расширения

Рассмотрим теперь различные значения поля UPI в зависимости от типа поля PTI. Для передачи нагрузки пользователя (PTI=000) существует несколько разных значений UPI, определяющих тип передаваемой нагрузки (табл. 4.5). Как следует из таблицы, поле UPI соотносится с форматами кадров GFP-F и GFP-T и определяет тип передаваемой нагрузки. Например, передача через сеть NGSDH данных Ethernet должна иметь маркировку PTI, PFI, EXI, UPI (000, PFI, 0001, 0000 0001) т. е. иметь значения полей PTI=000, EXI=0001, и UPI=0000 0001. Этот пример иллюстрирует, как маркировка (PTI, PXI, EXI, UPI) определяет в протоколе GFP-C специфику передаваемого по сети NGSDH трафика.

Таблица 5.5. Значения поля UPI в случае передачи нагрузки пользователя (PTI=000).

PTI = 000	
Значение UPI <биты7:0>	**Передаваемая нагрузка**
0000 0000 и 1111 1111	Зарезервировано и не может использоваться
0000 0001	Ethernet (GFP-F)
0000 0001	PPP (GFP-F)
0000 0010	Fiber Channel (GFP-T)
0000 0011	FICON (GFP-T)
0000 0100	ESCON (GFP-T)
0000 0101	Gb Ethernet (GFP-T)
0000 0111	Зарезервировано for future
0000 1000	Multiple Access Protocol over SDH (MAPOS) (GFP-F)
От 0000 1001 до 1110 1111	Зарезервировано для будущей стандартизации
От 1111 0000 до 1111 1110	Зарезервировано для использования производителем оборудования

При передаче в поле нагрузки сигналов управления значение поля PTI=100. Следует отметить, что в данном случае речь идет не о кадрах управления протокола GFP-C, мы по-прежнему говорим о клиентских кадрах. Но и в этом случае в поле нагрузки может возникнуть необходимость передачи сигналов управления. Например, если возникнет необходимость передачи данных от каких-либо процессов на стороне клиента, которые требуют контроля связности канала и контроля стабильности сигнала синхронизации, то в самом протоколе GFP-C должна быть предусмотрена возможность передачи по сети NGSDH таких

сигналов сквозным образом. Именно этой цели и служат клиентские кадры управления со значением PTI=100. В случае таких кадров значение поля UPI отличается. Возможные их значения в современном стандарте показаны в табл. 5.6.

Таблица 5.6. Значения поля UPI при передаче кадров управления (PTI=100).

PTI = 100	
Значение UPI <биты 7:0>	**Передаваемая нагрузка**
0000 0000 и 1111 1111	Зарезервировано
0000 0001	Сигнал о неисправности LCS – Loss of Client Signal (Потеря сигнала от клиента)
0000 0010	Сигнал о неисправности LCSyn – Loss of Character Synchronization (Потеря синхронизации символов)
От 0000 0011 до 1111 1110	Зарезервировано для будущего использования

Теперь от рассмотрения клиентских кадров перейдем к рассмотрению кадров управления в протоколе GFP-C.

Кадры управления GFP-C.

В отличие от клиентских кадров GFP-C кадры управления в настоящее время находятся в стадии рассмотрения и согласования. Для протокола GFP-C основное назначение – это передача пакетного трафика по сети NGSDH, а вопросы управления и контроля процесса передачи являются второстепенными. По этой причине стандарт в части структуры кадров управления является весьма лаконичным. Однако, по мере развития и внедрения технологии GFP на транспортных сетях возникнет большее понимание, какие механизмы управления должны быть реализованы на уровне GFP, и тогда стандарт начнет развиваться. Пока же единственным стандартизованным кадром управления GFP-C является «пустой» кадр.

«Пустой» кадр по своей структуре соответствует рис. 5.24, но в нем есть только заголовок кадра в 4 октета, и нет полезной нагрузки. В технологии NGSDH пустые кадры используются для процедуры заполнения ресурса канала передачи, если ресурс оказывается больше размера, необходимого для передачи клиентского трафика. Тогда излишек ресурса канала передачи заполняется пустыми кадрами. Как видно из рис. 5.28, структура пустого кадра по тривиальности соответствует его назначению. Значение индикатора нагрузки PLI=0. Что означает, что полезная нагрузка в кадре отсутствует. Соответственно, поле cHEC также представляет собой два последовательных октета из нулей. Для будущего использования предлагается также под контрольные кадры GFP-C зарезервировать значения PLI=1, 2 и 3.

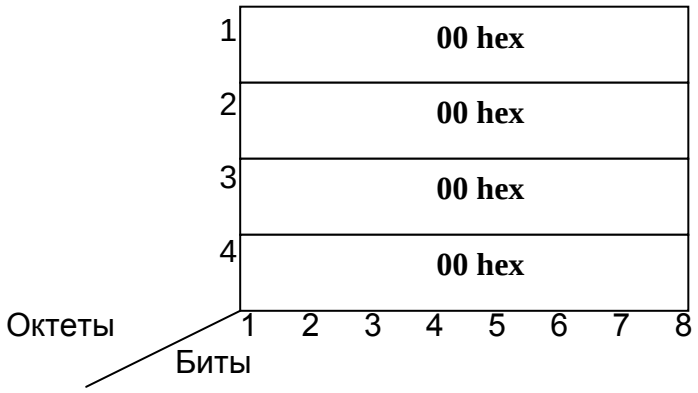


Рис. 5.28. Структура «пустого» кадра GFP-C.

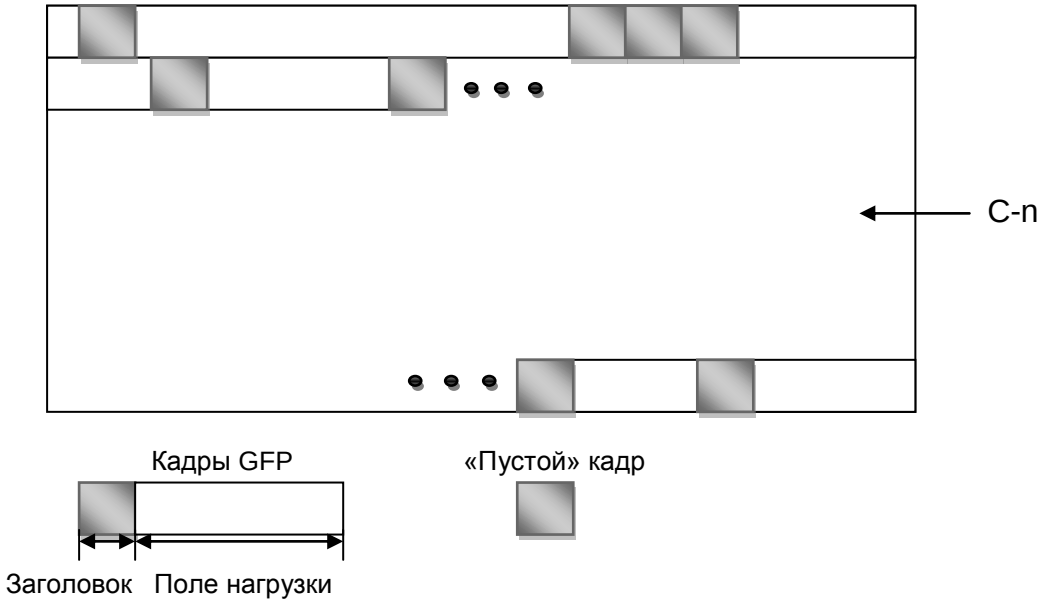


Рис. 5.29. Заполнение контейнера NGSDH кадрами GFP-C.

Применение пустых кадров позволяет добиться полного заполнения пространства виртуального контейнера NGSDH (рис. 5.29). Как показано на рисунке, в составе контейнера присутствуют и обычные кадры GFP-C, и пустые кадры, представляющие собой отдельные заголовки нулевого содержимого. Следует отметить, что под контейнером C-n в данном случае понимаются на только стандартные контейнеры классической SDH C-X, но также конкатенированные контейнеры C-X-Xc и виртуально конкатенированные контейнеры C-X-Xv.

Чтобы избежать путаницы, несомненно, присутствующей в стандарте GFP, сведем все приведенные ранее сведения воедино. Для этого на рис. 4.30 представлено дерево архитектуры GFP-C. При этом, важно сделать несколько выводов относительно основ GFP:

1. В протоколе GFP существует 5 важных для практики эксплуатации полей кадров PLI, PTI, PFI, EXI и UPI. Все эти пять полей несут важную информацию о составе кадров GFP и однозначно определяют тип передаваемого трафика. Поэтому значения этих полей сопоставимо со всеми известными полями классической SDH. Нужно только помнить их предназначение и местоположение в архитектуре GFP.

2. В протоколе GFP существует 4 поля контроля параметров ошибок: FCS, cHEC, tHEC и eHEC. Каждое из этих полей может быть использовано в дальнейшем для поиска и устранения ошибок в системе передачи на уровне GFP.

3. Протокол GFP добавляет два новых сигнала о неисправности уровня GFP, а именно LCS и LCSyn, которые присутствуют в клиентских кадрах. Эти два сигнала дополняют галерею сигналов о неисправности классической SDH и вносят первый вклад в многоуровневую систему контроля HGSDH.

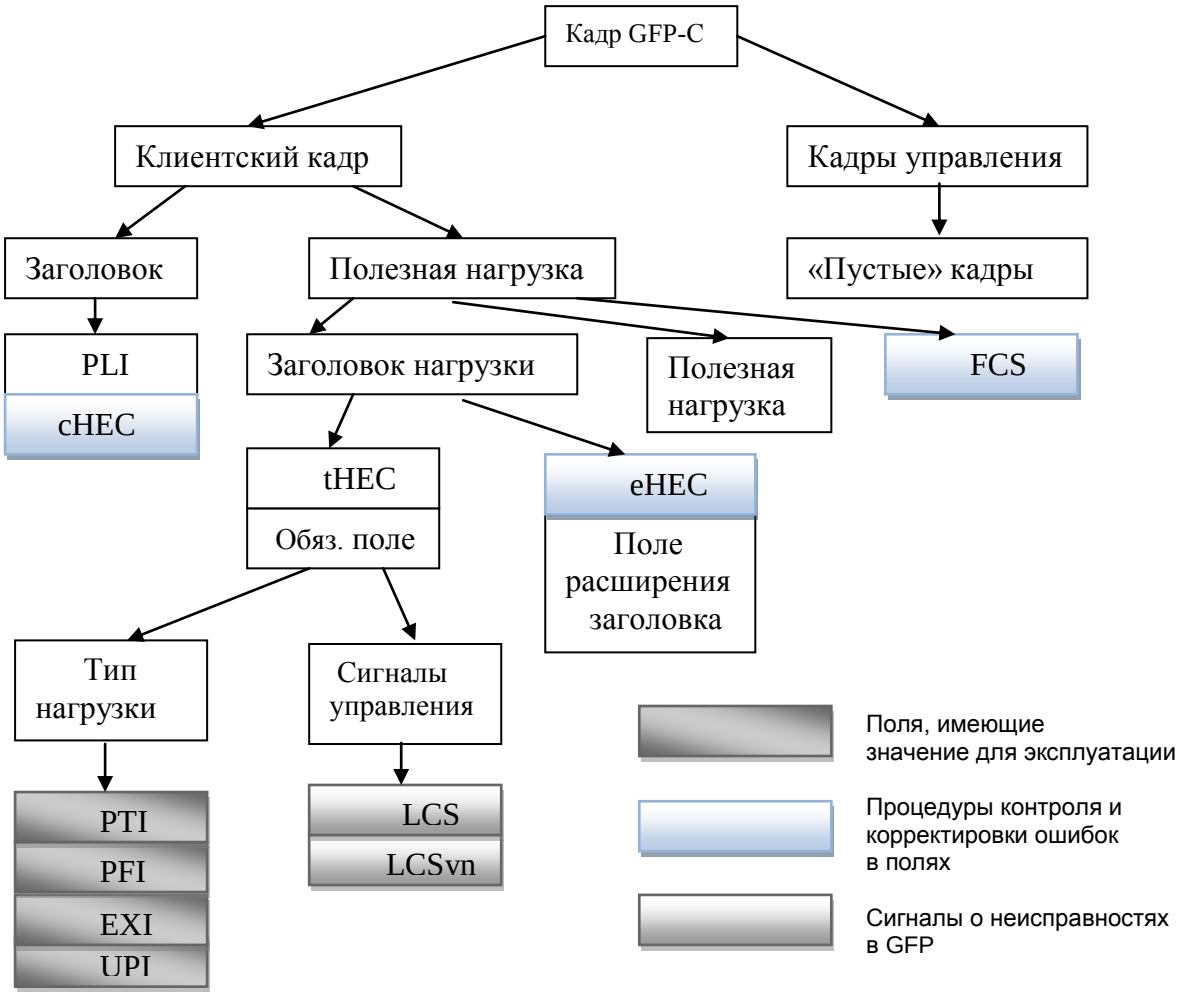


Рис. 5.30. Структура протокола GFP-C с указанием основных полей.

Как уже отмечалось, самое важное преимущество GFP перед его предшественниками состоит в максимальной адаптации к современному

состоянию сетей NGN и, в частности в максимальной адаптации ко всем видам современного пакетного трафика. В связи с этим в составе GFP было предложено разделение на два уровня протокола в зависимости от специфики передаваемого трафика. В результате GFP оказывается более адаптированным к текущим задачам и имеет большой ресурс на будущее.

Теперь перейдем к описанию подсистем GFP, связанных со спецификой передаваемой нагрузки.

5.3.3. Подсистема GFP-F.

Подсистема GFP-F представляет собой часть стандарта GFP, которая определяет правила передачи данных трафика PDU. Такой трафик преобладает на современных сетях России, достаточно сказать, что к этому классу трафика относятся Frame Relay, Ethernet, PPP/IP и др.

Подсистема GFP-F не представляет собой никакой новой системы сигнализации, она использует кадровую структуру GFP-C, но при этом имеет ряд установок маркировки PTI, PFI, EXI, UPI, соответствующих тому или иному типу трафика PDI. Поэтому даже в рек. ITU-T G.7041 описание подсистемы GFP-F представляет собой несколько иллюстраций принципов преобразования разных типов трафика в кадры GFP-F.

Преобразование Ethernet в GFP-F.

Иллюстрацию работы GFP-F начнем с наиболее распространенного типа трафика современных сетей передачи данных – трафика Ethernet (рис. 5.31).

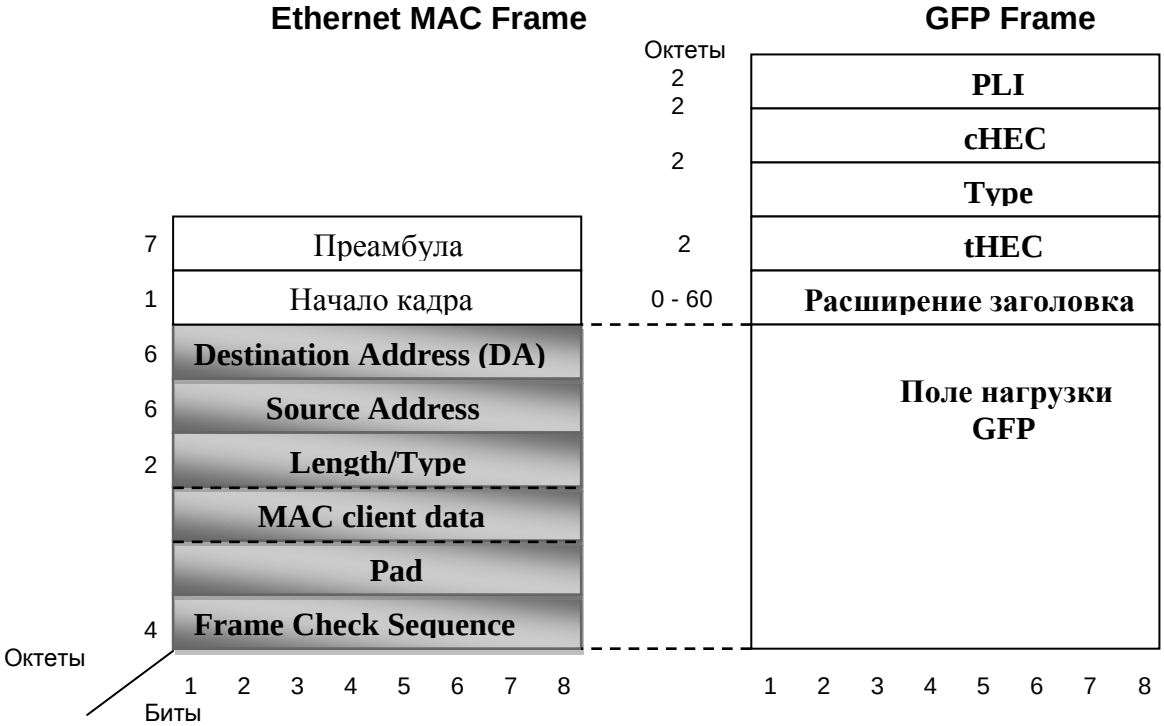


Рис. 5.31. Загрузка кадров Ethernet в кадры GFP-F.

На рисунке представлена структура кадра Ethernet, загружаемого в поле нагрузки кадра GFP-F. При загрузке кадра используется принцип «один к одному» и октетная загрузка информации в поле нагрузки. Кадр Ethernet загружается от поля адреса получателя (DA) до контрольной суммы FCS.

Отдельным вопросом преобразования Ethernet/GFP является вопрос о служебной информации Ethernet, а именно информации IPG (Inter-Packet Gap), т. е. информации заполнения между пакетами. Эта информация в GFP-F не загружается, поскольку механизм IPG, используемый для заполнения ресурса канала и выравнивания скоростей в технологии Ethernet меняется на механизм, принятый в GFP. В точке восстановления трафика Ethernet информация IPG тоже восстанавливается, но через сеть NGSDH данные IPG не передаются.

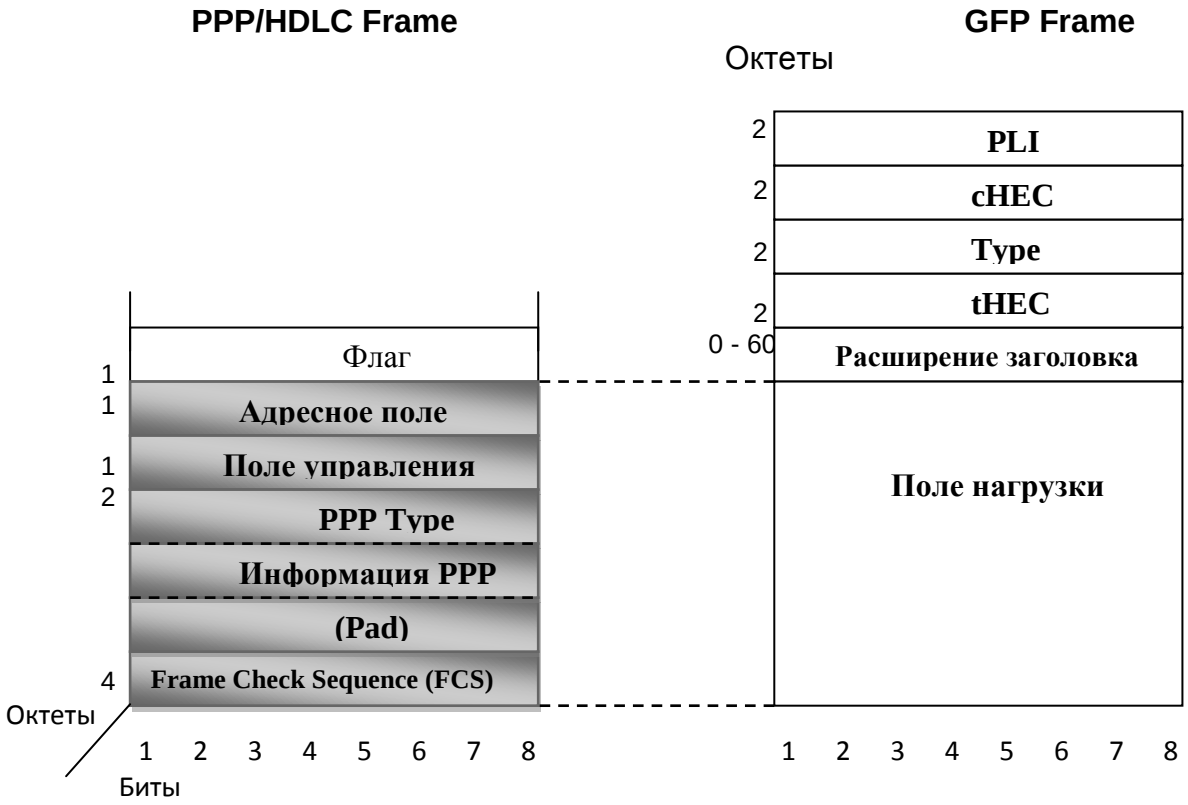


Рис. 5.32. Загрузка кадров PPP в кадры GFP-F.

Аналогично с технологией Ethernet происходит преобразование кадров PPP в кадры GFP-F (рис. 5.32). Загрузка выполняется по схеме «один к одному» в поле полезной нагрузки. Служебная информация PPP, к которой относятся флаги, в кадры GFP-F не загружается. При восстановлении на стороне приемника флаги восстанавливаются, равно как и принятый в PPP механизм выравнивания скоростей данных.

Третьим типом трафика, который может передаваться по сети NGSDH, является HDLC-ориентированный трафик. К этому типу трафика относится трафик сетей X.25/Frame Relay, который все еще встречается в мировой и отечественной

практике. Схема преобразования этого трафика в кадры GFP-F также очень проста и естественна (рис. 5.33). Как видно из рисунка, в этом случае все те же принципы «один к одному» по октетной загрузки, в результате весь кадр HDLC загружается в поле нагрузки кадра GFP-F.

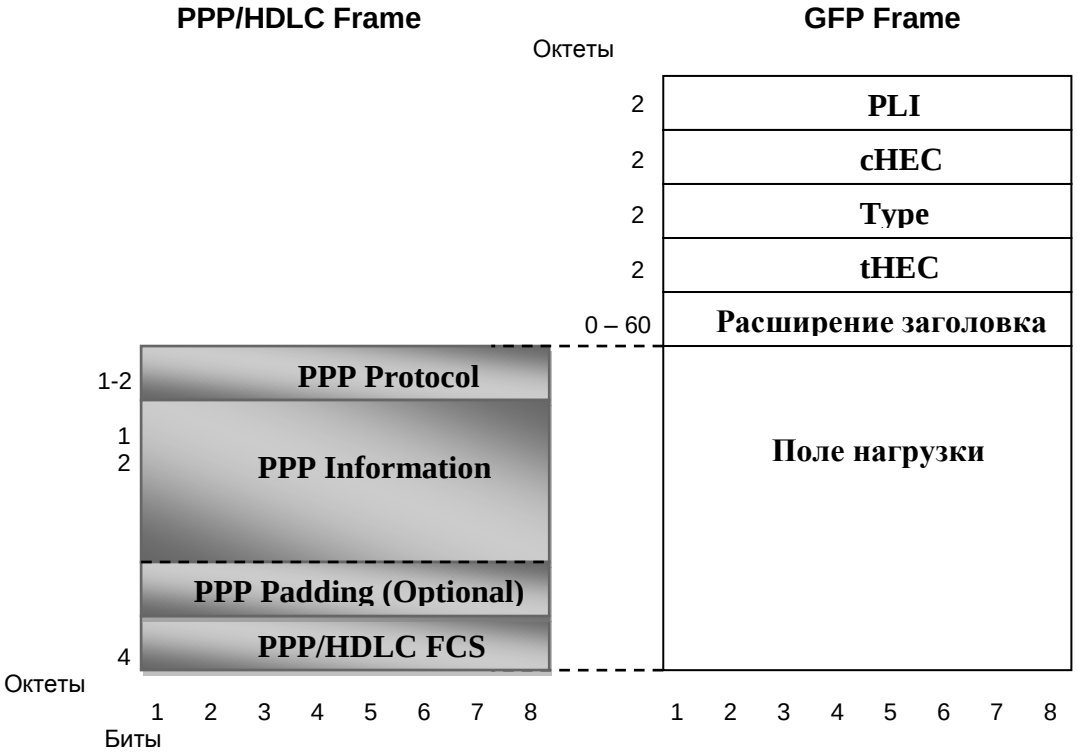


Рис. 5.33. Преобразование данных PPP/HDLC в кадры GFP-F.

Приведенные три иллюстрации показывают, что сами принципы, заложенные в протокол GFP, являются естественными и простыми. Единственную сложность для понимания этого протокола может составить общие принципы формирования кадров GFP-C, но и здесь GFP не представляется слишком сложным. Самая важная отличительная особенность GFP-F состоит в том, что взаимодействие GFP и протоколов передаваемого трафика сведено к минимуму. Никакие поля из протоколов IP, PPP, Ethernet или HDLC не преобразуются в поля GFP. В этом существенное отличие GFP от других протоколов взаимодействия и инкапсуляции. Кадры данных, передаваемые через сеть NGSDH, не подвергаются никаким сложным изменениям. Они не фрагментируются, не преобразуются, контрольные суммы не пересчитываются и т. д. Все это делает GFP-F максимально удобным и простым протоколом для выполнения его главной задачи: передачи данных PDU от одного пользователя к другому через сеть NGSDH.

5.3.4. Подсистема GFP-T.

Учитывая, что задача GFP-T состоит в передаче данных блок ориентированных технологий SAN по сети NGSDH, следует сразу сказать, что в современных отечественных сетях этот протокол встречается крайне редко.

Поэтому детально рассматривать структуры поля нагрузки кадров GFP-T мы не будем. Отметим только, что структура кадра GFP-T ничем принципиально от GFP-F не отличается. Отличие состоит только в формате поля нагрузки. С учетом довольно высокой сложности протоколов SAN, будь то Fiber Channel или ESCON, соответственно сложной будет и архитектура поля нагрузки GFP-T (рис. 5.34). Сам же процесс передачи данных является довольно простым, что и отражается в его названии (transparent – прозрачный). Как будет видно из дальнейшего, этот факт был использован для формирования решений по конвергенции сетей SDH и Gigabit Ethernet.

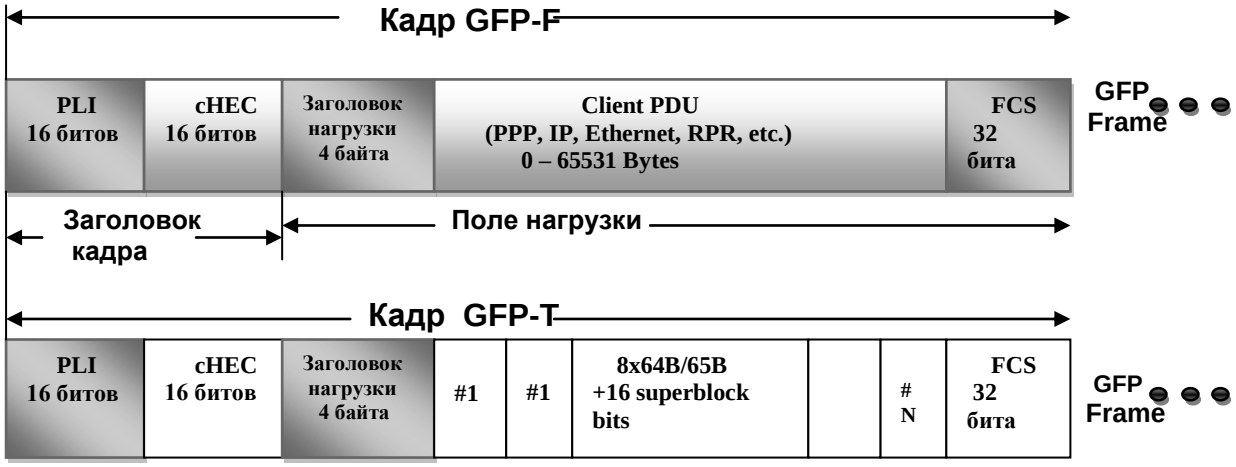


Рис. 5.34. Сравнение структуры GFP-F и GFP-T.

Подводя итог рассмотренному материалу, следует заметить, что GFP является протоколом, обеспечивающим преобразование данных различных типов трафика в кадры, удобные для загрузки в сеть NGSDH. Поэтому этот протокол можно считать интерфейсным между NGSDH и разнородными сетями передачи данных. GFP, как интерфейсный протокол может применяться также и для систем передачи OTN. Кроме того, простота и следующая отсюда перспективность GFP составят ему протекцию на будущее не только для сетей NGSDH второго поколения, но и для систем передачи следующих поколений.

5.4. Механизм работы систем VCAT.

5.4.1. Модель механизма VCAT.

Следующим после GFP уровнем современной модели NGSDH является уровень виртуальной конкатенации VCAT. На первый взгляд VCAT незначительно изменяет структуру классической SDH, т. к., в отличие от обычной конкатенации, VCAT минимально преобразует стандарты работы сети. В общем случае сеть вообще может не чувствовать VCAT, поскольку формирование виртуально конкатенированного контейнера и его восстановление происходит только на оконечных мультиплексорах, а по сети контейнеры передаются независимо, как самая обычная нагрузка SDH. Тем не менее, внутренняя механика VCAT важна и

для понимания самой сути преобразований контейнеров, и для будущего понимания возможностей эксплуатационных измерений и диагностики состояния NGSDH.

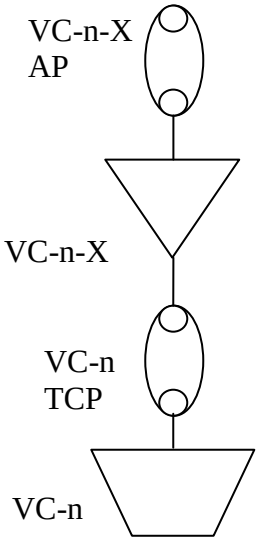


Рис. 5.35. Модель механизма VCAT.

Рассмотрим следующую простую модель процесса VCAT (рис. 5.35). В соответствии с приведенной моделью при формировании виртуально конкатенированного контейнера образуется совокупность из X независимых виртуальных контейнеров VC. Каждый из них понимается в VCAT как член виртуально конкатенированного контейнера. Совокупность всех VC формирует виртуально конкатенированную группу VCG, которая и представляет собой конкатенированный контейнер VC-n-X (где n означает уровень VC в группе, а X обозначает количество контейнеров). Механизм конкатенации описан в Рек. ITU-T G.707. В процедуру конкатенации могут быть вовлечены контейнеры всех уровней, включая VC-12, VC-2, VC-3 и VC-4. Лучше всего понимать механизмы VCAT на конкретных примерах, как это сделано в рек. G.707.

5.4.2. VCAT уровня VC-3/4.

На уровне HP процедура VCAT выполняется для контейнеров VC-3-Xv и VC-4-Xv. Рассмотрим ее на примере конкатенации VC-4-Xv (рис. 5.36), т. к. этот вариант имеет большую применяемость.

Сразу обратим внимание на логику процесса VCAT. В нем изначально предполагается передавать содержимое конкатенированного контейнера C-4-Xc, образованного обычной конкатенацией. Это означает, что мультиплексор, выполняющий процедуру VCAT, не просто рассовывает нагрузку по отдельным контейнерам, но делает это в два приема. Вначале формируется конкатенированный контейнер размера X*C-4, а потом уже он разбивается на VC-4. В этом заключается преемственность между обычной конкатенацией и VCAT.

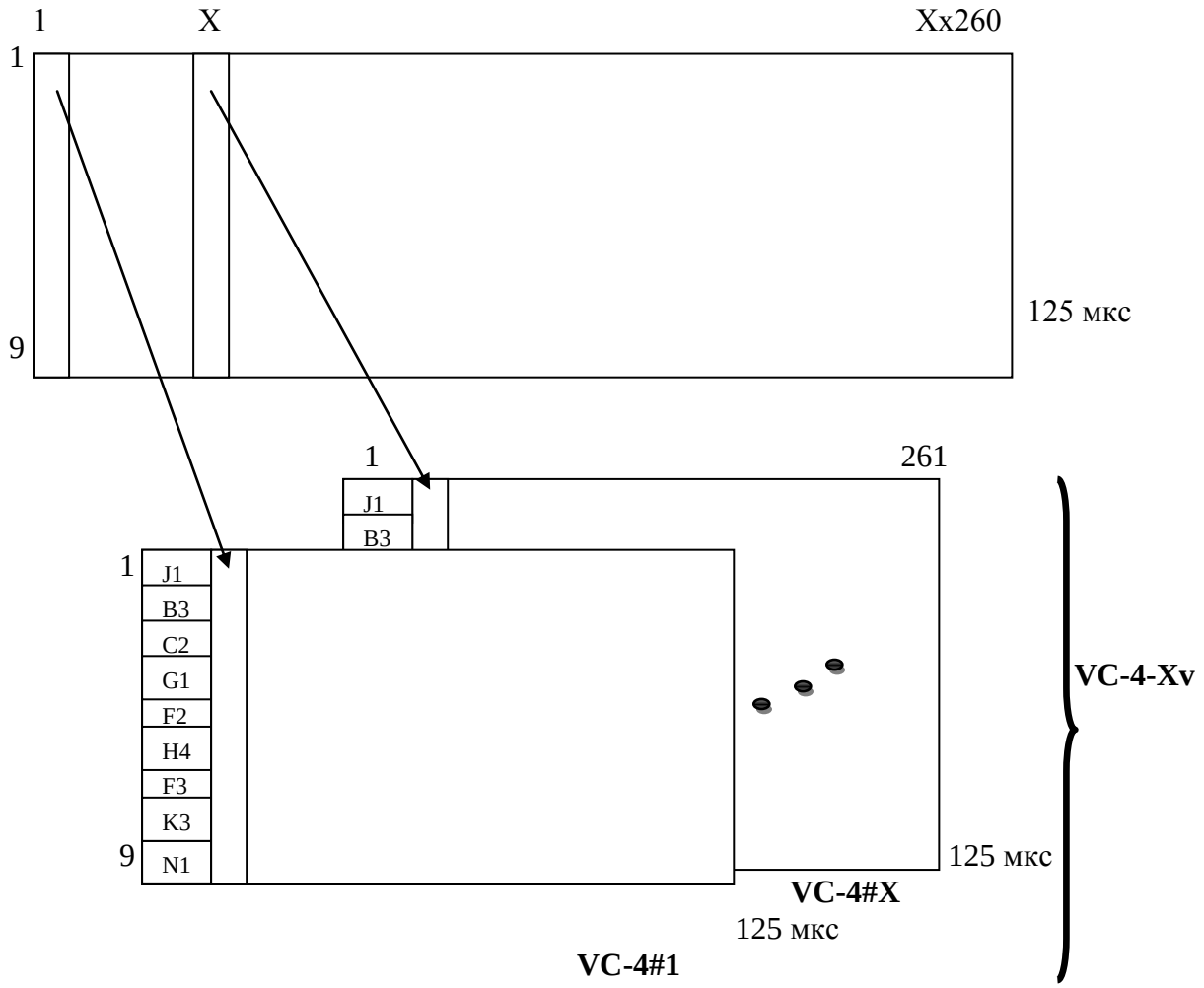


Рис. 5.36. Механика VCAT для VC-4-Xv.

Каждый контейнерVC-4, образованный в VCAT передается по сети NGSDH независимо как обычный виртуальный контейнер, все заголовки HP-POH этих контейнеров соответствуют стандартным. Единственное поле, в котором передается информация о том, что перед нами член VCG – это поле указателя H4 заголовка HP-POH. Именно указатель, изначально используемый для указания местоположения нагрузки, и должен по своему смыслу применяться для передачи данных VCAT.

VCG имеет свой порядок и свою цикловую структуру. Целью формирования последовательности членов в VCG и сверхцикла является необходимость компенсировать взаимные задержки, которые могут возникнуть при передаче разных VC-4 по сети NGSDH. Задержки могут возникать, поскольку каждый VC-4 передается по сети независимо от других по своему индивидуальному маршруту. Процедура VCAT должна компенсировать взаимные задержки вплоть до размера сверхцикла SDH, т. е 125 мкс.

Сверхцикл VCAT имеет размер 512 мсек и обозначается посредством двух индикаторов сверхцикла (табл. 4.7). В битах 5 – 8 поля H4 передается первый индикатор сверхцикла MFI1 (Multiframe Indicator). MFI1 имеет размер 4 бита и увеличивается с каждым новым циклом, принимая значение от 0 до 15. Второй индикатор сверхцикла MFI2 имеет размер 8 битов (т. е. принимает значения от 0 до 256) и передается в двух циклах: в цикле 0 (первые 4 бита, которые обозначаются как MSB) и в цикле 1 (вторые 4 бита, которые обозначаются как LSB). MFI2 увеличивается на единицу с каждым новым сверхциклом, а внутри сверхцикла MFI2 не меняет значение. В результате один полный сверхцикл VCAT обозначается как последовательность циклов SDH с последовательной сменой MFI2/MFI1. Общий его размер составляет 256(MFI2)x16(MFI1)=4096 циклов SDH или 512 мсек. Каждый цикл в последовательности сверхциклов кодируется парой номеров MFI2/MFI1, например пара (2,3) обозначает 4 цикл 3 сверхцикла.

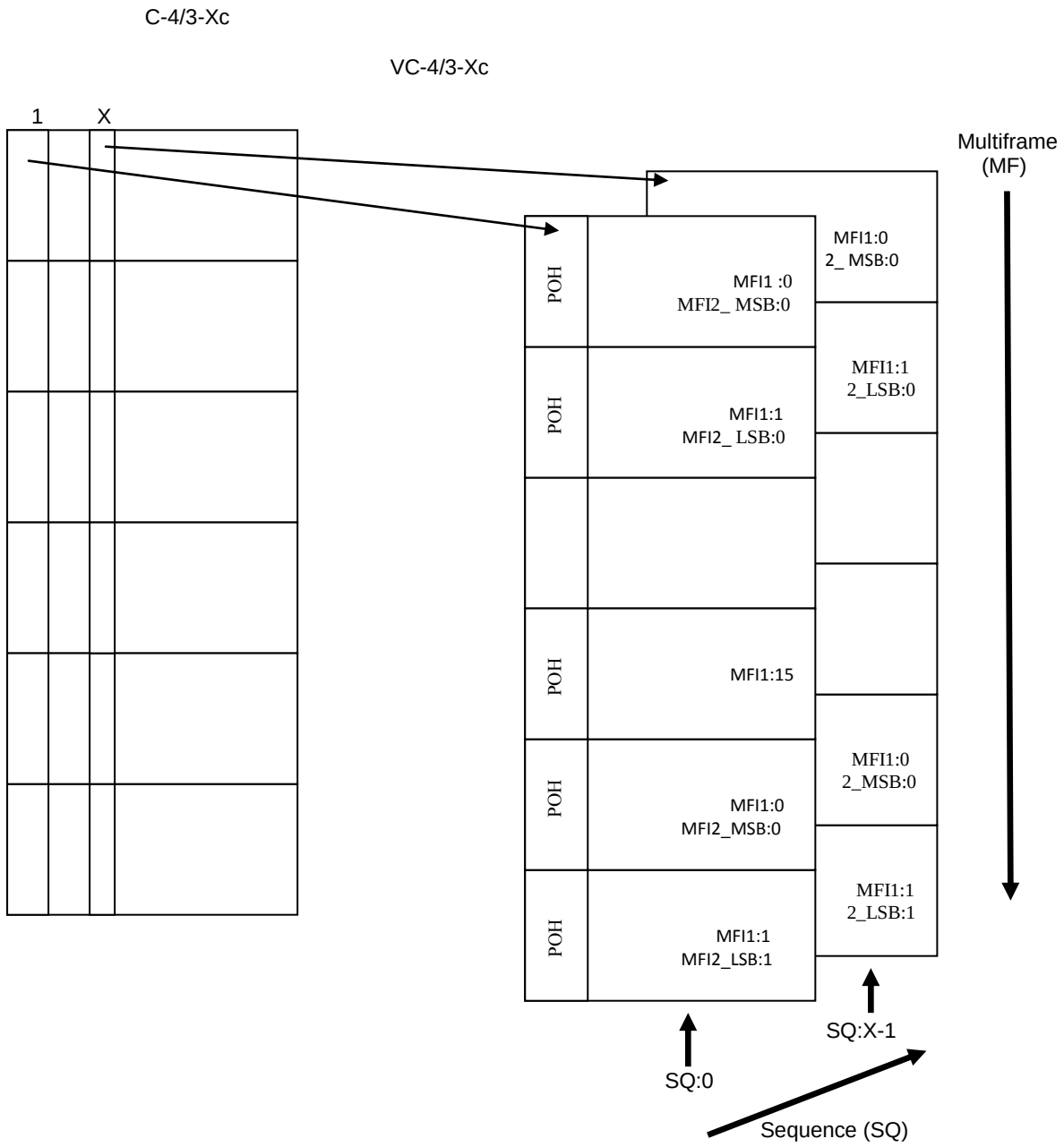


Рис. 5.37. Передача данных C-3/4c методом виртуальной конкатенации.

Вторым компонентом VCG является номер в последовательности SQ (Sequence Indicator). Это поле определяет порядок следования отдельных VC-3/4 в составе VC-3/4-Xv. Каждому виртуальному контейнеру VC-3/4 присваивается номер SQ от 0 до X-1. По номерам SQ осуществляется на дальнем конце объединение отдельных контейнеров в единый конкатенированный блок данных. Как показано на рис. 5.37, конкатенированный контейнер C-3/4c разделяется на отдельные канальные интервалы так, что первый канальный интервал передается в цикле SQ=0, второй – в цикле SQ=1 и т. д. В случае если конкатенированный контейнер имеет фиксированный размер, номера SQ присваиваются однажды и затем не меняются. В случае динамического изменения полосы пропускания потока VCAT номера SQ изменяются динамически.

Таблица 5.7. Значение битов H4 HP-POH в случае конкатенации VC-3/4-Xv.

Байт H4								**MFI1**	**MFI2**
Бит1	**Бит2**	**Бит3**	**Бит4**	**5**	**6**	**7**	**8**		
				MFI1 (Биты 1-4)					
Номер в последовательности SQ MSB (Биты 1-4)				1	1	1	0	14	n-1
Номер в последовательности SQ LSB (Биты 5-8)				1	1	1	1	15	
MFI2 MSB (Биты 1-4)				0	0	0	0	0	N
MFI2 LSB (Биты 5-8)				0	0	0	1	1	
Зарезервировано («0000»)				0	0	1	0	2	
Зарезервировано («0000»)				0	0	1	1	3	
Зарезервировано («0000»)				0	1	0	0	4	
Зарезервировано («0000»)				0	1	0	1	5	
Зарезервировано («0000»)				0	1	1	0	6	
Зарезервировано («0000»)				0	1	1	1	7	
Зарезервировано («0000»)				1	0	0	0	8	
Зарезервировано («0000»)				1	0	0	1	9	
Зарезервировано («0000»)				1	0	1	0	10	
Зарезервировано («0000»)				1	0	1	1	11	
Зарезервировано («0000»)				1	1	0	0	12	
Зарезервировано («0000»)				1	1	0	1	13	
Номер в последовательности SQ MSB (Биты 1-4)				1	1	1	0	14	
Номер в последовательности SQ LSB (Биты 5-8)				1	1	1	1	15	
MFI2 MSB (Биты 1-4)				0	0	0	0	0	n+1
MFI2 LSB (Биты 5-8)				0	0	0	1	1	
Зарезервировано («0000»)				0	0	1	0	2	

Номер SQ имеет размер 8 бит, т. е. принимает 256 значений. Передача номера осуществляется в поле H4 с использованием 14 цикла (первые 4 бита SQ MSB) и 15 цикла (вторые 4 бита SQ LSB) сверхцикла.

Нумерация циклов в рамках единого сверхцикла VCAT (табл. 4.7) делается с использованием двух индикаторов. Первичным является индикатор MFI2, который в таблице представлен номерами n-1, n, n+1. Тем самым показана последовательность сверхциклов по MFI2, которая передается в VCAT. Напомним, что номера MFI2 могут иметь значения от 0 до 255. Передача информации конкатенированного потока делается по последовательности MFI2=0 MFI2=1 → MFI2=3 →…MFI2=255 → MFI2=0…, которая и образует единый сверхцикл VCAT. В табл. 5.7 выбрана часть этой последовательности с MFI2 =(n-1), n, (n+1). При этом детально показаны поля сверхцикла MFI2=n, а MFI2=n-1 и n+1приведены в качестве иллюстрации периодичности данных VCAT.

Рассмотрим детально сверхцикл MFI2=n. Он состоит из 16 циклов MFI1 от 0 до 15. Именно эти значения приведены в столбце MFI1. В соответствующих столбцах показаны значения номера MFI1, которые передаются в битах 5-8 байта H4 в каждом цикле. Левое поле H4, отведенное битам 1-4 каждого цикла, используется в рамках VCAT для передачи MFI2(циклы 0 и 1) и SQ (циклы 14-15). Все остальные поля не используются VCAT и заполняются нулями. Следующий и предыдущий сверхциклы повторяют указанную информацию.

Такая структура позволяет поместить полную информацию о большом сверхцикле VCAT (MFI1, MFI2, SQ) в пространство информационного поля H4 POH. Далее эта информация передается по сети классической SDH и на дальнем конце восстанавливается в виде конкатенированного контейнера C-4-Xc. Расформировав этот контейнер, мультиплексор дальнего конца восстанавливает полезную нагрузку системы.

5.4.3. VCAT уровня VC-2/12.

Рассмотрим теперь механизм работы VCAT на нижнем уровне. Здесь в качестве иллюстрации рассмотрим наиболее часто встречающуюся схему VC-12-Xv (рис. 5.38). У этой схемы много общего с рассмотренной ранее схемой VC-4-Xv. Механика виртуальной конкатенации на нижнем уровне также разделяется на два шага. Вначале образуется конкатенированный контейнер C-12-Xc, сформированный с помощью обычной конкатенации. Затем этот контейнер разделяется на отдельные VC-12, которые передаются по сети NGSDH.

По-прежнему целью VCAT является решение двух задач:

- Компенсация возможных задержек при передаче индивидуальных контейнеров VC-12
- Формирование последовательности VC-12 так, чтобы обеспечить целостность передаваемого контейнера C-12-Xc.

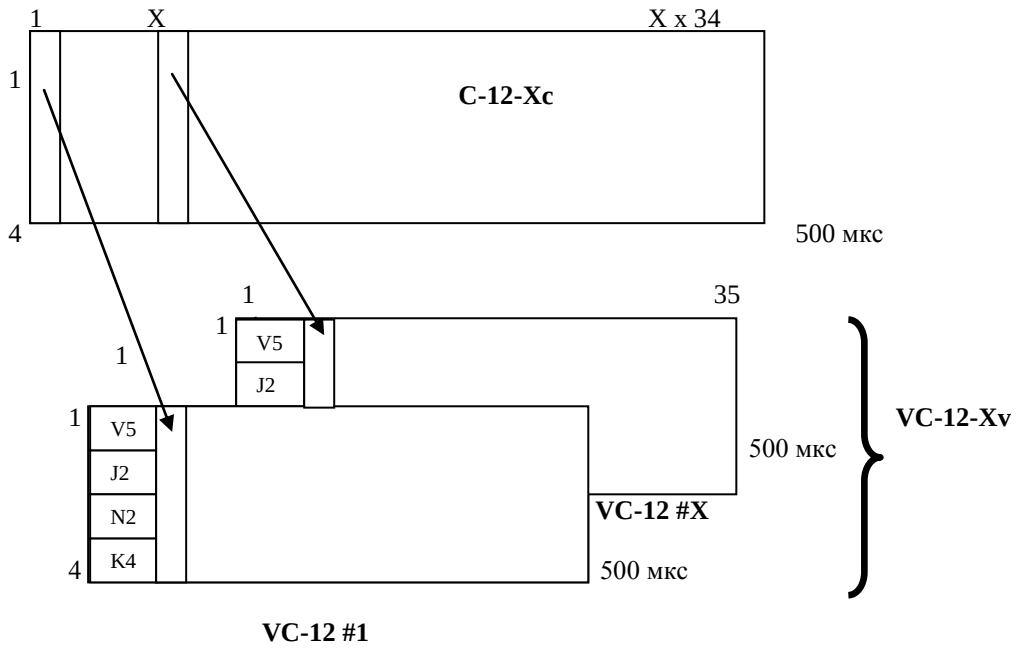


Рис. 5.38. Механизм VCAT для VC-12-Xv.

Для выполнения этих целей используется сверхцикловая структура VCAT. Двухшаговая сверхцикловая структура, аналогичная VC-4, в данном случае будет избыточной, поскольку и размер контейнера, и общее количество контейнеров в последовательности меньше. При формировании алгоритма VCAT на нижнем уровне также встает задача выбора ресурса, в котором возможно передать его сверхцикловую структуру. Было решено, что для целей VCAT здесь можно использовать ресурс байта К4 заголовка LP-POH, но не весь байт, отвечающий за резервное переключение, а только один его бит – бит №2, который в процессе резервного переключения не участвует.

Было решено образовать сверхцикл VCAT длительностью 16 мс по совокупности 128 циклов VC-12. В этих 128 циклах образуются 32-битовые последовательности, в которых передается информация. Структура полученной архитектуры цикла представлена на рис. 5.39.

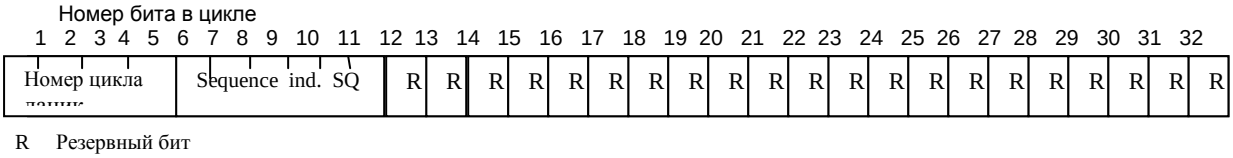


Рис. 5.39. Сверхцикловая архитектура VCAT LP, передаваемая в поле бита 2 К4 LP-POH.

Как видно из рисунка, сверхцикловая структура LP VCAT передает следующие информационные поля:

- Номер цикла, который передается в битах 1-5
- Номер последовательности (SQ), передаваемый в битах 6-11

Остальные 21 бит сверхцикла VCAT являются резервными и по умолчанию равны 0.

Номер цикла выполняет роль, аналогичную номерам MFI1/2, также, как и SQ выполняет роль, аналогичную SQ верхнего уровня. В этом смысле механизм LP VCAT совершенно аналогичен рассмотренной ранее, с той только разницей, что положение каждого цикла в последовательности кодируется двумя величинами: номером цикла и SQ.

5.5. Структура протокола LCAS.

Перейдем теперь к третьей части модели NGSDH – системе сигнализации LCAS. Как уже отмечалось, LCAS представляет собой надстройку над процессом VCATи технологически должна обеспечить динамическое расширение размеров виртуальных коридоров в системе NGSDH.

После рассмотрения внутренней механики VCAT, легко понять принципы построения LCAS. Как и любой протокол сигнализации, LCAS имеет определенные сигналы, правила их обмена и стандартизированные информационные поля, в которых эти сигналы передаются. Соответственно, любое описание системы сигнализации можно свести к следующим разделам:

- Используемые сигналы
- Алгоритм обмена сигналами
- Местоположение сигналов и информационные поля VCAT, которые для них используются.

Вполне естественно, что LCAS как протокол сигнализации, работающий над процессом VCAT, должен использовать созданную в технологии VCAT сверхцикловую структуру, добавляя к ней свои специфические информационные поля и сигналы. Здесь как раз и нужен большой резерв, заложенный в информационных полях VCAT.

5.5.1. Изменение структуры VCAT при введении LCAS.

Рассмотрим несколько информационных полей, связанных с LCAS (табл. 5.8). Как видно из таблицы, некоторые из них (MFI2 иSQ) уже использовались при рассмотрении процедуры VCAT. Другие поля (MST, RS-Ack, CTRL и GID) являются совершенно новыми и используются только в LCAS.

Таблица 5.8. Основные сигналы LCAS.

Поле	Расшифровка	Назначение
MST	Member Status	Состояние члена группы
RS-Ack	Re-Sequence Acknowledge	Подтверждение переустановки последовательности
SQ	Sequence Indicator	Индикатор последовательности
MFI2	2nd Multi Frame Indicator	Второй индикатор сверхцикла
CTRL	Control word	Управляющее слово
GID	Group Identificator	Идентификатор группы

Для передачи новых полей структура VCAT, представленная в табл. 5.7, меняется, т. к. часть резервных полей отводится для передачи полей LCAS (табл. 5.9).

Таблица 5.9. Значение битов H4 HP-POH в случае конкатенации VC-3/4-Xv.

Байт H4								MFI1	MFI2
Бит 1	**Бит 2**	**Бит 3**	**Бит 4**	**5**	**6**	**7**	**8**		
				Биты 1-4 MFI1					
Номер в последовательности SQ MSB (Биты 1-4)				1	1	1	0	14	n-1
Номер в последовательности SQ LSB (Биты 5-8)				1	1	1	1	15	
MFI2 MSB (Биты 1-4)				0	0	0	0	0	n
MFI2 LSB (Биты 5-8)				0	0	0	1	1	
CTRL				0	0	1	0	2	
GID (“000x”)				0	0	1	1	3	
Reserved (“0000”)				0	1	0	0	4	
Reserved (“0000”)				0	1	0	1	5	
CRC-8				0	1	1	0	6	
CRC-8				0	1	1	1	7	
Член status MST				1	0	0	0	8	
Член status MST				1	0	0	1	9	
RS-Ack (“000x”)				1	0	1	0	10	
Reserved (“0000”)				1	0	1	1	11	
Reserved (“0000”)				1	1	0	0	12	
Reserved (“0000”)				1	1	0	1	13	
Номер в последовательности SQ MSB (Биты 1-4)				1	1	1	0	14	
Номер в последовательности SQ LSB (Биты 5-8)				1	1	1	1	15	
MFI2 MSB (Биты 1-4)				0	0	0	0	0	n+1
MFI2 LSB (Биты 5-8)				0	0	0	1	1	
CTRL				0	0	1	0	2	
GID (“000x”)				0	0	1	1	3	
Reserved (“0000”)				0	1	0	0	4	
Reserved (“0000”)				0	1	0	1	5	
CRC-8				0	1	1	0	6	
CRC-8				0	1	1	1	7	
Член status MST				1	0	0	0	8	

Как следует из таблицы, 16 циклов MFI2 образуют цикл LCAS, который состоит из нескольких полей, в которых передается информация и поля контрольной суммы CRC-8для контроля ошибок передачи сигнальной информации LCAS. В таблице соответствующий цикл выделен жирным обрамлением.

5.5.2. Принципы сигнализации LCAS.

Принцип сигнализации LCAS, как уже отмечалось, заключается в том, что поскольку любой виртуальный коридор представляет собой виртуально-конкатенированную группу VCG, то расширение и сужение коридора связано с изменением состава VCG. Следовательно, система сигнализации должна обеспечить изменение состава VCG, включая процедуры формирования последовательности контейнеров и компенсации задержек. При этом должен быть соблюден главный принцип SDH – ни один бит, посланный в виртуальный контейнер переменного размера, не может быть потерян. Кроме того, для удобства работы оборудования NGN, подключаемого к виртуальному коридору переменной емкости, следует сделать так, чтобы изменение размера виртуального коридора проходило без скачков пропускной способности, т. е. более или менее плавно.

Рассмотрим, каким образом это достигается методами LCAS. Поскольку LCAS представляет собой протокол сигнального обмена канального уровня, для него характерна всего одна схема использования – схема «точка – точка» (рис. 5.40). В LCAS всегда присутствует источник А и приемник В, между которыми необходимо увеличить или уменьшить виртуальный коридор.

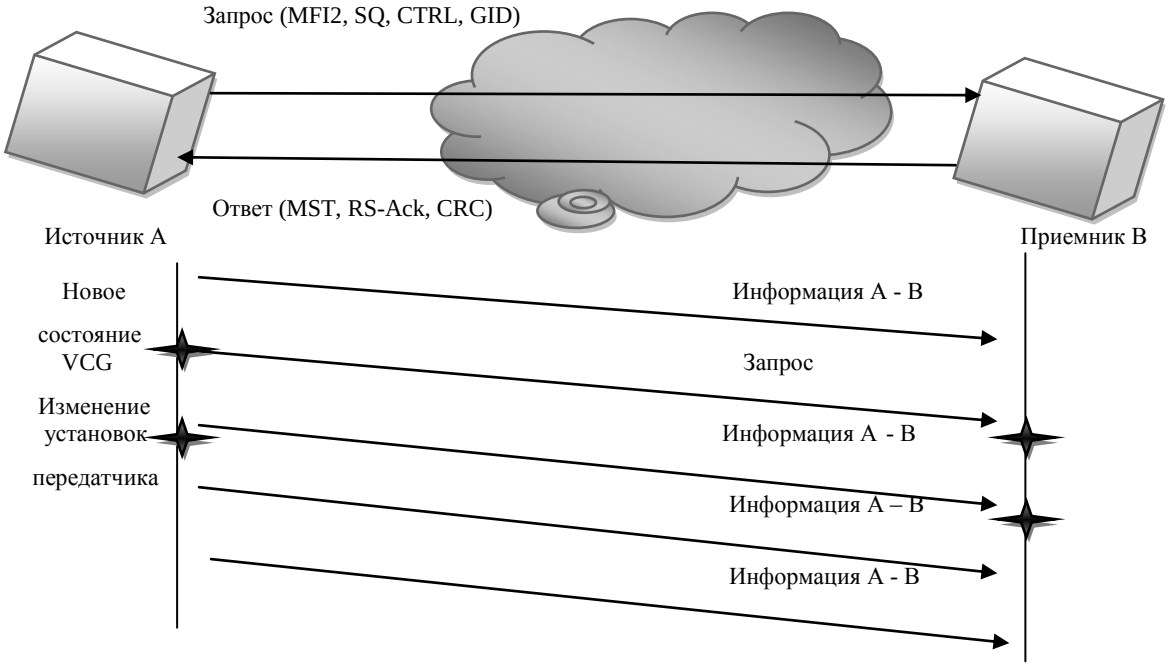


Рис. 5.40. Обмен сигналами LCAS.

Сигнальный обмен построен по схеме «запрос – ответ», как и большая часть систем сигнализации. Запрос на изменение состава VCG включает в себя поля MFI, SQ, CTRL, GID. В ответ приемник посылает отклик с информацией в полях MST, RS-Ack, CRC. Существенно, что для сигнализации LCAS характерна процедура отклика с предупреждением. В случае, если VCG нужно расширить, управляющий пакет с запросом на расширение передается заранее, т. е. новые установки становятся актуальными только с передачей следующего цикла VCAT. Получив управляющий пакет, сторона B производит изменения в составе VCG на стороне приемника. В результате, когда следующий цикл VCAT придет с новой конфигурацией VCG, приемник оказывается к этому готов. Так соблюдается принцип сохранения информации в NGSDH.

Рассмотрим подробнее поля (рис.4.40), которые входят в запрос и ответ.

Состав сообщения запроса.

Идентификатор сверхцикла MFI2.

Это поле заимствовано из процедуры VCAT. Значение MFI2 одинаково для всех членов VCG и изменяется на единицу с каждым новым сверхциклом.

Идентификатор последовательности SQ.

Также заимствован из процедуры VCAT и присваивается индивидуально для каждого VC-n, входящего в VCG.

Сигнал управления CTRL.

Само понятие сигнал управления подразумевает, что суть запроса на изменение конфигурации VCG связана именно с этим полем. Содержимое поля CTRL определяет характер запроса, который сторона A передает стороне B, а возможные значения поля представлены в табл. 5.10.

Таблица 5.10. Состав поля LCAS CTRL.

Значение	**Сигнал**	**Назначение**
0000	FIXED	В данном виртуальном контейнере н6е используется LCAS и размер коридора фиксированный
0001	ADD	Добавить нового члена в группу
0010	NORM	Обычная передача, размер коридора не меняется
0011	EOS	Идентифицирует последний контейнер в последовательности, обычная передача
0101	IDLE	Этот член не принадлежит группе или его нужно удалить из группы
1111	DNU	Не использовать нагрузку, произошла ошибка или сбой

В начальном состоянии все значения полей CTRL на стороне передатчика переводятся в положение CTRL=IDLE. Когда новый контейнер должен быть присоединен к VCG. Он должен содержать следующие установки полей:

a. CTRL=IDLE означает, что контейнер еще не принадлежит группе;
b. SQ= не представляет значения, поскольку на этапе присоединения контейнера к VCG положение контейнера может быть не ясно. В случае значения CTRL=IDLE поле SQ не анализируется мультиплексорами. Может быть установлено значение поля – все единицы;
c. GID= групповой идентификатор для виртуально-конкатенированной группы;
d. MST=1 (FAIL(ошибка)=1; OK=0)

Рассмотрим несколько характерных примеров, поясняющих функционирование LCAS.

5.5.3. Обмен сигналами LCAS.

Рассмотрим несколько наиболее распространенных сигнальных процессов для сигнализации LCAS, к которым относятся процессы обмена сигналами при увеличении и уменьшении размера виртуального коридора.

Увеличение размера VCG (команда ADD).

Пример сигнального обмена при присоединении нескольких контейнеров к VCG для случая двух контейнеров представлен на рис. 5.41.

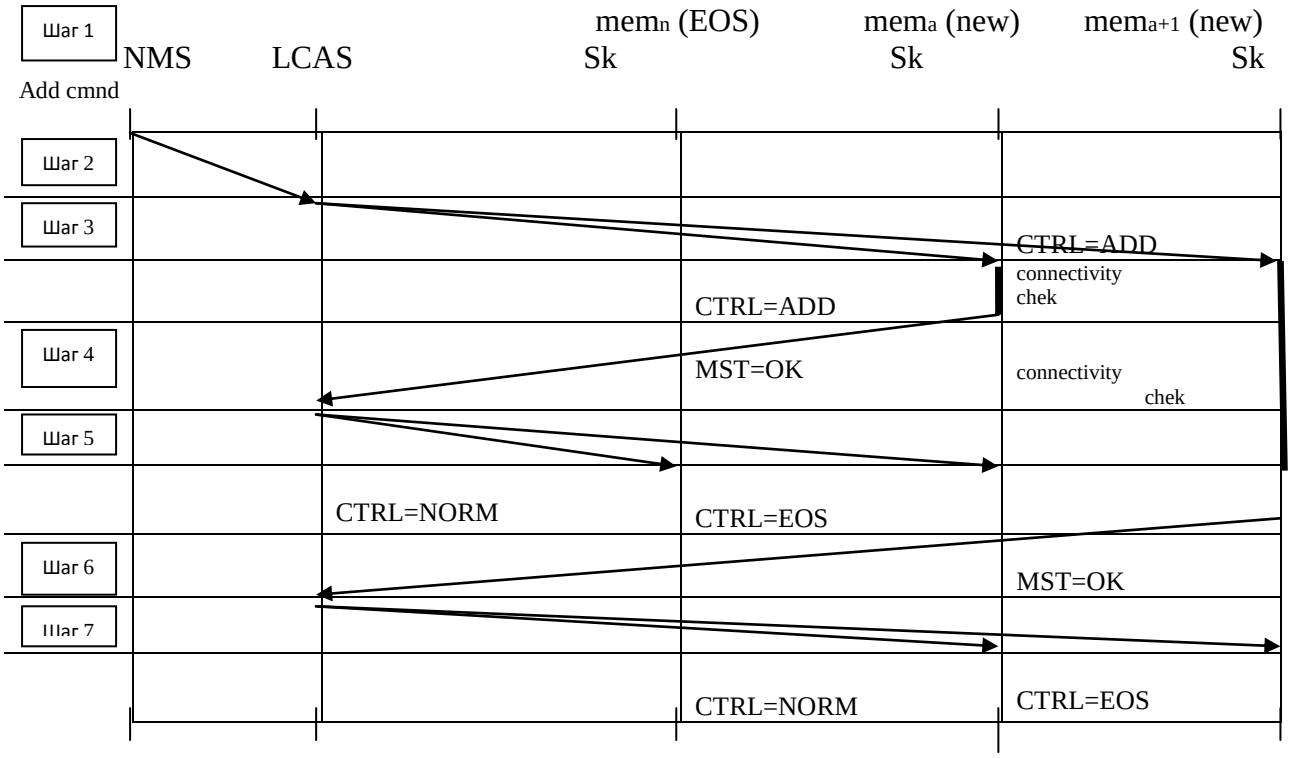


Рис. 5.41. Обмен сигналами в процессе ADD для случая двух контейнеров.

Соответствующее описание сигнального обмена по шагам, представленным на рисунке, приводится в табл. 5.11.

Таблица 5.11. Состав сигнального обмена LCAS в случае команды ADD.

Шаг		Член n			Новый член a			Новый член a+1		
		CTRL	SQ	MST	CTRL	SQ	MST	CTRL	SQ	MST
1	Начальное состояние	EOS	n-1	OK	IDLE	> n-1	FAIL	IDLE	> n-1	FAIL
2	Центр управления (NMS) передает команду ADD в систему сигнализации LCAS	EOS	n-1	OK	IDLE	> n-1	FAIL	IDLE	> n-1	FAIL
3	Источник So для члена (a) генерирует сигнал (CTRL=ADD; SQ=n), для члена (a+1) – (CTRL=ADD; SQ=n+1)	EOS	n-1	OK	ADD	n	FAIL	ADD	n+1	FAIL
4	Приемник Sk (a) подтверждает MST=OK источнику So	EOS	n-1	OK	ADD	n	OK	ADD	n+1	FAIL
5	Значения полей So (n-1) (CTRL=NORM); So (a) (CNRL=EOS; SQ=n), член (a) становится частью VCG	NORM	n-1	OK	EOS	n	OK	ADD	n+1	FAIL
6	Подтверждение Sk (a+1) MST=OK	NORM	n-1	OK	EOS	n	OK	ADD	n+1	OK
7	Значение полей So (a) (CTRL=NORM); S0 (a+1) (CTRL=EOS);член (a+1) становится частью VCG	NORM	n-1	OK	NORM	n	OK	EOS	n+1	OK

Как следует из таблицы, в данном случае используется последовательный алгоритм увеличения виртуального коридора. Сначала к VCG подключается контейнер (a), а затем – контейнер (a+1). Алгоритмами LCAS допускается и одновременное подключение двух контейнеров, так что сам алгоритм подключения допускает определенную свободу. Полезно также отметить, что новые контейнеры будут иметь в последовательности VCG номера SQ=n и SQ=n+1 соответственно, т. е. контейнеры добавляются к VCG в последовательном порядке.

Рассмотренный алгоритм допускает и потенциальные сбои в работе системы сигнализации. Например, если сигнал подтверждения присоединения нового контейнера MST=OK не приходит в течение определенного временного интервала, в системе LCAS генерируется сигнал о неисправности, связанный с нарушением команды ADD.

Теперь рассмотрим несколько процессов уменьшения коридора, которое может происходить по нескольким причинам:

- Плановое уменьшение коридора по командам от центра управления (NMS). В системе сигнализации LCAS имеется несколько алгоритмов для этого.
- Уменьшение коридора в связи возникновением неисправности в процессе передачи группы VCAT или в процессе изменения размера коридора. Также существует несколько различных алгоритмов такого уменьшения.

Получается асимметрия: на один унифицированный алгоритм увеличения скорости передачи в виртуальном коридоре существует 4 алгоритма ее уменьшения. Но именно это позволяет гарантировать стабильность работы сетей с LCAS. Увеличение размера коридора всегда связано с использованием ресурса, так что очень правильно, что есть только одно управляющее устройство, обеспечивающее этот алгоритм (NMS) и только один алгоритм. Наоборот, процесс уменьшения размера коридора – это освобождение ценного ресурса сети. Поэтому логично, что в LCAS имеется много различных алгоритмов , чтобы освободить ресурс как можно быстрее и эффективнее.

Уменьшение размера VCG (команда REMOVE) в случае удаления нескольких контейнеров из VCG.

Этот алгоритм был разработан для удаления контейнеров из VCG при условии, что ни один из этих контейнеров не является последним в последовательности. Удаление последнего контейнера представляет некоторую сложность и поэтому описывается специальным алгоритмом. В качестве примера предположим, что у нас имеется VCG размера n=6 членов (контейнеров), из которой требуется удалить контейнеры 4 и 5 (рис. 5.42).

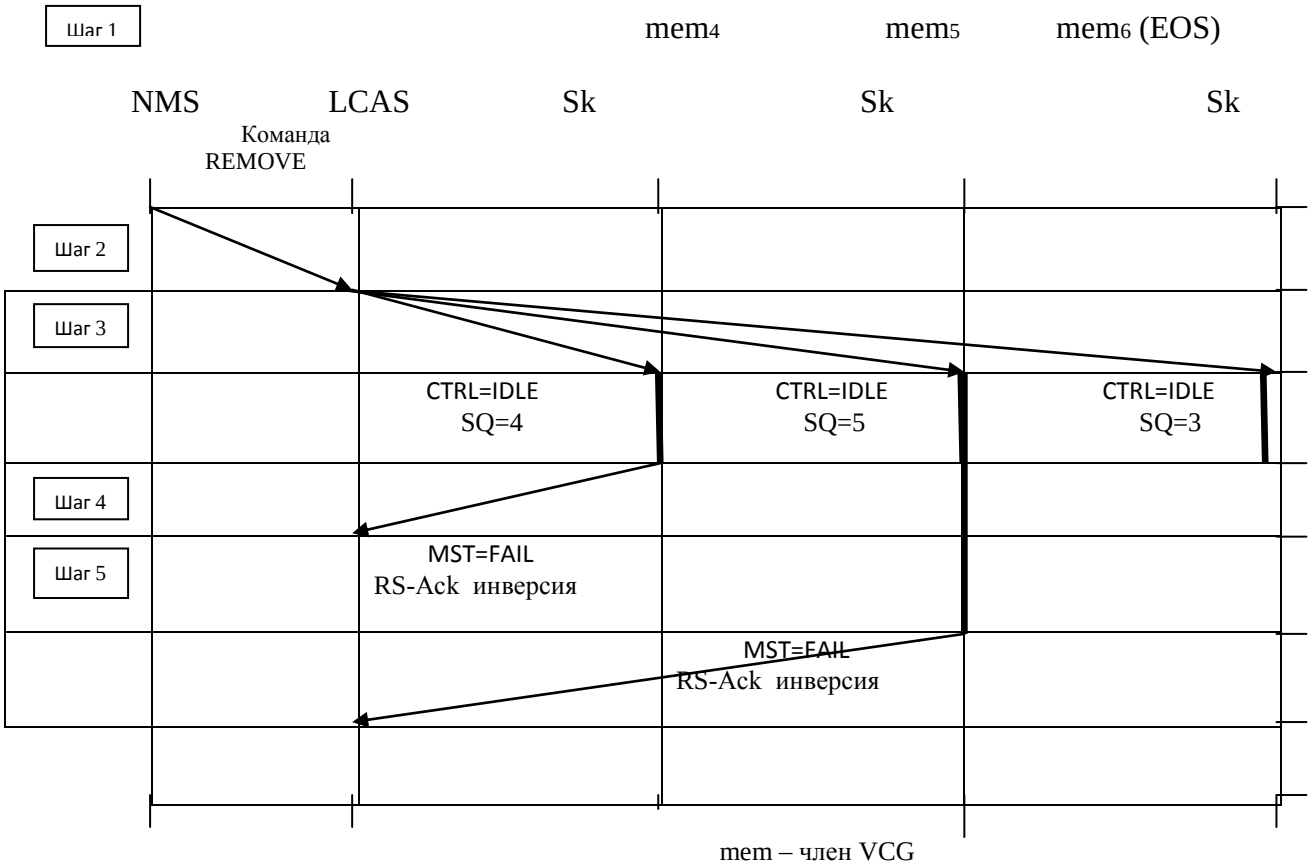


Рис. 5.42. Обмен сигналами в процессе REMOVE для случая двух не последних контейнеров.

Соответствующее описание сигнального обмена по шагам, представленным на рисунке, приведено в табл. 5.12.

Таблица 5.12. Состав сигнального обмена LCAS в случае команды REMOVE для нескольких контейнеров.

Шаг		член 4			Член 5			Член 6		
		CTRL	SQ	MST	CTRL	SQ	MST	CTRL	SQ	MST
1	Начальное состояние	NORM	3	OK	NORM	4	OK	EOS	5	OK
2	Центр управления (NMS) посылает команду REMOVE в систему	NORM	3	OK	NORM	4	OK	EOS	5	OK
3	So (3) передает(CTRL=IDLE, SQ=4) So (4) передает(CTRL=IDLE, SQ=5) S0 (5) передаетSQ=3	IDLE	4	OK	IDLE	5	OK	EOS	3	OK
4	Sk (исключенный член) передаетMST=FAIL и инвертирует бит RS-Ack	IDLE	4	FAIL	IDLE	5	OK	EOS	3	OK
5	Sk (исключенный член) передаетMST=FAIL и инвертирует бит RS-Ack	IDLE	4	FAIL	IDLE	5	FAIL	EOS	3	OK

Основной принцип уменьшения состава VCG состоит в том, чтобы присвоить исключаемым контейнерам значение поля CTRL=IDLE. При этом для других членов значение поля CTRL не изменяется. В качестве примера на рисунке показана ситуация, когда оба контейнера SQ=4 и SQ=5 удаляются из VCG одновременно. Это происходит на третьем шаге команды. Такой алгоритм очень экономичен, поскольку как только приемник Sk принимает значение CTRL=IDLE, система рассматривает освобожденные контейнеры как свободные и может использовать их в новом виртуальном коридоре. Однако Sk на полученное сигнальное сообщение REMOVE может отвечать не одновременно, допускается и последовательное подтверждение, и одновременное.

Рассмотренный алгоритм очень простой, он включает запрос на уменьшение полосы и подтверждение об исключении указанных членов из VCG. При удалении контейнеров из последовательности VCG возникает вопрос о пересчете номеров контейнеров в последовательности (поля SQ). Для этого существует два правила:

1. Все удаленные члены последовательности получают значение SQ заведомо большее, чем значение SQ последнего члена последовательности, который посылает сигнал EOS.
2. Все остальные члены последовательности, находящиеся после удаленных членов (контейнеры U), получают последовательные номера.

Лучше всего работа алгоритма пересчета поля SQ представлена на следующем примере, соответствующим рис. 5.42.

	VC	A	B	C	D	E	F	G
Перед	**SQ**	0	1	2	3	4	5	6
				U	U			
После	**SQ**	0	1	4	5	2	3	6

Уменьшение размера VCG (команда REMOVE) в случае удаления последнего контейнера VCG.

Процесс удаления последнего контейнера в последовательности имеет ряд особенностей. Рассмотрим соответствующий ему алгоритм сигнального обмена (рис. 5.43) и состав сигнальных сообщений (табл. 5.13).

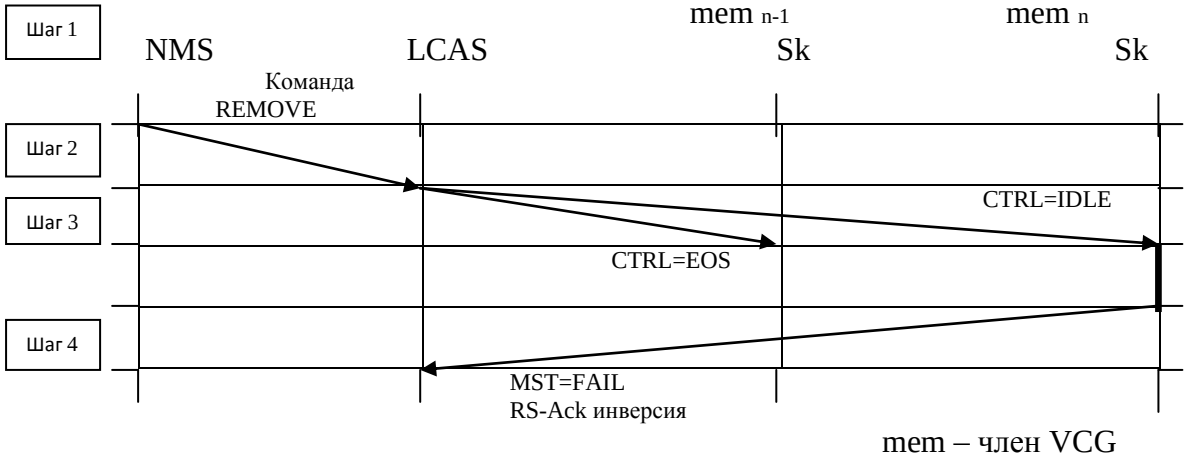


Рис. 5.43. Обмен сигналами в процессе REMOVE для случая одного последнего контейнера.

Как показано на рисунке и в таблице, алгоритм удаления из VCG последнего контейнера в целом аналогичен рассмотренному выше. Единственная его особенность заключается в том, что в этом случае SQ контейнеров группы не пересчитывается, а предпоследний контейнер должен изменить свое значение с NORM на EOS.

Таблица 5.13. Состав сигнального обмена LCAS в случае команды REMOVE для последнего контейнера.

Шаг		Член n-1			Член n		
		CTRL	SQ	MST	CTRL	SQ	MST
1	Начальное состояние	NORM	n-2	OK	EOS	n-1	OK
2	Центр управления (NMS) посылает команду REMOVE в систему	NORM	n-2	OK	EOS	n-1	OK
3	So (unwanted) передаетCTRL=IDLE, SQ=n-1, So (n-2) предает CTRL=EOS	EOS	n-2	OK	IDLE	n-1	OK
4	Sk (unwanted) передает MST=FAIL and RS-Ack bit inverted to So	EOS	n-2	OK	IDLE	n-1	FAIL

В обоих рассмотренных выше случаях уменьшение размера виртуального коридора было штатным, оно было связано с командами REMOVE из центра управления первичной сетью. Но LCAS выполняет не только функции динамического изменения размеров виртуальных коридоров, но также и уменьшение объема используемого ресурса в случае возникновения сбоев в VCG.

Рассмотрим несколько алгоритмов уменьшения размера виртуального коридора при возникновении неисправности в системе.

Уменьшение размера VCG (команда DNU) в случае возникновения сбоя в системе передачи VCAT в последнем контейнере.

Самый простой алгоритм уменьшения VCG при возникновении неисправности связан с неисправностью в последнем контейнере последовательности VCG. Это довольно ожидаемое явление, которое, например, может возникать в случае неудачно завершенного процесса присоединения нового контейнера к VCG. Дело в том, что в случае добавления нового контейнера (команда ADD), этот контейнер окажется в конце последовательности SQ. Следовательно, при сбое в процессе ADD неисправность будет скорее всего именно в последнем контейнере.

Соответствующий 4-шаговый алгоритм представлен на рис. 5.44 и сопровождается описанием шагов в табл. 5.14.

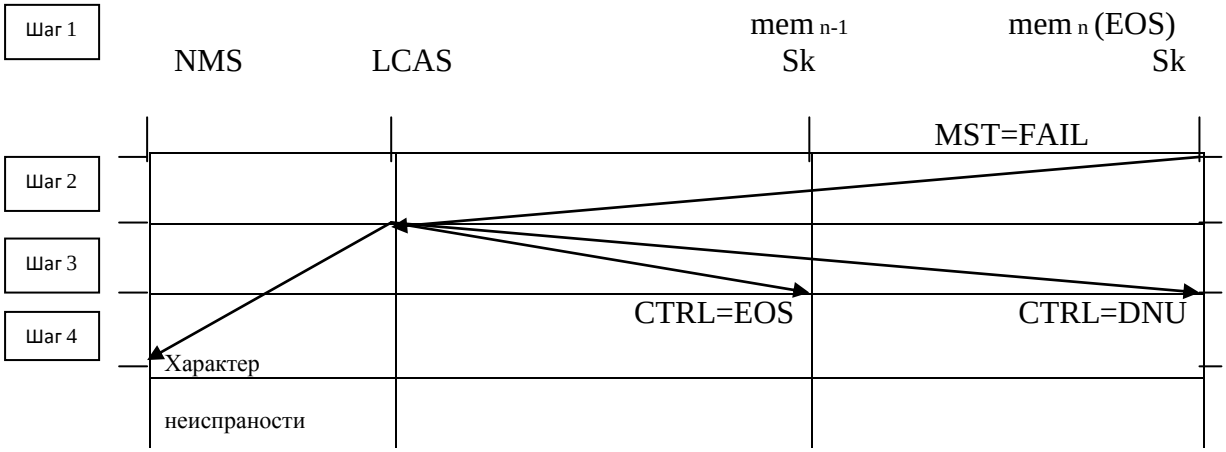


Рис. 5.44. Обмен сигналами в процессе DNU для случая одного последнего контейнера.

Таблица 5.14. Состав сигнального обмена LCAS в случае команды DNU и последнего контейнера.

Шаг		член n-1			Член n (EOS)		
		CTRL	SQ	MST	CTRL	SQ	MST
1	Начальное состояние	NORM	n-2	OK	EOS	n-1	OK
2	Sk (неисправный контейнер) передает MST=FAIL в сторону источника So	NORM	n-2	OK	EOS	n-1	FAIL
3	So (неисправный член) передает DNU; So (неисправный член – 1) передает EOS	EOS	n-2	OK	DNU	n-1	FAIL
4	LCAS передает информацию о характере неисправности NMS	EOS	n-2	OK	DNU	n-1	FAIL

Напомним, что возникновение неисправности в VCG соответствует передаче сигнала MST=FAIL, например, для SQ=n-1. Этот сигнал передается по линии обратной связи, от приемника к источнику VCG. Получив его, источник So

присваивает значение CTRL=DNU контейнеру SQ=n-1 и CTRL=EOS контейнеру SQ=n-2. Затем LCAS информирует NMS о характере неисправности, используя встроенные средства диагностики и нестандартные сигналы.

Уменьшение размера VCG (команда DNU) в случае возникновения сбоя в системе передачи VCAT в не последнем контейнере.

Более сложным является случай, когда неисправность возникает в произвольном контейнере последовательности SQ. Важным вопросом в этом случае является гарантия связности данных в виртуальном коридоре при уменьшении его размера потому, что при неисправности система NGSDH также как и система SDH должна стремиться к сохранению данных. Как добиться того, чтобы в процессе освобождения ресурса сети из-за сбоя в одном из членов VCG не произошло потери информации?

Поскольку в этом процессе SQ должны быть переименованы, может возникнуть нарушение связности виртуального коридора, когда контейнеры займут неподходящие им места.

Чтобы не допустить этого, был разработан алгоритм уменьшения коридора без изменения последовательности SQ на первом этапе. Этот алгоритм представлен на рис. 5.45 и прокомментирован в табл. 5.15.

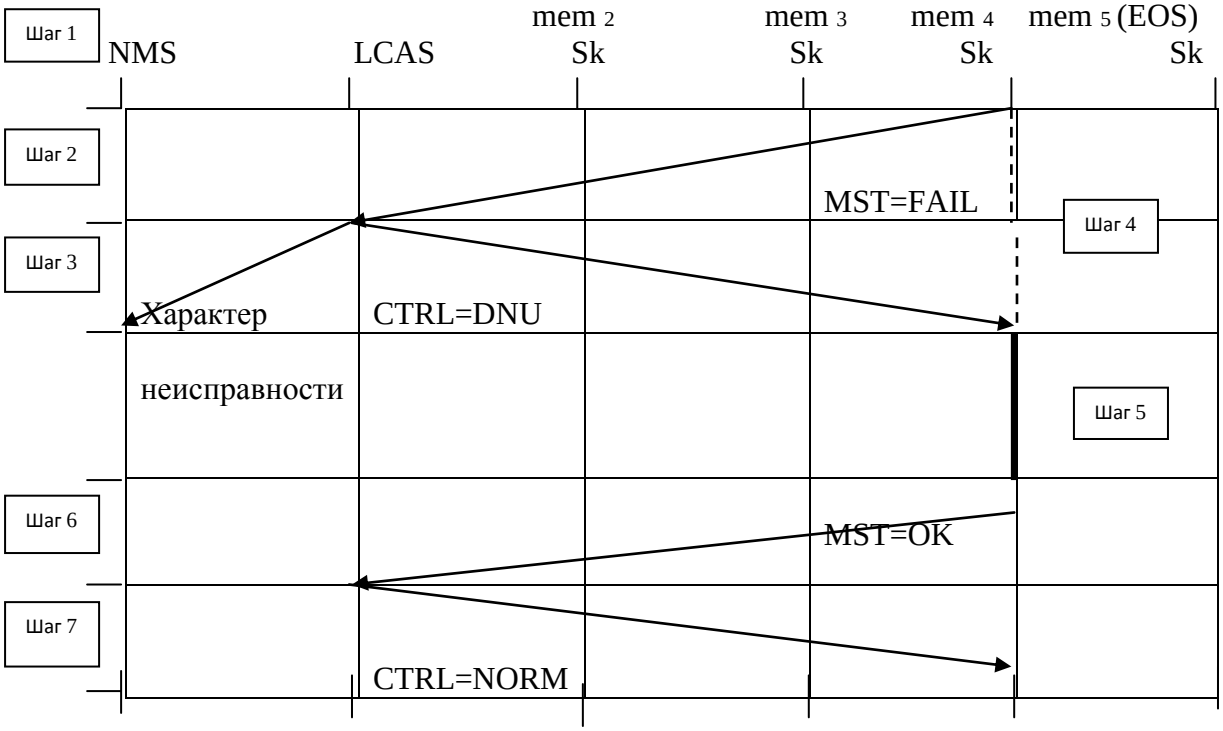


Рис. 4.45. Обмен сигналами в процессе DNU для случая одного не последнего контейнера.

В качестве примера рассмотрим VCG из 5 контейнеров CTRL(5)=EOS. Предположим, что в 4 контейнере возникает сбой, что выражается в передаче

Sk(4) сигнала MST=FAIL. В ответ источник So передает CTRL=DNU, выводя поток из VCG. Но при этом номера SQ не пересчитываются (см. табл. 5.15).

Таблица 5.15. Состав сигнального обмена LCAS в случае команды DNU и не последнего контейнера.

Шаг	член 2			член 3			член 4			член 5 (EOS)		
	CTRL	SQ	MST	CTRL	SQ	MST	CTRL	SQ	MST	CTRL	SQ	MST
1. Начальное состояние	NORM	1	OK	NORM	2	OK	NORM	3	OK	EOS	4	OK
2. Sk(3) передаетMST=FAIL в направлении So	NORM	1	OK	NORM	2	OK	NORM	3	FAIL	EOS	4	OK
3. So(3) передает CTRL=DNU	NORM	1	OK	NORM	2	OK	DNU	3	FAIL	EOS	4	OK
4. See text below table	NORM	1	OK	NORM	2	OK	DNU	3	FAIL	EOS	4	OK
5. See text below table	NORM	1	OK	NORM	2	OK	DNU	3	FAIL	EOS	4	OK
6. Неисправность устранена, передача MST=OK в направлении So	NORM	1	OK	NORM	2	OK	DNU	3	OK	EOS	4	OK
7. CTRL меняется с DNU на NORM	NORM	1	OK	NORM	2	OK	NORM	3	OK	EOS	4	OK

Как только в системе обнаруживается сбой, приемник начинает реконфигурацию виртуального коридора. Однако существует сравнительно большой промежуток времени (время передачи от Sk к So + время реакции на неисправность + время передачи от So к Sk), в течение которого передаваемые данные будут содержать ошибки. Чтобы избежать этого, источник прекращает передачу данных в контейнерах, имеющих ошибки. Он использует в этот период только контейнеры CTRL=NORM/EOS. Это лишь отчасти спасает проблему, т. к. на стороне приемника нет точных данных по интеграции полезной нагрузки виртуального контейнера. Однако это может быть сделано дополнительно специальным ПО канального уровня.

Если неисправность в контейнере устранена, значение поля CTRL меняется с DNU на NORM, и тогда приемник снова включает временно потерянного члена последовательности в общий процесс передачи/приема данных (шаги 6-7).

Важно отметить, что в рассмотренном процессе не происходит пересчета полей SQ (табл. 5.15), что значительно упрощает контроль над связностью данных и уменьшает их потери. Кроме того, поскольку уменьшение и восстановление размера коридора в случае неисправности не требует пересчета SQ, для пользователя виртуального коридора эта процедура будет плавной, т. е. в процессе сбоя не будет скачкообразных изменений пропускной способности или временного перебоя в канале.

Это очень важно для работы любых приложений, использующих пакетный трафик.

5.5.4. Преимущества LCAS.

Оценим еще раз все преимущества и особенности технологии LCAS:

1. Технология LCAS дополняет процедуру VCAT и позволяет привнести динамику в процесс формирования виртуальных коридоров.

2. Алгоритмы LCAS являются ненаправленными. Источник и приемник могут меняться местами без изменения алгоритма сигнального обмена.
3. LCAS позволяет устранять из VCG тех членов последовательности, в контейнерах которых имеются сбои. Одновременно после устранения сбоя LCAS автоматически возвращает контейнер к использованию, восстанавливая размер виртуального коридора. Это дает дополнительный механизм для концепции «самозалечивающейся сети».
4. Поскольку процедуры уменьшения и восстановления размера виртуального коридора в случае неисправности не требуют пересчета SQ, работа алгоритма LCAS не приводит к скачкам в пропускной способности виртуального коридора.

5.6. Некоторые дополнения к NGSDH.

В настоящее время модель NGSDH динамично развивается и уже дополнена несколькими процедурами, позволяющими повысить надежность новой системы SDH. Эти процедуры имеют дополнительное значение, т. е. они не связаны с каркасом NGSDH и могут совсем не присутствовать в конкретном оборудовании. Из процедур, имеющих практическую ценность можно выделить три:

1. Процедура коммутации каналов внутри SDH – TSI (Time slot interchange).
2. Алгоритм автоматической коммутации транспортной сети – ASTN (Automatic Switched Transport Network).
3. Автоидентификация (Autodiscovery).
4. Концепция упругого пакетного кольца – RPR (Resilient Packet Ring).

Рассмотрим кратко перечисленные дополнения к NGSDH.

5.6.1. Процедура коммутации каналов TSI.

Каково бы не было стремление добиться максимальной эффективности работы системы NGSDH (именно на это были направлены уровни VCAT/LCAS), в ней всегда есть «пустоты». Поэтому одной из популярных моделей современных систем NGSDH является модель швейцарского сыра, в нем всегда есть дырки. В результате формирования каналов в системах SDH или виртуальных коридоров NGSDH некоторые VC всегда оказываются незагруженными полезной нагрузкой. Это особенно характерно для систем кольцевой топологии, где топология сети (кольцо) вступает в логическое противоречие с принципом работы первичной сети (канал, линия).

Процедура TSI – это еще один способ повысить эффективность использования ресурса NGSDH. Как следует из самого названия процедуры,

подразумевается свободное переключение отдельных контейнеров или даже канальных интервалов и их объединение. Механика TSI во многом напоминает VCAT с той только разницей, что TSI не имеет ограничений по типам используемых контейнеров, т. е. разнородные контейнеры могут объединяться в один виртуально контейнированный коридор. Такое усовершенствование с одной стороны позволяет улучшить даже по сравнению с VCAT КПД системы передачи, с другой стороны – имеет ряд проблем, связанных с организацией и контролем связности полученных «смешанных» коридоров.

На данный момент технология TSI имеет ряд нерешенных вопросов, например, восстановление связности в случаях сбоев сети и пр. Поэтому в реальных сетях NGSDH чаще используется VCAT как более простой и отработанный протокол. Тем более, что ряд исследований показывает, что выигрыш в КПД системы передачи за счет TSI незначителен по сравнению со стоимостью таких решений.

5.6.2. Концепция автоматической коммутации транспортной сети ASTN.

Концепция автоматической коммутируемой транспортной сети (ASTN) является развитием методов оперативного и резервного переключения, используемым в системах SDH, но значительно дополняют эти методы за счет внесения в NGSDH принципов коммутации. В настоящее время ASTN стандартизована в рек. ITU-T G.8070, G.8080.

Концепция ASTN основана на системе сигнализации, которая по своему предназначению напоминает систему сигнализации ОКС7, но только для транспортных сетей. Принципы сигнализации ASTN во многом сходны с принципами протокола PNNI, разработанного в свое время для систем ATM.

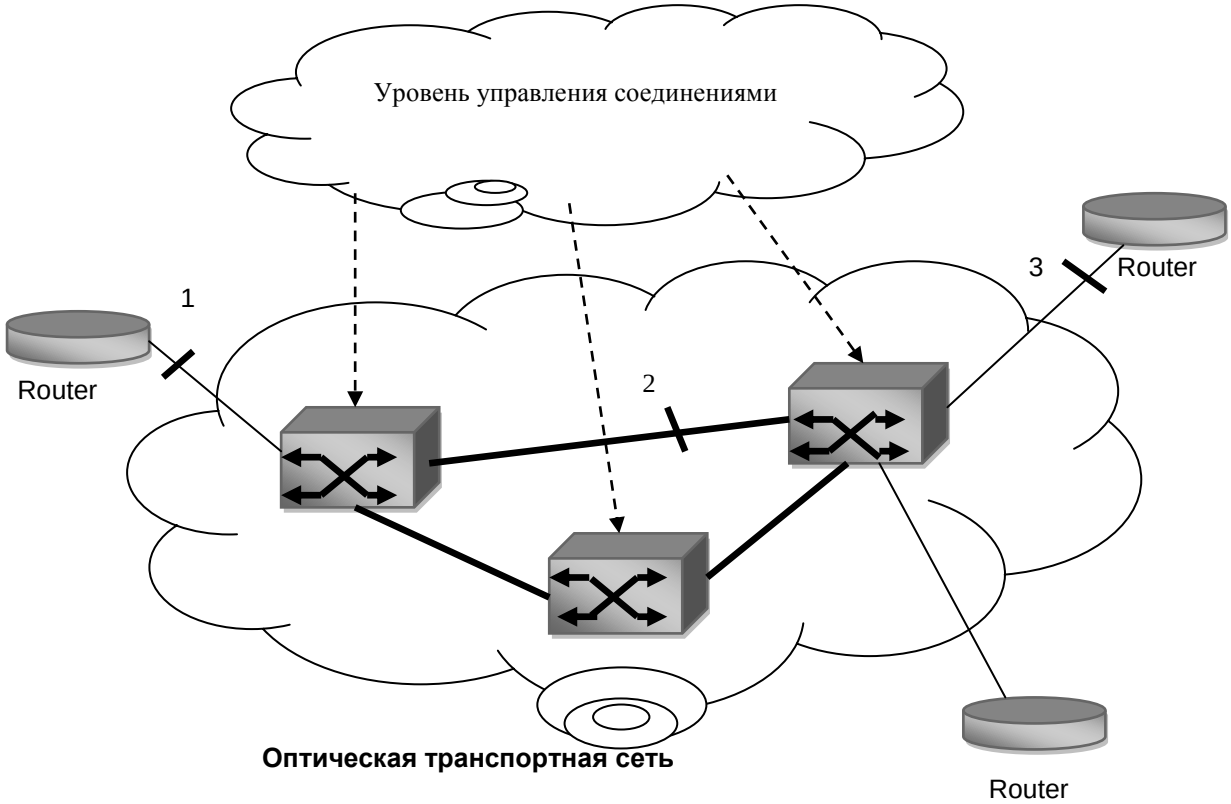


Рис. 5.46. Концепция ASTN для транспортных сетей.

В концепции ASTN существует два уровня управления соединением: уровень сети и уровень управления соединениями (рис. 5.46). Уровень управления соединениями представляет собой выделенную систему сигнализации, по которой передаются сигналы управления коммутаторам сети. Те в свою очередь формируют коммутируемое широкополосное соединение в виде виртуального коридора заданного размера. Концепция ASTN обеспечивает следующие дополнительные преимущества оператору NGSDH:

- Повышает оперативность формирования виртуального коридора от точки до точки.
- Создает единую основу для предоставления любых типов услуг в рамках транспортной сети.
- Динамически перераспределяет ресурсы транспортной сети.
- Быстро восстанавливает работу виртуального коридора в случае возникновения любой неисправности на сети.
- Позволяет ввести на уровень транспортной сети иерархию приоритетов среди каналов и виртуальных коридоров, так что определенные услуги, пользователи или профили передаваемого трафика могут получить более высокий приоритет в обслуживании.
- Позволяет оптимизировать транспортную сеть в кратчайшие сроки.

В настоящее время концепция ASTN является пока только концепцией и не реализована производителями оборудования NGSDH. Поэтому еще преждевременно говорить о механике ASTN и потенциальных проблемах, которые привнесет с собой эта технология.

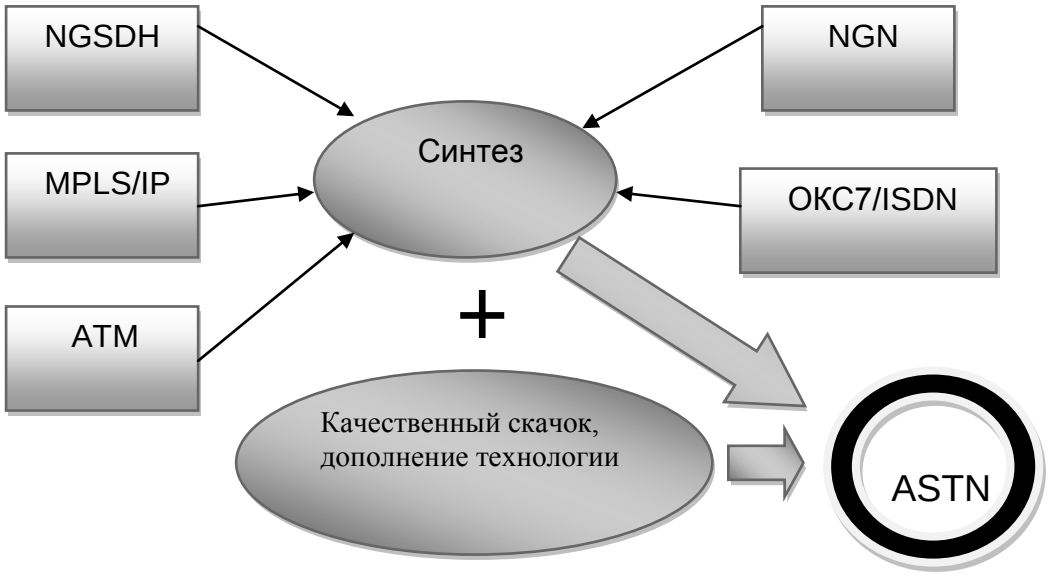


Рис. 5.47. Технология ASTN должна объединить все существующие транспортные технологии.

Легко догадаться, что внесение в первичную (теперь уже транспортную) сеть принципов оперативной коммутации стирает принципиальную разницу между системами NGSDH и широкополосными сетями с коммутацией пакетов (MPLS, ATM и пр.). Сигнализация в этом случае выступает основой для построения единой транспортной сети. Разница между транспортной сетью и сетями доступа стирается и определяется только пропускной способностью каналов.

В связи с многообразием профилей трафика и возможных параметров виртуального коридора сети ASTN будут намного сложнее всего рассмотренного выше. Такие сети соединят в себе сложность NGSDH/MPLS и современных систем сигнализации ATM/ОКС7 (рис. 5.47). Как правило, объединение столь разнородных технологий обязательно приводит к дополнительному усложнению технологии, поскольку имеет место еще дополнительный качественный скачок. Многие эксперты считают ASTN технологией ближайшего будущего для транспортных сетей.

5.6.3. Автоидентификация в сетях NGSDH.

Механизм автоидентификации (auto-discovery) впервые начал рассматриваться в рек. ITU-T G.7714. этот механизм связан с общей тенденцией привнесения принципов Plug&Play в современные транспортные сети. В быстро изменяющейся динамичной сети, такой как ASTN, принципы ее организации, основанные на ручной установке, как это было в SDH, становятся неудовлетворительными. Система передачи сама должна определять доступные ресурсы, оборудование, активность и готовность тех или иных сетевых элементов и в соответствии с текущей обстановкой на сети выполнять необходимые действия.

Для выполнения этой функции необходимо ликвидировать информационный разрыв между тем, что оператор действительно имеет на сети и тем, что система управления сетью **предполагает** на сети. Для больших транспортных сетей эти две категории данных могут не совпадать. Несовпадение между реальной сетью и ее образом в системе управления возникает по нескольким причинам. Поскольку данные об оборудовании вводятся в систему управления вручную, для систем управления существенна проблема актуализации данных, сеть может измениться, тогда как эти изменения не найдут отражения в базе данных OSS. Вторым фактором несовпадения выступают разнородные подсистемы управления, которые формируют отчетность в разнородных форматах данных. Несовпадение, а иногда и несопоставимость данных разных систем управления приводит к тому, что часть данных теряется, следовательно, уменьшается степень актуализации информации. Обе причины не были бы столь существенными, если бы транспортная сеть была бы статичной. Но в процессе любых реконфигураций сети дистанция между реальностью и ее образом в системе управления увеличивается, так что, в конце концов, транспортная сеть не может в полной мере выполнять свои функции.

Решить проблему призвана процедура автоидентификации, которая заключается в том, что оборудование само информирует систему управления о своем состоянии по запросу соответствующего формата. В результате образ транспортной сети получает максимальную актуальность, которая динамично изменяется по мере изменения ситуации на сети. Таким образом, процедура автоидентификации решает следующие проблемы современных систем управления (OSS):

- Обеспечивает эффективное управление коммутацией соединений (Connection Management)
- Выполняет актуализацию данных систем технического учета ресурсов (Inventory Management)
- Позволяет оператору контролировать качество и работу оборудования и предоставляемых на сети услуг.

Поле применения автоидентификации намного шире, чем только системы передачи NGSDH. Те же самые принципы охватывают все типы оборудования и все технологии будущего на современных сетях NGN. Мы же кратко рассмотрим принципы применения автоидентификации в системах NGSDH.

Для работы механизмов автоидентификации необходима система сигнализации. Такой системой в NGSDH выступает ресурс заголовков SDH и каналов DCC. Система сигнальных сообщений автоидентификации позволяет любому оборудованию NGSDH определять состояние и тип рядом расположенного оборудования или физической среды. Для систем автоидентификации есть три уровня информации, доступной для работы систем NGSDH:

1. Уровень физической среды - PMAD;
2. Уровень канального оборудования – LAD;
3. Уровень предоставляемых услуг.

Автоидентификация физической среды (PMAD – Physical Media Adjacency Discovery) позволяет сетевым элементам и оборудованию диагностировать взаимную связь между друг другом. Например, соединены ли между собой МВВ или МВВ подсоединен к регенератору. Этот уровень идентификации используется для следующих приложений:

- Возможность предоставления услуг
- Обновление данных технического учета (inventory)
- Характеристики портов смежного оборудования.

Назначение автоидентификации канального уровня (LAD – Layer Adjacency Discovery) повторяет PMAD, но на канальном уровне. LAD позволяет контролировать связи на уровне каналов NGSDH, будь то классические каналы или виртуальные коридоры. Например, пара МВВ может быть соединена между

собой через регенераторы или усилители, но на уровне VC-4 они должны рассматриваться как смежные устройства. На уровне LAD система управления не интересуется состоянием физического соединения, интересуют только канальные связи. Обычно на уровне LAD система управления формирует топологический граф связности сети, который может существенно отличаться от физического графа связности. Основной целью управления на уровне LAD выступает процесс переключения и коммутации. Например, с учетом резервирования канал может существовать даже в условиях существенного сбоя на физическом уровне. Результатом работы системы управления на уровне LAD является принятие решений о пути маршрутизации новых соединений.

Автоидентификация на уровне услуг (Service Type Signalling) позволяет оператору управлять услугами, которые предоставляются с использованием транспортной сети, как транзитной, так и сети доступа. Такая автоидентификация наиболее важна в случае составных услуг, предоставляемых несколькими операторами совместно или с транзитными потоками через несколько смежных сетей. Влияние на качество услуг со стороны транспортной сети – это влияние на уровне каналов или транспорта. Например, обрыв оптического кабеля или сбой в системе SDH может существенно повлиять на качество предоставления услуги на стороне конечного пользователя.

Обычно операторы защищаются от негативного воздействия смежных операторов, формируя соответствующие соглашения о качестве обслуживания (SLA). Но при всей дифференциальной политике SLA не учитывает динамику изменения ситуации на сети. Для того, чтобы в полной мере учитывать влияние транспортной сети на предоставляемые услуги необходима логическая связка между транспортным уровнем и уровнем услуг. Только в этом случае система передачи может в полной мере дифференциально подойти к собственным параметрам качества. Например, если система передачи будет располагать информацией, по каким каналам какой трафик передается, она может дополнительно оберегать одни каналы и менее заботится о других. Любой сбой в контейнере NGSDH будет сразу соотносится с определенным ухудшением качества на уровне услуг.

Для получения информации о качестве передаваемой по конкретному виртуальному коридору информации могут использоваться сигнальные сообщения, которые можно поместить в различные поля заголовков VC, например, в байтах K4, H4 или D. Информация для автоидентификации на уровне услуг должна включать:

- Трассировку маршрута, указание источника и приемника информации
- Различные сообщения типа TCM, которые позволяют учитывать влияние смежных транспортных сетей
- Тип передаваемой информации (пакетный трафик, трафик TDM, трафик Интернет, VoIP и пр.)
- Информация служебных протоколов GFP-T, GFP-P
- Приоритетность трафика
- Дополнительные параметры качества (QoS), предъявляемые к каналу

В случае, если эта информация будет доступна на сети, оператор может контролировать следующие параметры виртуального коридора:

- Содержимое виртуального коридора
- Количество транзитов через систему коммутации
- Влияние неисправностей узлов и сегментов сети

Для выполнения функций автоидентификации на уровне услуг на каждом узле сети, где осуществляется коммутация, может осуществляться передача служебных информационных пакетов UDP через поля LPOH (K4), HPOH (H4) и RS (D1-D3 DCC). Неиспользуемые VC могут помечаться пустыми пакетами.

Введение на сетях NGSDH процедур автоидентификации представляется очень заманчивым и должно принести определенные плоды. Но также, как и в случае с концепцией ASTN, автоидентификация в настоящее время реализована в реальном оборудовании довольно фрагментарно, что не позволяет говорить об этом направлении развития NGSDH как о сколько-нибудь существенном. Это скорее тренд в развитии современных систем передачи, нежели часть современной модели NGSDH.

5.7. Концепция упругого пакетного кольца RPR.

Рассмотрим работу системы NGSDH не с позиций работы первичной сети, а с позиций передачи пакетного трафика. Взгляд с этой стороны покажет все недостатки этой технологии и потребует дополнить ее новой концепцией. Именно такой концепцией является технология упругого пакетного кольца RPR.

Рассмотрим специфику передачи пакетов по сетям SDH кольцевой топологии (рис. 5.48). До сих пор перед NGSDH стояла задача соединения каналом или виртуальным коридором два сегмента сети. Теперь перейдем от понимания сети как одного канала и посмотрим на сеть в целом. Для работы кольца SDH в качестве сегмента сети с коммутацией пакетов необходимо формирование полносвязных сетей, которые обеспечивали бы связь маршрутизаторов по принципу «каждый с каждым». В этом случае кольцевая топология сетей SDH и сам принцип виртуальных коридоров входит в противоречие с топологией полносвязной сети.

В качестве примера на рис. 5.48 слева показана сеть SDH кольцевой топологии и несколько логических каналов, которые нужны для работы сети с коммутацией пакетов. Эта сеть состоит из 6 узлов, следовательно, для обеспечения связи «каждый с каждым» методом виртуальных коридоров нужно выделить на каждую связь минимум 1/5 ресурса кольца (при условии, что все связи равнозначны). В таком случае связь будет осуществляться через один центральный узел (узел B на рисунке), а схема будет эквивалентной схеме «звезда». Такая схема организации связи уже уменьшает эффективность использования ресурса. Кроме того, в ряде случаев трафик передается по кольцу дважды. Например, логическое соединение между узлами A и C проходит через

узел B. Для организации такого логического соединения трафик должен проходить от A к B, затем от B к C и обратно по линии C-D-A. Тем самым одна логическая связь требует создания виртуального коридора размером на все кольцо. Но сама схема связи между A и C через B приводит к дублированию потоков.

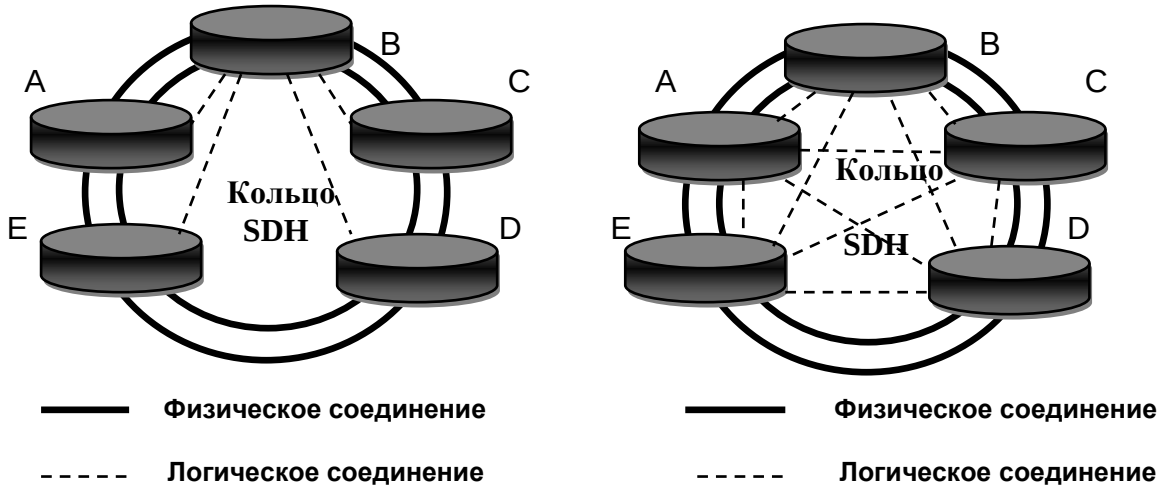


Рис. 5.48. Несколько примеров неэффективной работы NGSDH.

Не лучше обстоит дело в случае формирования полносвязной схемы организации связи по принципу «каждый с каждым» без посредничества центрального узла (рис. 5.48 справа). В этом случае дублирование передачи информации отсутствует, но возникает необходимость создания выделенного виртуального коридора между каждой парой узлов. Если предположить, что все каналы сети являются эквивалентными, то для сети из 5 узлов размер каждого виртуального коридора составит 1/10 общего ресурса кольца. Это уже ниже КПД паровоза.

Теперь рассмотрим поведение сети рис. 5.48 при передаче пакетного трафика групповой рассылки (Multicast). В этом случае трафик дублируется по всем сформированным каналам, что еще больше снижает эффективность использования сети.

Таким образом, если рассматривать сеть передачи данных на основе NGSDH именно как сеть, а не один виртуальный коридор, эффективность NGSDH вызывает большие сомнения. Тем более, что в соответствии с принципами SDH в системе закладывается резерв в 50%, так что для любого варианта реализации связей рис. 5.48 эффективность использования ресурса будет колебаться в пределах 7-15%, что вряд ли допустимо.

Еще одним недостатком NGSDH является отсутствие каких-либо процедур автоидентификации новых узлов и соединений. Даже использование LCAS не решает вопроса об установлении нового соединения или автоматического

добавления к системе нового узла. По-прежнему новый узел, равно как и новые каналы связи, должны прописываться на NMS вручную без минимальной автоматизации внутри технологии.

Таким образом, недостатками систем NGSDH с точки зрения решения задачи передачи современного пакетного трафика являются:

1. Система NGSDH, построенная на принципах виртуальных коридоров, не обеспечивает эффективного использования ресурса в случае передачи пакетного трафика.
2. Если сеть с коммутацией пакетов построена на основе топологии «звезда», то использование NGSDH в качестве транспортной сети приводит к дублированию передаваемой информации, что уменьшает эффективность использования ресурса системы передачи.
3. Если сеть построена на основе полносвязного графа, то использование NGSDH приводит к необходимости резервировать часть ресурса под каждый логический канал связи. Это тем более уменьшает эффективность использования ресурса.
4. Наличие в системе вещательного трафика (например, трафика Multicast) требует дублировать информацию по всем виртуальным коридорам NGSDH. В результате эффективность использования ресурса еще более падает.
5. Резервирование, принятое в системе NGSDH, уменьшает эффективность использования системы передачи вдвое.
6. В следствие всех перечисленных причин общая эффективность NGSDH для передачи пакетного трафика составляет 7-15%, что позволяет усомниться в эффективности этой технологии.
7. Дополнительным недостатком NGSDH является отсутствие в оборудовании и сетях функции автоидентификации, так что добавление к сети нового узла или требование сформировать новый виртуальный коридор требует вмешательства NMS.

Все перечисленные недостатки должна была устранить новая технология упругого пакетного кольца RPR.

5.7.1. Основы концепции упругого кольца RPR.

Технология RPR (Resilient Packet Ring) стала решением, позволяющим избавиться от проблем нестыковки NGSDH с современным пакетным трафиком. Эта технология была призвана адаптировать специфику передачи современного пакетного трафика к системам передачи кольцевой топологии, в том числе и к NGSDH. На этом основании технология RPR в настоящее время также рассматривается как одна из возможных реализаций технологии NGSDH. Исторически технология RPR является довольно молодой, стандартизация RPR была завершена документом IEEE 802.17 в июле 2004 г.

Рассмотрим основные принципы, заложенные в технологию RPR. Как следует из названия, в основе RPR лежит использование систем передачи кольцевой топологии, чем и достигается близкая связь с технологией SDH. Как и в SDH, RPR использует двойное кольцо с передачей информации навстречу друг другу (рис. 5.49). RPR формирует три типа пакетов, передаваемых по сети:

- Пакеты данных (DATA)
- Пакеты управления (CONTROL)
- Пакеты глобального управления (FAIRNESS)

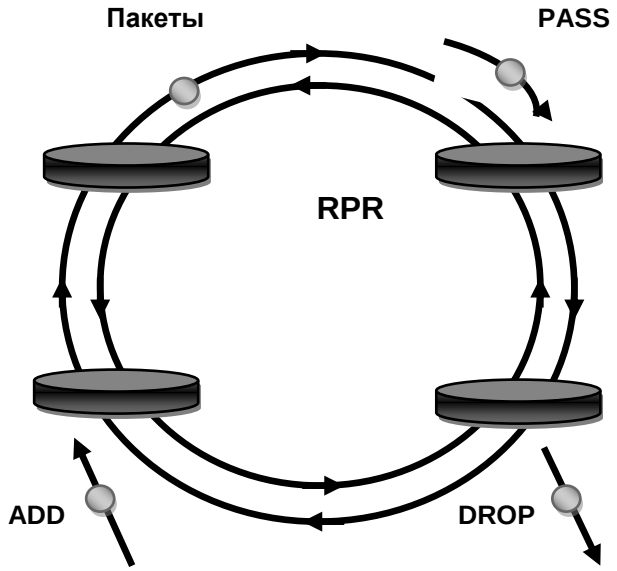


Рис 5.49. Три категории пакетов : ADD, PASS, DROP.

Пакеты данных DATA) рассматриваются системой как пакеты первого приоритета, поскольку именно они переносят трафик. Пакеты CONTROL используются для реконфигурации системы передачи, например, изменения параметров полосы пропускания, адресации и пр. Пакеты FAIRNESS используются в качестве средства управления распределенной транспортной сетью. Например, в системе RPR имеется алгоритм, согласно которому часть ресурса сети отводится для работы всех узлов. В результате такого алгоритма к узлам сети всегда есть доступ со стороны приема (по линии «вверх»). Если какой-либо из узлов RPR занимает слишком большую полосу передачи, центр управления может уменьшить ее, передавая на узел специальные пакеты FAIRNESS и тем подавляя его передатчик. Таким способом в сети RPR осуществляется борьба с перегрузками. Легко понять, что пакеты CONTROL и FAIRNESS относятся к классу управляющих сообщений, но они отличаются друг от друга по глубине управления. Можно рассматривать CONTROL как пакеты локального управления, а FAIRNESS как пакеты глобального управления.

На рис. 5.49 представлена схема работы системы RPR с пакетами DATA. Как следует из рисунка, узлы сети RPR имеют три функции: ADD, DROP и PASS. Пакеты DATA, поступающие от пользователей сети RPR, загружаются в систему

передачи (функция ADD). На стороне приемника данных выполняется функция выделения пакетов из системы передачи (функция DROP). В случае, если пакет проходит через узел системы передачи транзитом, узел не работает с пакетом (функция PASS).

В системе RPR реализовано дифференцирование нагрузки. Система поддерживает три класса качества передачи данных, обозначаемые соответственно: класс A (высокий приоритет), класс B (средний приоритет) и класс C (низкий приоритет.

Для трафика класса A обеспечивается гарантированная полоса передачи и малые параметры джиттера и задержки. Трафик класса A разделяется еще на два типа: класс A0 и A1. Для передачи трафика класса A0 в системе резервируется определенная полоса передачи, которая не может быть использована другими пользователями, даже если пользователь A0 не использует эту полосу. Для пользователей класса A1 также гарантирована полоса передачи, но в отсутствие трафика A1 эту полосу могут задействовать другие пользователи. Примерами трафика A являются: голосовой трафик, трафик видео, трафик TDM и пр.

Для трафика класса B также гарантирована полоса передачи, но выдержаны менее жесткие требования по джиттеру и задержке, чем для класса A. Примером трафика класса B является трафик данных от бизнес-приложений.

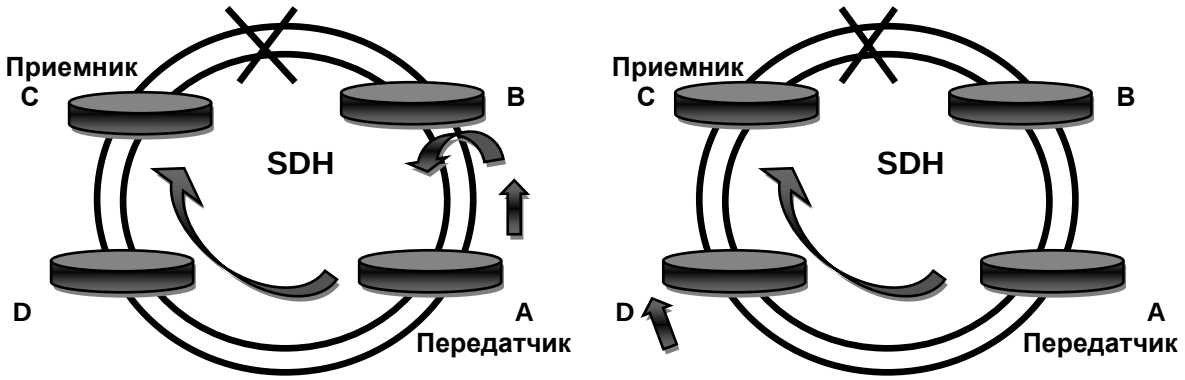
Трафик класса C представляет собой негарантированный трафик (трафик best-effort). Для него не гарантированы ни полоса, ни параметры задержки или джиттера. Оператор берет на себя обязательства прикладывать все усилия для передачи этого типа трафика (поэтому трафик и называют best-effort, т. е. «все усилия»), но именно передача трафика C останавливается, когда для передачи более приоритетного трафика не хватает полосы передачи. Примером трафика C является трафик Интернет обычных приложений.

Завершая введение в технологию RPR, рассмотрим две возможные схемы резервирования, реализованные в этой технологии. Напомним, что схема резервирования APS, применяемая в системах SDH, в настоящее время рассматривается как малоэффективная, поскольку требует 50% ресурсов сети. RPR позволяет выполнять резервирование, одновременно уменьшая необходимый для этого ресурс системы передачи.

В сетях RPR используется две схемы резервирования: схема заворота трафика (Wrapping) и схема автоматического переключения (Steering), представленные схематично на рис. 5.50. На представленном рисунке в нормальном состоянии трафик передается против часовой стрелки от A к B и C. Неисправность возникает на участке между B и C.

В случае использования алгоритма Wrapping при возникновении неисправности трафик по-прежнему передается от A к B, но затем перенаправляется обратно к A.
Так получается заворот трафика. Такая схема не требует какой-либо дополнительной функциональности узлов RPR и легко реализуема в оборудовании. В силу своей простоты алгоритм Wrapping обеспечивает высокую оперативность реконфигурации. Но у него есть и недостаток – двойное

использование ресурса сети после реконфигурации, т. к. некоторая часть трафика дважды передается от узла к узлу.



a) Wrapping b) Steering

Рис. 5.50. Принципы резервного переключения в сети RPR.

Алгоритм Steering предполагает, что на узле A имеется информация о возникшем сбое.

Тогда узел A начинает передачу данных к C в направлении D, а не B. Заворота трафика не возникает, ресурс используется оптимально. Но возникает вопрос, каким образом оповестить узел A о возникшей неисправности. Обычно для этого используется система сигнализации в виде сигналов о неисправностях, например, AIS/RDI, используемых в SDH. Но тогда возникает задержка с реконфигурацией, поскольку нужно время для передачи информации на узел A, анализа информации и реконфигурации по новому маршруту. Следовательно, алгоритм Steering работает медленнее, чем алгоритм Wrapping.

Поскольку оба изложенных алгоритма имеют свои преимущества и недостатки, они оба могут применяться в системах RPR. В современном стандарте основным алгоритмом считается алгоритм Steering, алгоритм Wrapping рассматривается как дополнительный.

Технология RPR допускает объединение двух алгоритмов с целью использования преимуществ каждого. При возникновении неисправности, когда критичным фактором является время реконфигурации, в RPR может использоваться сначала алгоритм Wrapping, а затем, когда реконфигурация уже проведена, используется алгоритм Steering с целью повышения эффективности использования ресурса системы передачи.

5.7.2. Преимущества RPR.

Рассмотрев в общих чертах технологию RPR, остановимся на преимуществах этой технологии по сравнению с SDH.

1. RPR идеально адаптирована к системам кольцевой топологии, которые применяются на городских сетях. Эта технология удобна для реализации функции MAN (Metro Area Networks), поскольку более эффективна в части использования ресурса, чем SDH или технология полносвязных сетей Ethernet.
2. RPR адаптирована к пакетному трафику и имеет все необходимые для этого механизмы: сопряжение со стандартами Ethernet (IEEE 802.17), ориентация на коммутацию пакетов, дифференциальная политика по трафику (разные классы трафика), дополнительные сигналы о неисправностях уровня пакетного трафика и пр.
3. Поскольку в процессе передачи каждый узел видит весь трафик и решает, пропустить ли его дальше или провести операцию ввода/вывода, трафик передается по кольцу в RPR только один раз. Это особенно существенно для передачи трафика групповой рассылки (Multicast).
4. RPR адаптирована к современным развернутым оптическим сетям. Переход от SDH к RPR может осуществляться простой заменой модулей в оборудовании.
5. Технология RPR может быть эффективно совмещена с технологией SDH. В этом случае часть ресурса системы SDH отводится для RPR, а остальная функционирует как обычная сеть SDH. Такая архитектура позволяет выстраивать политику на постепенную миграцию от систем SDH к RPR без необходимости коренной перестройки сети на любом этапе перехода.
6. Система передачи RPR может эффективно расширяться. Подключение нового узла к системе RPR не требует масштабного изменения конфигурации, система сама динамично изменяет топологию.
7. В то же время при всей гибкости работы RPR обеспечивает высокую скорость восстановления (<50мс) в случае возникновения сбоев в системе передачи. Сочетание алгоритмов Wrapping и Steering позволяет добиться времени восстановления, меньше чем в SDH.
8. Использование ресурса резервного кольца увеличивает КПД системы передачи.

Все перечисленные преимущества позволяют причислить RPR к одному из вариантов реализации концепции NGSDH. Хотя по стандартам RPR находится не так близко к SDH как технология {VCAT, GDP, LCAS}, в ряде случаев RPR может оказаться более эффективной надстройкой над транспортной системой SDH. Поэтому при широком понимании концепции NGSDH технологию RPR можно и должно рассматривать как еще один важный уровень современной модели систем SDH второго поколения. Технология RPR , также как и триада {VCAT, GFP, LCAS}, занимает пространство между технологиями пакетной передачи данных (IP, MPLS, Ethernet и пр.) и технологией транспортной сети SDH, соединяя эти разнородные классы технологий. Такое положение формирует для технологии RPR свой отдельный сегмент рынка, в котором эта технология будет

доминировать в ближайшем будущем. Этот сегмент – городские сети MAN кольцевой топологии, а таких сетей большинство. Но возникает закономерный вопрос, почему бы не стоить сети MAN только на технологии Ethernet, минуя уровень RPR. Оказывается, что сравнение RPR и Ethernet как двух альтернативных методов построения MAN показывает преимущества RPR. Основным преимуществом перед технологией Ethernet у RPR является более высокая устойчивость работы.

Специфика формирования транспортных сетей уровня MAN подразумевает довольно высокие параметры надежности. В то же время технология Ethernet имеет «родовую травму», поскольку происходит из технологии студенческих локальных сетей, где параметры надежности и скорость восстановления работы сети не были столь актуальны.

Поэтому в противовес времени переключения на резерв в 50 мс в RPR, технология Ethernet (протокол Spanning Tree (SPT) IEEE 802.1d) предлагает время восстановления порядка 1 минуты, что в условиях MAN оказывается недопустимым даже для передачи трафика данных в условиях современного города. Например, в случае использования MAN для передачи банковских данных, новостей, данных автоматизированных систем современных городов и пр. перерыв в несколько минут может иметь тяжелые последствия.

Новые стандарты Ethernet, связанные с протоколом RSTP (Rapid Spanning Tree Protocol, IEEE 802.1w) позволяют уменьшить время восстановления работы сегментов сети. Называется даже величина в 10 мс на переключение в идеальном случае, но практические опыты показали, что эта величина недостижима, а более реалистичная оценка составляет порядка 1 с, что также оказывается неприемлемым.

Вторым преимуществом RPR, более тактического характера, является то, что эта технология адаптирована к оптическим кабельным системам кольцевой топологии, которые со времени внедрения SDH, составляют костяк современных кабельных систем городов. Ethernet ориентирован на системы линейной топологии и требует формирования полносвязных сетей. В результате система MAN/Ethernet требует большего ресурса у кабельной системы, чем MAN/RPR.

Таким образом, RPR удачно соединяет в себе более высокую эффективность использования ресурса системы передачи по сравнению с SDH и большую, по сравнению с Ethernet, адаптацию к требованиям современных городских сетей MAN.

Занимая промежуточное положение между Ethernet на уровне пользователей и SDH в транспортной сети, технология RPR дает столь много преимуществ, что в будущем обречена на успех. По крайней мере можно констатировать, что эта технология получит не меньшее распространение, чем триада {VCAT, GFP, LCAS}.

5.8. Системы SDH второго поколения. MSPP и MSSP.

Рассмотрим структуру технологий, входящих в NGSDH (рис. 5.51). На рисунке представлен многоуровневый базис современной технологии.
Здесь необходимо
разделять различные решения между уровнем транспортной сети и уровнем услуг. Между ними лежит промежуточная область, в которую входят практически все современные технологические решения.
Например, технология RPR может рассматриваться как чисто транспортная, но в ней есть элементы уровня услуг, поскольку в RPR реализуется политика разделения трафика на классы. Уровень транспортной сети и уровень услуг определяются в контексте современной измененной модели OSI.

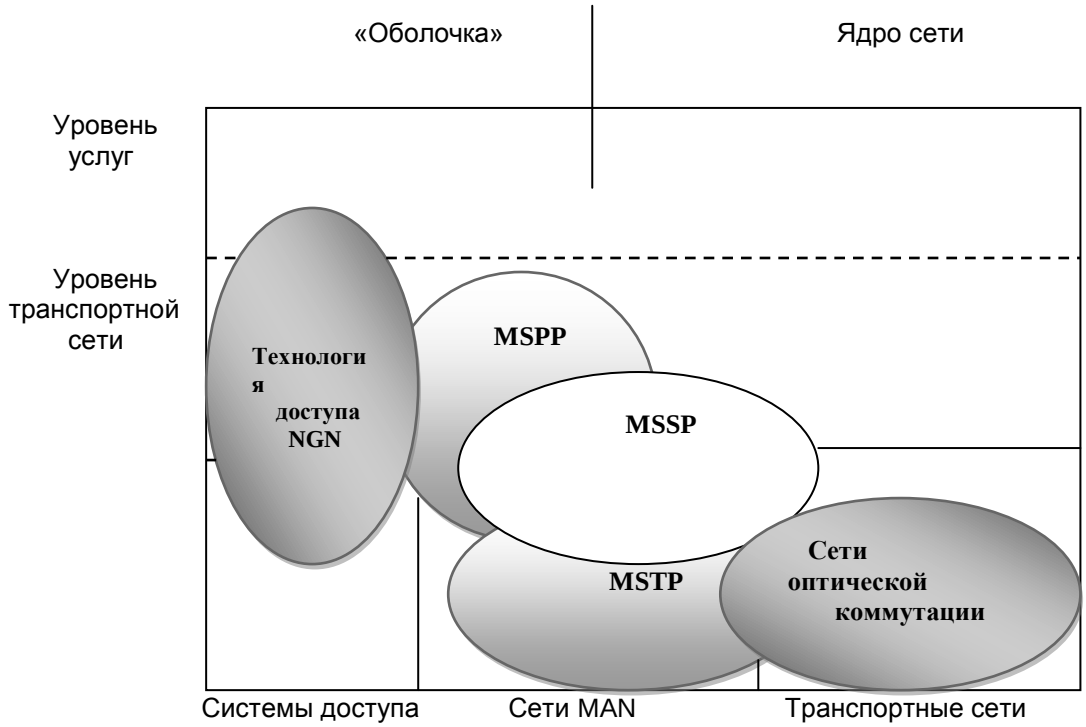


Рис. 5.51. Технологическое построение NGSDH в исторической перспективе.

На уровне транспортной сети существует разделение решений по схеме «транспорт-доступ». В действительности помимо уровней транспортной сети и уровня сетей доступа есть еще один промежуточный уровень – уровень городских сетей MAN. Причина здесь в том, что сама информатизация идет преимущественно в городах, здесь сети развиваются очень бурно, так что в современных MAN используются различные решения: от hot-pot систем Wi-Fi до 10 Gigabit Ethernet. Именно поэтому невозможно причислить решения MAN ни к транспортной сети, ни к сети доступа, поскольку здесь присутствуют элементы обоих уровней. Гораздо удобнее рассматривать уровень MAN как промежуточный уровень между сетями доступа и транспортными сетями.

На уровне услуг выполняется деление на ядро сети (Core), где предоставляются базовые услуги и формируются общие принципы

функционирования приложений, и «оболочку» (Edge), которая позволяет адаптироваться к требованиям каждой группы пользователей.

На рис. 5.51 представлены следующие технологии, которые составляют будущее современных широкополосных систем связи:

1. Технология доступа NGN
2. Мультисервисная платформа транспортной сети MSPP (Multiservice Provisioning Platform)
3. Мультисервисная транспортная платформа MSTP (Multiservice Transport Platform)
4. Мультисервисная коммутационная платформа MSSP (Multiservice Switching Platform)
5. Технология сетей оптической коммутации

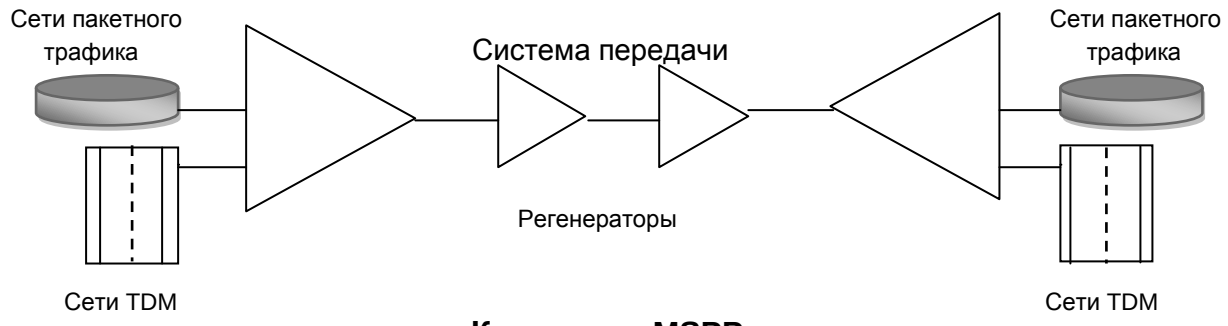
Демократический принцип NGN предсказывает, что в будущем все перечисленные технологии будут соседствовать друг с другом. Рассмотрим теперь некоторые особенности и перспективы развития каждой из них.

Технология доступа NGN широко использует достижения технологии SDH, и уже на этом основании должна быть включена в рис. 5.51. В то же время технология доступа должна рассматриваться изолированно. Основная цель технологии доступа – максимальная адаптация к специфике конкретных групп пользователей с тем, чтобы обеспечить им доступ к сети NGN. Поэтому модно предполагать, что технологии доступа будут весьма разнообразными и по типам передаваемого трафика, и по различным методам, средам передачи сигналов и пр. Технология NGSDH для сетей доступа не может считаться доминирующей, поскольку для таких сетей вообще доминанта не определена. Сегодня это может быть SDH, завтра Wi-Fi или ADSL2+, послезавтра Gigabit Ethernet. NGSDH для сетей доступа может быть только «первой среди равных» технологий, одним из компонентов мультисервисных сетей. Можно предполагать, что оборудование NGSDH для мультисервисных сетей доступа будет устройствами, для которых уже сейчас в западной технической литературе используется понятие «коробка пиццы» (pizza box product),т. к. это оборудование простое, компактное и недорогое. Основное назначение устройств NGSDH в этом случае будет передача комбинированного трафика (пакетного и TDM).

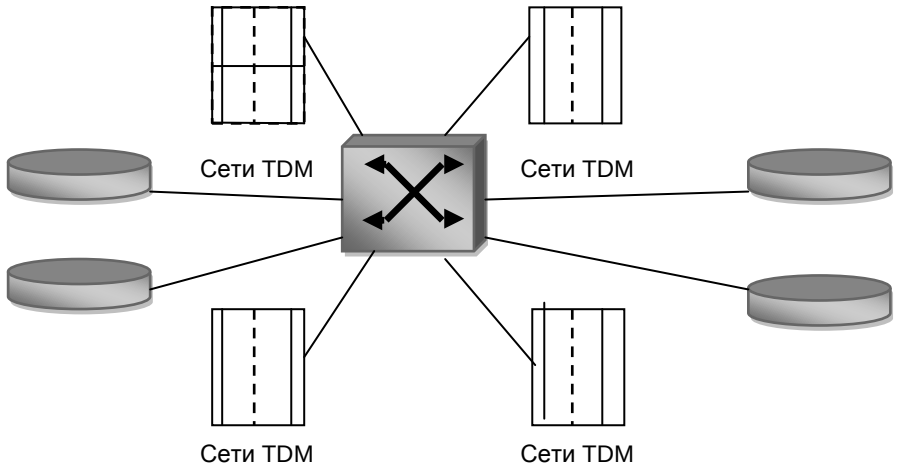
Первые устройства доступа для NGSDH уже сейчас представлены на рынке. Они широко используют методы классической SDH – GFP, VCAT. В ближайшее время появятся устройства, ориентированные на RPR.

Технология мультисервисной платформы MSPP представляет собой первую генерацию оборудования NGSDH для транспортных сетей. Основное требование к MSPP – передача в транспортной сети комбинированного трафика и эффективное его мультиплексирование. По этой причине технологию MSPP часто в современной литературе отождествляют с NGSDH. Но это не совсем корректно, оно верно только в случае, если под NGSDH понимать адаптацию SDH к условиям передачи комбинированного трафика. Принципы концепции MSPP представлены на рис. 4.52. Как видно из рисунка, основными функциями систем MSPP является передача комбинированного трафика по единой транспортной сети и

мультиплексирование/демультиплексирование разнородной нагрузки в точках доступа. Исходя из изложенного, в системах MSPP не делается дифференцирование трафика по классам и поэтому невозможно реализовать политику в области контроля качества QoS. Как показано на рис. 5.51, технологическая концепция MSPP базируется на транспортном уровне и не касается уровня услуг.



Концепция MSPP



Концепция MSSP

Рис. 5.52. Разница между технологиями MSPP и MSSP.

В настоящее время технология MSPP часто называется системами SDH второго поколения. Современная революция в области транспортной сети связана с внедрением именно этой концепции. Однако, уже сейчас эксперты отмечают, что при всей востребованности концепции MSPP для построения современных транспортных сетей, в будущем этой концепции будет явно недостаточно, чтобы удовлетворить все требования современных систем NGN. Поэтому на смену оборудованию второго поколения (MSPP) должно прийти третье поколение оборудования с новой концепцией MSTP/MSSP. Разделение третьего поколения на мультисервисную транспортную платформу **MSTP (Multiservice Transport Platform)** и мультисервисную коммутационную платформу **MSSP (Multiservice Switching Platform)** было заимствовано из концепции

современных систем сигнализации ОКС7. В ОКС7 имеет место разделение между транспортом сигнальных сообщений (транспортные узлы STP) и точками предоставления услуг (узлы SSP). Компонента STP выполняет коммутацию потоков до точки предоставления услуг, в точке SSP обеспечиваются новые услуги. Так работают интеллектуальные сети (IN). Эта концепция оказалась очень эффективной для вторичных сетей телефонии, поскольку для внедрения новых услуг в IN нет необходимости модернизировать все узлы сети, достаточно модернизировать ПО узлов SSP или даже одного отдельного узла, на котором и будет предоставляться новая услуга.

Переход от систем SDH второго поколения к системам третьего поколения связан с введением в транспортную сеть принципов коммутации пакетов. Следует понимать разницу между коммутацией и переключением. Переключение потоков, пусть даже оперативное и автоматическое, присутствует в концепции MSPP. Но оно не обеспечивает функции оперативной коммутации, когда отдельные данные передаются на отдельные направления.

Необходимость в оперативной коммутации в рамках транспортной сети может появиться, когда возникнет задача не просто передавать по транспортной сети комбинированный (мультисервисный) трафик от точки к точке, но также выполнять функции разветвления трафика (вещательные сети) и оперативной коммутации в соответствии с типом предоставляемой услуги. Когда такая необходимость появится, начнется постепенный переход к системам третьего поколения MSTP/MSSP. Как показано на рис. 5.51, системы MSSP неизбежно связаны с уровнем услуг, поскольку в таких сетях сам процесс оперативной коммутации требует разделения трафика по классам и установки приоритетов и параметров качества QoS для каждого приоритета.

Концепция MSTP будет обеспечивать поддержку технологии MSSP на уровне транспортных сетей. С точки зрения концепции MSTP будет представлять собой усеченную систему MSSP, и за счет уменьшения функциональности узлов технология MSSP/MSTP окажется более эффективной, чем системы второго поколения. По сути, произойдет то же, что с системами коммутации телефонных сетей. До определенного момента сеть строится на однородных и одинаковых узлах MSSP, но с развитием методов коммутации необходимо будет провести разделение на транспортные узлы MSTP и узлы коммутации MSSP.

В концепции систем третьего поколения ключевым изменением является процедура коммутации мультисервисного трафика. Поэтому развитие систем третьего поколения напрямую связано с разработками в области аппаратуры MSSP. Сейчас делаются первые попытки таких разработок, поэтому говорить о принципах работы систем третьего поколения сложно. Эксперты оценивают емкость коммутаторов MSSP от 20 Гбит/с до 160 Гбит/с, что позволит объединить в одном узле с коммутацией до 32-64 колец NGSDH.
Коммутатор MSSP в этом случае будет выполнять коммутацию на уровне отдельных VC с кольца на кольцо, соблюдая при этом параметры приоритетности и политику в области QoS. В настоящее время сложно даже оценить процессы, которые будут проходить в
таких сетях.

Оценить сложность будущей технологии MSSP можно, объединив все современные наработки в области NGSDH и системы ОКС7, а затем помножив

полученный объем технологических знаний на два, поскольку объединение технологий в одну всегда добавляет сложности.

Концепции MSPP, VSTP и MSSP связываются в настоящее время в первую очередь с городскими сетями MAN.

На уровне транспортных сетей технология SDH второго поколения связывается с современными технологиями NGSDH (GFP, VCAT, LCAS) и транспортной технологией WDM/OTN. Технология OTN представляет собой некоторое упрощение технологии NGSDH. Упрощение заключается в сокращении количества заголовков и процессов внутри системы передачи, чтобы лучше адаптировать ее к протяженным сетям. В результате уже сейчас длина участка регенерации OTN почти в 2 раза больше регенерационного участка NGSDH. Технология WDM/DWDM также связана с системами передачи второго поколения, эта технология позволяет увеличить пропускную способность протяженных транспортных сетей.

Технология третьего поколения для транспортных магистральных сетей связывается с **оптическими системами берстной коммутации OBS.** Как и в случае с технологией MSSP, в настоящее время сложно оценить принципы построения и функционирования систем OBS. Известны только самые общие принципы.

Обобщая вышесказанное, можно составить таблицу развития технологии NGSDH (табл. 5.18), которая позволит ориентироваться в современном и перспективном научно-техническом прогрессе в области технологии транспортных сетей.

Таблица 5.18. Развитие технологии NGSDH в современных транспортных сетях.

Этап	**Оптические системы передачи PDH**	**Классическая SDH**	**NGSDH второго поколения**	**Системы третьего поколения**
Период	80-е	90-е	1996-2005	После 2006
Сетевые элементы	Мультиплексоры	МВВ, регенераторы, коммутаторы	MSPP	Системы мультисервисного доступа, MSTP, MSSP, OBS
Идеология	Системы передачи высокой надежности и протяженности	Управляемость, надежность и гибкость	Минимизация затрат для построения MAN/WAN, передача пакетного трафика по существующим сетям	Построение универсальной транспортной сети для всех возможных видов трафика

Сетевые топологии	Точка - точка	Точка – точка, кольцевая топология	Возможность создания полносвязных и вещательных сетей	Любые виды топологии
Взаимодействие оборудования разных производителей	Нестандартные интерфейсы, нет взаимодействия	Стандартизация, возможность объединения разнородного оборудования	Элементы технологии Plug&Play,автоидентификация оборудования в сети	Полная интеграция разнородного оборудования на принципах Plug&Play
Управление и контроль QoS	Нестандартные методы диагностики неисправностей	Стандартизированные сигналы о неисправностях, простая интеграция с OSS	Реализация автоматических методов управления ресурсом в разнородной сети	Расширение функций управления на уровень DWDM, добавление уровней GFP и сервисного уровня
Уровни технологии	Только канальный уровень	Сетевой уровень	Транспортный уровень	Все уровни, включая уровень услуг

6. Принципы контроля сетей NG SDH.

6.1. Особенности NGSDH с точки зрения практики контроля.

Рассмотрим сначала особенности систем SDH второго поколения с точки зрения новых и отличительных элементов, которые привносит технология NGSDH в процесс эксплуатации.

Во-первых, вместо каналов мы имеем виртуальные коридоры. Это должно изменить принципы контроля систем передачи.

Во-вторых, в самой системе NGSDH передается комбинированный трафик, включающий трафик TDM и пакетный трафик. Это также не может не сказаться на принципах измерений.

В-третьих, новые технологии VCAT, GFP, LCAS, RPR должны повлиять на методы контроля систем передачи. Эти технологии добавляют дополнительные технологические уровни над SDH. Следовательно, размерность самих эксплуатационных решений будет большей.

Вот, пожалуй, и все отличительные черты систем SDH второго поколения. Все перечисленные изменения, внесенные технологией NGSDH, совершенно не затрагивают архитектуры системы передачи. Более того, технология MSPP призвана выполнить адаптации существующих систем SDH к специфике передачи мультисервисного трафика. Следовательно, принципом анализа практической стороны NGSDH будет принцип дополнительности: **Эксплуатационная**

концепция NGSDH представляет собой только дополнение концепции SDH с учетом всех нововведений MSPP.

Эксплуатационные и практические методы для сетей MSPP должны опираться на весь массив знаний о классической SDH и лишь в своих нововведениях дополняться соответствующими технологиями контроля. С этим связан тот факт, что **для систем NGSDH нет принципиально новых видов точек демаркации.**

Все рассмотренные ранее внешние и внутренние точки демаркации оказываются в равной степени актуальными и для систем NGSDH. Единственным принципиальным изменением будет качественный состав параметров в этих точках, но сами точки оказываются теми же. В результате за счет расширения спецификации параметров происходит расслоение внешних точек демаркации на несколько разных типов, и общее количество видов точек демаркации увеличивается. Тем не менее, сам характер этих точек не меняется. Исключение составляет внедрение систем WDM в качестве ядра систем передачи. В этом случае привнесение новой системы внутрь NGSDH объективно увеличивает количество внутренних точек демаркации. Таким образом, построение концепции эксплуатации современной системы NGSDH будет опираться на принцип дополнительности. Для таких сетей наиболее явно проявляется «эффект матрешки»: все наработанное практическое знание для систем SDH автоматически включается в эксплуатационную концепцию NGSDH и лишь дополняется в соответствии с тремя перечисленными выше концептуальными пунктами нововведений. Поэтому мы будем рассматривать здесь только дополнения «внешнего слоя» технологий и объединения их с базовыми знаниями в области эксплуатации классической SDH.

6.2. Многоуровневое решение по контролю NGSDH.

6.2.1. От каналов к виртуальным коридорам.

Технологию измерений NGSDH начнем с рассмотрения влияния виртуальных коридоров на принципы организации измерений. Для этого вернемся к рассмотренной ранее схеме с несколькими виртуальными коридорами в системе NGSDH сети MAN. Как уже отмечалось, любой канал в системе SDH имеет, как минимум, две точки демаркации по краям. Эти точки связаны с подключением оборудования пользователя, так что они могут считаться внешними точками демаркации. Точно также любой виртуальный коридор в системе NGSDH имеет две точки демаркации по краям (рис.6.1).
Из рисунка сразу видно усложнение концепции измерений. В случае SDH мы имели бы только два типа точек демаркации: в точке подключения пользователя PDH и в точке сопряжения оборудования SDH с WDM. Теперь имеется 5 типов точек демаркации, из которых одна точка соответствует параметрам классической SDH. Перечислим эти точки:

1. Точка подключения пользователя по интерфейсу Ethernet (внешняя точка, соответствует NGSDH)
2. Точка подключения пользователя PDH к системе NGSDH (внешняя точка, соответствует классической SDH)
3. Точка сопряжения мультиплексора NGSDH с мультиплексором WDM (внутренняя точка, актуальная и для случая классической SDH)

4. Точка сопряжения коммутатора Gigabit Ethernet с WDM (внешняя точка, соответствует NGSDH)
5. Внутренняя точка демаркации в системе WDM (актуальная только в случае малой функциональности встроенной системы контроля WDM, соответствует NGSDH).

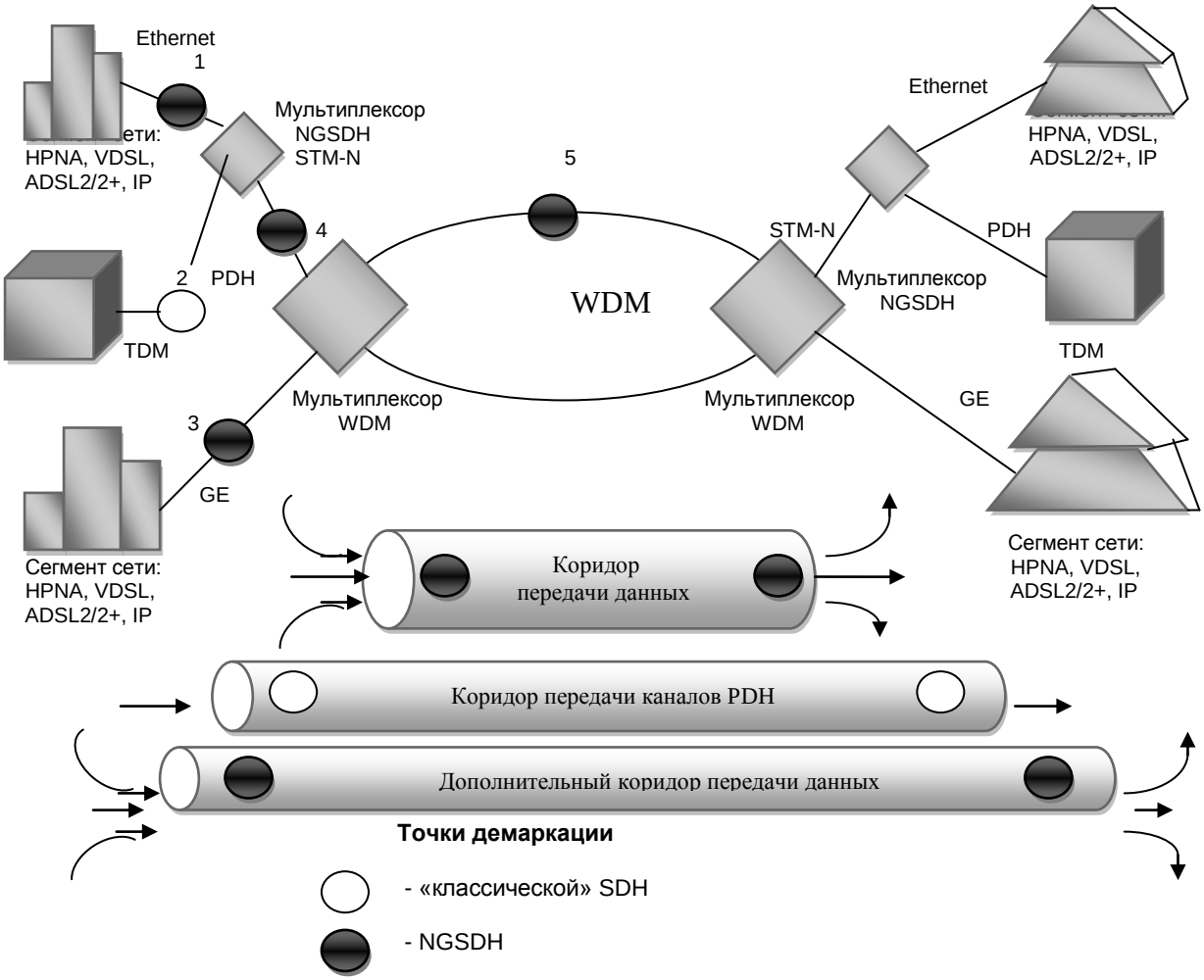


Рис. 6.1. Точки демаркации в NGSDH для сети MAN.

Здесь только точка 2 соответствует «классической» SDH и в полной мере отвечает этой технологии. Все остальные точки демаркации связаны уже с NGSDH. Итак, даже поверхностное рассмотрение позволяет сделать два вывода:

1. В системах NGSDH при использовании систем WDM внутренних точек демаркации становится больше, чем в системах SDH

2. Параметры внешних точек демаркации изменяются, т. е. технология NGSDH вносит в точки демаркации новые параметры. В ряде случаев это приводит к появлению новых точек демаркации.

Теперь рассмотрим более подробно, каким образом меняются принципы измерений во внутренних точках демаркации NGSDH, и в чем состоит добавление

новых параметров и появление новых точек. Дело в том, что концепция виртуальных коридоров изменяет саму структуру нагрузки систем передачи. В системах SDH нагрузка была структурирована. Теоретически можно было соединить в одной системе передачи контейнеры разного размера, например, VC-12 и VC-4, но практически это встречалось крайне редко. Соответственно, измерения в SDH носили структурированный характер. Большая часть анализаторов SDH первого поколения даже не имеют возможность генерировать и анализировать разнородные потоки, например, одновременно VC-12 и VC-4, и даже выполнять одновременный анализ нескольких VC-12. Сам принцип установки параметров подключения ориентирован на однородно структурированную нагрузку. Например, если в системе SDH реализуется схема C-12 (TU-12) (TUG-2) (TUG-3) (VC-4) (AU-4) (AUG-1) (STM-1), то именно такие установки должны быть выполнены на анализаторе SDH. Но это означает, что ПСП будет загружаться только в один канал C-12, все же остальные поля, контейнеры и пр. не будут содержать текстовой нагрузки, и мы не сможем анализировать параметры качества других потоков.

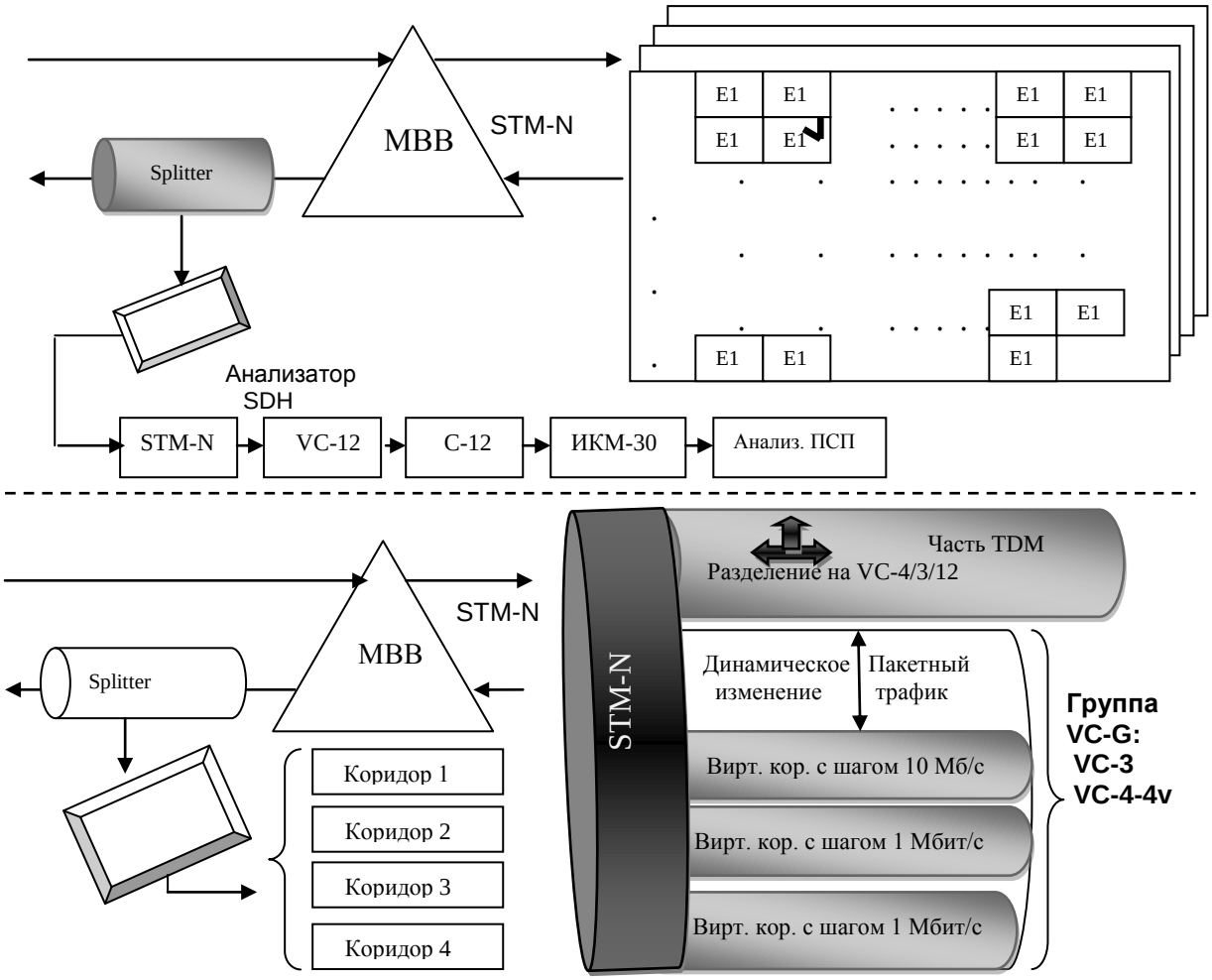


Рис. 6.2. Различия в принципах диагностики систем SDH и NGSDH.

В качестве примера на рис. 6.2 представлено соответствующее меню установок анализатора Victoria, из которого видно, что мониторинг потоков

осуществляется только для одного контейнера VC-12 с определенным номером в транспортном модуле. Таким образом, даже при однородной нагрузке (например, 63 потока E1 в одном STM-1) анализируется только один контейнер нижнего уровня.

В случае NGSDH ситуация меняется, теперь в транспортном модуле STM-N присутствует два типа трафика: один TDM, разделенный на контейнеры VC-12/VC-4, другой виртуально конкатенированный трафик с динамическим изменением VCAT/LCAS. Для анализа такой системы требуется контролировать параллельно несколько VC. Контроль нескольких VC вытекает из самой задачи контроля конкатенированных потоков VC-N-Kv. Например, для того, чтобы контролировать VC-4-7v, нужно провести одновременный контроль 7 контейнеров VC-4, которые рассматриваются системой NGSDH как единый поток. Учитывая, что VCAT-потоки могут объединять несколько разных контейнеров, да еще и динамично изменять VCG при использовании протокола LCAS, легко понять, что методически реализовать мониторинг VCAT возможно только, обеспечивая мониторинг многих или даже всех VC одновременно.

Следовательно, в условиях NGSDH возникает методика, которая потенциально должна позволять контролировать все виртуальные коридоры, будь это SDH или VCAT (рис. 6.2 снизу). Это существенно меняет сам подход к организации измерений в системе передачи. Во-первых, должна объективно измениться функциональность приборов, они должны обеспечивать несколько параллельных процессов измерения на разных VC. Во-вторых, сам процесс одновременного контроля нескольких VC со всеми информационными полями, заголовками и пр. требует широкого применения средств статистической обработки информации, поскольку прибор станет совершенно бесполезным ввиду огромного объема необработанной информации. В-третьих, в условиях применения этих средств должны измениться принципы отображения информации. Есть все основания предполагать, что новый этап разработок в области графического представления информации даст еще один или несколько дополнительных к ГХА методов экспертного анализа.

Меняется и сама процедура описания и нормирования параметров системы передачи. Вообще, любое описание канала в системе передачи можно свести к трем группам параметров: входным, выходным и дополнительным (рис. 6.3). Входные параметры канала – это установки и конфигурация того или иного потока. Выходные параметры – это параметры качества (QoS) канала системы передачи, связанные уже с работой системы и внешними воздействиями на нее. Обычно эта категория параметров используется для нормирования канала.

Дополнительные параметры представляют собой параметры канала, полезные

для систем эксплуатации, но не нормированные стандартами по качеству. Например, информация о неисправности полезна для служб эксплуатации, но не связана с нормированием каналов.

Рис. 6.3. Параметры описания каналов систем передачи.

Сам процесс нормирования по параметрам можно представить формулой F2 = g(F1), т.е. это установление соответствия между параметрами качества (выходными) и параметрами канала (входными). Рассмотренные ранее необходимые измерения как раз связаны с установлением такого соответствия. Эксплуатационный анализ системы передачи можно охарактеризовать более широким соответствием {F3, F2} = g(F1).

Для каналов системы SDH можно было применять стандартный набор параметров по методикам G.821/G.826/M.2100, лишь незначительно дополняя его сигналами неисправности SDH.

Методика, опирающаяся на структурированную нагрузку, делает область входных параметров F1 при SDH тривиальным: достаточно задать уровень измеряемого потока и схему мультиплексирования, например, рассмотренная нами схема C12 (TU-12) (TUG-2) (TUG-3) (VC-4) (AU-4) (AUG-1) (STM-1) в полной мере формирует все входные параметры. Выходные параметры F2 в случае системы SDH также определены и рассмотрены нами ранее. Это параметры BER, ES, SES и пр.

При дополнении их параметрами хронограммы сигналов о неисправности получим полный перечень {F2, F3} и алгоритм ГХА как практическое воплощение соотношения {F3, F2}=g(F1).

В случае виртуальных коридоров перечень входных параметров F1 необходимо существенно расширить и добавить параметры виртуального коридора: пропускную способность, схему конкатенации и пр. Так можно учесть гибкость процедуры VCAT. Выходные параметры F2 также неизбежно расширяются, поскольку теперь они привязаны к типу трафика, передаваемому по виртуальному коридору.

Это могут быть параметры обычной SDH, если по коридору передается трафик TDM. При передаче по коридору пакетного трафика в перечень входных параметров должны быть добавлены специфические параметры F2, связанные с паспортизацией транспортных сетей:

- Пропускная способность (Throughput)
- Задержка (Latency), девиация задержки (LD) и изменение задержки во времени (LoT)
- Количество потерянных пакетов (Frame Loss)
- Количество пакетов с ошибками (Frame Error)
- Параметры неравномерности трафика (Back-to-Back)

Кроме того, сама статистика по VCG может выступать в качестве выходного параметра.

Дополнительные параметры F3 в случае виртуального коридора тоже расширяются, т. к. должны дополняться параметрами активности VCG (статистика и трассировка LCAS (рис. 5.4).

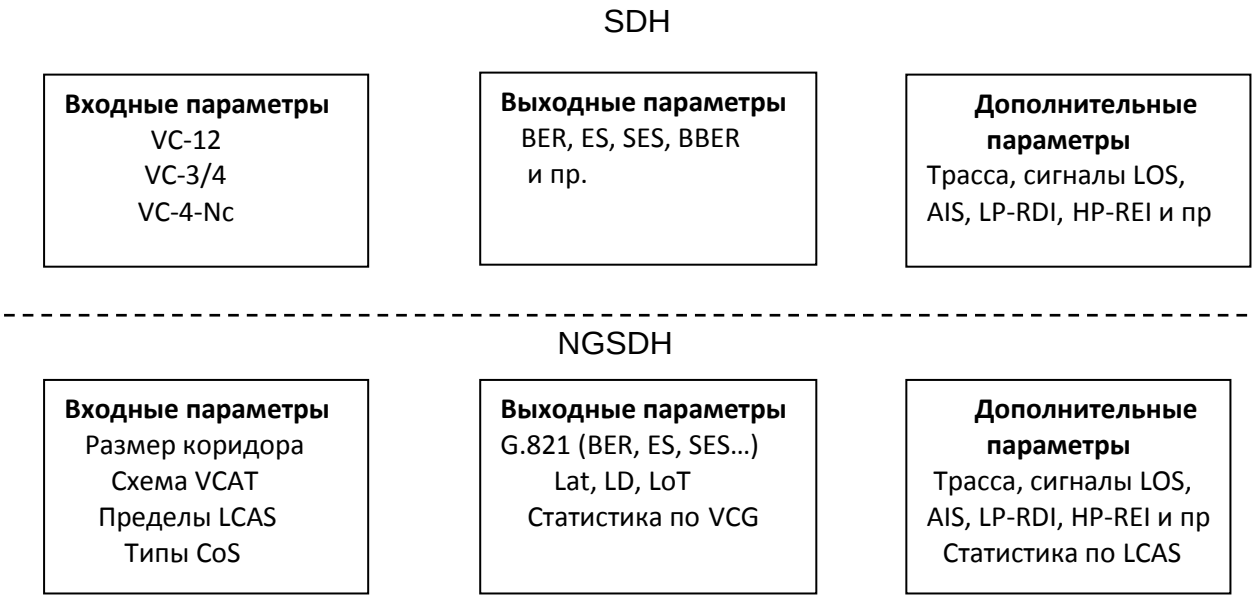


Рис. 6.4. Различие в параметрах описания потока SDH
и виртуального коридора NGSDH.

Таким образом, особенностью виртуальных коридоров является существенное расширение параметров описания, нормирования и измерения. Это касается входных, выходных и дополнительных параметров.

6.2.2. Мультисервисный трафик.

Второй специфической особенностью систем NGSDH является изменение самой структуры трафика, дополнение трафика TDM пакетным трафиком. Поэтому проблематика контроля параметров мультисервисного трафика связана с услугами и контролем их качества. И чем более разнообразны услуги, тем более разнообразными будут предъявляемые к транспортной сети нормы на параметры качества. Наличие мультисервисного трафика требует не только расширения перечня параметров, но еще и дифференцирования параметров качества в соответствии с услугами. Если в рассматриваемом виртуальном коридоре К1 передается трафик, связанный с услугой S (рис. 6.5 сверху), то возникает необходимость гарантировать определенные параметры качества услуги от источника услуги до пользователя. В полной мере параметры качества, связанные с услугой, нормируются на уровне услуг, где формируется определенное соглашение о качестве (SLA). Но опорой услуги является система передачи, переносящая трафик определенной структуры. В случае NGSDH это

виртуальный коридор, в котором передается комбинированный трафик (трафик TDM + пакетный трафик). Тогда со стороны услуги будут сформулированы определенные требования к параметрам качества, которым должен соответствовать канал передачи.

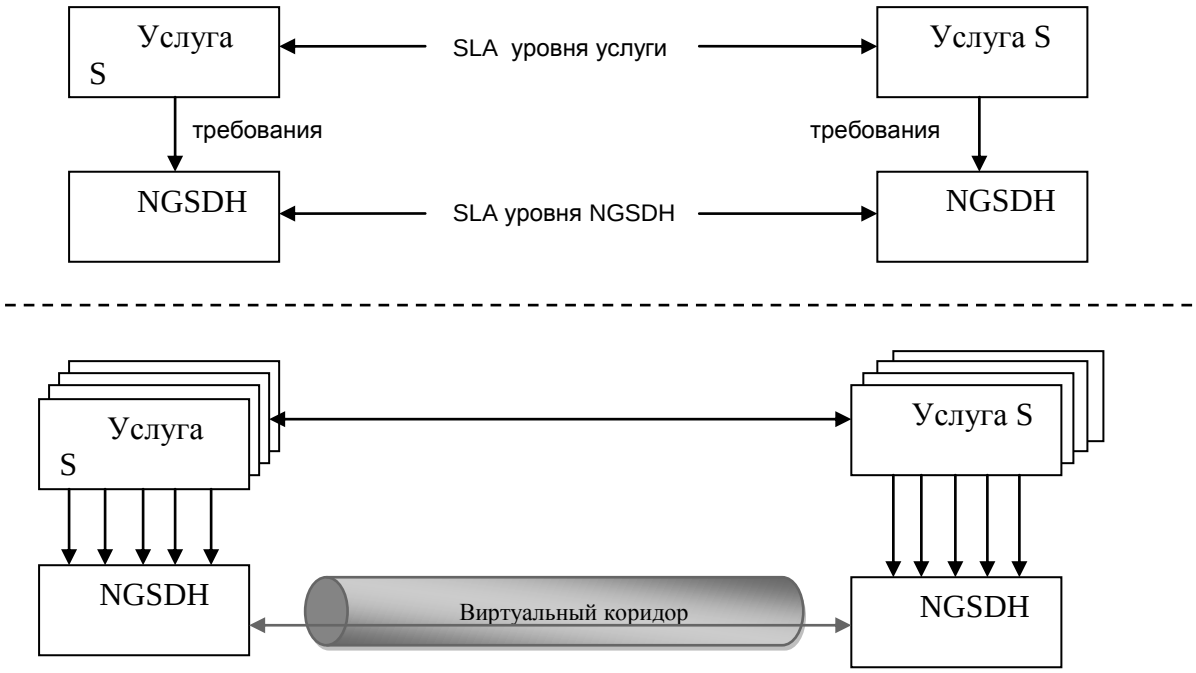


Рис. 6.5. Влияние SLA уровня услуг на параметры качества в виртуальном коридоре.

В общем случае с одним виртуальным коридором может быть связано несколько услуг. В этом случае каждая из услуг внесет свой вклад в общие требования к параметрам качества виртуального коридора. Как уже отмечалось, вопросы контроля качества услуг в транспортной сети NGSDH в полной мере не присутствуют. Предполагается, что транспортная сеть отвечает за качество предоставляемого канала, а гарантированный уровень качества услуги должны обеспечивать уровни выше транспортного, например технология MPLSoSDH. Но этот факт означает только, что система передачи не несет ответственности за **все** параметры качества услуги. Тем не менее часть параметров качества виртуального коридора оказывается критичной для SLA уровня услуги. Например, современные банковские системы требуют надежности передачи информации порядка 99,99999%. Для обеспечения такого параметра система передачи должна иметь параметр US лучше, чем 0,00001%, что и должно быть указано в SLA для виртуального коридора.

С точки зрения эксплуатационных методик для систем NGSDH рассмотренная особенность имеет только одно важное следствие. Если в системах SDH ориентировались на нормы стандартов первичной сети, а сам механизм SLA рассматривали как дополнительный, то в мультисервисной сети в

условиях многообразия предоставляемых услуг уже SLA является обычной практикой, а стандарты превращаются в частный случай SLA.

6.2.3. Многоуровневая архитектура и многоуровневое решение по контролю NGSDH.

Обобщая материал предыдущей главы, можно предложить следующее многоуровневое деление современной технологии NGSDH (рис. 5.6), на которой выделено три пояса уровней.

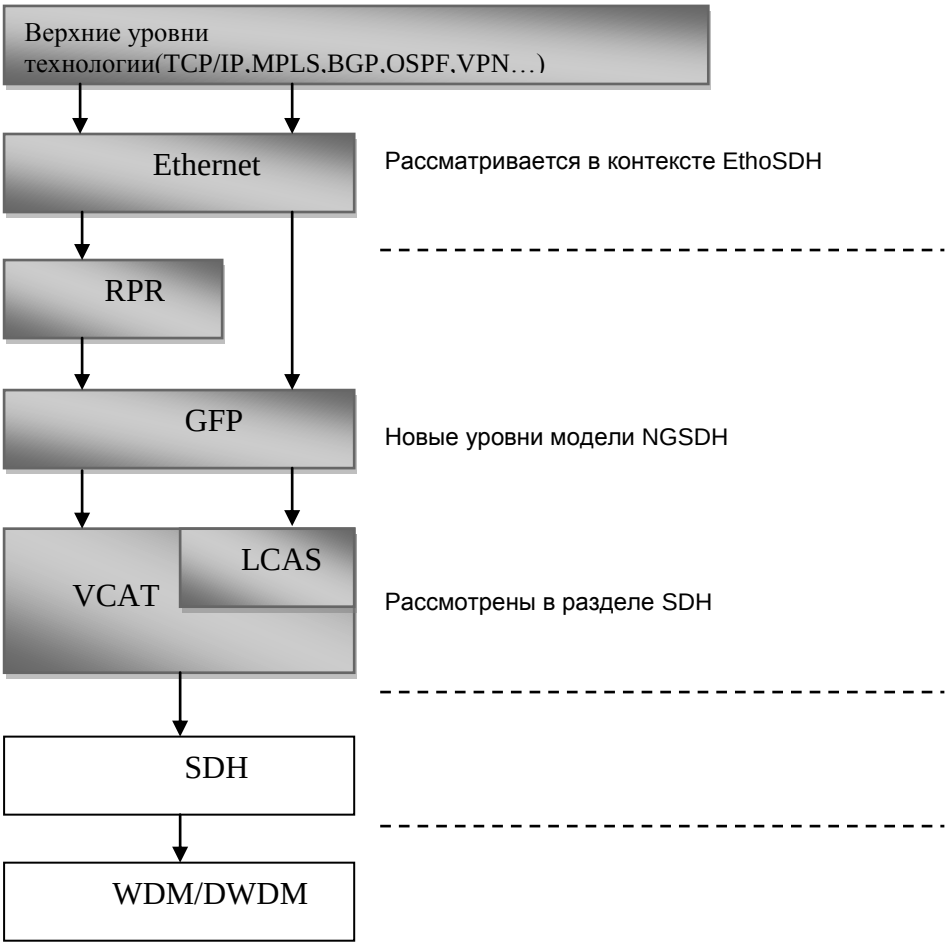


Рис. 6.6. Дополнительные уровни NGSDH

Нижний пояс представляет собой систему передачи SDH которая адаптируется к условиям передачи пакетного трафика. В этом случае сами принципы эксплуатации, структура и методы контроля на этом уровне остаются прежними. Промежуточный уровень NGSDH, куда включены уровни VCAT, LCAS, GFP и RPR, представляет собой уровень адаптации SDH к условиям передачи пакетного трафика. Верхним уровнем модели являются сети пользователя, источник и приемник трафика, технология Ethernet.

В соответствии с концепцией, приведенной на рисунке, можно предложить трехуровневое эксплуатационное решение по контролю систем NGSDH (рис. 6.7).

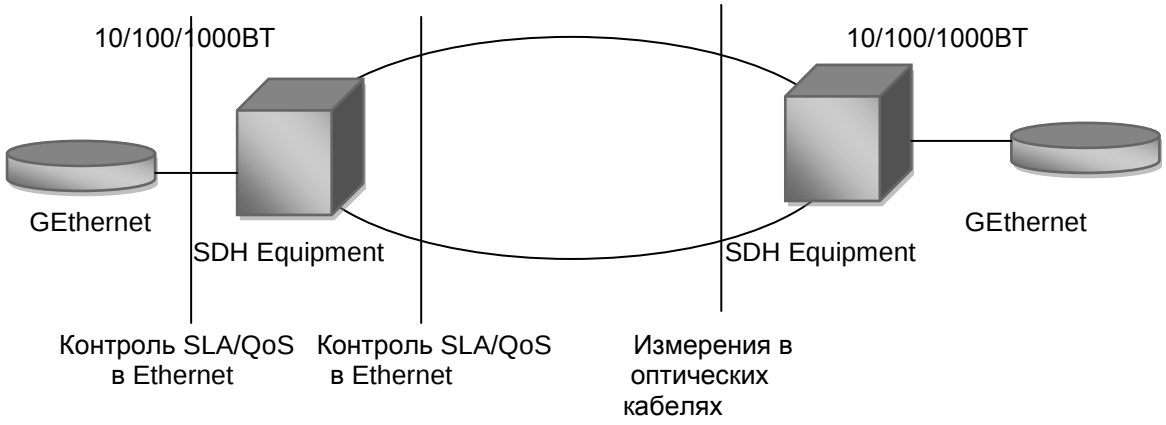


Рис. 6.7. Структура многоуровневого решения по контролю NGSDH.

Как следует из рисунка, вопросы контроля в объединенных сетях NGSDH разделяются на три группы

1. Контроль качества на уровне выходов NGN – Ethernet/Gigabit Ethernet – внешние точки демаркации.
2. Контроль качества на уровне SDH, включающий в себя как измерения самого SDH, так и измерения технологий промежуточного уровня (рис. 5.6) – VCAT, GFP, LCAS, RPR
3. Контроль параметров оптических магистральных кабелей при инсталляции и эксплуатации систем SDH со спектральным разделением WDM/DWDM.

Для удобства дальнейшего изучения материал целесообразно разделить на несколько разделов:

1. Контроль NGSDH во внешних точках демаркации на уровне Ethernet
2. Контроль процедур VCAT
3. Контроль процедур LCAS
4. Контроль уровня GFP
5. Контроль уровня RPR

6.2.4. Анализ системы NGSDH с точки зрения эксплуатационных процессов.

Поскольку NGSDH является развитием классической SDH, вполне естественно, что все пять рассмотренных ранее для SDH эксплуатационных процессов будут актуальны и для NGSDH, хотя и должны претерпеть некоторые корректировки. Например, процесс возникновения ошибок и неисправностей должен включать в рассмотрение не только служебные поля SDH, но и поля новых уровней, например GFP. Процесс маршрутизации потоков должен помимо рассмотренных ранее классических методов мультиплексирования включать процедуры конкатенации и VCAT и т. д.

Но кроме технологического наследия из пяти процессов, в системах NGSDH появляются свои процессы. Их не должно быть много, т. к. NGSDH это дополненная система SDH. Поскольку основная цель этого дополнения –

передача пакетного трафика по системе SDH, новые эксплуатационные процессы должны быть связаны с технологическим решением этой задачи. Можно выделить два новых эксплуатационных процесса:

- Процесс формирования, управления, контроля и пр. виртуальных коридоров, которых не было в системах SDH.
- Процесс передачи, восстановления, контроля качества и пр. пакетного трафика по виртуальным коридорам. Сюда относятся все вопросы, связанные с преобразованием пакетного трафика, управлением эффективностью использования ресурса, контролем качества и пр. и, следовательно, уровни GFP и RPR.

Таким образом, в системах NGSDH будут присутствовать 7 эксплуатационных процессов, представленных в табл. 6.1. Из них нас будут интересовать только два последних, поскольку первые пять связаны с работой самой системы SDH и передачей по ней трафика TDM, а эта часть почти не изменяется.

Таблица 6.1. Эксплуатационные процессы в системе NGSDH.

SDH	Технологическое дополнение NGSDH
1. Процесс маршрутизации потоков 2. Процесс возникновения ошибок и неисправностей 3. Процесс нарушения в работе системы синхронизации 4. Процесс резервного переключения 5. Процесс организации и использования протокола взаимного соединения (TCM)	6. Процесс формирования и управления виртуальными коридорами (VCAT + LCAS) 7. Процесс передачи и восстановления пакетного трафика (GFP + RPR)

Прежде, чем перейти к анализу измерений и принципов практического контроля и эксплуатации систем NGSDH, рассмотрим некоторые особенности пакетного трафика.

7. Основные сведения о технологии Ethernet и GE.

7.1. Общие сведения о технологии Ethernet.

Технология Ethernet/Gigabit Ethernet в настоящее время интересна по двум основным причинам. Первая причина состоит в том, что именно эта технология представляет собой на современном этапе наиболее развитую технологию NGN. Вторая причина заключается в том, что технология Ethernet/GE фактически победила среди различных технологий оконечного пользователя. Сейчас более 90% всех абонентских сетей передачи данных – это сети Ethernet/GE. И, следовательно, если мы рассматриваем транспортные технологии, непосредственно не связанные с Ethernet/GE, и, в частности, NGSDH, то на выходе этих систем скорее всего будет присутствовать интерфейс Ethernet/GE.

Таким образом, Ethernet/GE представляет интерес и как составная часть технологии транспортных сетей, и как технология абонентской сети.

Нужно отметить в первую очередь, что Ethernet не является единой технологией, это семейство технологий отдельно для локальных (LAN), городских (MAN) сетей и сетей доступа (Access Networks). Технология Ethernet стандартизована в рекомендациях IEEE 802.3 (рис. 7.1). В январе 2005 г. окончательно были определены четыре скорости передачи данных, единые для всех типов сетей Ethernet: Ethernet на скорости 10 Мбит/с, Fast Ethernet на скорости 100 Мбит/с, Gigabit Ethernet на скорости 1000 Мбит/с и 10 Gigabit Ethernet на скорости 10 Гбит/с. Это разделение по скоростям относится ко всем возможным несущим средам, включая витую пару, оптический кабель и беспроводные локальные сети. Комбинации между видом несущей среды и скоростью передачи формируют многообразие интерфейсов технологии Ethernet (табл. 7.1).

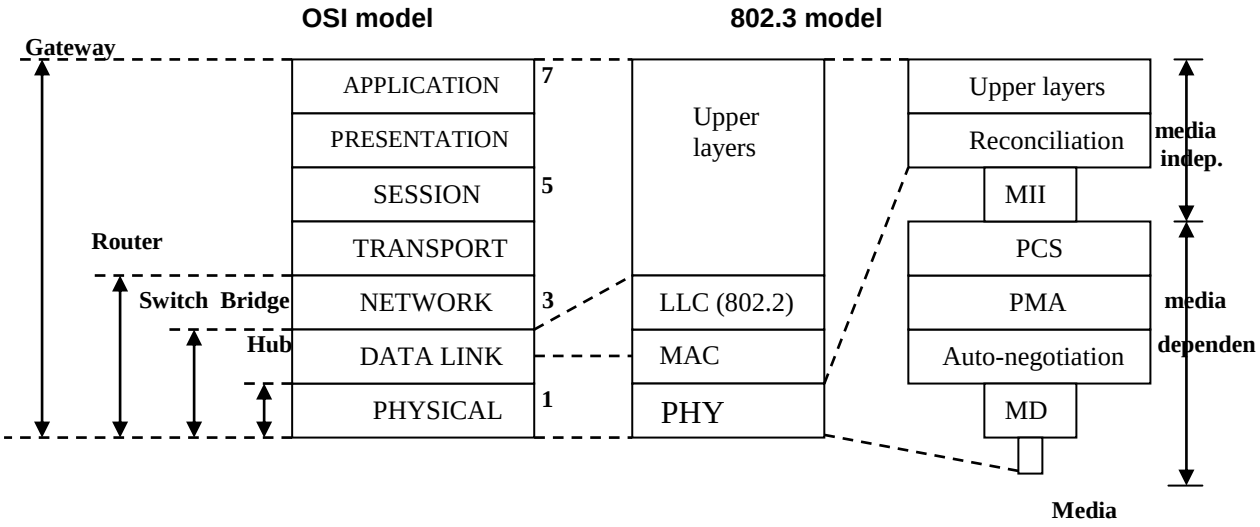


Рис. 7.1. Структура протокола Ethernet применительно к модели OSI.

Как следует из рис. 7.1, технология Ethernet охватывает все уровни 7-уровневой модели. Более того, в настоящее время в связи с широким распространением Ethernet, системщики предлагают отказаться от 7-уровневой модели в пользу более упрощенной 5-уровневой модели, которая объединила бы сессионный, представительский уровни и уровень приложений. В зависимости от уровня коммутации в технологии Ethernet используются различные устройства:

- Объединение сетей на уровне физической среды передачи выполняют самые простые устройства – хабы (Hub)
- Коммутацию на канальном уровне выполняют коммутаторы (Switch, Bridge)
- Коммутация сетевого уровня выполняется маршрутизаторами (Router)
- Преобразование на уровне приложений выполняется различными шлюзами (Gateway)

Таблица 7.1. Различные варианты интерфейсов Ethernet по стандарту IEEE 802.3.

Стандарт	Название	Тип интерфейса	H/F	Кодиро-вание	Линейный код	MFS	Размер сети
10GEth. IEEE 802.3ae (clause 48-53)XGMII	10GBASE-SR	Двойной 50/125 мкм MMF, 850 нм	F	64B/66B	NRZ	N/A	2/550 м
	10GBASE-SW	Двойной 62,5/125 мкм MMF, 850 нм	F	64B/66B	NRZ	N/A	2/33 м
	10GBASE-LX4	Двойной 50/125 мкм MMF, 4xDWM signal	F	8B/10B	NRZ	N/A	300 м
	10GBASE-LX4	Двойной 62,5/125 мкм MMF, 4xDWM signal	F	8B/10B	NRZ	N/A	300 м
	10GBASE-LX4	Двойной 8-10 мкм SMF,1310 нм 4xDWM signal	F	8B/10B	NRZ	N/A	10 км
	10GBASE-LR	Двойной 8-10 мкм SMF,1310 нм	F	64B/66B	NRZ	N/A	10 км
	10GBASE-LW	Двойной 8-10 мкм SMF,1310 нм	F	64B/66B	NRZ	N/A	10 км
	10GBASE-ER	Двойной 8-10 мкм SMF,1550 нм	F	64B/66B	NRZ	N/A	2/40 км
	10GBASE-EW	Двойной 8-10 мкм SMF,1550 нм	F	64B/66B	NRZ	N/A	2/40 км
Gigabit Ethernet IEEE 802.3z/ab (clauses 34-42) GMII	1000BASE-ZX	Двойной 8-10 мкм SMF,1310 нм	F	8B/10B	NRZ	416	80 км
	1000BASE-LX	Двойной 8-10 мкм SMF,1310 нм	F	8B/10B	NRZ	416	5 км
	1000BASE-LX	Двойной 50/125 мкм MMF,1310 нм	F	8B/10B	NRZ	416	550/2000м
	1000BASE-LX	Двойной 62,5/125 мкм MMF,1310 нм	F	8B/10B	NRZ	416	550/1000м
	1000BASE-SX	Двойной 50/125 мкм MMF,850 нм	F	8B/10B	NRZ	416	550/750 м
	1000BASE-SX	Двойной 62,5/125 мкм MMF,850 нм	F	8B/10B	NRZ	416	220/400 м
	1000BASE-CX	Двойной 150 Ом STP (twinax)	F	8B/10B	NRZ	416	25 м
	1000BASE-T	Четыре пары UTP 5 (или лучше)	H/F	4D-PAM5	PAM5	520	<100 м
Fast Ethernet IEEE802.3u (clauses 21-29) MII	100BASE-Fx	Двойной 50/125 мкм SMF	F	4B/5B	NRZI	64	40 км
	100BASE-Fx	Двойной 62,5/125 мкм MMF	F	4B/5B	NRZI	64	2 км
	100BASE-Tx	Двойная пара кабеля STP	F	4B/5B	MLT3	64	200 м
	100BASE-Tx	Двойной UTP 5 (или лучше)	H/F	4B/5B	MLT3	64	<100м
	100BASE-T4	Четыре пары UTP 3 (или лучше)	H	8B/6T	MLT3	64	<100м

	100BASE-T2	Двойной UTP 3 (или лучше)	H/F	PAM5x5	PAM5	64	<100м
Ethernet IEEE 802.3a-t (clauses 1-20) AUI	10BASE-FP	Двойной 62,5/125 мкм MMF с синхронным хабом	H	4B/5B	Manchester	64	<2000м
	10BASE-FP	Двойной optical 62,5/125 мкм MMFпассивный хаб	H	4B/5B	Manchester	64	<1000м
	10BASE-FL	Двойной optical 62,5/125 мкм MMFасинхронный хаб	F	4B/5B	Manchester	64	2000м
	10BASE-T	Двойная пара из UTP3 (или лучше)	H/F	4B/5B	Manchester	64	<100м
	10Broad36	Один 75 Ом коаксиальный (CATV)	H	4B/5B	Manchester	64	<3600м
	10BASE-2	Один 50 Ом тонкий коаксиальный кабель	H	4B/5B	Manchester	64	<185м
	10BASE-5	Один 50 Ом тонкий коаксиальный кабель	H	4B/5B	Manchester	64	<500м

Первоначально технология Ethernet предусматривала полный доступ всех клиентских устройств к единому ресурсу сети, но по мере эволюции технологии сети были сегментированы, и в настоящее время доступ к ресурсам сети ограничен.

Стандарт IEEE 802.3 предусматривает деление протокола на 4 уровня:

- Уровень физической среды передачи (физический уровень в модели OSI), который в свою очередь делится на несколько подуровней (рис. 6.1)
- Уровень управления средой передачи (Medium Access Control – MAC)
- Уровень управления логическим соединением (Logical Link Control – LLC)
- Верхние уровни протокола.

Рассмотрим теперь отдельно все перечисленные уровни.

7.1.1. Физический уровень технологии Ethernet.

Физический уровень технологии Ethernet состоит из нескольких подуровней. Часть из них связана со средой передачи, часть является независимой от среды передачи. Из табл. 7.1 видно, что в качестве среды передачи сигналов в технологии Ethernet могут использоваться коаксиальные кабели, витая пара UTP и STP, одномодовые и многомодовые оптические кабели. Такое многообразие возможных физических сред передачи обусловлено самой историей технологии, поскольку она адаптировалась к уже существующим кабельным системам для обеспечения быстрого внедрения на рынке.

Чтобы обеспечить разделение стандартов физического уровня Ethernet на зависящие и независимые от среды передачи части, в технологии было предложено аппаратное разделение устройств интерфейса на два типа:

- Контроллеры интерфейсов обеспечивают функции физического уровня и выше (например, уровня MAC), не зависящие от среды передачи
- Трансиверы интерфейсов преобразуют сигналы интерфейса от контроллера в линейный код и физические сигналы для соответствующей среды передачи

Таким образом, если мы рассматриваем функции физического уровня, связанные со средой передачи сигналов, то речь идет о трансивере. Если же мы говорим об универсальном интерфейсе Ethernet, то речь идет о функциях контроллера.

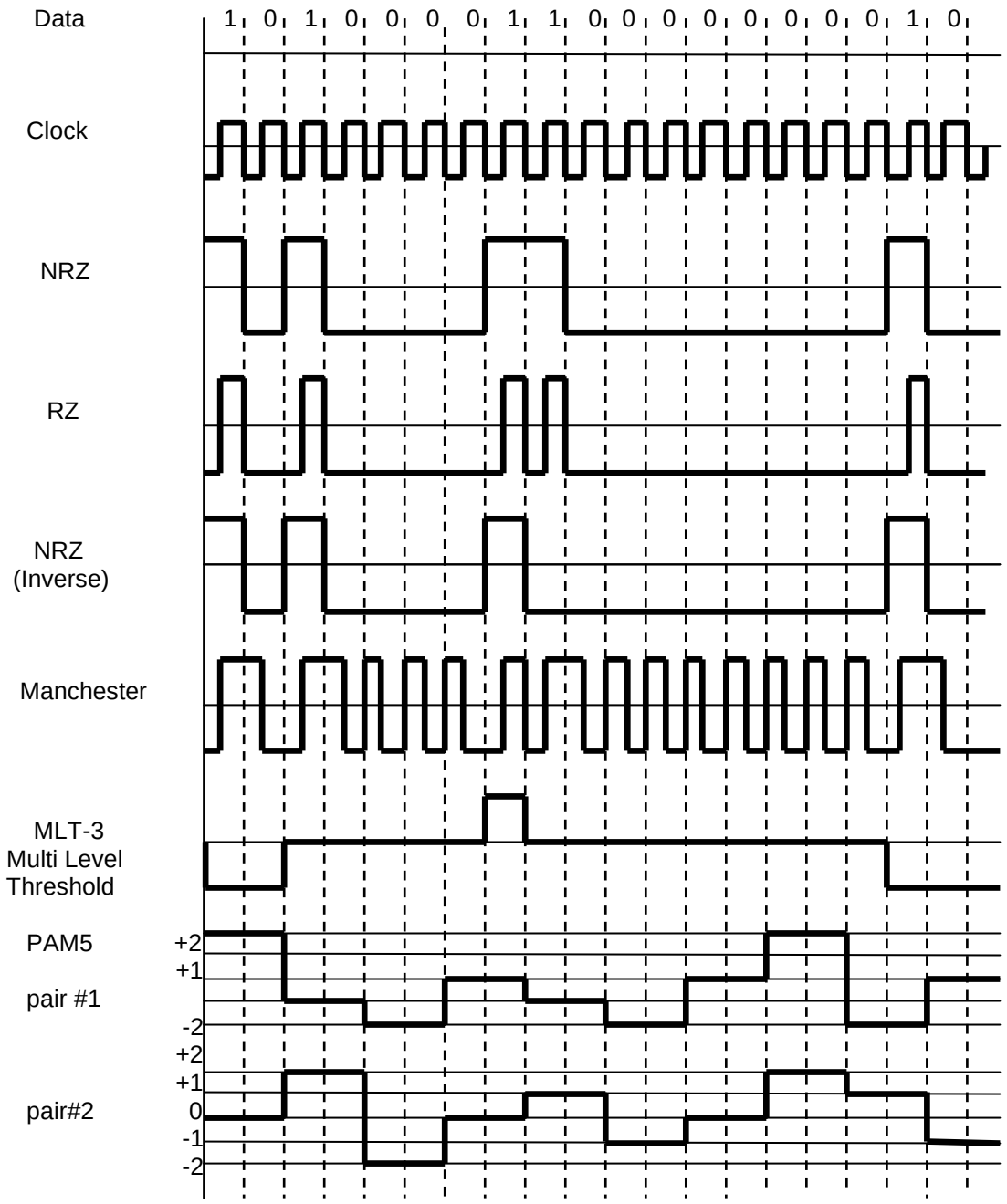


Рис. 7.2. Различные типы линейного кода, используемые в технологии Ethernet.

Для корректной работы трансиверов особенное значение имеет формирование линейного кода. Различные интерфейсы требуют различных типов линейного кода (табл. 7.1). Варианты линейных кодов представлены на рис. 7.2. Разные коды имеют разное количество уровней линейного сигнала, например, код PAM5 использует 5-уровневое кодирование. В связи с этим помехоустойчивость линейных сигналов также различается, что находит отражение в параметре максимального размера сети.

Первые технические решения Ethernet в части интерфейсов были целиком зависящими от среды передачи. По мере развития технологии трансиверы начали отделять от контроллеров. Первый опыт выделения универсального интерфейса Ethernet привел к появлению интерфейса AUI (Attachment Unit Interface), который обеспечивал работу на скорости до 10 Мбит/с. По интерфейсу AUI передавалось 4 типа сигналов: передаваемые данные, принимаемые данные, информация о неисправностях (коллизиях) и питание интерфейса. Дальность подключения не превышала 50м.

Развитие идеологии разделения в интерфейсе трансиверов и контроллеров нашло завершение в формировании подуровня независимого от среды передачи интерфейса MII (Medium Independent Interface), который находится на самом верху физического уровня модели IEEE 802.3 (рис.7.1). Интерфейс MII был разработан для технологии Fast Ethernet (100 Мбит/с) с тем условием, что пользователи могут в равной степени использовать этот интерфейс для систем на металлическом или оптическом кабеле. В результате часть функций преобразования сигналов, в том числе и линейное кодирование, были переданы трансиверу. Интерфейс MII реализует функции 4 групп сигналов: подачу питания на интерфейс, формирование сигналов управления (синхронизация, контроль и пр.), передачу/прием данных и передачу/прием сигналов управления CS, CD и пр.

Развитием технологии MII стал интерфейс GMII (Gigabit Medium Independent Interface), разработанный для сетей Gigabit Ethernet (GE). В отличие от MII интерфейс GMII был ориентирован на современные достижения микропроцессорной техники. Спецификации GMII ориентированы на описание логического соединения, а сам интерфейс находится внутри микропроцессора GE.

7.1.2. Уровень MAC.

Первые опыты с технологией Ethernet выявили негативное явление в самой технологии – явление коллизий, когда пакеты от двух источников наслаиваются друг на друга, так что информация становится нечитаемой. Для того, чтобы минимизировать эффект коллизий в технологии был придуман уровень контроля доступа к ресурсу (уровень MAC – Medium Access Control) и протокол CSMA/CD как протокол, обеспечивающий управляемый доступ к общему ресурсу системы.

Первая часть протокола CSMA/CD обеспечивает регулирование самого процесса передачи CSMA (Carrier Sense Multiple Access). Суть предложенной процедуры передачи состоит в том, что передающая станция должна выполнить следующие шаги, чтобы предотвратить нежелательные коллизии:

1. Прослушать канал передачи и проверить, не ведется ли передача информации другой станцией
2. Если канал передачи свободен, начать передачу и ждать подтверждения ее успешности (сообщение АСК)
3. Если канал занят, возвратиться в состояние 1
4. Принимающая станция проверяет поле контрольной суммы CRC, которое входит в состав кадра Ethernet. Если ошибок не обнаружено, принимающая станция генерирует сообщение АСК
5. Если в течение определенного времени передающая станция не получает подтверждения АСК на свою информацию, она возвращается в состояние 1
6. Если передающая станция получает сообщение АСК, процесс передачи кадров считается завершенным положительно.

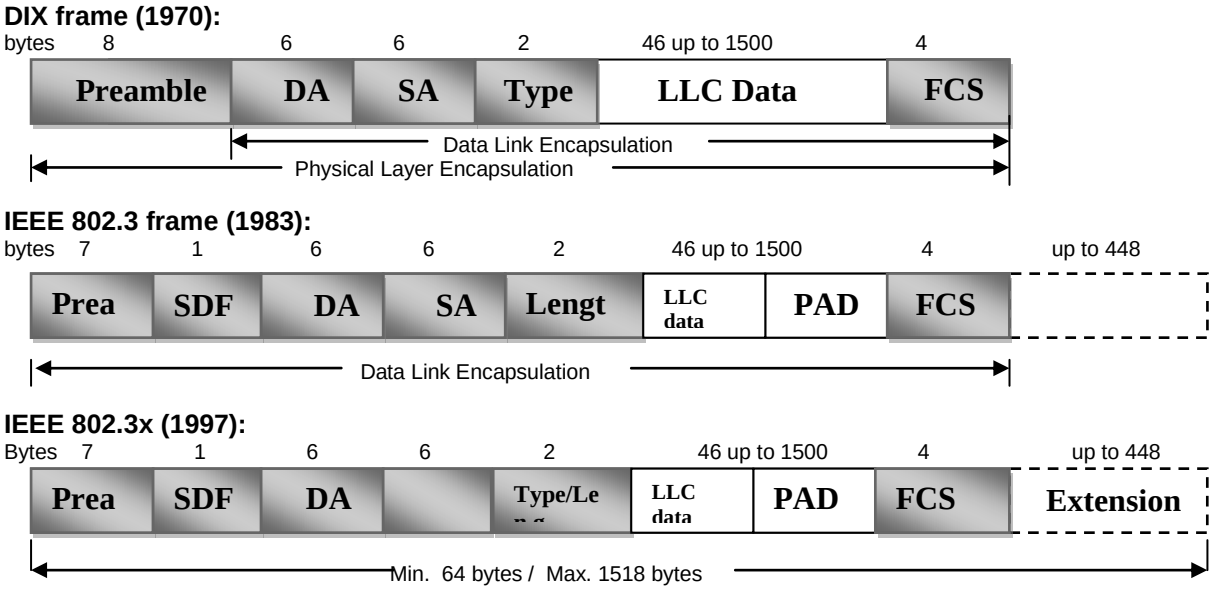
Но, несмотря на ограничения передачи со стороны протокола CSMA, возможна ситуация, когда две или более рабочих станций начнут передачу информации одновременно. Тогда возникнет коллизия. Исключить коллизии полностью невозможно, ном можно постараться уменьшить ущерб, наносимый ими процессу передачи данных. Для этого в составе протокола уровня MAC была добавлена еще одна процедура CD (Collision Detection). Ее цель – уменьшить длительность коллизий. Достигается это за счет нехитрого усовершенствования: рабочая станция продолжает прослушивать канал передачи в процессе своей передачи. Если в процессе передачи обнаружена коллизия, передача немедленно прекращается, так что продолжительность коллизии уменьшается и, соответственно, уменьшается вред, наносимый ею всему процессу передачи на канальном уровне. В качестве подтверждения возникновения коллизии на все станции передается специальный сигнал оповещения (jamming). В результате объединения двух частей протокола появился единый протокол CSMA/CD.

Дополнительным способом уменьшить влияние коллизий стал метод ограничения размера кадра Ethernet снизу (параметр минимально допустимого размера кадра Minimum Frame Size (MFS). Дело в том, что чем короче пакет, тем более вероятна ситуация, когда два пакта передаются одновременно, вызывая коллизию. В случае протокола CSMA, когда все станции прослушивают канал передачи перед началом соединений, передача пакетов большого размера не вызывает трудностей и коллизий, т. к. ни одна станция не начинает передачу до окончания передачи большого пакета. Следует отметить, что метод ограничения размера кадра по параметру MFS может улучшить ситуацию только для полудуплексных сетей (H), поэтому для сетей Ethernet и Fast Ethernet устанавливается ограничение MFS=64 байта, для сетей GE MFS=416 или 520 байт. Для полнодуплексной сети (F) механизм ограничения по MFS ничего не дает и поэтому не используется.

Если же, несмотря на все перечисленные механизмы и методы защиты, возникают коллизии, несколько кадров неизбежно будут потеряны. Запросить повторную передачу информации можно только с использование протоколов более высокого уровня, в алгоритме CSMA/CD такого механизма не предусмотрено.

7.1.3. Структура кадров Ethernet. MAC-адресация.

Вторым по важности компонентом технологии Ethernet уровня MAC является структура кадров канального уровня, представленная на рис. 7.3. В настоящее время существует три типа форматов кадров Ethernet: DIX, IEEE 802.3 и IEEE 802.3x.



Preamble: synchronization pattern
SDF: Start Frame Delimiter (10101011)
DA: Destination Address
SA: Source Address
Type: Indicates the nature of the client protocol IP, IPX, Apple Talk, etc
Length: Number of bytes of the LLC data
LLC data: Information supplied by LLC data
Pad: Bytes added to ensure a minimum frame size of 46 bytes
Extension: Only for Gigabit, ensures a minimum frame size (depending on version)
FCS: Frame Check Sequence CRC code based on all the fields except Preamble and SDF

Рис. 7.3. Три варианта структуры кадров технологии Ethernet.

Исторически первым форматом кадра Ethernet была структура DIX. В нее были включены основные поля, которые затем были использованы следующими поколениями стандартов Ethernet. Появление стандарта IEEE 802.3 было связано с добавлением в состав структуры кадра поля SFD (Start Frame De limiter), которое играет важную роль в технологии Ethernet. Вторым изменением в формате кадра стало поле длины кадра (Length) вместо поля Type в формате DIX. Это поле

позволяет реализовать функции регулирования размера кадра за счет служебного поля PAD в поле нагрузки. Последняя версия стандарта IEEE 802.3x, принятая в 1997 г., определила возможность использования полей Type и Length в комбинированной интерпретации, т. е. в том смысле, в котором использовалось поле Type в стандарте DIX и поле Length в IEEE 802.3 (1983).

Рассмотрим теперь состав основных полей Ethernet и их назначение. В формате IEEE 802.3 используются следующие поля:

- Преамбула (Preamble) представляет собой фиксированную последовательность из 7 байтов, которая заполняется последовательностью «10101010». Преамбула используется для синхронизации приемника по принимаемой последовательности.
- Поле ограничителя (SDF, Start Delimiter) представляет собой однобайтовое поле с заполнением (1010…), также как и в преамбуле, за исключением двух последних битов, которые устанавливаются равными 1. Это показывает, что за полем SDF следует важное информационное поле, которое должно загружаться в буфер сетевого устройства для последующего анализа.
- Поле адресации MAC (DA, SA – MAC-адреса) Destination (приемника) и Source (передатчика. В стандарте установлено три типа адресов: a) уникальные, поле в 48 бит, присваиваемые каждому порту сетевого элемента на этапе производства из перечня доступных свободных номеров, которые имеются у производителя оборудования; b) широковещательные, поле заполняется последовательностью 1, что означает, что все приемники должны анализировать такие кадры; c) адреса групповой рассылки (multicast), поле, в котором первый бит равен 1, а далее содержится информация о группе терминалов-приемников. В формате кадров Ethernet используется составное адресное поле, которое состоит из двух частей: поле уникального идентификатора OUI (Organizationally Unique Identifier) и поле идентификатора производителя (Vendor).
- Поле типа кадра (Type) впервые было использовано в стандарте DIX и идентифицирует тип клиентского протокола верхнего уровня (IP, IPX, Apple Talk и др.).
- Поле длины кадра (Length) показывает размер поля значимых данных без служебного поля PAD. В соответствии со стандартом Ethernet размер кадра не может быть больше 1518 байтов (без учета преамбулы и SDF).
- Поле LLC (Logical Link Control) представляет собой полезную нагрузку кадра Ethernet. По своему названию оно содержит служебные поля более высоких, чем MAC, уровней протоколов. В соответствии со стандартом Ethernet размер этого поля составляет от 48 до 1500 байтов.

- PAD представляет собой служебное поле, которое отвечает за выполнение процедуры регулирования размера кадров уровня MAC по параметру MFS. В случае, если данные пользователя меньше 64 байтов, после поля LLC

вставляется служебное поле PAD, так что общий размер кадра оказывается соответствующим требованиям по MFS. Разделение полей LLC и PAD выполняется на основании данных поля Length.

- Контрольная сумма CRC (Cyclic Redundancy Check) используется для контроля ошибок в кадре Ethernet. Обычно при обнаружении ошибок в кадре весь кадр считается поврежденным и не восстанавливается.

Из перечисленных полей в кадре Ethernet уровня MAC особенное значение имеют поля адресации. MAC-адреса присваиваются отдельно портам передатчиков и приемников сетевых элементов. Передача данных Ethernet канального уровня выполняется между MAC-адресами передатчика и приемника, для чего в составе кадров Ethernet должны быть указаны соответствующие поля. Наличие MAC-адресов существенно сказывается на принципах организации измерений в сетях Ethernet.

Самое главное отличие заключается в том, что в технологии Ethernet чрезвычайно затруднено формирование шлейфа в то время, как шлейфовые измерения весьма популярны в системах связи. Формирование виртуального шлейфа здесь оказывается проблематичным именно из-за наличия MAC-адресации, которая требует, чтобы порт передатчика и порт приемника не совпадали друг с другом. Из-за этого оператор должен прописывать маршрут следования потока тестовых кадров Ethernetпо всей сети с использование дополнительных портов или внешнего интеллектуального шлейфообразователя, что само по себе неудобно. Таким образом, специфические особенности технологии Ethernet существенно влияют на методику организации измерений параметров качества.

7.1.4. Развитие технологии Ethernet.

В процессе всего времени присутствия технологии Ethernet на мировом рынке, она всегда развивалась динамично и гибко перестраивалась в соответствии с текущими требованиями к локальным сетям передачи данных. Главное отличие между первыми сетями Ethernet и современными сетями состоит в существенном изменении топологии этих сетей (рис.7.4). первые сети Ethernet были построены на принципе общей шины, к которой подключаются рабочие станции. Такая схема получила название объединенной шины. На практике объединение шины значило объединение проблем эксплуатации сети. Например, любое нарушение в кабельной системе приводило к недоступности целого сегмента сети. Поэтому был разработан механизм построения сетей на основе радиальной топологии (технология выделенной кабельной сети), для чего были изобретены первые устройства канальной коммутации – хабы (hub).В результате сеть Ethernet оказалась более устойчивой к повреждениям кабельной сети. Рабочие станции включаются через хаб, и при этом до каждой станции идет свой кабель. Повреждение кабеля приводит к отключению только одной станции, что делает сеть в целом более стабильной.

Рис. 7.4. Ethernet: от общей среды передачи к выделенному каналу передачи.

Первые хабы выполняли простую коммутацию физического уровня, но скоро функциональность хабов была дополнена некоторыми интеллектуальными функциями, позволяющими отключать от сети станции, являющиеся источниками неисправностей в сети. Современные хабы позволяют дополнительно адаптироваться к разным скоростям передачи в сети Ethernet и разным типам абонентских кабелей.

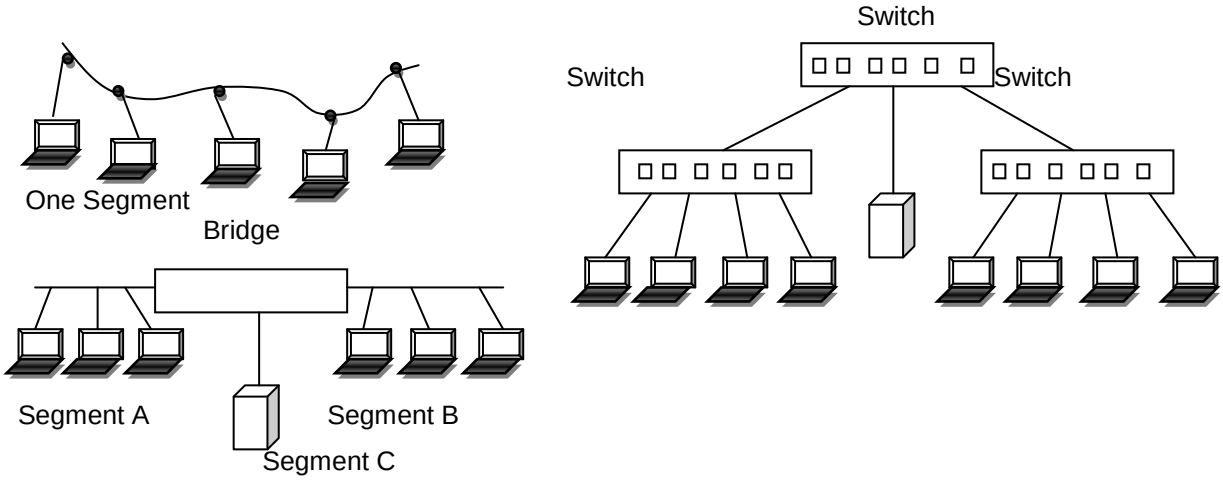


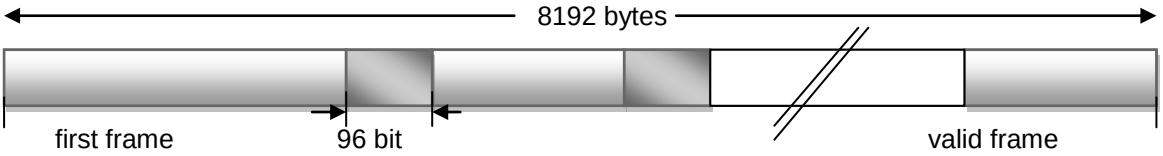
Рис. 7.5. Ethernet: сегментация и коммутация

Второе направление эволюции сетей Ethernet шло по пути от общего доступа к выделенному ресурсу сети. Первые сети Ethernet были односегментными (рис. 7.5). В них был реализован принцип общего доступа всех рабочих станций к ресурсу сети, т. е. любой терминал мог использовать всю полосу пропускания сети. В результате с ростом количества рабочих станций неизбежно возникали коллизии, а производительность сети снижалась. Для предотвращения этого была предложена сегментация сетей. Сегментация выполнялась с помощью мостов (bridge), которые выполняли коммутацию на канальном уровне, соединяя несколько сегментов. В каждом сегменте было ограниченное число терминалов и, следовательно, вероятность коллизий уменьшалась. Вторым шагом по пути преобразования топологии сетей Ethernet стало неравномерное разделение общего ресурса между сегментами, таким образом, что сегмент, в котором имеются рабочие станции с большим трафиком, получал большую часть ресурса. Необходимость переключения и динамического изменения распределения

ресурсов между сегментами привело к появлению еще одного типа оборудования – коммутаторов (switch). Современным этапом развития сетей Ethernet сложной топологии стало появление сетей с полной коммутацией (рис. 7.5).

7.1.5. Полудуплексный и полнодуплексный режим передачи. Берстность. Механизм управления потоками.

Еще одна важная особенность технологии Ethernet заключается в наличии в таких сетях двух возможных режимов передачи информации: полудуплесного и дуплексного (его также называют полнодуплесным). Полудупдексный режим передачи может оказаться малоэффективным, особенно в том случае, когда данные передаются в виде кадров малого размера (в этом случае используется поле PAD). Наличие поля PAD объективно уменьшает эффективность использования ресурса сети. Чтобы избежать необходимости использования поля PAD, в технологии было предложено использовать принцип берстности. Суть его состоит в том, что несколько пакетов малого размера накапливаются, образуя совокупность – берст. Тогда размер берста превосходит MSF, и поле PAD не используется. Например в технологии Gigabit Ethernet в одном берсте может передаваться до 8000 байт. Принцип передачи информации в этом случае представлен на рис. 7.6. Первый кадр передается как обычный кадр, затем без освобождения ресурса передается следующий и т. д. Между кадрами устанавливается защитный интервал GAP или IFG, составляющий минимальный размер 96 битов. IFG позволяет разделять кадры при передаче, но ресурс сети не освобождается до тех пор, пока не будет передан последний кадр берста. Такая схема передачи существенно повышает эффективность использования ресурса в случае полудуплексного режима передачи.



IFG: Interframe Gap
Max. Burst length: 8192 bytes, last frame still valid
Interframe gap: 96 bits

Рис. 7.6. Передача берстного трафика в полудуплексном режиме.

Выше уже отмечалось, что несмотря на все усилия и использование протокола CSMA/CD в технологии Ethernet имеют место коллизии. Больший уровень трафика приводит к большей вероятности возникновения коллизий. Отсюда, чем больше уровень использования ресурса сети, тем больше в ней возникает коллизий, так что сеть может стать неуправляемой, вплоть до полного коллапса. Тем не менее, существует метод полностью устраняющий саму возмодность коллизий – это использование полнодуплексного режима передачи (рис. 6.7). Полнодуплексный режим передачи предусматривает формирование канала передачи между каждым передатчиком и каждым приемником сети, в этом случае коллизии не могут возникнуть принципиально. Как следствие, для

полнодуплексного режима передачи нет необходимости использовать протокол CSMA/CD:

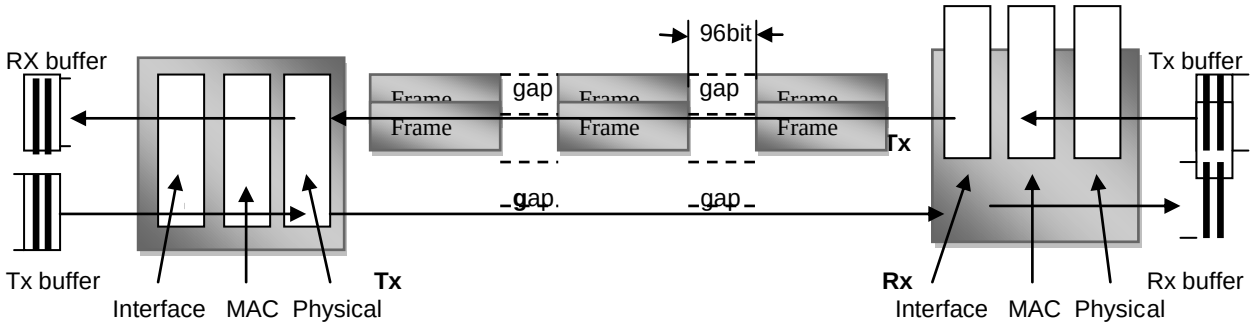


Рис. 7.7. Схема организации полнодуплексного режима передачи в сети Ethernet.

- Часть алгоритма CSMA, отвечающая за формирование многопользовательского доступа к ресурсу, не нужна, т. к. ресурс всегда свободен.
- Часть алгоритма CD, отвечающая за управление коллизиями, не нужна, т. к. в случае полнодуплексного режима передачи, коллизии не могут возникнуть.

Фактически сам принцип существования уровня MAC-адресации при полнодуплексном режиме оказывается более чем спорным, т. к. зачем нужна адресация канального уровня, если канал прямой и всегда свободен. Единственным фактором, ограничивающим производительность сети в этом режиме передачи, может быть максимальная длина канала передачи. Этот параметр определяется характеристиками передатчика.

С режимом полнодуплексной передачи связан механизм управления потоком. Рассматривая рис. 7.7, легко понять, что в системе передачи Ethernet может возникнуть сбой, если буфер приемника окажется переполненным. Чтобы избежать переполнения буфера на стороне приемника нужно оповестить передатчик и ограничить скорость передачи. Для выполнения этой функции в Ethernet был придуман протокол PAUSE, в котором приемник может послать запрос передатчику на прекращение передачи данных.

Протокол использует короткое сообщение, которое называется кадром PAUSE (рис. 7.8). Основным информационным наполнением кадра PAUSE является поле таймера (Timer), содержащее данные 512-битного таймера. Значение в поле таймера представляет собой размер задержки передачи. Получив кадр PAUSE, передатчик анализирует значение информационного поля таймера и приостанавливает передачу информации на указанное в поле время. В протоколе PAUSE имеется механизм запуска передачи.

Кадр PAUSE, содержащий нулевое значение таймера считается командой на запуск передачи информации. Таким образом, если буфер приемника очищается и он вновь готов к приему информации, в протоколе можно запустить передачу информации, не дожидаясь запланированного времени задержки.

PAUSE

7	1	6	6	2	2	2	42	4	
Pre	**SDF**	**DA**	**SA**	**Length**	**Opcode**	**Timer**	**Reserved**	**FCS**	**Extension**

Opcode: Indicates PAUSE frame, hexa value = 0001
Pause Time: time is requested to inhibit transmission

Рис.7.8. Структура кадра PAUSE.

Протокол PAUSE работает по принципу «точка – точка», поэтому в технологии Ethernet не допускается передача кадров этого протокола через сетевые элементы (мосты, коммутаторы и маршрутизаторы). С помощью протокола PAUSE в сети Ethernet при полнодуплексном режиме передачи осуществляется функция управления потоком данных на канальном уровне.

7.1.6. Виртуальные локальные сети VLAN.

VLAN представляет собой выделенный логическими средствами сегмент локальной сети. Обычно VLAN используется для разделения ресурсов сети между группами пользователей, чья область деятельности требует изоляции. Удобство VLAN заключается в том, что оператор может управлять этими сегментами без реконфигурации аппаратной части сети. Для того, чтобы подключить тот или иной терминал к VLAN, не нужно переключать этот терминал и тянуть к нему кабель от нужного сегмента. Все делается при помощи реконфигурации программного обеспечения сети. Для виртуальной сегментации VLAN терминалы должны быть подключены к коммутаторам (рис. 6.9). Коммутаторы обеспечивают объединение терминалов в виртуальные сети. Два терминала могут быть физически удалены на тысячи километров, но чувствовать себя как если бы они были в одной локальной сети.

Virtual LAN

7	1	6	6	2	2	2	n	m	4	
Pre	**SDF**	**DA**	**SA**	**VLAN Id**	**Tag control**	**Length**	**Data**	**Pad**	**FCS**	**Extension**

VLAN Id: Frame Indicator for LAN
Tag Control: contains transmission priority and VLAN Id

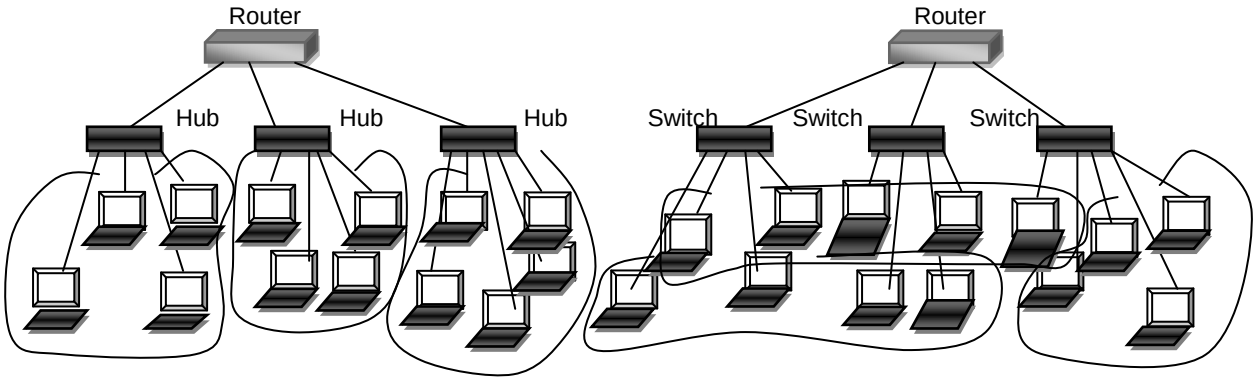


Рис. 7.9. Отличие VLAN от сегментированных локальных сетей.

VLAN обеспечивают необходимый уровень защиты сегментов, функции адресации и управления сегментом. Огромное значение для технологии VLAN имеет маршрутизатор (router), который выполняет функции фильтрации и маршрутизации вещательных данных, полей адресации и управления потоком данных для отдельных VLAN.

7.1.7. Функции автоматической конфигурации канального уровня.

Уже на ранней стадии своего развития технология Ethernet оказалась запутанной в части стандартов, поскольку разрабатывалась «по месту». В результате появилось большое многообразие возможных сред передачи, скоростей передачи данных, протоколов и их версий и пр. Как следствие, установка сетей без детальной подстройки оказалась затруднительной. Вместе с тем разработчики хотели максимально упростить процесс внедрения Ethernet за счет привнесения в технологию принципа Plug&Play. Внесение этого принципа влечет за собой разработку функций автоидентификации и автоконфигурации сетевых устройств. Именно по этому пути пошли разработки технологии Ethernet. Причем в данном случае задача усложнилась различиями в версиях протоколов, которые могут иметь место, когда один из терминалов пытается связаться с другим. Процесс автоконфигурации соединения должен включать в себя два шага:

- Передачу информации на удаленный конец о версии Ethernet и дополнительных протоколах, реализованных на ближнем конце.
- Конфигурацию обоих терминалов на всех уровнях и приведение их к единому протоколу, приемлемому для обоих сторон.

В процессе конфигурации два терминала обмениваются 16-битовыми сообщениями. Помимо первого сообщения (base page) обмен может содержать большое количество сообщений, выполняющих функции настройки протоколов и конфигурации терминалов. Процедура автоконфигурации детально разрабатывалась для сетей 10/100 Мбит/с, использующих среды UTP и RJ-45, а также для сетей 1000BaseX вне привязки к возможной среде передачи.

7.1.8. Варианты топологии сетей Ethernet.

Многообразие задач, под которые была адаптирована технология Ethernet, привело не только к большому разнообразию стандартов, протоколов, поддерживаемых сред передачи и пр., но и к разнообразию в области топологии сетей. Первые сети Ethernet, построенные на коаксиальных кабелях, допускали подключение до 100 терминалов на один сегмент. Отдельные сегменты соединялись через повторители, формируя связность сети, так что между любыми двумя терминалами устанавливался канал передачи. Доминирующей топологией в то время являлась шина.

Изобретение в 80-е г.г. мостов и маршрутизаторов изменило топологию сетей, так что количество терминалов на сегмент существенно уменьшилось.

Формирование сети с этого времени стало больше ориентироваться на логическую связность, нежели на физические подключения. Так появились сети разветвленной топологии. В таких сетях было уменьшено количество коллизий, тем самым была увеличена производительность сети. Необходимость разделения пользователей сети на группы привела к появлению функций управления топологией на уровне логических соединений.

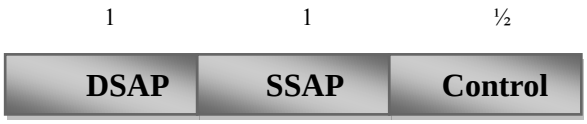
С начала 90-х г.г. происходит постепенная смена приоритетов в области топологии сетей. Теперь начинает доминировать радиальная топология, опирающаяся на максимально широкое использование сетевых устройств: хабов, коммутаторов, маршрутизаторов. Основным приоритетом в построении LAN становится управляемость сети и независимость от среды передачи, и именно радиальная топология позволяет решить эти задачи.

С 2000 г. в технологию локальных сетей приходят волоконно-оптические кабели. Как следствие, сама технология Ethernet выходит с уровня локальных сетей на уровень районных и городских. Тем самым Ethernet подстраивается под разветвленную топологию распределенных сетей передачи данных. В настоящее время существуют конфигурации «точка-точка», «шина», «кольцо» и даже сети полносвязной топологии. Новый стандарт локального шлейфа (IEEE P802.3ah, June 2004) позволяет рассматривать технологию Ethernet как технологию пользовательского доступа, конкурирующую с ISDN и ADSL, так что можно говорить о том, что технология Ethernet поддерживает любые варианты топологии и используется на всех уровнях современных сетей: на уровне транспорта и на уровне доступа.

7.1.9. Уровень управления логическим соединением (LLC).

Основной целью уровня LLC является формирование канала от терминала до терминала вне зависимости от того, реализована ли на уровне MAC схема выделенного ресурса или множественного доступа к ресурсу. Для решения этой задачи на уровне LLC реализуются следующие функции:

- Передача данных без установления соединения и без подтверждения получения данных (квитирования). Эта функция используется для передачи дейтаграмм от терминала до терминала. При этом предполагается, что процедуры управления скоростью передачи, контроля ошибок и пр. реализуются на верхних уровнях протокола.
- Передача данных без установления соединения, но с квитированием. В этом случае при получении приемником блока данных, он посылает квитанцию – сообщение АСК.
- Передача данных с установлением соединения. Обычно эта функция опирается на алгоритм установления виртуального соединения между двумя терминалами.



DSAP: Destination Service Access Point
SSAP: Source Service Access Point
Control: LLC Control field

Рис. 7.10. Формат сообщений уровня LLC.

Для выполнения перечисленных функций на уровне LLC протокола используются специализированные кадры, формат которых представлен на рис. 7.10. Поскольку уровень LLC связан с параметрами соединения от терминала до терминала, в состав сообщения входят следующие три информационных поля:

- Поле идентификации приемника DSAP
- Поле идентификации передатчика SSAP
- Поле управления Control, в котором передается управляющая информация

Поля DSAP/SSAP используются для определения местоположения источника и приемника информации, а также размера соответствующих буферов для определения процессом передачи/приема. Поле управления Control может иметь размер 1 или 2 байта в зависимости от типа услуги, которая описана в полях DSAP/SSAP. Например, значение поля 3 означает «ненумерованный формат» сообщения, что соответствует передаче кадров LLC без установления соединения и без квитирования.

7.2. Gigabit Ethernet, 10GE и дальнейшее развитие технологии Ethernet.

Развитие технологии Ethernet привело к появлению несколько отличной технологии – технологии гигабитных сетей Gigabit Ethernet (GE). Если Ethernet рождалась в качестве технологии локальных сетей, а затем уже вышла на уровень распределенных сетей и MAN, то GE изначально разрабатывалась под задачи MAN/VAN, т. е. GE целесообразно использовать в территориально растянутых сетях. При этом GE является наследницей классической Ethernet и очень просто сопрягается с форматами данных от локальных сетей. Таким образом, достигается интеграция между локальными сетями и MAN/VAN. Будучи современной технологией, GE в полной мере адаптирована к новым технологиям и услугам в сети, например к технологии MPLS.

Как транспортная технология, Gigabit Ethernet упразднила некоторые ограничения технологии Ethernet на размер сети, которые происходят исторически из самой технологии локальных сетей. Они связаны с вопросами совместного использования ресурса сети и среды передачи, а также с режимом полудуплексной передачи. Технология GE должна была снять соответствующие ограничения на размер сети, чтобы стать в полной мере технологией высокоскоростных транспортных сетей. Поэтому стало необходимым модифицировать стандарты Ethernet в новых условиях.

В технологии GE принят полнодуплексный режим передачи. Топология сетей Gigabit Ethernet ориентирована на использование коммутаторов, к которым подключаются терминалы GE, использующие обычно дуплексные оптические каналы. Единственным исключением стал стандарт 1000Base-T, специально разработанный для постепенной миграции из стандартных сетей Ethernet UTP к сетям GE. Этот стандарт относится в большей степени к локальным сетям GE. Все остальные стандарты ориентированы на сети MAN/VAN.

Рассмотрим более подробно архитектуру сетей GE (рис. 7.11). Стандарты для них появились в 1998 г. Первым стандартом стал IEEE 802.3z/ab, который определил две возможных модели архитектуры сетей Gigabit Ethernet. Одна часть модели получила название архитектуры 1000BASE-X (вместо X устанавливается вариант версии из трех: GX, LX или SX) и была ориентирована на использование оптической среды передачи. Другая часть касалась сетей на основе витой пары UTP категории 5 (Cat 5) или лучше и получила название 1000 BASE-T. Стандартизация модели также учитывала указанную двойственность: интерфейс 100BASE-X был стандартизован в 802.3z, а 1000BASE-T – в 802.3ab.

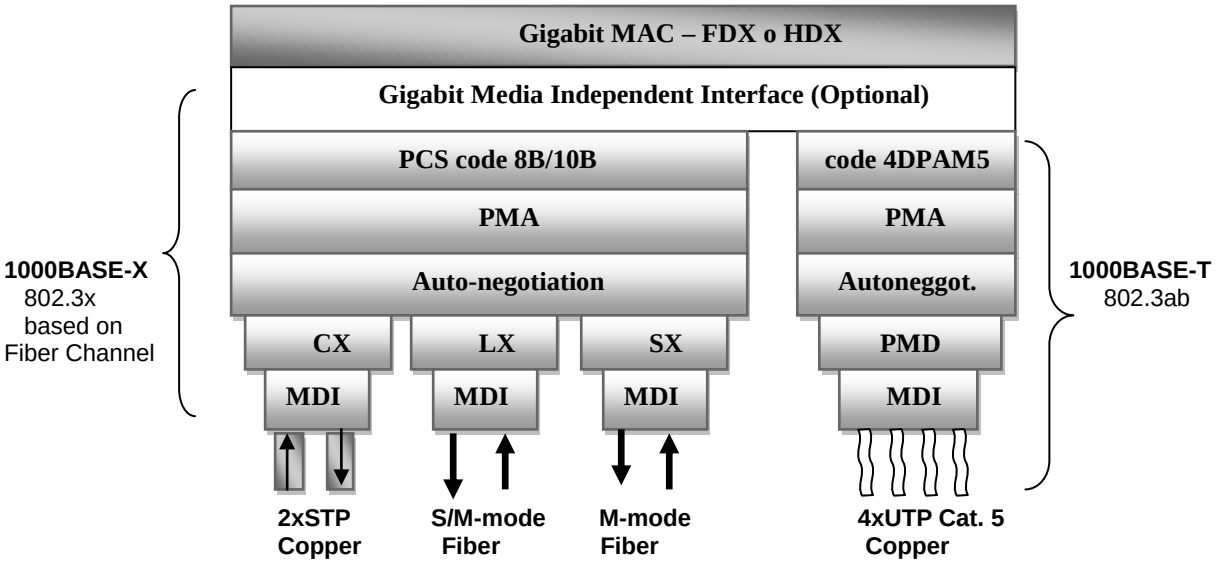


Рис. 7.11. Архитектура современных сетей Gigabit Ethernet.

После стандартизации сетей GE развитие этой технологии не остановилось. Более того, очень скоро были предложены новые уровни скоростей, что привело к появлению новой технологии высокоскоростного транспорта – 10 Gigabit Ethernet или 10GE. Эта технология имеет две отличительных особенности от предыдущих версий Ethernet.

Во-первых, в отличие от GE, которая может применяться на уровне локальных и транспортных сетей, технология 10GE изначально рассматривалась только как транспортная технология. Как следствие, в ней используются мощные оптические трансиверы с дальностью действия более 40 км и одномодовые кабели, используемые в транспортных оптических сетях.

Во-вторых, в стандарт 10GE была внесена специальная модификация (опция WAN), позволяющая прозрачно транслировать данные 10GE по транспортным сетям NGSDH. Во многих случаях появились решения, интегрирующие технологии SDH и 10GE, а также комбинированные системы WDM/SDH/10GE.

Стандарты 10GE были приняты, а оборудование постепенно начало внедряться на сетях, включая сети отечественных операторов. Современный этап развития технологии GE можно охарактеризовать, как опытное внедрение сетей 10GE и постепенный переход от GE к 10GE на транспортных сетях WAN. Уже сейчас в лабораториях решается вопрос о дальнейшем развитии технологии GE и о будущей взаимосвязи ее с технологией SDH. В основном разработчики работают над созданием высокоскоростного оборудования SDH уровня 40 Гбит/с или STM-256.

Для таких сетей передача в одном из контейнеров трафика 10GE становится вполне реализуемой. С другой стороны разработчики технологии GE предлагают первые проекты оборудования 40GE, которая будет соответствовать объемам трафика NGSDH.

Однако, в настоящее время операторы более охотно внедряют технологию WDM и развертывают сети GE в разных каналах WDM. Такой подход обещает быструю отдачу в отличие от неясных пока перспектив разработки супер высокоскоростной технологии 40/100GE. На уровне локальных сетей по-прежнему доминирует технология Fast Ethernet (100 Мбит/с), хотя в последнее время многие отмечают, что недостаток пропускной способности этой технологии уже начал ощущаться.

7.2.1. Архитектура технологии Gigabit Ethernet. Стандарт IEEE 802.3.

Технология GE использует те же форматы кадров и типы протоколов, что и ее предшественницы – Ethernet/Fast Ethernet. Это дает возможность безболезненно переходить от одного уровня к другому без существенных капитальных затрат. Архитектурная модель, представленная на рис. 7.11, расширена на рис. 7.12. слева приведен стандарт IEEE 802.3ab (1000Base-T) поверх кабелей UTP, справа – стандарт IEEE 802.3z (1000BASE-T) поверх оптического кабеля. Отличительной чертой технологии GE стала разработка уровней MAC и уровня Gigabit MII (GMII) вместо MII для адаптации технологии к новой среде передачи и новой скорости передачи кадров, а также существенная переработка стандартов физического уровня.

Как видно из рис. 7.12, в технологии GE используются протоколы CSMA/CD или режим дуплексной передачи (FDX). Это означает, что теоретически в системах GE можно использовать и полудуплексный, и полнодуплексный режим передачи. Чтобы обеспечить режим работы протокола CSMA/CD в технологии GE был увеличен параметр MFS до размера 512 байт. Но, несмотря на теоретические предпосылки, в реальных сетях используется в основном полнодуплексный режим передачи, а протокол CSMA/CD не используется.

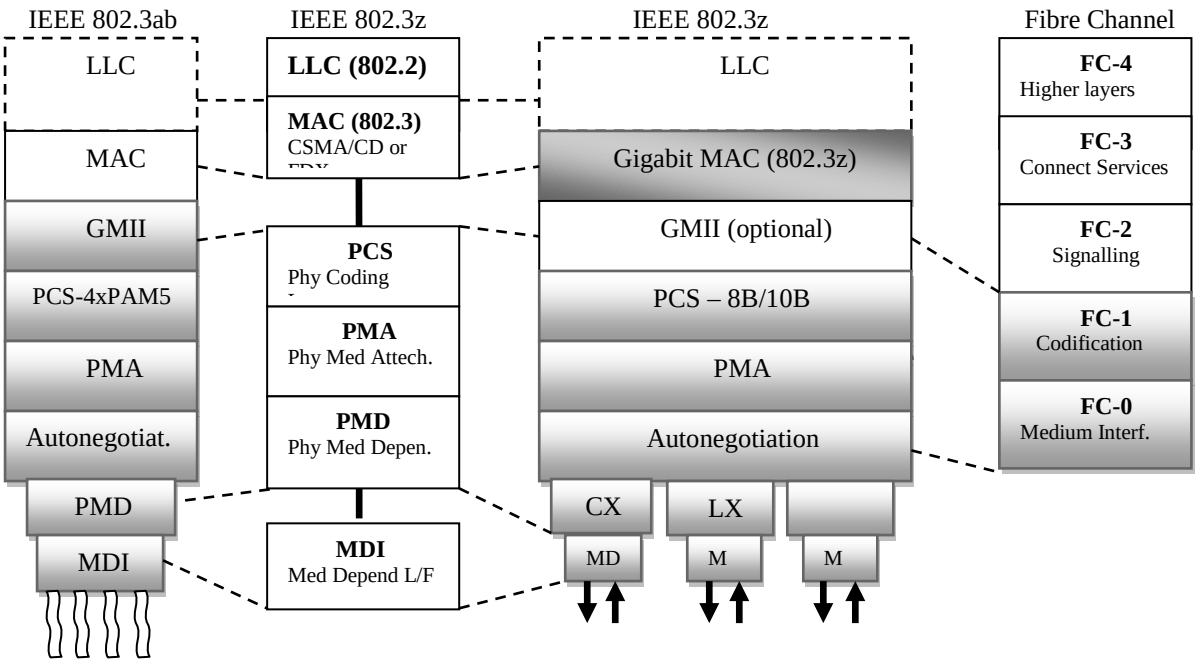


Рис. 7.12. Модель протокола Gigabit Ethernet по IEEE 802.3.

7.2.2. Интерфейс 1000BASE-X.

Основные изменения в архитектуре GE по сравнению с Ethernet коснулись физического уровня 1000Base-X, использующего оптический кабель, и уровня кодирования PCS, т. к. было предложено, чтобы технология GE опиралась на принципы кодирования и передачи сетей Fiber Channel (уровни FC-0 и FC-1). Данные Fiber Channel при использовании GFP-T передаются по системе NGSDH прозрачно, без существенных преобразований. Это формирует базу для конвергенции сетей Gigabit Ethernet и NGSDH. В результате эти транспортные сети оказываются ближайшими родственниками, связываясь на основе протокола GFP. Структура физического уровня GE представлена на рис. 7.13.

Как показано на рисунке, данные поступают в интерфейс с уровня MAC и затем пошагово конвертируются в оптические или электрические сигналы. С уровня MAC сигнал приходит на уровень GMII, который представляет собой, также как и MII часть интерфейса, не зависящую от среды передачи. Здесь сигнал преобразуется в определенную последовательность со скоростью передачи 125 Мбит/с. Полученные данные передаются непосредственно на физический уровень 1000BASE-X. Этот уровень разделен на несколько подуровней в зависимости от процессов преобразования сигнала Gigabit Ethernet. Рассмотрим их детально.

Уровень кодирования PCS (Physical coding sublayer).

На этом уровне осуществляется линейное кодирование сигнала GE, поступающего от подуровня GMII. Вообще подуровень PCS выполняет две функции:

- Кодирование и декодирование данных GMII в формат кода 8B/10B
- Процедуры автоидентификации и автоконфигурации .

Еще одна, дополнительная функция, связанная с обеспечением протокола CSMA/CD при полудуплексной передаче имеет явно дополнительный характер.

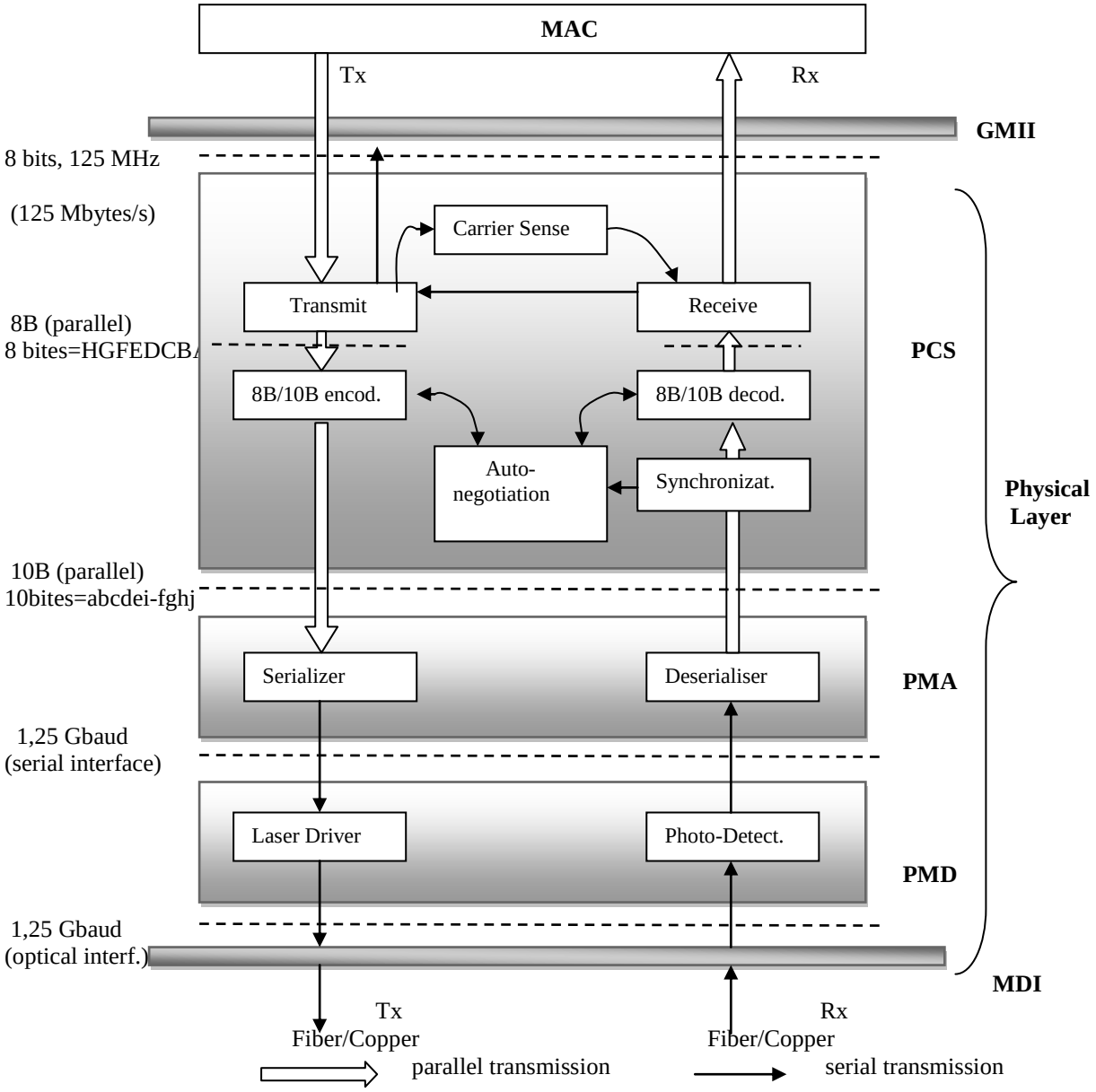


Рис. 7.13. Схема физического уровня технологии 1000BASE-X.

Кодирование 8B/10B соответствует блок-ориентированному коду, используемому в технологии Fiber Channel. Суть процедуры состоит в кодировании каждого 8-битного октета в 10-битный символ (рис. 7.14). Для этого байт разделяется на две группы X и Y. Y-группа содержит 3 наиболее важных бита, X-группа – 5 менее важных битов. В результате формируется кодовая группа /*Dx.y*/. Например, рассмотрим кодирование байта с содержимым 5C в 16-

ричном представлении (Hex). Кодирование этого байта приводит к кодовой группе /*D28.2*/ (см. табл. 7.2).

$$5C\ hex = \overbrace{010}^{y}\ \overbrace{11100}^{x} = /Dx.y/ = /D28.2/ \Longleftrightarrow \overbrace{001110}^{abcdei}\ \overbrace{0101}^{fghj}$$

Помимо преобразования последовательностей 8B в 10B передатчик старается в динамическом режиме обеспечить баланс количества единиц и нулей. Для этого используется два типа кода RD (Running Disparity): RD- (слишком много нулей) и RD+ (слишком много единиц), взаимно инверсных друг к другу. В результате среднее количество 1 и 0 в линейном сигнале равно.

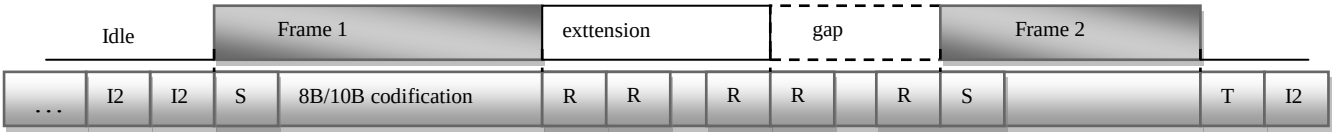


Рис. 7.14. Принцип кодирования 8B/10B.

Таблица 7.2. Варианты кодирования различных последовательностей в коде 8B/10B.

Байт	Содержимое (8B) в порядке HGF EDCBA	Группа /Dx.y/	Код 10B (RD-) в порядке abcdei fghi	Код 10B (RD+) в порядке abcdei fghi
0 0	000 00000	/D0.0/	100111 0100	011000 1011
0 1	000 00001	/D1.0/	011101 0100	100010 1011
5 C	010 11100	/D28.2/	001110 0101	110001 1010
A 2	101 00010	/D2.5/	101101 1010	010010 0101
D E	110 11110	/D30.6/	011110 0110	100001 1001
F E	111 11110	/K30.7/	011110 0001	100001 1110

Кадры Ethernet всех трех рассмотренных выше типов кодируются с использованием правил 8B/10B. Затем полученная кодовая комбинация передается с кодом группы /S/, который одновременно обозначает начало передачи кадра. Окончание передачи кадра обозначается как минимум двумя полями кодовых групп /T/ и /R/. Кадры, содержащие четное количество кодовых групп заканчиваются двойным полем /R/. Для передачи защитного интервала GAP или IFG используются поля свободного кода /I1/ и /I2/, которые можно считать полями заполнения 8B/10B (рис. 7.14).

Применение кода 8B/10B в технологии Fiber Channel, принятой ANSI, было обусловлено использованием его для систем хранения информации. Этот код имеет ряд преимуществ, таких как высокая плотность преобразования (большое

число переходов от 0 на 1), устойчивый баланс по постоянному току (отсутствие постоянной составляющей) и, главное, высокая устойчивость к появлению ошибок, которая определяется разделением информации на два класса по уровню ценности. Все перечисленные преимущества позволяют эффективно использовать код 8B/10B в распределенных системах передачи байт-ориентированной информации.

Уровень адаптации к среде передачи PMA (Physical Medium Attachment).

Следующим вниз за уровнем PCS расположен уровень адаптации к среде передачи PMA. Этот уровень является последним уровнем, не зависящим от среды передачи. Роль уровня PMA состоит в передаче последовательности сигналов в формате NRZ от уровня PCS к уровню PMD, где последовательность импульсов преобразуется в оптические или электрические сигналы. PMA также выполняет функции выделения сигналов синхронизации из входящего потока данных.

Уровень преобразования сигнала в физические сигналы PMD (Physical Medium Dependent).

Ниже уровня PMA находится уровень PMD, уже привязанный к специфике среды передачи. Здесь сигнал, кодированный на уровне PCS и переданный через уровень PMA, преобразуется в электрический или оптический сигнал в соответствии с правилами, установленными для соответствующих интерфейсов. Затем с уровня PMD сигналы поступают на уровень MDI (Medium Dependent Interface), где непосредственно загружаются в систему передачи.

Поскольку для технологии GE электрический интерфейс рассматривается скорее как дополнительный, рассмотрим оптический интерфейс 1000BASE-X. Он включает в себя три основных части:

- Тип оптического интерфейса
- Протокол автоконфигурации
- Процедуры управления

В современных оптических сетях и, в частности, в сетях GE широко используются сменные оптические интерфейсы SFP. Применение сменного интерфейсного модуля имеет несколько преимуществ:

- Любая неисправность в оптическом интерфейсе не требует замены всего модуля оборудования, достаточно заменить сам интерфейс
- Модули в оборудовании оказываются независимыми от длины волны оптической системы передачи. При необходимости перехода на другую длину волны достаточно поменять интерфейсный модуль SFP

Процедура автоконфигурации в интерфейсе 1000BASE-X используется также как и в интерфейсах обычных сетей Ethernet для определения режима передачи (полнодуплексный или полудуплексный), управления потоками данных и идентификации неисправностей.

7.2.3. Немного об интерфейсе 1000BASE-T.

В отличие от оптического интерфейса, интерфейс GE на основе витой пары UTP 1000BASE-T на практике имеет меньшую ценность и встречается довольно редко. На физическом уровне этот интерфейс использует витую пару UTP категории 5, что позволяет выполнять переход от технологии Ethernet в GE без реконструкции кабельной системы оператора. Как и в интерфейсе 1000BASE-X, физический уровень 1000BASE-T разделен на подуровни PCS, где формируется логическая структура потоков передачи и кодирование сигнала, PMA, где выполняется аналого-цифровое преобразование сигналов для передачи их по кабельной системе и PMD, где осуществляется сама передача.

При разработке стандарта 1000BASE-T учитывалось, что пропускная способность кабелей UTP категории 5 ограничена полосой в 125 МГц. Поэтому в интерфейсе используется 4 пары, по каждой из которых передается по 250 Мбит/с, итого – 1 Гбит/с. В процессе кодирования сигнала используется метод кодовых групп и специальная технология кодирования по 4 парам одновременно (4D-PAM5). Кодирование включает в себя следующие правила:

- Все 4 пары кабеля используются одновременно для передачи и приема сигналов
- Каждый байт кодируется 4 импульсами с модуляцией PAM
- Используется 5-уровневое кодирование (+2, +1, 0, -1, -2)
- Для кодирования используются только 4 уровня, 5 уровень применяется для процедуры коррекции ошибок FEC (Forward Error Correction)
- В отсутствии передаваемых данных в интерфейсе используется последовательность символов заполнения IDLE (+2, 0, -2), которая обеспечивает сохранение режима фазовой синхронизации

В результате использования 4-уровневого кодирования по одной паре при символьной скорости 125 Мбод, характерной для UTP, передается информация со скоростью 250 Мбит/с, а по всем парам – 1 Гбит/с. При этом в каждой паре спектральная плотность сигнала соответствует интерфейсу 100BASE-TX. Это позволяет осуществить переход из Ethernet в GE без коренной реконструкции кабельной системы.

Использование принципа передачи по 4 парам одновременно составляет основную специфику, присущую интерфейсу 1000BASE-T. Все остальные нюансы технологии Ethernet для этого интерфейса во многом аналогичны обычному Ethernet. Также как и в Ethernet в интерфейсе 1000BASE-T могут быть реализованы полудуплексный и полнодуплексный режимы передачи. Режим автоидентификации также реализован аналогично Ethernet, с использованием практически тех же форматов данных и соответствующих полей.

8. Контроль параметров NGSDH.

8.1. Принципы контроля параметров NGSDH на уровне Ethernet. RFC-2544.

При рассмотрении принципов контроля работы систем NGSDH нас будет интересовать только канальный уровень. Это позволяет из всего материала, касающегося принципов измерений в сетях Ethernet выделить только небольшую часть, связанную с проблематикой NGSDH.

Рассмотрим задачу измерений в системах NGSDH со стороны сетей Ethernet. С технологией Ethernet и GE связаны точки демаркации, находящиеся на границах виртуальных коридоров, образованных в сети NGSDH. Самый общий анализ принципов измерений в этих точках приводит к выводу о том, что измерения, связанные с внешним контролем в сетях NGSDH со стороны интерфейсов Ethernet и GE, можно свести к задаче паспортизации параметров качества виртуального коридора.

Действительно, для проверки эффективности работы системы NGSDH на уровне передачи и приема пакетного трафика Ethernet достаточно измерить параметры качества образованного в рамках транспортной сети виртуального коридора (рис. 8.1).

Рис. 8.1. Проблема паспортизации виртуальных коридоров.

Здесь нас будут интересовать только параметры качества канального уровня, измеряемые по схеме «точка – точка» от пункта передачи трафика до пункта приема. Шлейфовые измерения параметров качества в виртуальном коридоре Ethernet исключаются в силу технологических особенностей последней.

Современная методология паспортизации параметров качества проработана довольно детально и отражена в рекомендации IETF RFC-2544: «Методология эталонного тестирования для устройств, входящих в состав сети». Рассмотрим эту рекомендацию и ее применимость для решения задачи паспортизации виртуальных коридоров в сети NGSDH.

RFC-2544 определяет множество тестов, которые могут использоваться для определения производительности сетевых устройств или сегментов сетей Ethernet/IP. Все измерения по рек. RFC-2544 относятся к уровню транспортной сети и опираются на понятие тестового канала. Тестовым каналом называется

маршрут передачи пакетов от пункта передачи до пункта приема. В общем случае пакеты могут передаваться по сети по разным маршрутам, но обязательно должны собираться в пункте приема.

Для производителей оборудования Internet и Ethernet RFC-2544 стал естественной методологией испытаний. В отличие от традиционных базовых услуг TDM и ATM, Ethernet не имеет строгих требований по качеству для каждого класса обслуживания. Необходимые условия тестирования для MAN традиционно ориентировались на параметры пропускной способности, задержки и уровня потери пакетов, а не на битовые ошибки и «пять девяток» надежности. Причина здесь в том, что измерение параметров ошибок (BER) теряет смысл, если передаваемый трафик является пакетным. Коль скоро трафик передается в виде пакетов Ethernet или IP, в составе каждого пакета присутствует контрольная сумма. При идентификации ошибки пакет уничтожается, так что на сторону приемника поступает не загруженная тестовая последовательность, а лишь ее отдельные фрагменты (блоки). С точки зрения пакетной технологии одна или несколько битовых ошибок приводят к одному и тому же результату – пакет уничтожается на стороне прима. Следовательно, методика должна опираться не на количество битовых ошибок в нагрузке, а на количество пакетов, принятых с ошибками или количество потерянных пакетов. В этом коренное отличие пакетного трафика от трафика TDM с точки зрения нормирования и измерения параметров качества.

RFC-2544 имеет высокую ценность для тестирования качества обслуживания в традиционных сетях, ее значение сопоставимо со значением методик G.821/G.826/M.2100. Методика включает в себя измерения, проводящиеся в режиме имитации, т. е. с генерацией тестовой нагрузки и ее приемом. Всего в методике устанавливается семь групп параметров качества тестового потока:

- Пропускная способность (Throughput – Th)
- Задержка передачи данных (Latency – Lat) и ее производные параметры: девиация задержки (Latency Deviation – LD) и изменение задержки во времени (Latency over Time - LoT)
- Количество ошибок в потоке (Frame Errors – FE)
- Количество потерянных пакетов (Frame Loss – FL)
- Параметры качества передачи/приема берстного трафика (Back-to-back frames)
- Время восстановления канала при возникновении неисправности (System Recovery)
- Время восстановления исходного состояния системы (Reset)

Измерения перечисленных параметров, управляемые автоматически при различных размерах пакета, обеспечивают паспортизацию качества устройства или сегмента сети. Измерения могут занять от нескольких минут до нескольких часов в зависимости от производительности сети и измеряемых параметров.

Так как RFC-2544 является методикой активного тестирования, связанного с трафиковой генерацией, измерения не могут быть произведены в режиме пассивного мониторинга сети, поскольку сами параметры качества требуют использования тестовых пакетов. Для измерения параметров задержки, например, в составе пакета должна содержаться метка времени генерации пакета. Для контроля количества потерянных пакетов и пакетов с ошибками необходимо знать общее количество переданных пакетов, значит, в составе пакеты должны быть нумерованными. Чтобы поле временной метки и поле нумерации содержалось в пакете, это должен быть специализированный тестовый пакет. Следовательно, измерение перечисленных параметров качества принципиально невозможно на реальном трафике, а только на тестовом трафике, отсюда и вытекает необходимость трафиковой имитации.

Методика измерений RFC-2544 предполагает несколько методов подключения приборов:

- Использование одного прибора
- Использование двух приборов

Рассмотрим теперь несколько типовых методов организации измерений по методике RFC-2544.

Один измерительный прибор и одно испытуемое устройство.

Схема на рис. 8.2. типична для тестирования сетевого устройства в процессе его сертификации, выходного и входного контроля, а также при пуско-наладочных испытаниях. В схеме организации измерений используется один измерительный прибор, который одновременно является передатчиком и приемником тестового потока данных. Прибор посылает тестовый трафик на один порт устройства и затем анализирует параметры качества на другом порте устройства.

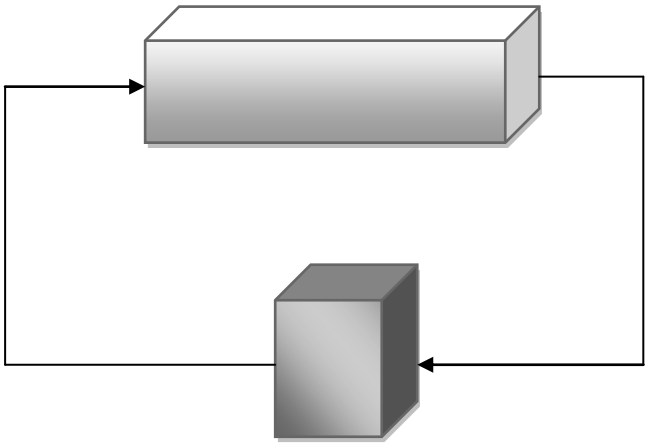


Рис. 8.2. схема организации измерений с одним прибором и одним тестовым устройством.

Один измерительный прибор и последовательность испытуемых устройств.

Схема использования одного измерительного прибора может быть обобщена на случай тестирования нескольких устройств или целого сегмента сети (рис. 7.3). В этом случае прибор измеряет параметры качества в канале, прошедшем через несколько устройств в сети. Примером использования такой схемы можно считать проведение измерений по рек. RFC-2544 по шлейфу. В этом случае в сети организуется логический шлейф, который позволяет сделать петлю от порта передатчика прибора к порту приемника. Получившийся составной маршрут в полной мере иллюстрируется рис. 8.3. Обычно такая методика используется в лабораторных исследованиях, где нет территориальной разнесенности портов передатчика и приемника.

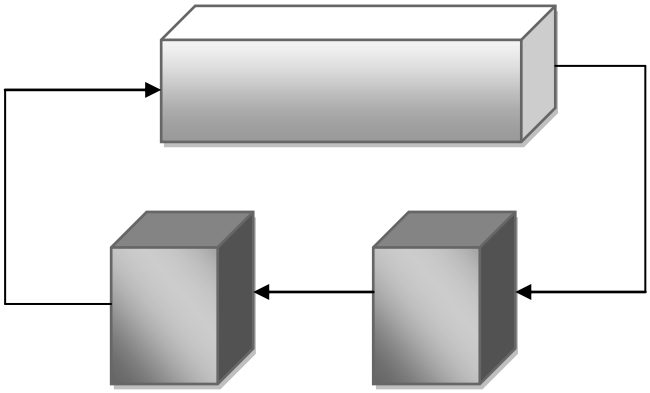


Рис. 8.3. Схема организации измерений с одним прибором и несколькими тестовыми устройствами.

Два измерительных прибора и сегмент сети.

Формирование локального шлейфа в сети Ethernet представляет собой довольно сложную процедуру, требующую изменения установок по MAC-адресации потока на всех узлах, через которые проходит тестовый маршрут. В большой сети, где требуются регулярные измерении для паспортизации разных виртуальных коридоров, формировать для каждого такого измерения логический шлейф представляется очень трудоемким. По этой причине в методике рек. RFC-2544 было предложено несколько схем, использующих принципы организации измерений по схеме «точка – точка». Использование таких схем уменьшает объем необходимых подготовительных работ при проведении измерений и соответствует специфике эксплуатационного тестирования.

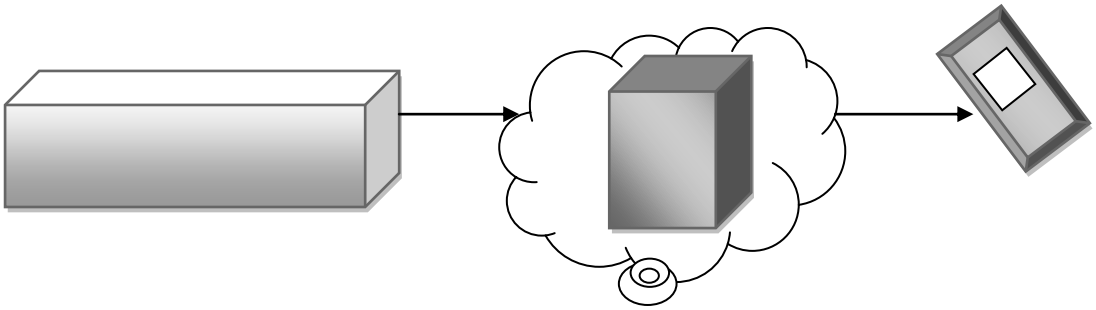


Рис. 8.4. Методика организации измерений по схеме «точка – точка».

Наиболее простая схема организации измерений представлена на рис. 8.4. Согласно ей используется два прибора: один выступает генератором тестового потока пакетов, другой – анализатором параметров качества. Эта методика накладывает ограничения на перечень измеряемых параметров. Например, для измерения параметра Lat передатчик и приемник тестового потока должны иметь синхронизацию по абсолютному времени не хуже 1 мкс, что в реальной практике едва ли достижимо. Поэтому при выполнении измерений в соответствии с рис. 8.4 абсолютные параметры задержки Lat не измеряются, а измеряются только относительные параметры LD и LoT.

Методика организации измерений по удаленному шлейфу.

Ограничения на перечень измеряемых параметров при выполнении тестов в режиме «точка – точка» представляют собой неприятное последствие схемы рис. 8.4. Параметр абсолютной задержки Lat является принципиальным для многих интерактивных услуг, и невозможность его измерения объективно ограничивает применение методики. Для нахождения компромисса между схемой рис. 8.4 и решением вопроса о временной синхронизации была разработана схема организации измерений с удаленным шлейфом (рис. 8.5). Согласно этой схеме, на удаленном конце приемника тестового потока устанавливается устройство, которое осуществляет логическое шлейфообразование, преобразуя поля адресации пакетов. Затем поток тестовых пакетов передается в обратном направлении на порт приемника основного анализатора. В результате измеряется полная спецификация параметров качества рек. RFC-2544. Использование одного прибора в качестве генератора и анализатора тестового потока устраняет требование временной синхронизации, так что параметр Lat может измеряться точно. Формирование шлейфа на удаленном конце за счет использования специального устройства решает вопрос об изменении установок в сети. Действительно, при формировании виртуального коридора в сети Ethernet он обычно существует в виде дуплексного канала, так что нет необходимости прописывать по сети обратный маршрут. Единственное изменение в конфигурации касается устройства удаленного шлейфа, но оно не является частью сети и обычно конфигурируется дистанционно. Следовательно, выполнение измерений не требует изменения установок сетевых элементов и в то же время решает вопрос с измерением Lat. Единственным недостатком методики рис. 8.5 является то, что параметры качества измеряются одновременно в прямом и обратном направлении. В случае, если в прямом и обратном направлении параметры качества не совпадают, т. е. существует анизотропия в параметрах, разделить полученный результат между прямым и обратным направлением не представляется возможным. Пожалуй, это единственный серьезный методический недостаток предложенной схемы. На практике его компенсируют, объединяя схемы рис. 8.4 и 8.5. Ряд приборов для паспортизации потоков Ethernet имеют функции формирования локального шлейфа. Тогда их можно использовать как по схеме рис. 8.4, так и по схеме рис. 8.5. Использование схемы рис. 8.5 позволяет

точно измерить параметр Lat и совокупные параметры качества двойного канала, а схема рис. 8.4 позволяет учесть вклад прямого и обратного канала передачи пакетов.

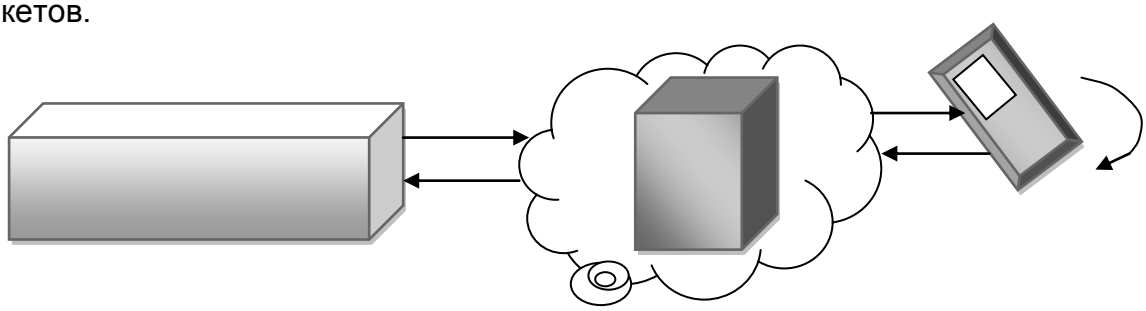


Рис. 8.5. Методика организации измерений с удаленным шлейфом.

Во всех перечисленных методиках используется генерация специализированных пакетов, содержащих временные метки для измерения Lat, LD, LoT, и нумерацию следования для измерения FE, FL. Поток таких пакетов можно рассматривать как тестовый канал. В общем случае тестовый поток «растекается» по сети Ethernet, чтобы потом собраться на стороне приемника. В случае NGSDH и тестирования отдельных виртуальных коридоров поток пакетов находится в определенной виртуальной трубе. Тестовый поток имеет ряд параметров:

- Уровень загрузки виртуального коридора – GAP
- Размер кадра – L
- Приоритетность кадров – Pr
- Установки – VLAN
- MAC-адресация
- Параметры полей, связанные с верхними уровнями (HTTP, SMTP, IP и пр.)

Рассмотрим перечисленные параметры тестового потока с учетом специфики измерений в системах NGSDH.

Уровень загрузки виртуального коридора GAP

Параметр GAP определяет уровень загрузки виртуального коридора. GAP представляет собой защитный интервал между пакетами. В данном случае это параметр, определяющий уровень загрузки виртуального коридора тестовым трафиком. Например, для измерений можно загрузить весь виртуальный коридор (100%), а можно использовать и часть ресурса (10 – 15%). С параметром GAP уровень загрузки ресурса связан обратным соотношением: чем больше GAP, тем меньше загружен ресурс. Можно использовать как абсолютные единицы GAP (мксек), так и относительные (%).

Размер кадра L

Размер кадра представляет собой важный параметр тестового потока. Он определяет соотношение между преамбулой (заголовком) тестового кадра и его содержимым. Кадры малого размера почти полностью состоят из заголовка,

кадры большого размера – из полезной нагрузки. Тестовый поток, состоящий из кадров малого размера, часто оказывается удобен для анализа работы системы коммутации пакетов. В случае преобладания в трафике коротких кадров центральный процессор коммутатора должен обрабатывать большое количество сигнальной информации в заголовках, а полезная нагрузка при этом будет минимальна. Поскольку многие системы коммутации проектируются в расчете на средние длины кадров, тестирование с использованием трафика коротких кадров позволяет проверить производительность центрального процессора коммутатора. На практике существует и трафик коротких кадров (приложения VoIP, трафик SMS и пр.), и трафик длинных кадров (передача видеоинформации). Обычно разные типы трафика сосуществуют в одном сегменте сети и даже в одном виртуальном коридоре. В таком случае трафик называют смешанным.

С точки зрения задачи тестирования виртуальных коридоров в NGSDH сам процесс коммутации фактически отсутствует, т. к. виртуальный коридор в системе NGSDH второго поколения существует на канальном уровне. Поэтому с точки зрения методики измерений параметр L мало сказывается на результатах тестирования. Но постепенное развитие систем NGSDH и переход к системам третьего поколения будет связан с совмещением функций системы передачи и системы коммутации. Как только процессы коммутации окажутся внутри оборудования NGSDH, роль параметра L существенно увеличиться.

Согласно классической методике RFC-2544 рекомендуется проводить измерения для нескольких значений размеров кадра L: 64, 128, 256, 512, 1024, 1280 и 1518 байтов. Каждое измерение проводится отдельно для каждого размера кадра или параллельно с использованием методики смешанного трафика. Для систем, использующих пакеты расширенного размера (Jumbo frame) 4096 или 9000 байтов, измерения проводятся по дополнительным методикам, представляющим собой модификации методики RFC-2544.

Приоритетность кадров Pr

Приоритетность тестового потока Pr определяется параметрами приоритетов отдельных кадров. Обычно приоритетность связана с тремя классификационными иерархиями: ToS (Type of Services), DiffServ и VLAN. Тип иерархии устанавливается для всей схемы формирования трафика. Приоритетность внутри VLAN представляет собой отдельную схему установления приоритетов в том случае, если передаваемый тестовый трафик поддерживает VLAN. ToS и DiffServ являются альтернативными схемами установки приоритетов, принятыми в системах адресации IPv4 и IPv6. Все приоритеты отдельных кадров используются в системе коммутации. Трафик более высокого приоритета имеет преимущества в системе коммутации и обслуживается сетевыми элементами в первую очередь. Приоритетность трафика всегда связана с типом услуг, для которых трафик передается. Примерами трафика высокого приоритета являются трафик VoIP или передачи видеоинформации.

Вполне понятно, что уровень приоритетности является важным параметром тестового трафика при измерениях в системах коммутации NGN. Применительно к задаче тестирования NGSDH параметр Pr имеет малое значение для методики измерений, поскольку в этом случае имеет место коридор, соединяющий две точки сети. Внутри его может быть установлена определенная приоритетность тестовых пакетов, но на параметры качества передачи трафика уровень приоритетности не сказывается, поскольку в системе отсутствует сам процесс коммутации. Таким образом, для случая NGSDH параметр Pr не имеет методической ценности.

Установки VLAN

Установки параметров VLAN должны соответствовать требованиям, установленным в сети NGSDH. Обычно параметры VLAN устанавливаются в полях специального заголовка кадра IP. Если в системе NGSDH принята система разделения трафика по VLAN, то тестовый трафик должен соответствовать требованиям, принятым в сети. Другого значения для тестирования виртуального коридора NGSDH параметр VLAN не имеет.

MAC-адресация

Наличие адресации канального уровня является важной особенностью технологии Ethernet, соответственно, MAC-адреса передатчика и приемника являются важными параметрами любого тестового потока. В одном виртуальном коридоре могут существовать несколько тестовых потоков кадров, отличающихся параметрами MAC-адресов передатчиков и приемников (рис. 8.6 сверху). В процессе проведения измерений параметры MAC-адресации приемника и передатчика могут быть как фиксированными, так и переменными. В качестве примера на рис. 8.6 снизу показан пример переменного значения MAC-адреса приемника. В результате тестовый поток распространяется на стороне приемника «веером». Такой режим называется режимом сканирования по MAc-адресам приемника. Существует возможность установок аналогичного режима по MAC-адресам передатчика.

Параметры полей, связанные с верхними уровнями (HTTP, SMTP, IP и пр.)

Помимо параметров канального уровня (поля VLAN и MAC-адресация) тестовый поток может содержать необходимые поля верхних уровней, к которым относятся:

- IP-адресация (адресация сетевого уровня)
- Параметры специализированных полей транспортного уровня (например, параметры MPLS)
- Параметры поддерживаемой сигнализации (HTTP, TCP, UDP, SMTP и пр.)

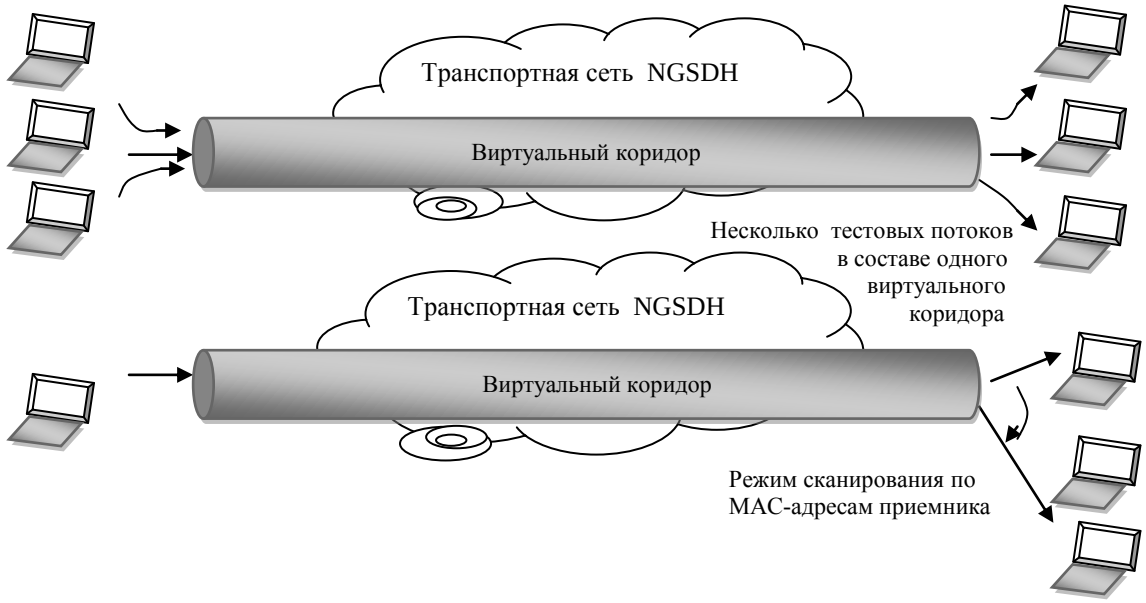


Рис. 8.6. Некоторые варианты схем измерений виртуального коридора в случае различных установок параметров MAC-адресации.

Как и в случае с параметрами VLAN для контроля параметров виртуального коридора NGSDH перечисленные группы параметров тестового потока не имеют методического смысла. Единственное требование к тестовому потоку из перечисленной группы параметров может состоять в их соответствии с требованиями сети. Например, если тестовый поток передается в виде IP-кадров, то в кадрах должны стоять соответствующие значения IP-адресов передатчика и приемника. В противном случае MBB NGSDH может удалить неправильные кадры. Но сами поля верхнего уровня не участвуют в методике контроля параметров виртуального коридора NGSDH. Таким образом, несмотря на то, что методика RFC-2544 была разработана для тестирования устройств и сегментов пакетных сетей уровней 2 и 3, для задачи контроля параметров виртуальных коридоров NGSDH существенными являются только параметры канального уровня (уровень 2). Подводя итог этому, перечислим параметры, существенные для измерения виртуальных коридоров:

- Уровень загрузки виртуального коридора – GAP
- Размер кадра – L
- MAC-адресация

В дальнейшем они определяются как входные параметры тестового потока.

Рассмотрим теперь детально параметры качества, предложенные в рек. RFC-2544.

Пропускная способность (Throughput)

Тест производительности определяет максимальную пропускную способность, которую обеспечивает устройство или сегмент сети без потери кадров. Обычно тесты на пропускную способность измеряются в зависимости от параметров GAP и для разных значений L.

Th = f(GAP/ при условии L)

Испытание начинается обычно с 10% загрузки канала, передачей определенного количества кадров определенной длины. Если был потерян хоть один кадр, испытание повторяется на более низкой скорости загрузки кадров, причем уменьшение скорости производится по принципу деления интервала пополам, что соответствует бинарному алгоритму поиска (5%, 2,5% и т. д.). Этот процесс продолжается, пока для данного значения GAP не будет определена максимальная производительность.

RFC-2544 определяет стандартный метод измерения Th, основанный на последовательном уменьшении производительности, с шагом 10% до тех пор, пока не будут исключены ошибки кадров. Но в большинстве своем анализаторы используют бинарный алгоритм поиска для определения производительности и по направлению вверх, т. е. при условии, что на 10% не было потерь пакетов, следующий шаг тестирования составляет 10% + (100 -.10)% = 55% и т. д. по бинарному алгоритму в сторону повышения GAP. Такой алгоритм обеспечивает лучшую сходимость, следовательно, меньшее время на одно измерение.

В результате проведения измерений для различных значений GAP и L получают зависимости f(GAP/ при заданном L) F(L/ при заданном GAP).

Время задержки (Latency)

Стандартный тест времени задержки сигнала выполняется при фиксированном уровне нагрузки канала GAP в течение нескольких минут в зависимости от внутренней методики, реализованной в приборе. В процессе теста измеряют время задержки отдельных кадров с временными метками и фиксируют минимальную задержку в течение одной минуты. Время задержки вычисляется как среднее из 20 таких испытаний. Строгое соответствие стандарту требует 280 минут – более чем 4 часа – чтобы завершить тест для всех размеров кадра. Однако на практике используются различные варианты оптимизации теста задержки, так что общее время измерения сокращается и составляет не более 15 – 30 мин.

Существует также возможность соединить измерения пропускной способности и задержки, если при тесте пропускной способности использовать тестовые пакеты с временными метками. Тогда во время теста пропускной способности измеряется и усредняется время задержки пакетов. Общее время задержки измеряется при максимальной пропускной способности, которая была достигнута во время теста. Результаты теста задержки заносятся в таблицу, как функция от размера кадра и пропускной способности Lat = f(Th/ при заданном L) или Lat = f(L/при заданном Th).

Уровень потери кадров (Frame Loss Rate)

Результатом измерения уровня потери кадров является зависимость количества потерянных кадров от загрузки канала GAP. Обычно измерение начинается со 100% загрузки канала, посылкой установленного числа кадров и регистрации процента потерянных при этом кадров. Загрузка канала уменьшается на заданное количество, 10% или меньше, и испытание повторяется. Если два следующие друг за другом результата проходят без потерь, то тесты с более низкой загрузкой канала не производятся и им присваивается нулевое значение потерянных кадров. Этот тест повторяется для каждого размера кадра L. Таким образом, результатом измерений будет ряд зависимостей FE = f(GAP/при заданном L).

Тест берстности Back-to-back

Берстный трафик представляет собой пример максимально неравномерного трафика. Он формируется кадрами, которые передаются дословно «спина-к-спине» (Back-to-back), так что начало нового кадра отстает от конца предыдущего на минимально допустимый технологией GAP. В результате трафик можно представить по схеме «максимальная интенсивность – пауза – максимальная интенсивность» (рис. 8.7).

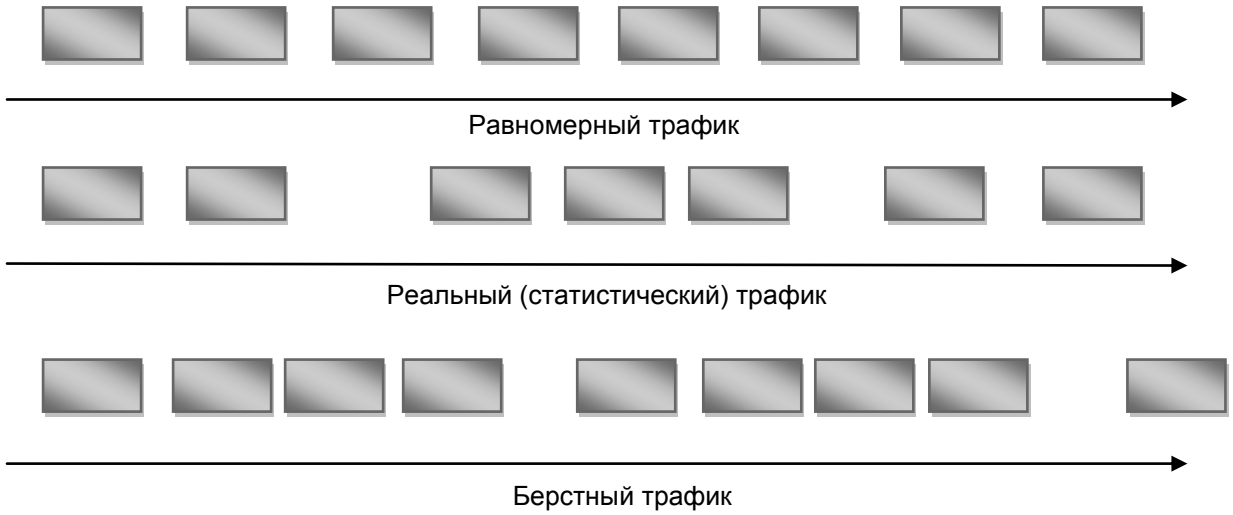


Рис. 8.7. Равномерный, реальный и берстный трафик

Берстный трафик представляет собой определенную структуру тестового трафика на входе. На выходе теста измеряются те же самые параметры пропускной способности канала и задержки. Основной целью теста Back-to-back является проверка способности оборудования/сегмента обрабатывать неравномерный трафик. Реальный трафик, конечно, находится между равномерным и берстным. Поскольку обработка берстного трафика для оборудования/сегментов обычно сложнее, чем обработка равномерного трафика, параметр Throughput, измеренный в условиях теста Back-to-back, часто трактуют как максимальную пропускную способность (maximum throughput) или способность обработки берстного трафика (burstability). Поэтому важнее оказывается проверка функциональности сетевых элементов в условиях работы с берстным трафиком.

Установка параметров теста Back-to-back определяет количество кадров и повторений с большим или меньшим числом кадров N в берсте. В процессе измерения параметр N увеличивается до N_{max}. Обычно тест повторяется для каждого размера кадра L. Результаты выводятся в виде таблиц зависимости {Th, Lat} = f(N/при заданном L).

Системная скорость восстановления (System Recovery)

Системная скорость восстановления – это время, которое требуется устройству/сегменту для остановки потери кадров, когда скорость передачи кадров уменьшается от стрессового (более 100%) к нормальному состоянию. В процессе измерения устройство подвергается нагрузке в течение не менее одной минуты со слишком большим уровнем трафика, обычно 110% от максимальной пропускной способности, определенной в тесте Throughput, т. е. с заведомо ожидаемой потерей кадров. Потом, трафик уменьшается до 50% от максимальной пропускной способности. Время между падением скорости передачи кадров и последним потерянным кадром усредняется для нескольких тестов, выполненных для каждого размера кадра L, и называется System Recovery.

Таким образом, System Recovery – это скорость восстановления системы после возникновения в ней перегрузки. Данные этого теста могут оказаться очень полезными при дальнейшей эксплуатации оборудования, сегмента или всей сети в целом. Также как и предыдущие тесты, измерение проводится для различных значений L. Результатом измерения является зависимость $T_{recovery}$ = f(L) и могут быть оформлены в виде таблицы или графика.

Reset

Тест на сброс измеряет время, которое требуется устройству или сегменту, чтобы начать передачу кадров после аппаратного или программного сброса или прерывания подачи питания. В отличие от других тестов RFC-2544, тест проводится только для кадров минимальной длины L = 64 кбайт. Задержка между последним переданным кадром перед сбросом и первым кадром после сброса показывает время сброса. Испытание выполняется для каждого типа сброса.

8.2. Контроль параметров NGSDH на уровне SDH.

8.2.1. Цели и задачи измерений на уровне NGSDH.

Уровень NGSDH состоит из 4 подуровней – VCAT, LCAS, GFP и RPR. Эти технологии были рассмотрены ранее, теперь мы рассмотрим методы и принципы измерений для каждой из них, направляясь от VCAT к RPR. Но прежде определим задачи, которые могут возникнуть в связи с этими измерениями и какие эксплуатационные проблемы должны решаться при этом.

Первая задача вполне предсказуема и определена новизной рассматриваемой технологии. Поскольку в новой структуре NGSDH присутствуют

уровни VCAT, LCAS, GFP и RPR, возникает вопрос о корректности работы соответствующих процессов в системе передачи. Таким образом, первой задачей эксплуатации становится проверка работоспособности механизмов, заложенных в технологию NGSDH.

Вторая задача, которую можно поставить перед измерениями – это контроль параметров качества верхнего уровня через систему NGSDH. Действительно, выше мы рассматривали принцип измерения параметров качества Ethernet на входе/выходе из системы NGSDH. Но для этой же цели можно использовать саму систему передачи. Здесь могут быть разные методы:

- На порт Ethernet может подаваться тестовый трафик различного профиля, а анализатор NGSDH методом пассивного мониторинга измеряет параметры качества по RFC-2544 в различных точках сети (рис. 8.8).
- Анализатор NGSDH в режиме Drop&Insert (ввода/вывода) подмешивает тестовый трафик непосредственно в систему NGSDH. Анализатор Ethernet на выходе МВВ измеряет параметры качества RFC-2544. С учетом сложности реализации такой схемы и самого режима Drop&Insert на работающей сети NGSDH такая методика может рассматриваться только как теоретически возможная, но не представляющая эксплуатационной ценности.
- Анализаторы Ethernet и NGSDH могут работать в пассивном режиме, обеспечивая анализ статистических параметров трафика Ethernet на входе/выходе NGSDH и внутри NGSDH. За счет сравнения результатов можно оценить влияние различных участков сети на общий уровень деградации качества. Так работают некоторые системы мониторинга конвергентных сетей.

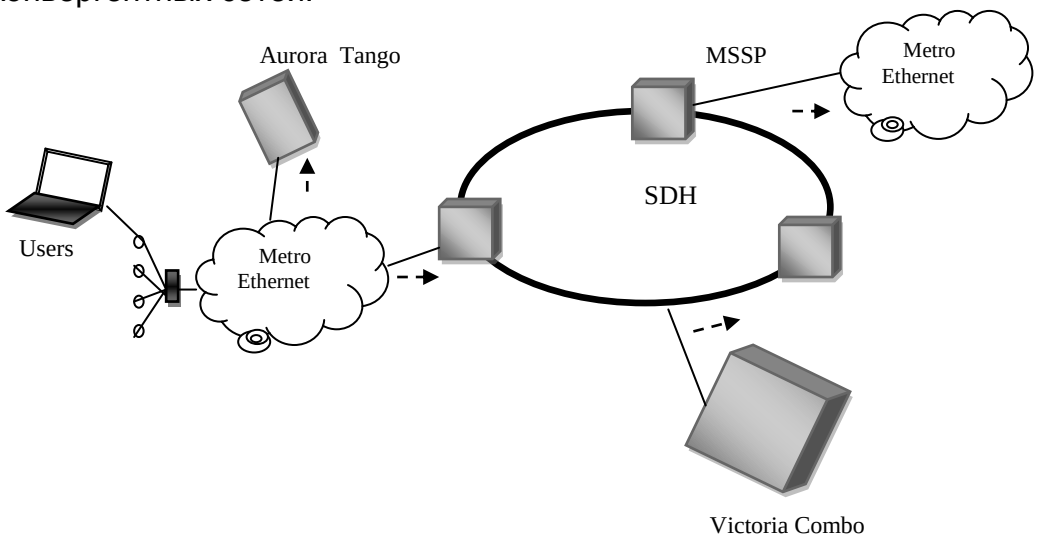


Рис. 8.8. Анализ параметров качества Ethernet через систему NGSDH.

Задача оценки механизмов NGSDH имеет отдельную методическую ценность. Здесь нужно рассматривать методы диагностики, принципы организации измерений и т. д. Задача измерения параметров качества внутри

NGSDH имеет совершенно прикладной смысл и полностью базируется на методиках классической SDH и RFC-2544, которые нами уже детально рассматривались. Отличие измерений уровня NGSDH здесь состоит только в новых вариантах подключения приборов и методах анализа полученных данных. В связи с этим мы в первую очередь рассмотрим принципы диагностики новых механизмов NGSDH, а вопрос контроля качества рассмотрим довольно кратко.

Следует отметить, что диагностика различных механизмов NGSDH в процессе эксплуатации не может быть отнесена к необходимым измерениям, т. к. к ним относятся только измерения по паспортизации каналов по параметрам качества. В случае классической SDH это измерения потоков PDH в системе, в случае NGSDH к ним добавляются параметры качества виртуальных коридоров в пакетной сети со всеми методическими построениями RFC-2544. Все остальные эксплуатационные измерения должны относится к дополнительным. Такие дополнительные измерения могут преследовать три цели:

- Устранение системных неисправностей, связанных с некорректной работой механизмов NGSDH или неправильными настройками оборудования
- Исследование новых механизмов и определение уровня эффективности их применения на сети (вопросы оптимизации настроек)
- Обучение персонала новой технологии

8.2.2. Специфика контроля систем VCAT

Сам механизм VCAT предусматривает сцепку контейнеров разного уровня на мультиплексорах по краям виртуального коридора. Этим определяется ответ на первый методический вопрос: «Где проводятся измерения VCAT?» - естественно, на мультиплексорах VCAT. Внутри сети NGSDH измерения VCAT провести невозможно, поскольку каждый контейнер распространяется стандартным образом. Диагностика VCAT должна включать в себя следующие задачи:

- Контроль правильности сцепки контейнеров, которая определена составом и номерами VC в VCG
- Контроль уровня компенсации взаимных задержек VC в VCG, которые возникают при передаче по сети
- Контроль информационных полей MFI1, MFI2 и SQ, что связано с цикловой и сверхцикловой структурой VCAT
- Контроль работы специфических сигналов о неисправности, которые возникают вследствие сбоя процедуры VCAT

Напомним, что современная технология VCAT предлагает очень широкий выбор вариантов конкатенации и получаемых скоростей передачи в виртуальных коридорах, и в каждом случае целостность виртуального коридора определяется соответствующей VCG. В качестве схемы организации измерений могут рассматриваться два варианта. Либо вместо МВВ ставится прибор, который имитирует поток VCAT, но это предполагает отключение мультиплексора от сети,

и поэтому этот метод нельзя считать эксплуатационным. Либо прибор ставится в режим мониторинга непосредственно после МВВ, и такой метод представляется более эксплуатационным (рис. 8.9). В этом случае исследование процесса VCAT сводится к сравнению результатов тестов в точке начала виртуального коридора и в точке, где VCAT собирается.

Однако метод мониторинга параметров VCAT не всегда реализуем на практике. Для выполнения мониторинга необходимо, чтобы соответствующие контейнеры в составе VCG были в одной структуре. Это возможно только, если между МВВ с VCAT и сетью SDH имеется один канал связи. Если таких каналов несколько, то от самого МВВ контейнеры в составе VCG пойдут по разным путям. В таком случае реализовать мониторинг всей группы VCG невозможно, и методически приходится признать, что единственным способом проверки работы VCAT будет отключение мультиплексора. Реализовать такие измерения можно только в процессе развертывания сети.

Рассмотрим по порядку возможные решения перечисленных выше 4 направлений диагностики VCAT. Контроль может осуществляться с помощью одного из самых современных анализаторов NGSDH – Victoria Combo.

Контроль правильности сцепки VC в VCG

Контроль правильности сцепки можно осуществить, сравнивая информацию о составе VCG, полученную с помощью прибора, с информацией от системы управления. Установленный порядок по номерам контейнеров в составе модуля VCAT сравнивается с порядком, в котором приходят контейнеры на приемной стороне. Несмотря на такой простой метод анализа, он позволяет убедиться в правильности порядка сцепки контейнеров в VCAT.

Контроль уровня компенсации взаимных задержек

Сложнее реализовать контроль уровня компенсации взаимных задержек при передаче разных контейнеров. На этапе пуско-наладки проверить уровень компенсации можно, если подключить вместо мультиплексора измерительный прибор. Тогда, внося задержки в передачу контейнеров в составе VCG на стороне передатчика, на приемной стороне можно фиксировать уровень компенсации соответствующих задержек. В режиме мониторинга оценить уровень компенсации задержек в NGSDH оказывается пока невозможным. Для этого нет разработанной методики.

Контроль полей MFI1, MFI2 и SQ

Контроль полей MFI1, MFI2 и SQ не представляет методической проблемы. Напомним, что еще в период разработки методов контроля полей заголовков классической SDH был придуман метод использования триггеров и сложных сценариев записи содержимого тех или иных полей заголовка. Если теперь вспомнить, что индикаторы MFI1 и MFI2 передаются в виде отдельных битов в

составе поля указателя H4, то соединив воедино методику диагностики полей с использованием триггеров и понимание местоположения полей MFI1, MFI2 и SQ, нетрудно реализовать мониторинг содержимого полей. Но здесь нужно признать, что единственным разумным применением полученных данных может служить анализ логики работы МВВ с реализованной функцией VCAT. Такая задача может быть у разработчиков МВВ, но не у службы эксплуатации.

Контроль неисправностей VCAT

В отличие от мониторинга содержимого полей MFI1, MFI2 и SQ контроль сигналов о неисправности в процессе VCAT объективно имеет смысл. Появление новых уровней в NGSDH по сравнению с SDH должно привести к появлению новых сигналов о неисправности в системе передачи. А это в свою очередь приводит к дополнению архитектуры диагностики. Поскольку в новой архитектуре появляются на выходе интерфейсы Ethernet, имеющие свои механизмы диагностики, то в состав перечня сигналов должны войти сигналы уровня Ethernet. Появление подуровней VCAT/LCAS и GFP в архитектуре самой сети NGSDH приводит к появлению еще двух уровней сигналов о неисправности – уровня VCAT и уровня GFP (см. табл. 8.1).

Таблица 8.1. Уровни сигналов о неисправностях в NGSDH

Уровень	**Сигналы о неисправностях**
Физическая среда	LOS, OOF, LSS, TSE, AIS, Slip
Регенерационная секция RS	LOF, FAS, TIM, OOF, B1-Err, REI
Мультиплексная секция MS	AIS, RDI, B2-Err, REI
Административный блок AU	AIS, LOP, PJE+, PJE-, NDF, Inv. Ptr
Маршрут HO-POH	UNEQ, RDI, TIM, PLM, B3-Err, REI, BIP-2
Трибутарный блок TU	AIS, LOP, LOM, PJE+, PJE-, NDF, Inv. Ptr.
Маршрут LO- POH	UNEQ, RDI, RFI, TIM, PLM, B3-Err, REI, BIP-2
VCAT/VCG	LOA, LOM, OOM2, OOM1, SQM
GFP	LFD, LOCS, LOCCS, cH-U, cH-C, tH-U, tH-C, eH-U, eH-C, pFCS
Ethernet	Allign., Under., Over., Flagm., FTL, FCS, OOR, IR

Таким образом, на уровне VCAT/VCG имеются следующие сигналы о неисправностях:

- LOA (Loss of Alignment) – потеря сцепки VCAT
- LOM (Loss of Multiframe) – потеря сверхцикла VCAT

- OOM1 (Out of Frame 1) – нарушение в индикаторе MFI1
- OOM2 (Out of Frame 2) – нарушение в индикаторе MFI2
- SQM (Sequence Number Mismatch) – нарушение в поле SQ

По своему назначению указанных сигналов, они выполняют все обозначенные выше функции контроля за работой процедуры VCAT. Анализ сигналов LOA дает возможность проверить целостность виртуально конкатенированного потока, а сигналы LOM, OOM1, OOM2 и SQM непосредственно связаны с соответствующими информационными полями и представляют полезный инструмент для контроля за ними. Как в случае классической SDH, анализ значения указателей не имеет эксплуатационного смысла, но имеет смысл анализ активности указателей, также и здесь, при контроле за системой NGSDH не так важно значение полей, как негативные изменения, которые отражаются сигналами о неисправностях. Анализ соответствующих сигналов позволяет выявить проблемы на уровне VCAT. Диагностика причины возникновения проблемы может затем потребовать контроля за целостностью потока, контроля механизма компенсации задержек и даже анализа содержимого полей MFI1, MFI2 и SQ. Но этот инструмент может использоваться эксплуатацией для уточнения причины нарушений в работе VCAT. Сам же контроль VCAT осуществляется в первую очередь по сигналам о неисправности.

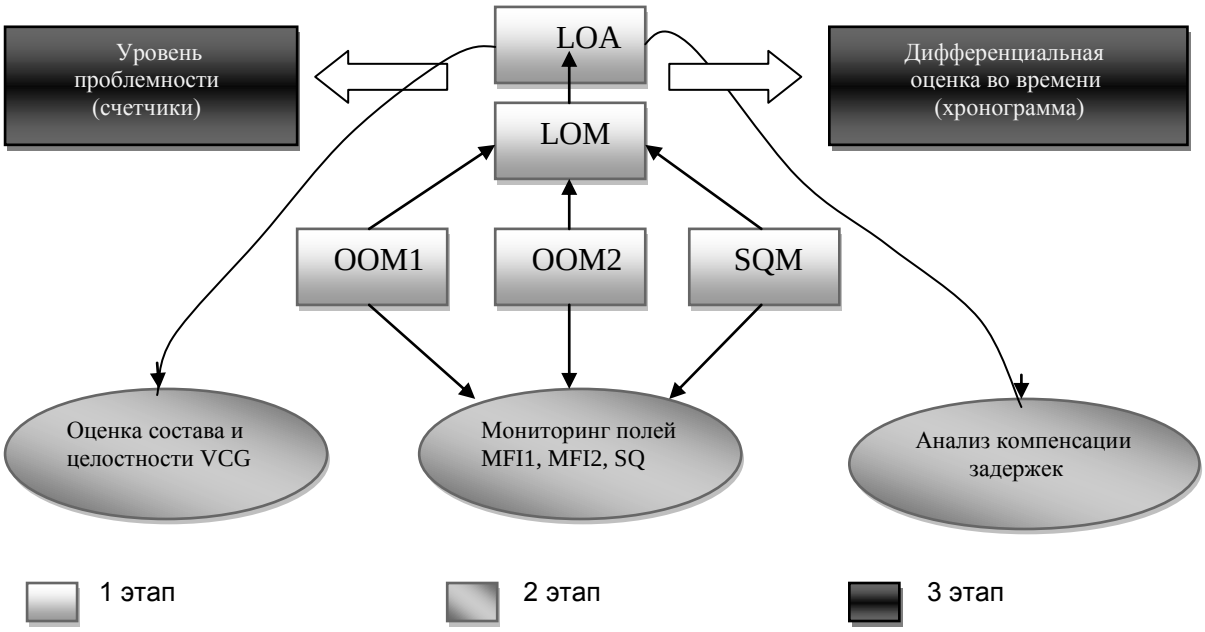


Рис. 8.9. Алгоритм контроля VCAT.

Для обобщения перечисленного можно предложить следующий алгоритм контроля VCAT (рис. 7.9):

- Обнаружение неисправности (этап 1)
- Уточнение неисправности (этап 2)
- Глубокий анализ неисправности (этап 3)

При обнаружении неисправности следует учитывать иерархическую структуру возникающих сигналов. Наиболее существенная неисправность – LOA, которая приводит к потере всей сцепки. Она может быть вызвана сбоем в цикловой структуре, тогда должен появиться сигнал LOM. Последний может быть следствием нарушений в различных полях VCAT, тогда LOM будет сопровождаться сигналами OOM1, OOM2 или SQM.

С каждым сигналом о неисправности должны быть связаны интегральная и дифференциальная оценки. В качестве интегральной оценки используются счетчики количества секунд с заданным типом неисправности. В качестве дифференциальной оценки используется хронограмма сигнала, которая показывает динамику появления сигнала о неисправности во времени. Соответственно счетчики отображают уровень проблемности неисправности, а хронограмма подсказывает возможные причины и природу неисправности. При обнаружении на первом этапе какого-либо сигнала о неисправности, на втором этапе целесообразно уточнить характер неисправности, используя для этого счетчики и хронограмму. На третьем этапе используется рассмотренный ранее инструментарий для уточнения неисправности, после чего персонал может приступить к ее устранению.

Рассмотренная приоритетность имеет настолько очевидный прикладной характер для работы служб эксплуатации, что в настоящее время для контроля NGSDH используются приборы, дизайн которых идет по пути постепенного наращивания функций 1 и 2 этапа для того, чтобы обеспечить максимально оперативную диагностику. Например, в новой версии ПО анализатора Victoria COMBO используются уже двухканальные счетчики, которые позволяют не только контролировать общее количество неисправностей в начале и в конце виртуального коридора, но и оценивать задержку распространения по всей совокупности VC в составе VCG. В такой функциональности для выполнения контроля VCAT оператору достаточно индикатора сигналов о неисправности и многоканального счетчика.

8.2.3. Контроль LCAS

Контроль процедуры LCAS сложнее, чем контроль VCAT. Разница здесь определяется наличием в LCAS динамики. VCAT – это состояние системы, LCAS – это динамика изменения VCAT. Следовательно, в LCAS можно сразу предположить качественно новый уровень сложности, что не может не отразиться на принципах диагностики.

LCAS представляет собой протокол сигнализации, который добавляет (ADD) и удаляет (REMOVE) виртуальные контейнеры из определенной VCG. Между источником (Source) и приемником (Sink) LCAS обеспечивает контроль состояния VCAT и тем самым выполняет контроль полосы виртуального коридора. Для выполнения этой задачи сообщения LCAS вставляются в каждый VC группы VCG, используя для этого информационные поля H4 и K4. Можно трактовать LCAS как

определенный протокол канального уровня, предусматривающий наиболее простую схему сигнального обмена – «точка – точка». Для сигнального обмена используется 6 информационных полей MFI2, SQ, MST, RS-Ack, CTRL и GID, рассмотренных подробно ранее.

Таким образом, LCAS выполняет две функции управления VCAT, связанных с изменением состояния VCG:

1. Плановое расширение и сужение виртуального коридора в процессе развития сети
2. Нештатное изменение размера виртуального коридора в связи с возникновение неисправности в системе передачи

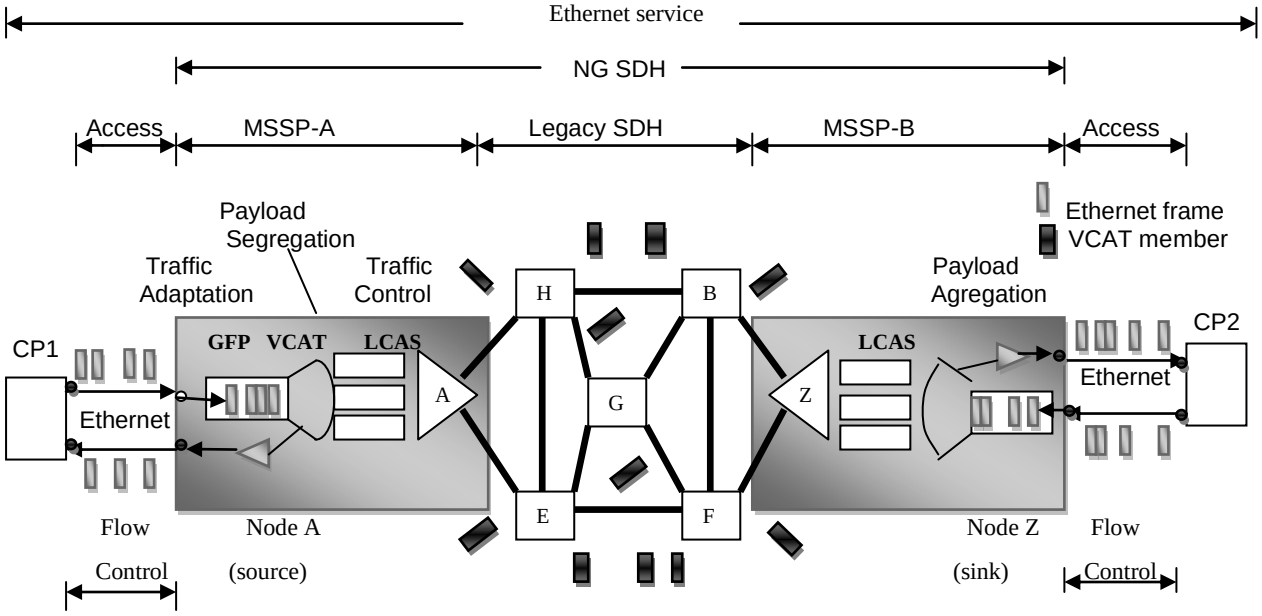


Рис. 8.10. Виртуальный коридор в системе GFP/VCAT/LCAS.

Рассмотрим систему передачи NGSDH, содержащую виртуальный коридор переменного размера (рис. 8.10). С обеих сторон к виртуальному коридору подключаются устройства CP1 и CP2, работающие через интерфейсы Ethernet и в общем случае генерирующие пакеты асимметричного и неравномерного пакетного трафика. Пакеты от CP1 попадают на узел Node A, где проходят череду последовательных преобразований. Сначала трафик нормализуется с использованием процедуры GFP. Потом с помощью механизма VCAT принятые кадры GFP распределяются по различным маршрутам SDH. При этом ширина виртуального коридора регулируется LCAS. Разделенный на отдельные VC трафик передается по классической SDH и собирается в единый поток данных на узле Node Z. Данные проходят обратные преобразования и восстанавливаются в виде пакетного трафика Ethernet.

Важно отметить, что по каждому из виртуальных коридоров, показанных на рис. 8.10, LCAS узла а договаривается с LCAS узла Z, так что изменение размеров виртуального коридора осуществляется не во всей сети NGSDH, а

только посредством управления двумя оконечными узлами. В этом состоит важное преимущество NGSDH перед другими технологиями транспортных сетей NGN. В других технологиях MPLS, ATM и пр. изменение размера виртуального коридора должно сопровождаться серией команд по всем транзитным узлам. Т. е. здесь имеет место существенно более простая схема управления транспортным потоком.

Сигнальный обмен между модулями LCAS имеет свои особенности. Например, если LCAS A посылает команду ADD, то LCAS Z имеет в арсенале два сообщения в ответ: MST и RS-ACK. Сообщение MST может нести информацию о готовности (OK) или неготовности (FAIL), и этого оказывается достаточно для того, чтобы диагностировать целостность виртуального коридора и управлять его размером.

Помимо решения задачи диагностики и управления виртуальным коридором LCAS выполняет еще одну важную функцию, а именно обеспечение целостности и стабильности виртуального коридора. Целостность виртуального коридора обеспечивается самими принципами сигнального обмена (рис. 7.11). Точка приемника (sink) устанавливается для каждого члена VCG отдельно. В результате сообщения от приемника дублируются столько раз, сколько членов имеется в группе VCG. Таким образом, обмен сигналами оказывается симметричным. На команду от источника поступает несколько ответов приемника, и это уже повышает надежность работы коридора. Дублирование сообщений нужно еще и для того, чтобы предотвратить любые нарушения в сигнальном обмене при сбоях на отдельных маршрутах. Если один или несколько маршрутов VCG будут повреждены, сигнальный обмен LCAS не нарушается, и виртуальный коридор по-прежнему находится под контролем и управлением оконечных мультиплексоров МВВ. За счет использования такой резервированной системы сигнализации, источник всегда имеет полную информацию о состоянии VCG. Как было показано выше, для передачи информации LCAS используется сверхцикл в информационном поле H4 размером 8 бит. Для передачи информации о состоянии 64 членов необходимо 8 сверхциклов или 128 мс, именно с таким периодом обновляется информация о состоянии VCG.

Теперь рассмотрим, каким образом сигнализация LCAS обеспечивает функции сохранения целостности виртуального коридора. Для этого вернемся к рис. 7.10 и представим ситуацию, когда возникает нарушение в маршруте по линии A-H-B-Z (рис. 7.12). В этом случае в виртуальном коридоре 1 возникнет сбой. Источник реагирует на него информационным сообщением MST = fail (1). Сразу же после этого процедура VCAT удаляет поврежденный маршрут из соответствующей VCG и более его не использует. Но одновременно с этим сам виртуальный коридор остается целым, имеет место только незначительный перерыв (порядка 128 мс) для подключения нового маршрута, а данные пользователя перенаправляются в течение перерыва по тем маршрутам коридора, которые остались рабочими. При этом возникает некоторая задержка с

передачей данных, поскольку в течение 128 мс размер виртуального коридора будет несколько меньше, чем раньше, но затем размер коридора восстановится и задержка компенсируется со временем. Берстная структура трафика Ethernet позволяет утверждать, что любая избыточная задержка может быть компенсирована при условии правильного расчета пропускной способности коридора.

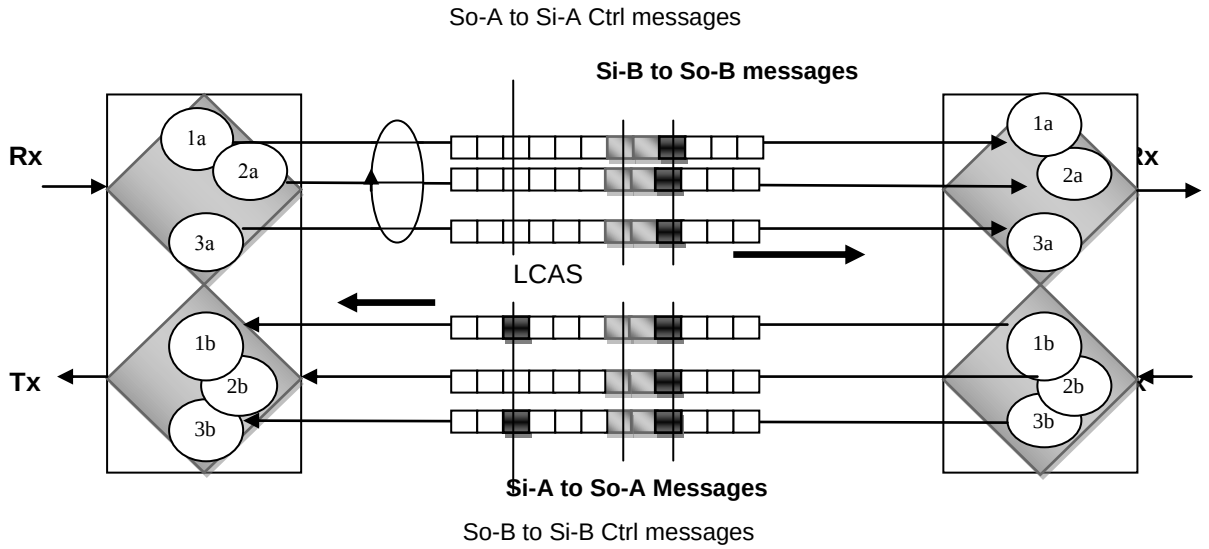


Рис. 8.11. Асимметричная и резервированная структура сигнального обмена в LCAS обеспечивает высокую надежность виртуального коридора.

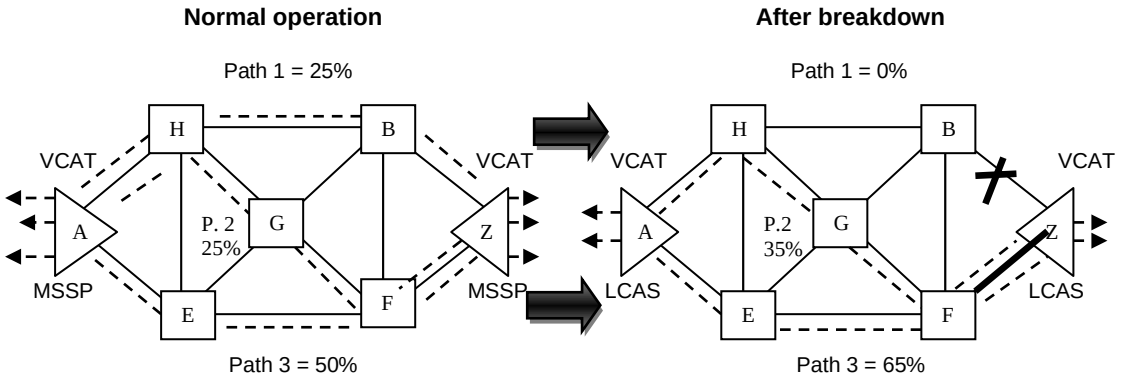


Рис. 8.12. Сохранение связности виртуального коридора при возникновении сбоя в одном из маршрутов.

Таким образом, LCAS обеспечивает не только гибкую систему управления размерами виртуальных коридоров, но и сохранение их целостности при возникновении сбоев. В результате можно утверждать, что за счет LCAS стратегические преимущества SDH как самой надежной технологии транспортных сетей могут быть перенесены на специфику универсальных транспортных сетей и транспорта для пакетного трафика.

Рассмотрим теперь принципы контроля и измерения работы системы сигнализации. В первую очередь отметим, что с точки зрения методики

измерений, т. е. схемы подключения приборов и настроек анализ LCAS полностью повторяет принципы измерений VCAT. Таким образом, если рассматривать тестирование LCAS как анализ сигнализации, то это будет измерение с имитацией сигнальных сообщений. Из этого следует, что измерение LCAS в большей степени возможны на этапе пуско-наладки системы, когда необходимо проверить правильность работы системы сигнализации, а методы мониторинга для диагностики LCAS едва ли могут быть полезны.

Схему измерений можно условно представить на рис. 8.13. Для диагностики LCAS прибор подключается вместо мультиплексора-источника. Оператор загружает определенный сценарий имитации сигнального обмена, который может быть ориентирован на имитацию различных типовых случаев использования LCAS (например, добавление члена к VCG, удаление члена из VCG, имитация неисправности и пр.). В соответствии с установленным сценарием прибор обеспечивает сигнальный обмен и принимает сигнальные сообщения от удаленного мультиплексора VCAT/LCAS. Результаты сигнального обмена записываются в виде отчета. Например, в качестве сценария на рис. 7.13 представлена схема, когда прибор вначале последовательно подключает к VCG 4 члена, а затем их удаляет из VCG.

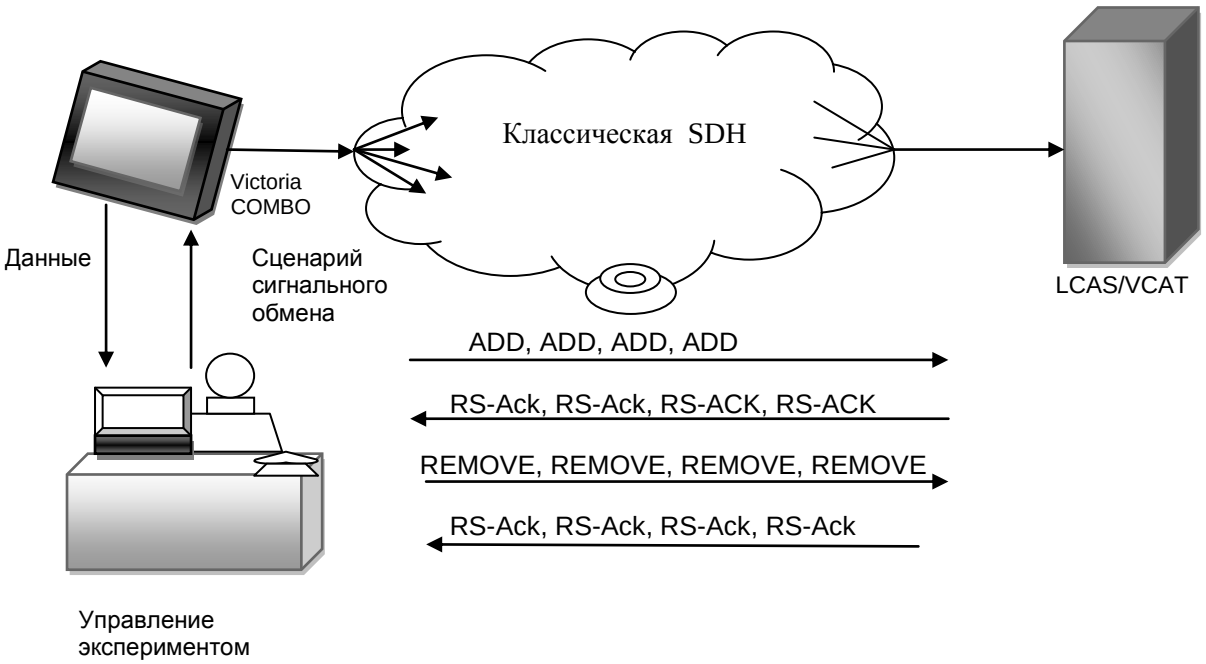


Рис. 7.13. Имитация сигнального обмена LCAS.

В качестве измерительного прибора на схеме использован анализатор Victoria COMBO. С помощью анализатора можно, например сформировать ассиметричный виртуальный коридор из VCG, содержащей 19 членов, как со стороны передатчика, так и со стороны приемника, но с разными скоростями передачи. Самое важное поле установок тестирования LCAS относится к

командам обмена в процессе измерений. Здесь можно выбрать отдельный номер члена VCG и сделать операцию ADD или REMOVE. Но для того, чтобы сигнальный обмен был максимально близок к установкам в системе передачи, нужно задать определенные параметры самого протокола LCAS (порядок обмена, настройки таймеров и пр.). Для более точного соответствия сценария тестирования параметрам LCAS, реализованным в анализаторе Victoria COMBO, используется дополнительное меню настроек протокола. Назначение разных полей в этом меню представлено в табл. 8.2. Как следует из таблицы, основными параметрами протокола являются настройки таймеров различных сигналов LCAS. Корректируя параметры таймеров, оператор может подстроить протокол под заранее известные параметры реализации LCAS в оборудовании. Задача может быть также повернута обратно: изменяя установки таймеров, оператор может уточнить требования к параметрам LCAS, оптимальные для работы схемы связи и, на основании полученных данных, провести оптимизацию и настройку LCAS в оборудовании, соответственно перестраивая таймеры МВВ. Таким образом могут решаться различные вопросы по настройке оборудования, а также вопросы о взаимодействии разнородного оборудования при сигнальном обмене LCAS.

Таблица 8.2. Назначение различных полей установки параметров протокола LCAS.

Конфигурация параметров источника	UMTS Detection time-out	Время обнаружения неустановленного члена VCG
	UMTS Clear time-out	Время удаления неустановленного члена VCG
	RS-Ack time-out	Время задержки посылки квитанции от приемника к передатчику о выполнении всех изменений в коридоре
	Partial Loss of Capacity Receive (PLCR)	Минимальное количество членов VCG, при котором будет генерироваться сигнал о неисправности на стороне передачи
Конфигурация параметров приемника	Wait-to-restore time (WST)	Временной интервал между восстановлением обмена данных по коридору при сбое в секции маршрута и полным восстановлением коридора по новому маршруту
	Hold-off timer	Время между получением сигнала о нарушении обмена и включением системы резервирования коридора
	Partial Loss of Capacity Transmit (PLCT)	Минимальное количество членов VCG, при котором будет генерироваться сигнал о неисправности на стороне приема

Если протокол настроен успешно и правильно установлен сценарий организации измерений, можно начинать тестирование LCAS. В процессе измерения целесообразно контролировать его ход и состояние различных членов VCG. В таком случае сам процесс обмена будет более иллюстративен, а при

возникновении неисправностей в LCAS, не необходимости ждать конца измерений. Мониторинг состояния VCG сам по себе представляет удобный тестовый инструмент. Но кроме него широко используется наглядный метод диагностики сигнального обмена – метод контроля сигналов о неисправности. Любые нарушения в сигнальном обмене LCAS приводят к нарушениям в VCG. Как следствие, должны генерироваться определенные типовые сигналы о неисправностях.

С сигнальным обменом LCAS связано два метода контроля сигналов о неисправностях. В самом простом случае неисправности при обмене LCAS будут отражаться в сигналах VCAT, которые рассмотрены нами ранее. Соответственно, все методы указанные выше для контроля сигналов о неисправностях в VCAT в равной степени применимы и для LCAS.

Второй метод предусматривает формирование специальных сигналов о неисправностях сигнального обмена LCAS. Поскольку специализированные сигналы о неисправности должны отражать проблемы обмена сообщениями, обычно соответствующие сигналы отображаются в двух режимах: текущее состояние неисправности (Current) и факт наличия неисправности за время измерений (History). В этом случае оператор имеет возможность не просто идентифицировать текущее состояние сигнального канала, но и оценить историю сигнального обмена.

Для удобства анализа сигналов о неисправности в LCAS все сигналы разделены на две группы: неисправности со стороны источника (source) и неисправности со стороны приемника (sink). Кроме того, поскольку LCAS ориентирован на передачу/прием сообщений в полях отдельных членов VCG, то сигналы о неисправностях отображаются для отдельных членов VCG.

В заключение рассмотрения методов контроля LCAS, отметим, что также как и для VCAT методики контроля LCAS далеки пока от совершенства. Это объясняется тем, что технология NGSDH появилась всего несколько лет назад и принципы эксплуатационного контроля этой технологии, в том числе и LCAS/VCAT, находятся в стадии развития. Определим, какие недостатки имеют современные методики контроля LCAS.

Первое – это то, что, как и для VCAT, методика контроля процедуры LCAS не имеет пока эксплуатационной составляющей. Для проведения измерений МВВ нужно отключать от сети, и это является очень важным ограничением. В результате измерения LCAS можно проводить только на этапе развертывания сети, но никак на этапе ее эксплуатации в штатном режиме.

Второй недостаток носит более прикладной характер. Несмотря на то, что LCAS является протоколом сигнализации, ни в одном из современных приборов не используются пока методики анализа протоколов, которые разработаны для других протоколов сигнализации. Методики, которые мы рассмотрели, позволяют контролировать состояние виртуального коридора и его изменение.

Сама же процедура LCAS – это система сигнализации, которая такими изменениями управляет. И именно поэтому применение методов анализа протоколов сигнализации в данном случае было бы вполне оправдано. Тем более, что LCAS как система сигнализации представляет собой вовсе не тривиальный протокол. Несмотря на то, что в LCAS имеется не так много сигнальных сообщений, нужно учитывать, что эти сообщения передаются для каждого члена VCG и для каждого виртуального коридора отдельно. Так что общий объем передаваемых данных будет довольно существенным.

Третий недостаток рассмотренных методик состоит в слабой проработке методов использования и отображения сигналов о неисправностях. Методы, которые были разработаны для анализа состояния SDH, используют для этого прогрессивный способ гистограмм-хронограммного анализа (ГХА).

Применение хронограммы сигналов о неисправности позволяет ввести в рассмотрение фактор времени, что позволило бы существенно увеличить эффективность рассмотренных методик. Например, это позволило бы сразу получит относительно удобное представление о сигнальном обмене LCAS. Но ничего подобного в современных анализаторах NGSDH всех производителей пока нет.

8.2.4. Контроль GFP.

В архитектурной модели NGSDH уровень GFP выполняет роль преобразования форматов пакетных сетей в формат, удобный для загрузки в сеть SDH. При этом для самого протокола GFP все равно, будет ниже его классическая SDH, конкатенированные или виртуально-конкатенированные потоки. С другой стороны, протокол GFP является универсальным в том смысле, что он позволяет преобразовывать любые форматы пакетного трафика, которые модно встретить в современной сети. Для протокола GFP существуют правила загрузки данных PPP, Fiber Channel, Ethernet и пр. В каждом случае правила преобразования форматов свои, но сама полученная структура кадров GFP оказывается типовой и имеет единые принципы построения.

В этом разделе мы рассмотрим вопросы контроля и измерений уровня GFP. Для этого нужно ответить на два основных методических вопроса:

- В какой точке целесообразно проводить измерения GFP?
- Какие задачи может выполнять эксплуатационное тестирование и контроль NGSDH на уровне GFP?

Первый вопрос оказывается легче второго, поэтому начнем по порядку. Для того, чтобы понять возможные точки подключения анализаторов для проведения эксплуатационных измерений, вернемся к рис. 7.10, где показан процесс последовательного преобразования данных Ethernet в виртуальном коридоре VCAT/LCAS. Согласно этому рисунку, оптимальной точкой включения прибора модно было бы считать точку после окончания процедуры GFP и перед началом разделения данных на различные виртуальные коридоры. Но это практически

исключено, поскольку GFP реализуется внутри мультиплексора, где нет точек для подключения прибора. Более того, в этой точке поток данных неструктурирован, не соответствует цикловой структуре SDH и совершенно не пригоден для мониторинга анализатором NGSDH. Следовательно, остается только параллельное подключение к каналам SDH, по которым передаются транспортные модули одного виртуального коридора. Если в системе реализуется только GFP, но нет VCAT, задача упрощается, поскольку она сводится к эксплуатационному мониторингу конкатенированного потока типа VC-4-Xc. Точка включения в таком случае одна, и через нее можно наблюдать за все потоком кадров GFP. Если же реализуется процедура VCAT, то анализатор должен одновременно стоять на нескольких потоках, обеспечивая мониторинг и сращивание данных по потоку GFP. В результате мы приходим к идее многоканальных измерений NGSDH.

Альтернативным методом можно считать метод отключения MBB и подключения вместо него анализатора, но этот метод не будет эксплуатационным методом диагностики GFP. Его можно применять только на этапе пуско-наладочных работ или в лабораториях. В этом смысле этот метод имеет те же недостатки, что и рассмотренный выше метод для VCAT/LCAS.

Определи теперь, какие задачи может выполнять эксплуатация при измерениях на уровне GFP. Здесь можно выделить следующие задачи:

- Общий анализ GFP как уровня NGSDH. Если имеет место процедура GFP с заданными установками и форматами полей, то целесообразно ее контролировать уже потому, что сама технология уже молода, и могут быть как системные, так и оперативные ошибки.
- В процессе эксплуатации GFP желательно контролировать сигналы о неисправности и ошибки на уровне GFP. Такие сигналы и ошибки скажутся на качестве передачи пакетного трафика и помогут в поиске проблемных точек и причин нарушения связи в целом.

Данные задачи, во-первых, также относятся к классу дополнительных измерений, которые не связаны с общей проблемой контроля качества виртуальных коридоров. Во-вторых, обе эти задачи требуют проведения пассивных измерений, и, поэтому, анализатор, который в полной мере не сможет имитировать своими параметрами параметры мультиплексора в смысле процедуры GFP, должен стоять в режиме пассивного мониторинга. Пусть даже для этого потребуется выполнить многоканальное подключение.

Контроль работы процедуры GFP.

Процедура GFP представляет собой довольно сложный процесс, и, поэтому, важно указать, каким образом можно его контролировать. Здесь нужно выделить несколько пунктов:

- Визуальный контроль структуры кадров GFP и установление структуры кадров стандарту

- Контроль наиболее важных для эксплуатации полей GFP, а именно: PLI, PTI, PFI, EXI и UPI
- Контроль переменных значений полей для определения соответствия параметров GFP-кадров установкам на оборудовании

В современных анализаторах реализуются два возможных метода контроля GFP (рис. 8.14), причем самый простой подход заключается в пассивном мониторинге GFP и сборе данных о структуре наиболее важных полей (справа). В результате набирается большое количество рутинной работы. Более удобным для проведения долговременных измерений оказывается метод, представленный на рисунке слева. Здесь оператор устанавливает определенные значения полей, которые соответствуют ожидаемым установкам оборудования, Перечень полей можно трактовать как сценарий поведения процесса GFP. При любом отклонении в параметрах от заданных значений анализатор формирует сигнал о неисправности.

Рис. 8.14. Два метода контроля GFP.

Таким образом, хотя схема подключения анализатора остается пассивной, нас будут интересовать методы установок передачи, которые как раз будут соответствовать сценарию измерений.

Рассмотрим, как можно контролировать процедуру GFP с помощью анализатора Victoria COMBO. Пусть в качестве примера произведена установка параметров GFP передатчика в качестве сценария теста. На экране будет легко узнать структуру GFP кадра и состав установок. В установках, например, выбран

тип структуры GFP-F, а качестве полезной нагрузки – данные Ethernet. Можно увидеть установки основных полей PLI, PTI, PFI и UPI.

В режиме простого пассивного мониторинга анализатор устанавливается в режим автонастройки параметров GFP. В этом случае в меню указываются только базовые поля в структуре GFP. Единственное, что может знать об обмене данными оператор – это тип полезной нагрузки. В данном случае это пакеты Ethernet.

В процессе автоматического определения параметров GFP-пакетов в принимаемом трафике определяется конфигурация GFP и состав основных полей. Например, в результате измерений обнаружено, что GFP содержит клиентские данные, поле EXI имеет нулевое расширение, тип протокола GFP-F. Загрузка кадров Ethernet. Других вариантов в измеряемом канале нет. В режиме быстрой автонастройки, анализатор определяет только структуру протокола и тип трафика. При более долговременной процедуре анализатор определяет также значения полей CID, PFI, PTI и UPI для разных виртуальных коридоров, присутствующих в измеряемом тракте. В результате оператор получает меню доступных на данном физическом подключении установок. Это можно использовать, например, в случае, когда анализатор не может быть подключен к нескольким каналам VCAT одновременно. В этом случае, контролируя только часть кадров GFP, оператор имеет возможность составить перечень проходящих через точку подключения виртуальных коридоров и соответствующих им установок GFP для каждого из них.

Контроль поля EXI наиболее сложен, поскольку здесь имеет место своя канальная структура. Для контроля поля EXI используется отдельное экранное меню, которое в равной степени активно в режиме установки сценария и в режиме мониторинга параметров.

В процессе контроля процедуры GFP оператор получает не только информацию качественного характера (о структуре кадров, полях, их установках и пр.), но и количественные данные об уровне трафика GFP, проходящего через физическую точку подключения прибора. Специальные функции статистического анализа указывают на уровень трафика GFP в количестве пакетов или байтов, а также рассчитывают эффективную скорость передачи данных Ethernet в виртуальном коридоре.

Контроль параметров ошибок и неисправностей в GFP

Помимо общего анализа корректности работы процедуры GFP анализатор выполняет обширные функции по контролю сигналов о неисправностях. Как мы знаем из вышеизложенного, всего в системе GFP присутствует:

- 4 поля контроля параметров ошибок: FCS, cHEC, tHEC и eHEC.
- Два новых сигнала о неисправностях уровня GFP: LCS и LCSyn, которые присутствуют в клиентских кадрах

В зависимости от категории различаются ошибки, которые можно корректировать процедурой HEC, и те, которые невозможно корректировать. В результате в меню появляется 10 сигналов о неисправности (см. табл. 8.3). Как следует из таблицы, к сигналам о неисправности относятся не только сигналы собственного уровня GFP, но также и сигналы, связанные с идентификацией появления ошибок на уровне GFP. В то же время функция контроля ошибок должна выполнять количественные оценки по всем 7 категориям ошибок. Важно отметить, что все ошибки отображаются в трех значениях: общее количество ошибок, относительный уровень ошибок и количество секунд с соответствующими ошибками. Это помогает использовать полученные данные для учета влияния уровня GFP на общие показатели качества передачи данных внутри виртуального коридора.

Таблица 8.3. Сигналы о неисправности в протоколе GFP.

Аббревиатура	**Сигнал**	**Описание**
LFD	Loss of Frame Delineation	Потеря режима выравнивания кадров
LOCS (LCS)	Loss of Client Signal	Потеря сигнала от клиента
LOCCS (LCSync)	Loss of Character Synchronization	Потеря синхронизации символов
cH-U	Uncorrectable cHEC error	Некорректируемая ошибка cHEC
cH-C	Correctable cHEC error	Корректируемая ошибка cHEC
tH-U	Uncorrectable tHEC error	Некорректируемая ошибка tHEC
tH-C	Correctable tHEC error	Некорректируемая ошибка tHEC
eH-U	Uncorrectable eHEC error	Некорректируемая ошибка eHEC
eH-C	Correctable eHEC error	Некорректируемая ошибка eHEC
pFCS	Payload FCS error	Ошибка контрольной суммы пользователя

Может показаться, что рассмотренные методики контроля уровня GFP еще менее проработаны, чем соответствующие методики для VCAT/LCAS, но это не так. Просто в отличие от VCAT/LCAS диагностика процедуры GFP в своем основании имеет довольно простой принцип «подсматривать и делать выводы». Здесь нет глубоких размышлений о составе виртуального коридора и динамике его изменения. Есть только специфика контроля определенных полей. Но, интерпретируя полученные данные, оператор должен в совершенстве владеть принципами использования GFP. Так что в данном случае имеет место паритет между простыми принципами сбора информации и сложностью ее обработки.
Теперь перейдем ко второй задаче диагностики систем NGSDH на уровне GFP – контролю качества через систему NGSDH. Для этого рассмотрим методы контроля параметров Ethernet через систему NGSDH.

8.2.5. Контроль параметров Ethernet внутри сети NGSDH.

Наличие в современных измерительных приборах функций декодирования полей GFP дает возможность осуществить анализ параметров кадров Ethernet и других протоколов, инкапсулированных в GFP. Для эксплуатации функция анализа кадров Ethernet может иметь несколько смыслов:

- Анализ параметров кадров Ethernet и основных полей этих кадров (адресация, приоритетность и пр.) позволяет проверить корректность процедуры инкапсуляции. Также как и рассмотренная выше методика проверки процедуры GFP, этот класс измерений относится к контролю на уровне качественных параметров и выполняется схожими методами.
- Помимо качественного анализа параметров Ethernet и IP прибор обеспечивает контроль сигналов о неисправности верхних уровней: Ethernet, IP, MPLS и пр. Это позволяет сформировать многоуровневую трассировку состояния канала NGSDH.
- Анализ параметров Ethernet дополнительно позволяет использовать механизм статистической обработки данных, и таким образом можно выполнить весь спектр измерений параметров качества пакетного трафика, передаваемого в виртуальном коридоре NGSDH.

Проиллюстрируем теперь решение этих перечисленных задач с помощью анализатора Victoria COMBO.

Контроль процедуры инкапсуляции пакетов в GFP.

Контроль корректности работы процедуры инкапсуляции выполняется методом диагностики качественных параметров. Анализатор NGSDH в этом случае позволяет контролировать все информационные поля любых протоколов, инкапсулированных в GFP. Для удобства контроля внутри анализатора содержится информация о структуре всех современных протоколов сетей передачи данных. Контроль параметров полей осуществляется по тем же принципам, что и в случае GFP, т. е. сценарий тестирования и настройки прибора производятся в режиме пассивного мониторинга.

В качестве первого примера рассмотрим экранное меню по установке сценария генерации/анализа трафика Ethernet, инкапсулированного в GFP. Справа на экране представлены основные поля Ethernet, включая поле кадра MAC-адресации и поле выбранной структуры LLC. Остальная часть экрана занята различными установками параметров Ethernet: параметрами трафика PIR, CIR, MBS, параметрами адресации, настройками VLAN и пр.

В качестве нагрузки внутри кадров Ethernet можно сделать дополнительные настройки параметров IP, MPLS или задать параметры тестовой нагрузкипользователя. Таким образом, вначале мы делаем на анализаторе настройки SDH, чтобы состыковаться с системой передачи. Затем выполняем настройки и контроль GFP. Внутри GFP оказываются кадры Ethernet, и мы должны их контролировать. Но внутри Ethernet могут быть IP или MPLS, и может оказаться важным контролировать и эти поля. Такая схема соответствует самому построению технологии современных сетей NGN. Меню настройки параметров

кадров Ethernet по внешнему виду напоминает соответствующее меню GFP и Ethernet, поскольку сами принципы настройки имеют туже логику: отображение структуры дейтаграммы и соответствующие установки ее полей. В качестве параметров IP могут, например, установлены параметры адресации уровня 3, маска сети, адрес шлюза, схема приоритетности, а также параметры передачи дейтаграмм.

В процессе анализа инкапсулированных протоколов требуется использование режима фильтрации. Дело в том, что в современной системе передачи может присутствовать несколько тысяч и даже миллионов потоков дейтаграмм. В то же время задача анализа определенных дейтаграмм обычно не возникает сама собой, а связана с диагностикой нарушений в работе тех или иных приложений на сети. В этом случае нас интересуют параметры конкретных дейтаграмм, связанных с этим приложением. Тогда удобным методом контроля будет являться использование функций фильтрации для разных уровней инкапсулированных протоколов. Задавая параметры интересующих нас дейтаграмм, можно в процессе измерений отбросить все лишнее и сконцентрироваться на определенной текущей проблеме.

Контроль ошибок верхних уровней.

Второй группой задач, связанных с мониторингом и анализом параметров кадров Ethernet внутри системы NGSDH, является контроль ошибок верхних по отношению к NGSDH уровней. Ошибки Ethernet представляются в виде общего количества, относительного количества, а также в виде ES.

Данная функция в действительности может иметь широкое эксплуатационное применение. Достаточно вспомнить, что от интерфейса до интерфейса все пакетные данные в виртуальном коридоре передаются внутри сети NGSDH. Единственным методом контроля потока по пути следования является мониторинг его параметров через точки подключения к NGSDH. Следовательно, задача поиска неисправностей, разграничения ответственности за параметры качества, мониторинг неисправностей и пр. – все эти эксплуатационные задачи могут быть решены только через контроль параметров пакетного трафика внутри NGSDH.

Можно сформулировать и более тонкую задачу – контроль влияния ошибок в системе NGSDH на параметры пакетного трафика. В этом случае возникает потребность сравнить соответствующие хронограммы сигналов о неисправности Ethernet с сигналами NGSDH.

Третий класс задач, который может потребовать знать рассматриваемую функцию в процессе эксплуатации – это мониторинг SLA по пакетному трафику. SLA будет формироваться, исходя из параметров качества пакетного трафика, поскольку именно этот трафик предоставляет оператор пользователю. Но мониторинг SLA не обязательно будет реализован через интерфейс Ethernet на выходе виртуального коридора. Подключившись к системе NGSDH, оператор получает доступ ко всем виртуальным коридорам параллельно, тогда как на интерфейсах МВВ это могут быть отдельные точки подключения. Таким образом, реализация функции контроля ошибок и параметров трафика Ethernet может стать первым шагом к формированию многоканальных систем контроля соответствия SLA.

Контроль параметров качества по RFC-2544.

Самый важный вопрос для обеспечения контроля и паспортизации каналов в соответствии с методикой рис. 8.8 состоит в том, можно ли обеспечить функции измерения по RFC-2544, подключившись к системе передачи в точках NGSDH. Рассмотрим, какими функциями обладают анализаторы NGSDH для выполнения таких измерений.

Как следует из схемы рис. 8.8, проведение измерений параметров качества по RFC-2544 выполняется анализатором в пассивном режиме. При этом считается, что тестовый трафик, несущий полезную информацию о задержке и количестве потерянных пакетов, загружен в NGSDH, так что остается его только проанализировать.

Первым шагом такого анализа может стать статистический анализ по параметрам длин пакетов с целью определить профиль трафика. В пакетной сети результаты любых измерений, в том числе и по методике RFC-2544, всегда сопоставляются с соответствующим профилем трафика, для которого формируются нормы. Поэтому анализ профиля пакетного трафика представляет собой первый шаг к проведению измерений по RFC-2544. Затем в соответствии с указанным профилем трафика можно провести измерения по методике RFC-2544. Для этого выполняют установку параметров трафика в соответствии с параметрами ожидаемого тестового трафика в виртуальном коридоре. В установках для измерений указываются параметры размеров пакетов, на которых выполняются измерения, а также категории измерений (Th, Lat, FL) и их продолжительность. Здесь можно выбрать уровень детализации измерений – по нескольким или по всем точкам длительности пакета L. В процессе измерений получаются, как и ранее, зависимости параметров RFC-2544 от количества точек L.

В завершение отметим, что сама проблематика мониторинга параметров Ethernet и других вариантов пакетного трафика через транспортную сеть NGSDH вытекает из стратегической идеи конвергенции. Взаимопроникновение технологий требует, чтобы одни и те же параметры (например, параметры качества по RFC-2544) могли быть доступны в любом сегменте конвергентной сети. Поэтому приложение идеи конвергенции к проблематике эксплуатационного контроля параметров сетей приводит к тому, что различные уровни модели NGSDH должны взаимодействовать между собой в смысле использования одних и тех же типовых методик.

9. Дальнейшее направление развития. Системы SDH третьего поколения.

Рассматривая современное и перспективное состояние развития технологии SDH, можно сделать следующие выводы. Для систем первого поколения ясны и разработаны теоретические и практические вопросы эксплуатации. Для систем SDH второго поколения понятны стандарты построения сетей, но практические вопросы эксплуатации проработаны не до конца. Переходя к системам SDH третьего поколения, мы с зыбкой почвы незаконченного знания попадаем в зону, где даже теоретические основы построения систем передачи далеко не ясны. Для сетей уровня MAN третье поколение систем SDH означает переход от технологии MSSP к двуединой концепции MSTP/MSSP, а в части магистральных транспортных сетей – к технологии OBS. Но сами эти концепции в настоящее время не проработаны даже на уровне ориентировочных стандартов. Оборудование, которое можно было бы рассматривать как воплощение новых

концепций, только появляется на мировом рынке. Тем более вопросы эксплуатации и практики использования этого оборудования серьезно никто не рассматривал. Тем не менее, полезно, хотя бы в общих чертах, посмотреть на современные тенденции в развитии оборудования, новые концепции и современные научные исследования, чтобы угадать в них будущее развитие систем SDH.

9.1. От концепции MSSP к концепции MSSP/MSTP.

Концепция MSxP в широком смысле использует одну идею, представленную на рис. 9.1. Она состоит в том, чтобы использовать уже существующую сеть SDH и адаптировать ее к новым задачам переноса различного трафика. При этом экономическая эффективность будет высокой, если внедрение новых принципов не будет затрагивать все устройства SDH, а только оконечные мультиплексоры, которые образуют виртуальный коридор. Эта концепция появилась при разработке стандартов NGSDH, что и привело к созданию концепции MSSP. Можно предположить, что и последующие шаги по пути развития концепции MSxP, т.е. разработка MSTP/MSSP пойдет по тому же пути.

Оценивая идею рис. 9.1, можно сразу понять, что любое воплощение концепции MSxP должно приводить к модернизации оборудования мультиплексора ввода/вывода. Если философия MSxP предусматривает использование без существенных модификаций сеть классической SDH для переноса трафика NGN, то единственное место реализации новых концепций – это оконечные мультиплексоры. Тогда можно сделать важный вывод: развитие стандартов SDH в рамках концепции MSxP – это развитие мультиплексорного оборудования. Но если это верно, то, наблюдая за современными тенденциями в развитии мультиплексорного оборудования, мы увидим тенденции в развитии технологии SDH.

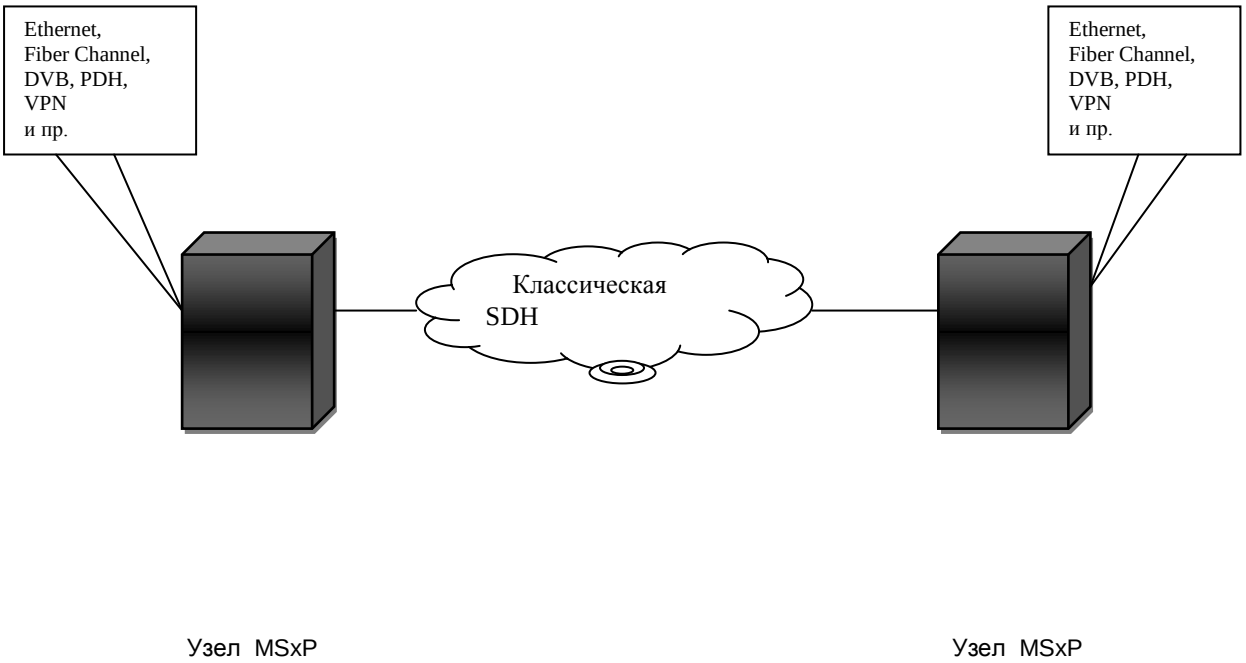


Рис.9.1. Развитие философии NGSDH – концепция MSxP.

Если рассматривать оборудование для современных систем SDH, то уже сейчас можно выделить эволюционный ряд из нескольких конфигураций мультиплексоров. На рис 8.2 представлено несколько типовых конфигураций МВВ, соответствующих обычному МВВ SDH, мультиплексору MSPP, мультиплексору MSTP и мультиплексору MSSP.

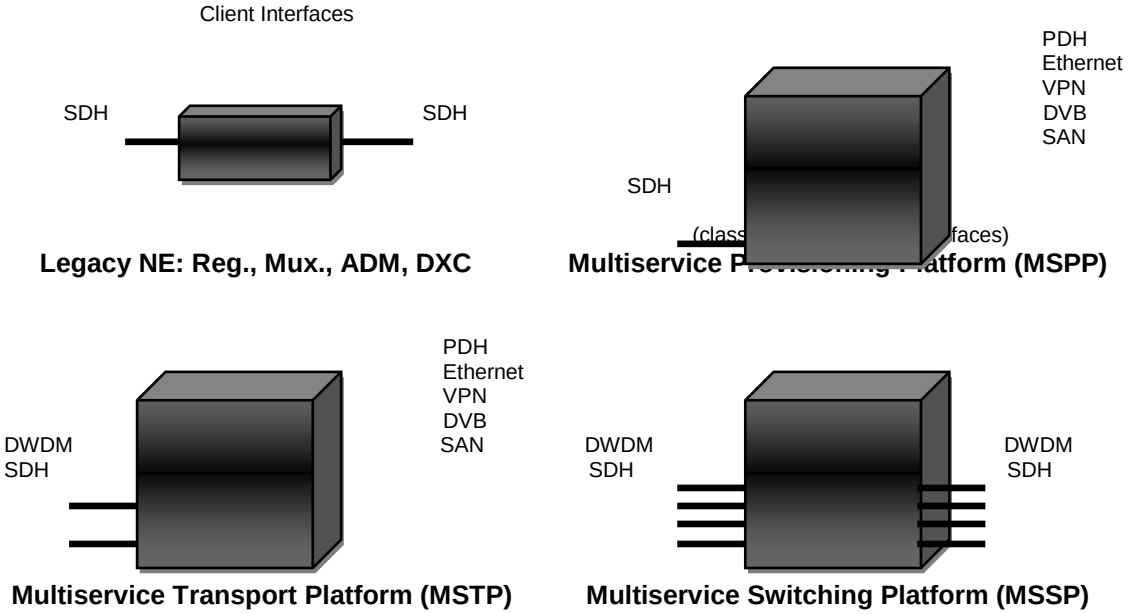


Рис. 9.2. Последовательная эволюция оборудования: МВВ – MSPP – MSTP – MSSP.

Как показано на рисунке, обычный МВВ классической SDH выполняет только функции ввода/вывода типовых каналов с интерфейсами клиента. Требование передачи разнородного трафика NGN привело к появлению мультиплексоров NGSDH, что и соответствует концепции MSPP. Мультиплексор MSPP представляет собой объединение МВВ с реализованными интерфейсами для пакетного трафика различной структуры. Переход к концепции MSTP/MSSP означает разделение функций коммутации и передачи трафика. Как следствие, должны появиться два типа оборудования.

Мультиплексор MSTP представляет собой развитие концепции MSPP, это объединение MSPP с оборудованием DWDM на стороне линейных интерфейсов. В этом мультиплексоре наравне с линейными интерфейсами SDH используются интерфейсы DWDM, за счет чего увеличивается пропускная способность магистрали. Можно утверждать, что MSTP – это мультиплексор, который может в равной степени применяться на сетях SDH и DWDM, а также на конвергентных транспортных сетях, которые уже сейчас включают сегменты обоих типов технологий.

Соответственно, для конвергентных сетей SDH/DWDM мультиплексор MSSP выступает как коммутационный элемент. В нем нет клиентских интерфейсов, только линейные SDH и DWDM. Основное назначение такого элемента – управление трафиком и коммутация данных с одного линейного интерфейса на

другой. Именно этот элемент интересует разработчиков оборудования последние годы. Дело в том, что транспортные сети DWDM стали реальностью и применяются уже более 10 лет в мировой практике.

Стоимость оборудования DWDM стремительно уменьшается, так что эта технология с магистральных сетей вышла на уровень городских сетей MAN. В результате формирование транспортного потока от точки А до точки В методом DWDM уже не представляет особых трудностей. Другое дело – вопрос коммутации и управления трафиком. Этот вопрос является на современном этапе развития технологии ключевым, и его решение будет определять прогресс в области транспортных сетей.

Рассмотрим вопрос о коммутации транспортных потоков несколько глубже, заглянув внутрь «черного ящика» МВВ. Нас будет интересовать, как может коммутироваться трафик в транспортной сети. На рис. 9.3 показаны два ключевых сетевых элемента, осуществляющих коммутацию в неконвергентной сети.

В сетях классической SDH для коммутации используется коммутатор SDH, который включает в себя коммутационную матрицу и линейные интерфейсы. Линейные интерфейсы SDH обеспечивают обработку трафика. Коммутационная матрица переключает информационные потоки между линейными интерфейсами на уровне виртуальных контейнеров VC.

Аналогично работает коммутатор пакетных сетей (рис. 9.3 справа).
Здесь тоже линейные интерфейсы обеспечивают обработку трафика, а коммутационная матрица переключает трафик на уровне отдельных пакетов по адресам уровня L2.

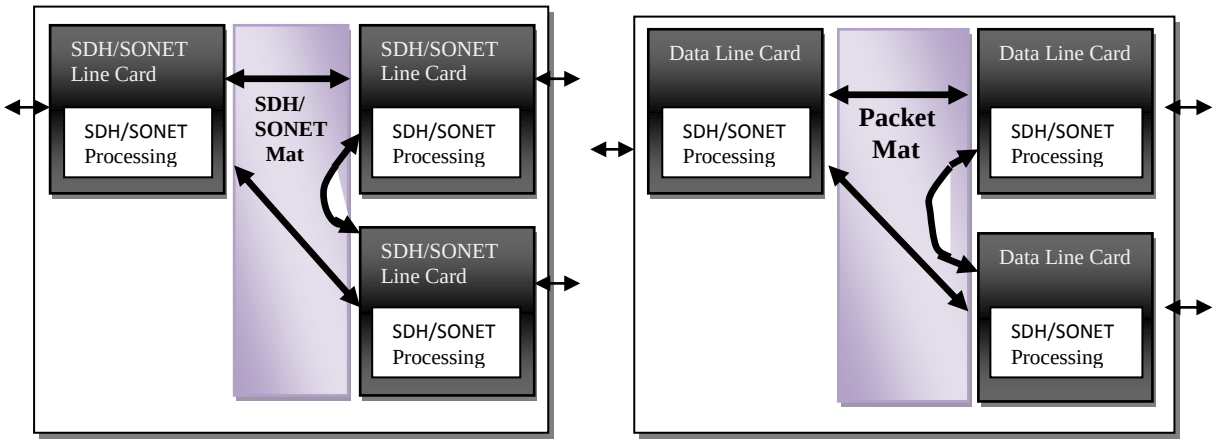


Рис. 9.3. Структура коммутационного поля сетевых элементов: коммутатор SDH (слева) и коммутатор пакетной сети L2 Switch (справа).

Требование конвергентного использования сетевых устройств основано на том, что теперь в сети передается комбинированный трафик (пакетный и TDM одновременно). В этом случае самым простым методом реализации коммутатора является внесение в него модуля GFP (рис. 9.4), который осуществляет преобразование пакетного трафика в трафик SDH. Коммутация в таком случае осуществляется на уровне VC стандартной коммутационной матрицей SDH.

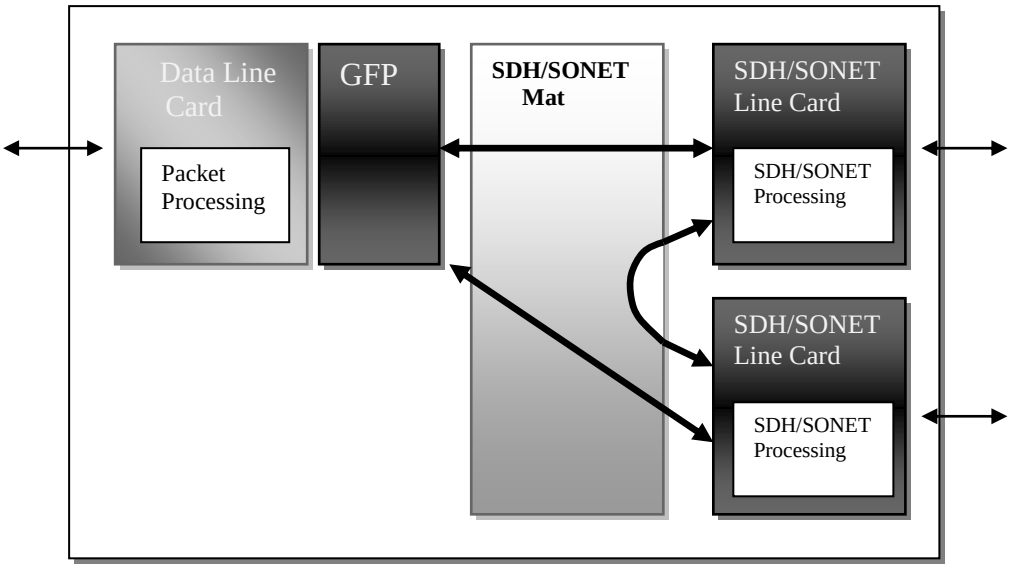


Рис. 9.4. Структура конвергентного коммутатора NGSDH.

Даже привнесение в коммутатор принципов VCAT/LCAS не изменяет существенно архитектуру коммутатора. Если разместить модуль VCAT/LCAS до коммутационной матрицы, то сам процесс коммутации может быть выполнен стандартными средствами SDH (рис. 9.5).

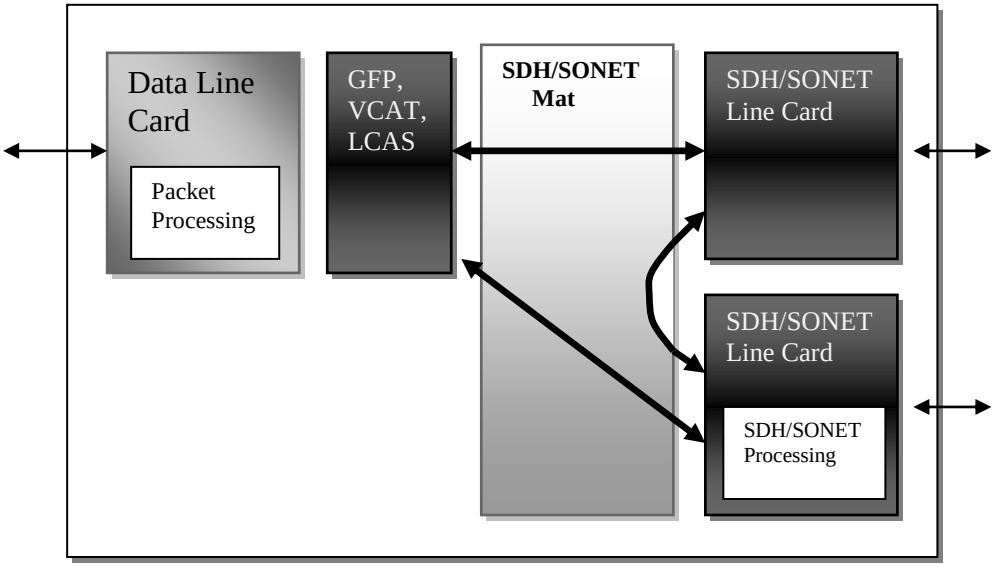


Рис. 9.5. Использование VCAT/LCAS в коммутаторе.

Переход к системам SDH третьего поколения и необходимость формирования MSSP требуют революционного перехода и разработки совершенно новой универсальной коммутационной матрицы (рис. 9.6)

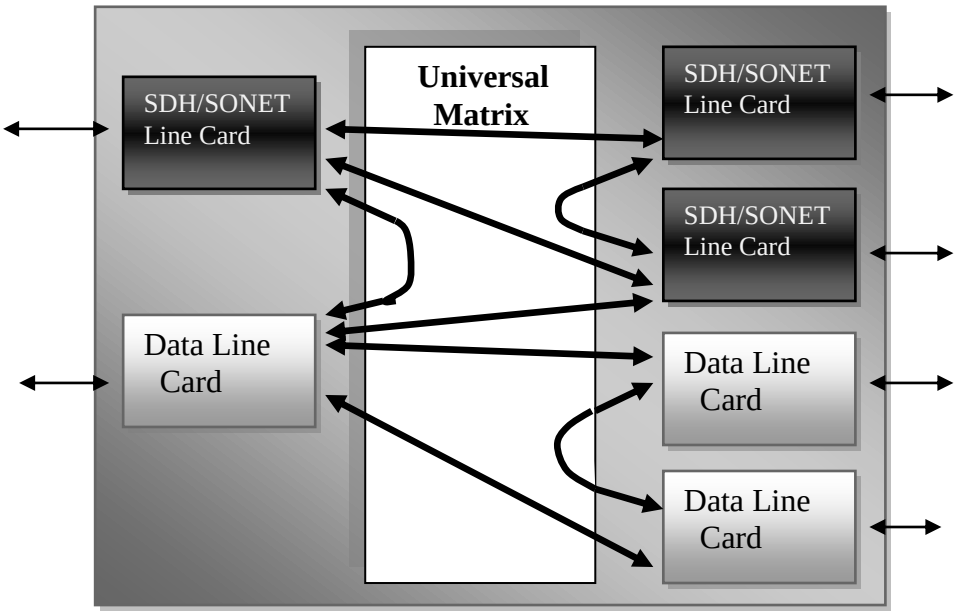


Рис.9.6. Универсальная коммутационная матрица сетевого элемента MSSP.

Суть новой технологии состоит в том, что универсальная матрица способна переключать любой тип трафика (пакетный, TDM).

Для этого должны быть переработаны решения линейных интерфейсных модулей, поскольку эти модули должны теперь обрабатывать трафик различной природы и преобразовывать его в единый формат данных, удобный для работы коммутационной матрицы.

В результате может быть сформирована архитектура универсального узлового элемента, который обеспечивает коммутацию и передачу трафика в любом направлении. Одним из первых устройств такого типа явился коммутатор A1850, разработанный компанией Alcatel в 2006 году (рис.9.7).

Внутренняя архитектура этого коммутатора позволяет использовать такой сетевой элемент в самых различных качествах (рис. 9.8):

- Как МВВ уровня MSTP
- Как транспортный элемент MSTP
- Как коммутатор в сети передачи данных (CETP)

- Как устройство преобразования форматов данных, поскольку универсальная коммутационная матрица может в общем случае преобразовывать данные SDH в пакетные и наоборот

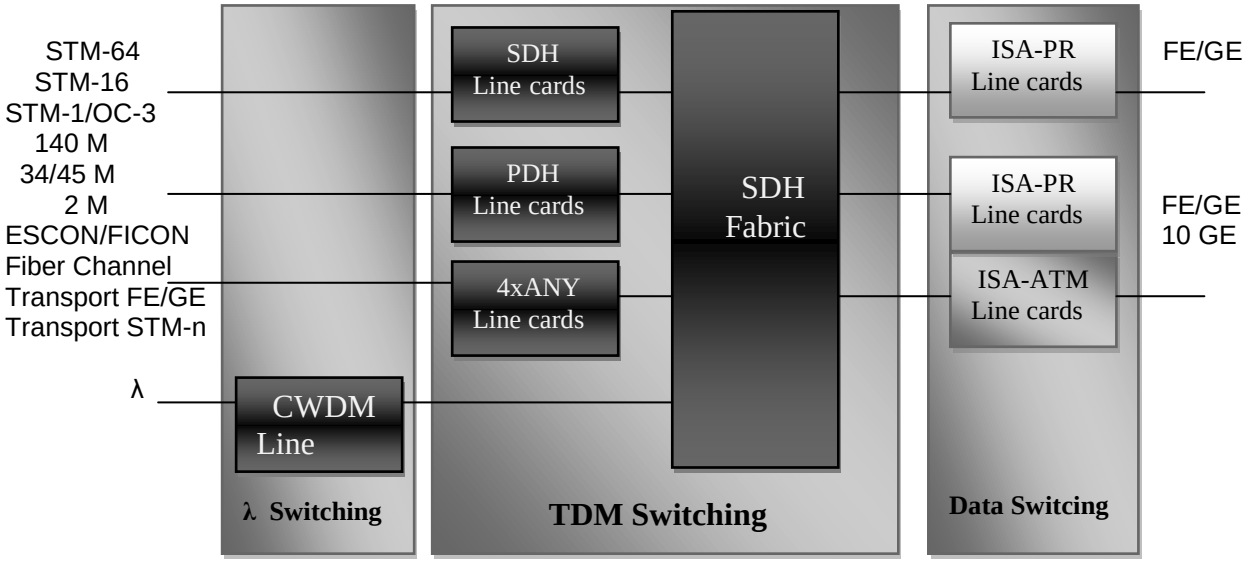


Рис. 9.7. Архитектура коммутатора A1850 компании Alcatel.

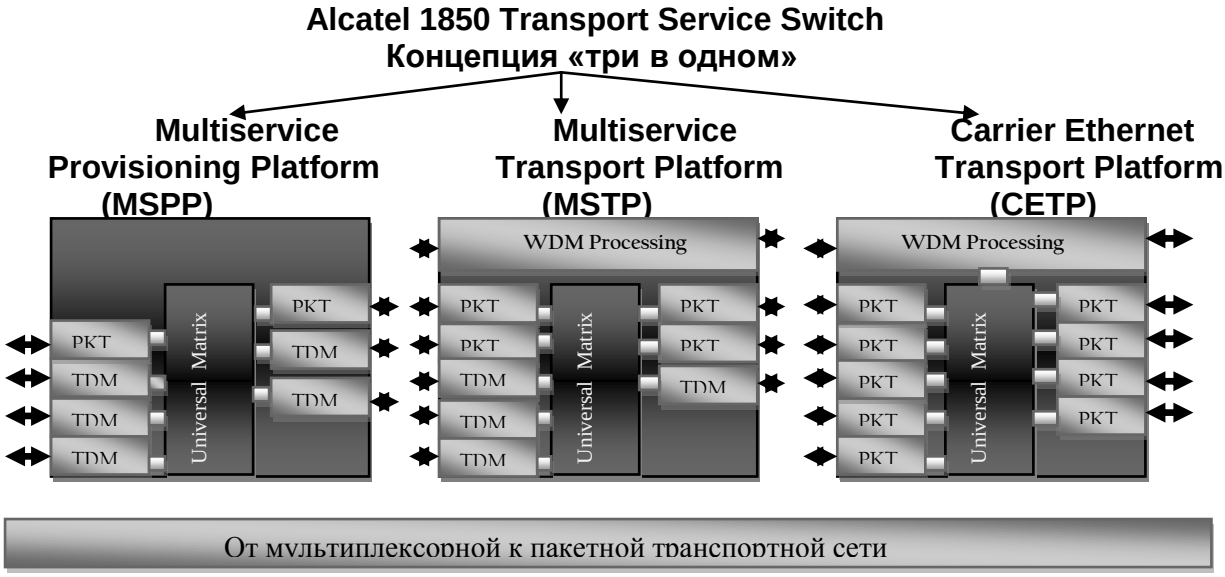


Рис. 8.8. Применение коммутатора A1850 компании Alcatel.

В этом случае важно, что коммутационная матрица нового устройства является универсальной, а это уже означает, что такой мультиплексор представляет собой первое конструктивное воплощение концепции MSSP.

Из вышеперечисленного следует, что переход от систем SDH второго поколения к системам третьего поколения невозможен без революционной перестройки принципов построения узловых элементов. Новая конструкция мультиплексоров должна включать универсальное коммутационное поле, без этого едва ли удастся реализовать функции MSSP. Таким образом, намечается необходимость новой локальной НТР в области построения транспортных сетей.

Из этого проистекает, что концепция эксплуатации и измерений в будущем должна будет претерпеть существенные изменения. Последовательное преобразование форматов данных и их коммутация обязательно должны внести дополнительные задержки в передачу данных. Эти задержки будут зависеть от процесса преобразования, следовательно, будут разными для разных категорий трафика. В результате возникнет вопрос об их контроле. Вытекающая из философии MSSP функция преобразования форматов данных также должна внести изменения в процедуры эксплуатационного контроля. Если устройство обеспечивает преобразование форматов данных, то на этапе эксплуатации возникает целый ряд задач по проверке правильности работы этой процедуры. Можно также предполагать, что новое качество оборудования приведет к появлению других задач и новых методов контроля.

Третий вывод, который можно сделать, состоит в в очень интересной тенденции. Представленная на рис. 9.7 универсальная архитектура коммутационного узла в одинаковой степени подходит для создания узлового элемента транспортной сети и коммутационного элемента сети доступа. Но тогда получается, что само разделение между MSTP и MSSP может оказаться чисто условным, тогда как функции обоих типов устройств будут реализованы в одном устройстве. Развитие этой концепции неизбежно приведет к объединению понятий транспортной сети и сети доступа в единую среду передачи информации.

9.2. OBS – новая концепция транспортных сетей.

9.2.1. Концепция OBS.

Рассмотренная выше проблема формирования алгоритмов и принципов коммутации в современных транспортных сетях привела совершенно недавно к появлению новой концепции построения транспортных сетей. Необходимость не просто передавать данные с высокой скоростью и эффективностью, но и коммутировать их в реальном масштабе времени привела постепенно к пересмотру самих принципов организации коммутации и передачи информации. Рассмотрим, какие принципы коммутации оптических сигналов применяются в настоящее время в технике. Упор на коммутацию именно оптических сигналов сделан нами потому, что для будущих транспортных сетей NGN заведомо считается, что более 90% трафика будет передаваться в виде оптических сигналов.

В настоящее время существует два общепризнанных принципа коммутации информационных сигналов в высокоскоростных сетях (рис. 9.9). Один из них используется в оптических коммутаторах систем DWDM. Принцип коммутации в таком устройстве основан на оптическом перемещении сигнала с длины волны λ_1 на длину волны λ_2. Положительным моментом в таком принципе коммутации является то, что для ее осуществление не нужно выполнять оптоэлектронное преобразование, поскольку коммутируется оптический сигнал. За счет этого повышается надежность передачи информации и увеличивается отношение сигнал/шум для передаваемого сигнала. Кроме того, оптический коммутатор не имеет ограничений по производительности, здесь применяется аналоговый принцип коммутации, и никакого преобразования сигнала не выполняется. Часто коммутацию DWDM называют еще оптической коммутацией каналов OCS (Optical Circuit Switching). Негативным фактором здесь выступает то, что весь поток данных оптического входа λ_1 передается в оптический канал λ_2.

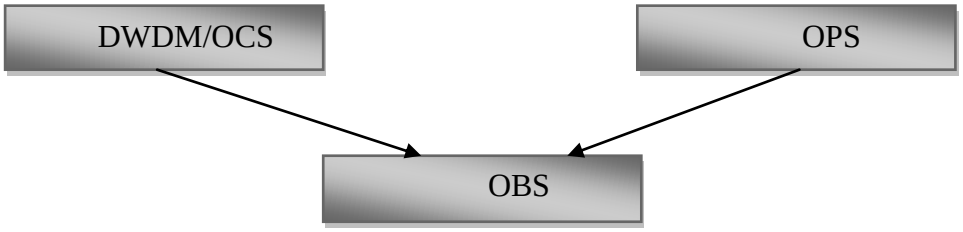


Рис. 9.9. Появление концепции OBS.

Этот негативный фактор отсутствует в любых системах оптической пакетной коммутации OPS (Optical Packet Switching). Здесь входной поток разбирается на отдельные пакеты, и каждый пакет коммутируется индивидуально. Это повышает эффективность использования оптического коммутатора. Но индивидуальная коммутация каждого пакета не может быть реализована в оптическом сигнале. Поэтому коммутатор OPS преобразует оптический сигнал в электрический, и уже потом выполняет процесс коммутации в процессорах коммутационного поля. После осуществления коммутации, сформированный на каждом направлении поток проходит электронно-оптическое преобразование и передается в заданном направлении в формате оптического сигнала.

Наличие двух взаимных опто-электронного и электронно-оптического преобразований делает коммутатор OPS дорогим. Преобразования сигналов могут ухудшать его параметры сигнал/шум, вносить ошибки и дополнительные задержки.

Необходимость коммутации каждого пакета отдельно ведет к ограничениям на уровень обрабатываемого узлом трафика, которые связаны с ограниченной производительностью процессоров устройства OPS. Стремясь соединить преимущества двух технологий оптической коммутации, разработчики предложили новый комбинированный принцип комутации, получивший название берстной коммутации OBS (Optical Burst Switching). В основе работы коммутатора OBS находится оптический коммутатор DWDM, но коммутация выполняется в два шага.

Вначале данные, которые нужно передать на направление, накапливаются в виде отдельной посылки-берста (burst). Как только данных накапливается достаточно для начала процесса, коммутатор выполняет временное переключение сигнала с длины волны λ_1 на длину волны λ_2 по методу DWDM. В результате данные коммутируются индивидуально, но теперь коммутация OBS может быть реализована оптическими средствами коммутации.

Предложенная новая концепция построения систем транспорта и систем коммутации OBS оказалась настолько революционной, что в настоящее время над этой концепцией работает много научных групп. Уровень работ и уровень проблематики достаточно высокий. Долее мы рассмотрим лишь некоторые принципы, которые уже закладываются в качестве стандартных для систем OBS.

9.2.2. Принципы функционирования OBS.

Для систем OBS перспективными считаются сети кольцевой топологии (рис. 9.10). Кольцевая топология не является обязательной, но наиболее часто рассматривается в качестве стандартной. Открыв все преимущества систем кольцевой топологии на этапе развертывания систем SDH первого поколения, специалисты настолько привыкли к таким сетевым конфигурациям, что все последующие технологии MAN: WDM, DWDM, GE и пр. также начали строить на основе кольцевой топологии.

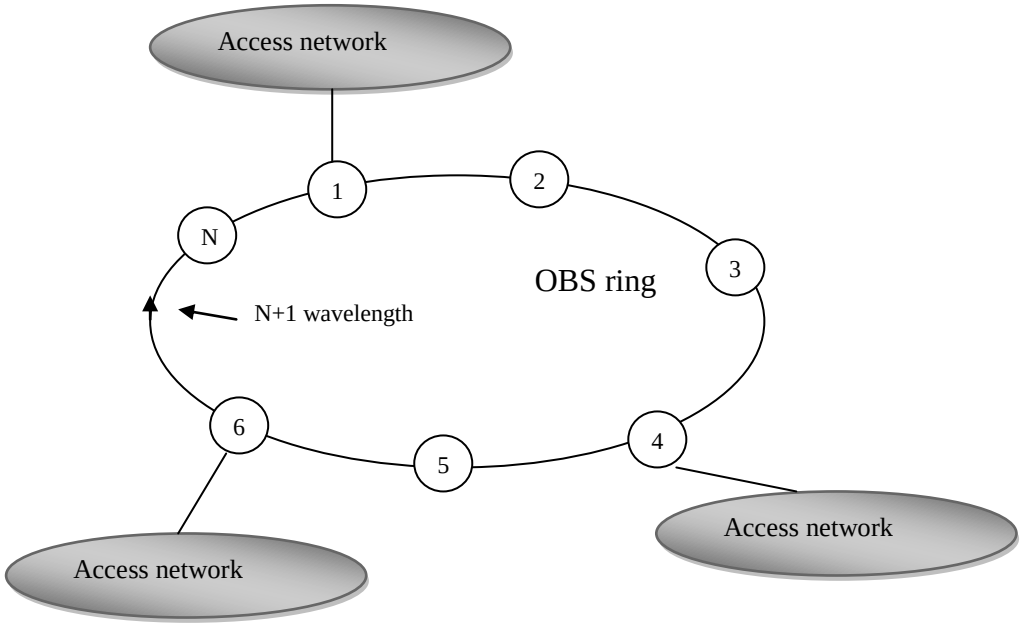


Рис. 9.10. Сеть OBS кольцевой топологии.

Основой работы OBS является применение временной оптической коммутации, как только сформируется определенный берст данных. Для этого используется принцип резервирования оптического канала (рис. 9.11).

Пред началом процесса переключения узловой элемент передает запрос на резервирование оптического канала (сообщение класса SETUP). Затем

выдерживается определенное время смещения (OFFSET) и передается берст данных.

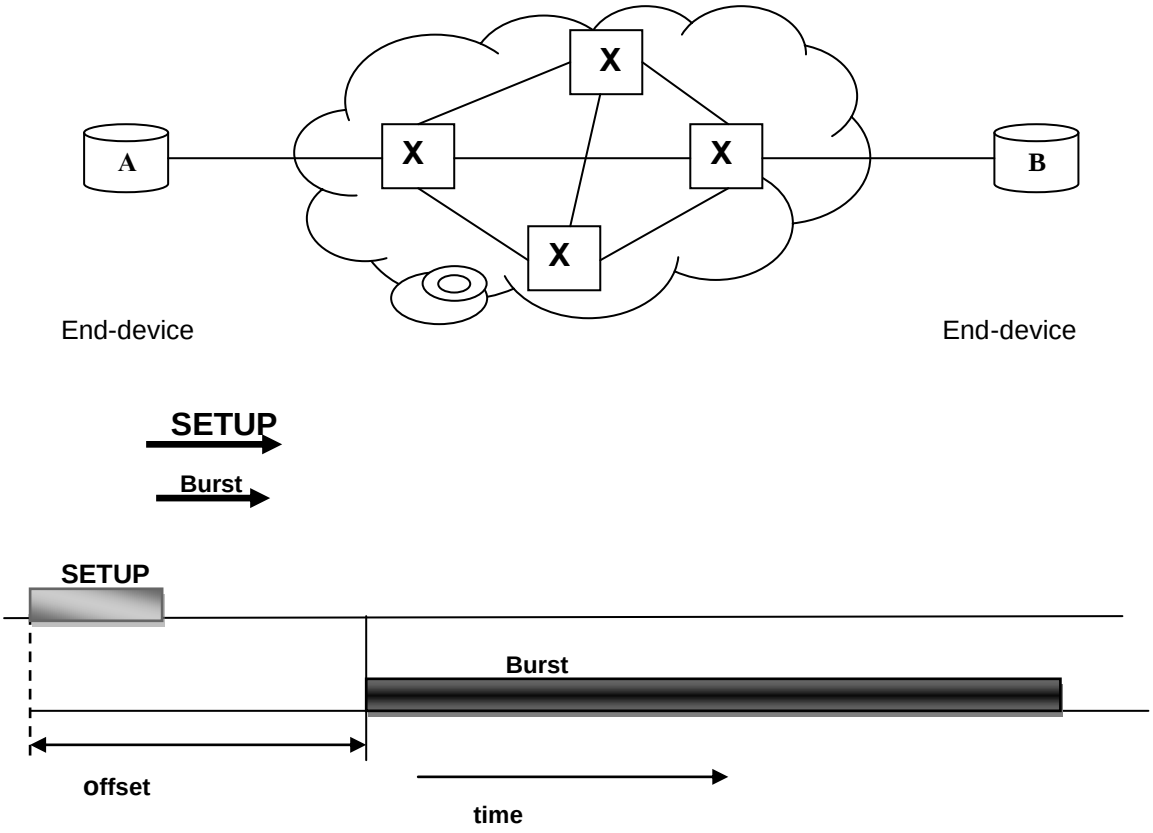


Рис. 9.11. Принцип организации передачи берста в сети OBS.

Приведенная схема организации передачи показывает, что в системах OBS используется асинхронный режим передачи, так что такие системы не будут иметь столь жесткие требования к системам синхронизации, как системы SDH.

Время смещения необходимо для реализации процесса передачи берста по сети. В качестве примера на рис. 9.12 показан процесс передачи берста по цепи из 4 узлов. Здесь хорошо виден процесс передачи берста по сети OBS. Поскольку в системе OBS используется механизм передачи данных без преобразования O/E/O (оптика – электричество – оптика), то стратегическим принципом является минимизация использования оптических буферов данных – элемента дорогого и сложно реализуемого. В результате процесс коммутации реализуется не от узла к узлу, как в телефонной сети, а методом формирования туннеля оптической передачи от узла передачи к узлу приема. Соответственно, сообщения SETUP передаются по сети прозрачно через все узлы, и каждый узел формирует свою часть туннеля, создавая в сети прозрачный оптический канал. Каждый узел имеет определенное время, необходимое для обработки сигнала SETUP, переключения и создания туннеля (на рис. 8.12 – processing time). Начальное время смещения OFFSET используется для компенсации отдельных задержек оптической коммутации.

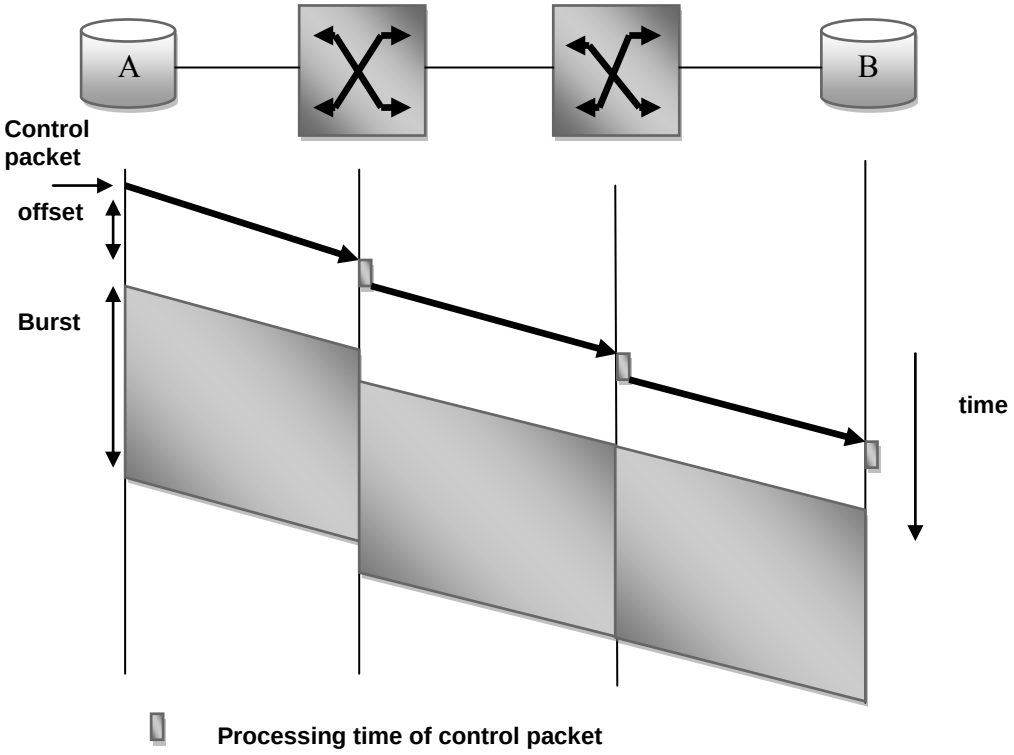


Рис. 9.12. Передача берста по цепи из 4 узлов.

Ошибка в выборе величины времени смещения приводит к потере данных берста (рис. 9.13). Передача по оптической сети OBS отдельного берста напоминает сход лавины: на ее пути не должно быть препятствий. Если в нужный момент времени оптический канал не будет переключен, часть берста будет потеряна.

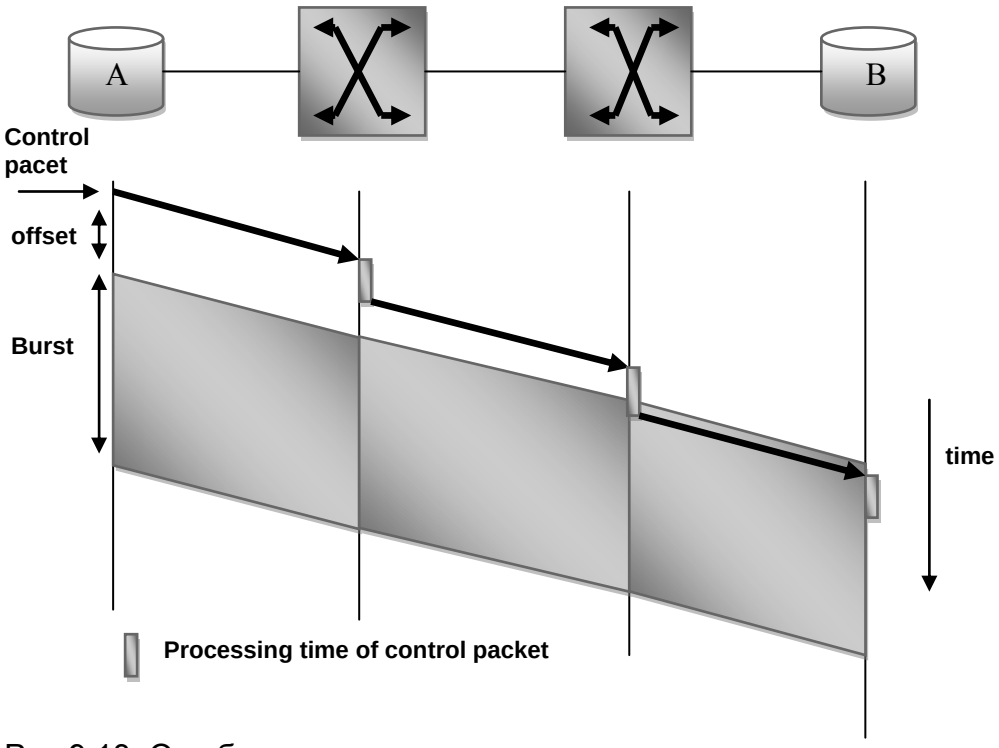


Рис.9.13. Ошибка в установке времени смещения приводит к потере данных в берсте.

9.2.3. Сигнализация в системах OBS.

Взаимодействие между процессом передачи, установками OFFSET и временем резервирования оптического канала настолько сложны, что потребовали разработать специализированные протоколы сигнализации. В настоящее время сформулированы три основных протокола сигнализации: JIT, JET и HORIZON.

На рис. 9.14 показана схема работы протокола JIT (Just in Time,т. е. дословно «строго время»). В оптических каналах λ_1 и λ_2 передаются соответственно управляющие пакеты (control) и берсты данных.

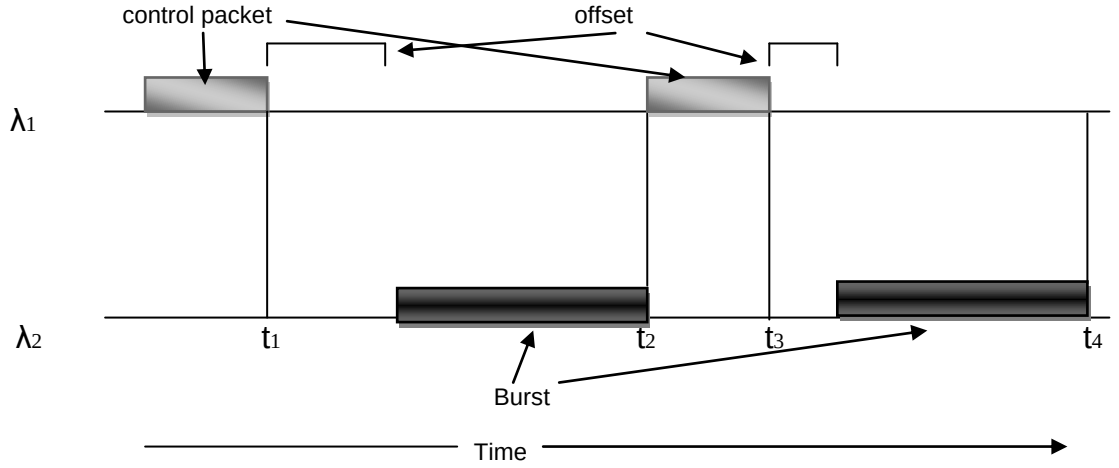


Рис. 9.14. Протокол сигнализации JIT.

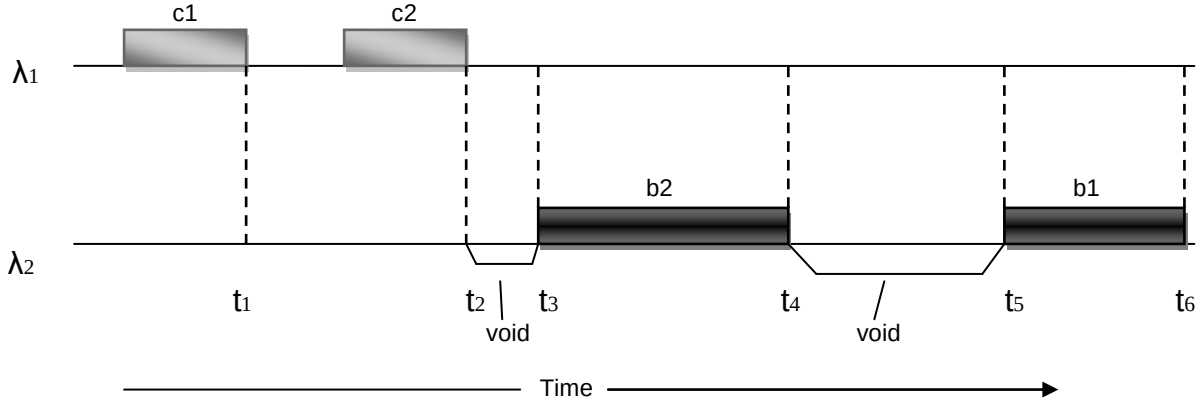


Рис. 9.15. Протокол сигнализации JET.

В соответствии с протоколом JIT оптический канал резервируется сразу после получения сообщения SETUP и предоставляется после интервала смещения OFFSET. Это соответствует наиболее простой схеме работы OBS. На рисунке 9.14 канал зарезервирован в интервалах времени от t_1 до t_2 и от t_3 до t_4. В результате, если сеть является протяженной и время OFFSET оказывается

большим, КПД системы передачи падает, поскольку время резервирования становится существенно больше времени передачи. Поэтому разработчики предложили создавать альтернативные решения в части управления передачей в системе OBS.

Отрицательные явления, связанные с JIT, были преодолены в новом протоколе, получившем название JET (Just Enough Time или «достаточное время») (рис. 9.15). Согласно этому протоколу оптический канал резервируется ровно на то время, которое нужно для передачи берста. Каждое сигнальное сообщение (c1) ставится в очередь на выделение ресурса оптической системы передачи. Если канал свободен, ресурс предоставляется. Если приходит новый запрос (c2) на выделение ресурса, то сначала обрабатывается он (b2), а затем уже первый (b1).

Преимуществами JET являются лучший КПД использования ресурса оптической системы передачи и меньший процент блокировок. Отрицательным фактором является то, что JET намного сложнее JIT в реализации. Еще одним важным недостатком протокола является применение в нм принципа FILO (First in Last Out – «первый пришел, последний ушел»), который может приводить к очень большим задержкам при передаче информации. Более распространенным в сетях передачи данных является принцип FIFO (First in First Out – «первым пришел, первым ушел»). Для внесения этого принципа в систему сигнализации OBS был разработан самый сложный протокол сигнализации – HORIZON (рис. 9.16).

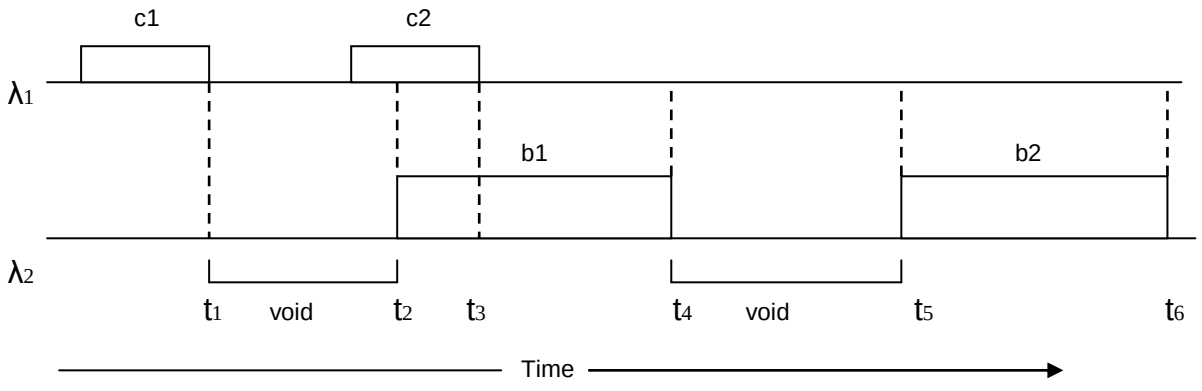


Рис.98.16. Протокол HORIZON.

Для выполнения принципа FIFO протокол HORIZON использует метод защитных интервалов (gap) между берстами. Эти интервалы используются для выстраивания обслуживания и резервирования каналов в соответствии с образованной очередью. Теоретически HORIZON имеет меньший КПД, чем JET, но практически качество передаваемого трафика улучшается, поскольку параметр задержки оказывается статистически распределенным и предсказуемым в отличие от JET. По параметру процента блокировки передачи HORIZON также находится между JIT и JET. Кстати, представленная на рис. 8.16 ситуация в случае использования JIT привела бы к потере берста b2.

Принципы сигнализации в системах OBS пока определены лишь в самых общих чертах и все разработки в области контроля перегрузок, управления соединениями, контроля топологии сетей OBS и пр. носят пока совершенно отвлеченный научный характер и не воплощены ни в одном оборудовании, за исключением лабораторных макетов.

9.2.4. Узловые элементы OBS.

Для понимания уровня влияния концепции OBS на технологию SDH нужно сказать несколько слов об устройстве узловых элементов OBS. Ведь именно структура узловых элементов подсказала направление развития технологии SDH третьего поколения. Точно также понимание архитектуры узловых элементов OBS позволяет указать на роль всей концепции OBS на развитие систем SDH.

Самая простая схема узлового элемента OBS (рис. 9.17) показывает, что мы имеем дело с совершенно новым типом коммутатора, который может быть близок к технологии DWDM, но не к технологии SDH. Основу его составляют линейные интерфейсные модули DWDM и коммутационное поле OBS, обеспечивающее коммутацию данных в формате берстов. Можно утверждать, что перед нами высокопроизводительный MSSP, но без линейных интерфейсов SDH. Это может быть интересным для исследования принципов синтеза систем DWDM и OBS, но находится далеко от проблематики систем SDH.

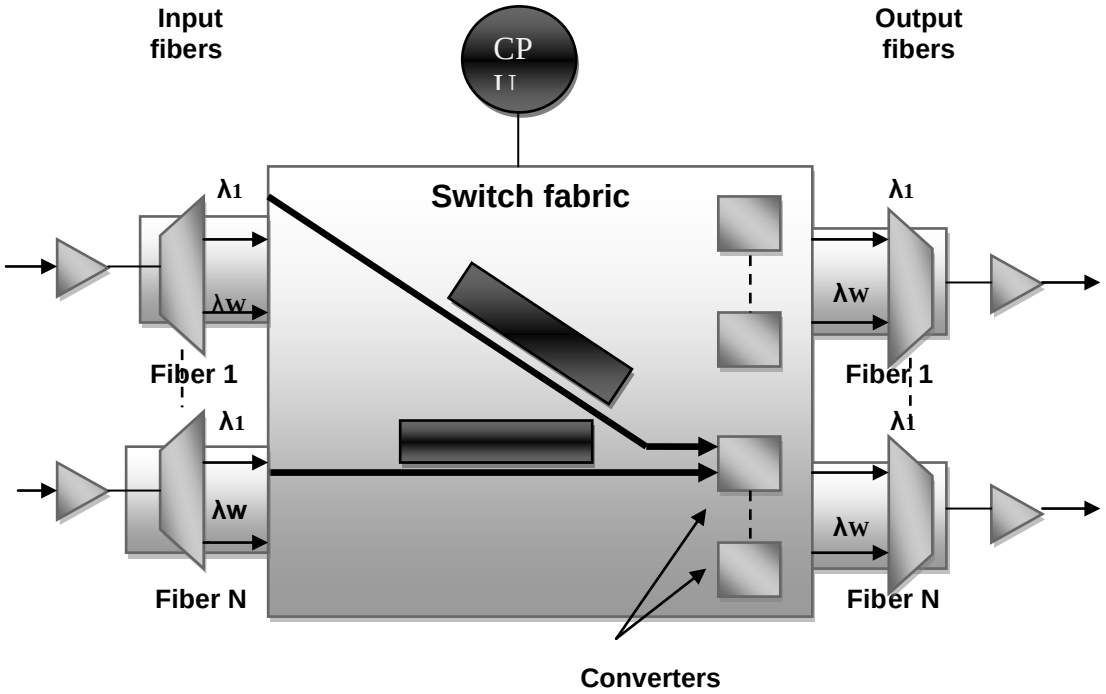


Рис.9.17. Структура узлового элемента OBS.

Но более глубокое исследование принципов построения узловых элементов OBS показывает, что эта технология не так уж и далека от систем SDH. На рис 9.18 представлена более детальная модель устройств коммутатора OBS. Из нее видно, что в составе узлового элемента OBS, если оснастить его не только

линейными, но и пользовательскими интерфейсами, входят интерфейсные модули от систем доступа, где может находиться модуль NGSDH. Вторым фактором близости OBS и SDH является использование в системе OBS принципов ввода/вывода, так что даже сам узловой элемент получил название OADM, т. е. оптический МВВ. Значит, очень возможным направление развития технологии OBS станет использование в той или иной мере цикловой структуры и принципов работы систем SDH. В конце концов, надежность технологии SDH привлекала и будет привлекать разработчиков.

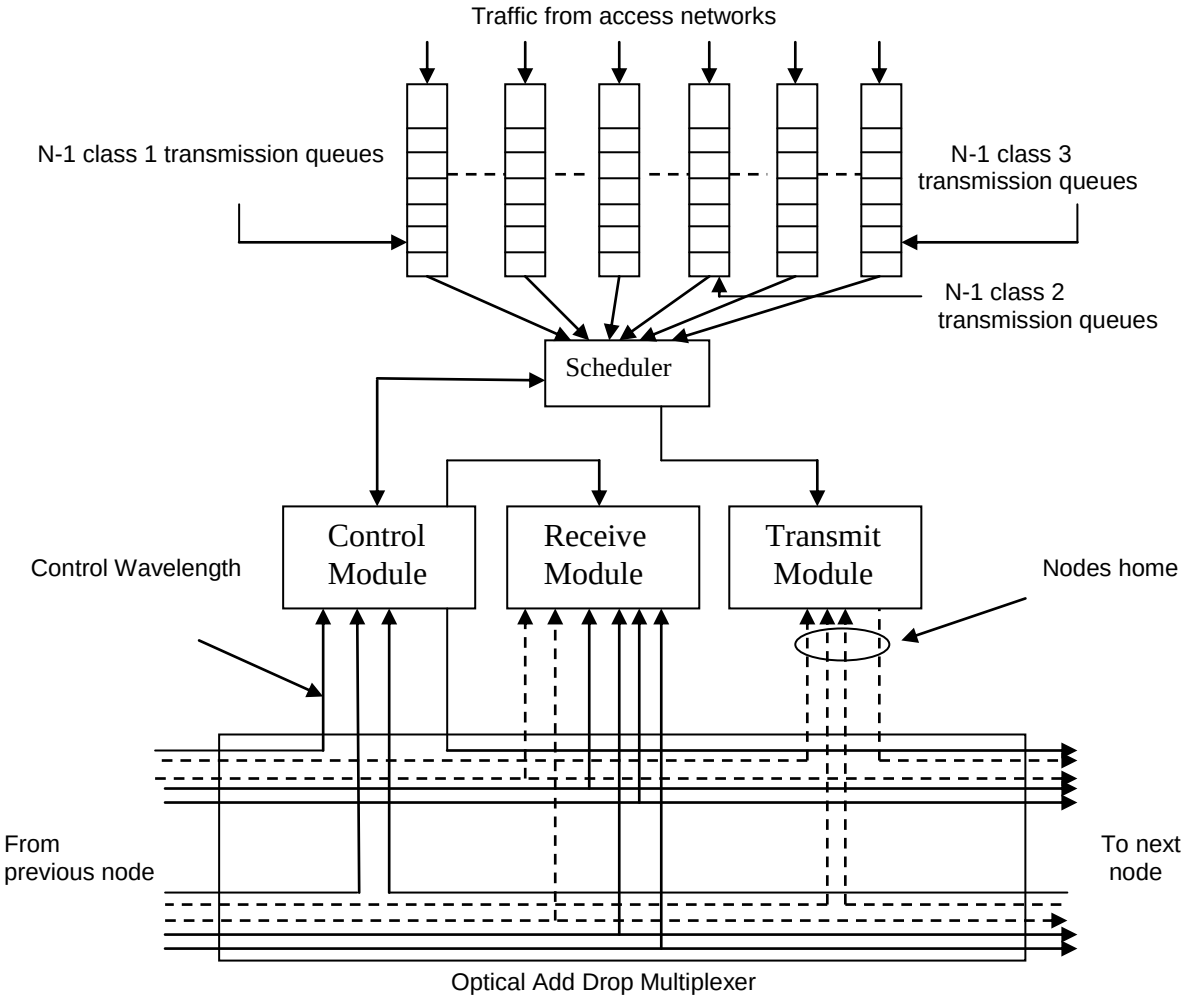


Рис. 9.18. Оптический МВВ в системе OBS.

9.2.5. Потенциальные эксплуатационные проблемы OBS.

Если говорить о потенциальных проблемах, которые уже сейчас можно найти в системах OBS, то можно отметить, что безоблачным далекое будущее технологии транспортных сетей назвать нельзя. Применение берстных систем передачи и коммутации с неизбежностью приведет к появлению большого разброса в параметрах задержки для передачи разного типа трафика. Многие вопросы технологии OBS пока не решены:

- Нет понимания политики в области контроля качества
- Не до конца изучены механизмы контроля и управления перегрузками

- Не понятен механизм управления большими и распределенными сетями на основе OBS

Уже сейчас понятно, что простых решений перечисленных вопросов для технологии OBS не будет. Даже тот факт, что математическое описание таких систем может быть выполнено только аппаратами нелинейной динамики и математической теории динамического хаоса, показывает, насколько сложным может быть поведение таких систем.

9.3. NGSDH – магистраль или периферия технического развития?

Мы рассмотрели две новые концепции MSxP и OBS, развитие которых определит специфику перехода систем от второго поколения к системам третьего поколения. В связи с этим может возникнуть вопрос: являются ли предлагаемые решения вообще технологией SDH? Не наблюдаем ли мы процесс смерти технологии SDH и замены ее новыми универсальными коммутационными матрицами и новым оборудованием OBS? Не вытеснят ли новые концепции технологию SDH в область технологии доступа?

Ответов на эти вопросы может быть два. Либо технология SDH, ее философия и стандарты не будут использоваться, и дальше второго поколения системы SDH развиваться не станут. Либо новые технологии MSxP и OBS в какой то степени заимствуют технологические достижения SDH и, таким образом, третье поколение систем передачи сохранит и разовьет стандарты SDH на новом технологическом поле. Однозначный ответ из двух упомянутых выбрать сейчас нельзя. Это и понятно, ведь вся мировая технология систем передачи сейчас только начинает внедрять оборудование SDH второго поколения, а до внедрения третьего поколения систем должно пройти еще 10-15 лет.

Как бы ни случилось в отдаленном будущем, в истории мировой связи есть много оснований, предсказывающих долгую жизнь технологии SDH. Не было ни одного случая, когда технология, глубоко внедрившаяся в практику систем связи, исключалась на новом витке научно-технического прогресса. Наоборот, технологии, пустившие глубокие корни, продолжают развиваться, модифицироваться и адаптироваться к новым требованиям. Например, широко известный проект ALOHA привел к созданию технологии Ethernet, и с тех пор эта технология развивается непрерывно от LAN к MAN, от MAN к WAN, превышая все мыслимые и немыслимые ограничения по скорости передачи: 10 Мбит/с, 100 Мбит/с, 1 Гбит/с, 10 Гбит/с, 40 Гбит/с и т. д. Аналогично, технология HDLC породила протокол X.25, доработанный позже до Frame Relay/ISDN и в конце концов до ATM.

Все перечисленные примеры позволяют смотреть на технологию SDH очень оптимистично. По разным оценкам процесс перехода от систем классической SDH к NGSDH займет от 5 до 10 лет. Столько же может занять переход к системам передачи третьего поколения. Так что даже без адаптации к сетям третьего поколения технологии SDH можно предсказывать от 10 до 25 лет жизни на том ресурсе, который сейчас наработан. Если же сети третьего поколения смогут вобрать в себя стандарты SDH и умело их использовать, то срок жизни SDH можно прогнозировать от 40 до 70 лет.

Литература

1. Убайдуллаев Р. Р. Волоконно-оптические сети. М., Эко-трендз, 1998
2. Зингеренко А. М., Баева Н.Н., Тверецкий М.С. Системы многоканальной связи, М., Связь, 1980.
3. Левин Л. С., Плоткин М. А. Цифровые системы передачи информации. М., Радио и связь. 1982
4. Бернард Скляр. Цифровая связь. Вильямс, М – СПб- Киев, 2003
5. Дансмор Б., Скандьер Т. Справочник по телекоммуникационным технологиям. Вильямс, М – СПб – Киев, 2004
6. Слепов Н. Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. М., Радио и связь, 2000
7. Брени С. Синхронизация цифровых сетей связи. М., Мир, 2003
8. Власов И.И. Птичников М.М. Измерения в цифровых сетях связи. М., Постмаркет, 2005
9. Крухмалев В.В., Гордиенко В.Н., Моченов А.Д. Цифровые системы передачи. Учебное пособие для ВУЗов. М., Горячая линия – Телеком, 2007
10. Алексеев Е.Б., Гордиенко В.Н., Крухмалев В.В., Моченов А.Д., Тверецкий М.С. Проетирование и техническая эксплуатация цифровых телекоммуникационных систем и сетей. Учебное пособие для ВУЗов. М., Горячая линия – Телеком, 2008
11. Бакланов И.Г. SDH NG SDH: практический взгляд на развитие транспортных сетей. М., Метротек, 2006
12. Зингеренко Ю.А. Оптические цифровые телекоммуникационные системы. Учебное пособие. СПб,СПб ГУ ИТМО, 2010

Содержание

Введение……3

Глава 1. Основные сведения о ВОСП……..5
1.1. Основные положения……5
1.2. Оптическое волокно……...8
1.2.1. Типы оптических волокон……8
1.2.2. Распространение света по волокну……..12
1.2.3. Характеристики поставляемых волокон……..17
1.3. Пассивные оптические компоненты……21
1.3.1. Разъемные соединители……..21
1.4. Оптоэлектронные компоненты ВОСП……...24
1.4.1. Передающие оптоэлектронные модули……24
1.4.2. Приемные оптоэлектронные модули……31
1.5. Волоконно-оптические усилители и волновое мультиплексирование……36
1.5.1. Оптические усилители……..36
1.5.2. Применение оптических усилителей EDFA……44
1.5.3. Плотное волновое мультиплексирование……...50

Глава 2. Системы передачи синхронной цифровой иерархии (SDH) первого поколения……57
2.1. Общие особенности построения SDH и ее основные характеристики……57
2.2. Основы функционирования SDH……..63
2.2.1. Аллегория «Поезд»……64
2.2.2. Процедура контейнирования нагрузки……65
2.2.3. Понятие виртуального контейнера……77
2.2.4. Понятие маршрута……79
2.2.5. Мультиплесирование нагрузки и варианты загрузки VC……..82
2.2.6. Заголовки и поля……84
2.2.7. Идентификаторы J-x……..89
2.2.8. Указатели – поля Hx……..91
2.2.9. Топология сети и резервирование – байты K……98
2.2.10. Контроль четности – байты B……105
2.2.11. Другие важные поля – C, G, V……108
2.2.12. Управление в системе SDH……111
2.2.13. Протоколы взаимного соединения TCM – байты N……..123
2.2.14. Архитектура мультиплексоров SDH……126
2.2.15. Обобщенный взгляд на технологию SDH……...131

ГЛАВА 3. Синхронизация в сетях SDH. Джиттер и вандер……132
3.1. Общие сведения о синхронизации……132
3.1.1. Аллегория «Бассейн»……..132
3.1.2. Понятие проскальзываний……133
3.1.3. Общие принципы систем синхронизации……..135
3.1.4. Построение системы синхронизации……141
3.1.5. Струтура графов и топоплогия систем синхронизации……152

3.2. Джиттер и вандер в сетях SDH……..154
3.2.1. Понятие джиттера и вандера……..154

3.2.2. Измерение джиттера и вандера……157
3.2.3. Джиттер и вандер в сетях SDH. Работа указателей……..160
3.3. Системы синхронизации в SDH. Использование SSM……168
3.3.1. Интеграция системы управления и системы синхронизации……168
3.3.2. Состав сигналов SSM……169
3.3.3. Механизм использования SSM системой управления при резервировании……171
3.3.4. Использование TSG/SSU в системе управления синхронизацией……..173

Глава 4. Принципы измерения параметров ошибок и мониторинг взаимного соединения……177
4.1. Измерительные технологии и особенности эксплуатационных измерений……177
4.1.1. Принципы измерения параметров ошибок……..178
4.1.2. Методики нормирования и контроля качества G.821/G.626/M.2100……...182
4.2. Система SDH как объект измерений……192
4.2.1. Многоуровневый принцип процесса измерений……193
4.2.2. Принципы мониторинга полей заголовков……..195
4.3. Принципы контроля качества при необходимых измерениях……202
4.3.1. Нормы Приказа №92……..202
4.3.2. Переход к соглашению о качестве обслуживания SLA……208
4.3.3. Сетевые средства контроля качества и роль измерений QoS в современных системах эксплуатации……210
4.4. Эксплуатационные измерения в системах SDH……212
4.4.1. Процесс маршрутизации потоков……213
4.4.2. Процесс возникновения ошибок и неисправностей. Трассировка системы SDH……216
4.4.3. Процесс нарушения в работе системы синхронизации……219

Глава 5. Предпосылки к появлению новой технологии – NG SDH.....222
5.1. Новые требования к системе передачи SDH……..223
5.1.1. Рост уровня пакетного трафика……..223
5.1.2. Появление разнородных типов трафика и принцип конвергенции……..224
5.1.3. SDH как технология транспорта……225
5.1.4. Преимущества и недостатки использования NG SDH на транспортной сети……227
5.1.5. Влияние когцепции оптических технологий FTTx на NG SDH……229
5.1.6. Концепция WDM/DWDM……231
5.2. Основные направления развития систем NG SDH……..233
5.2.1. Направление развития NG SDH……233
5.2.2. Проблемы передачи высокоскоростного трафика……235
5.2.3. Первая попытка решения – кокатенация……235
5.2.4. Виртуальная кокатенация VCAT……239
5.2.5. Проблемы передачи пакетного трафика……..240
5.2.6. Управление шириной коридора LCAS……..247
5.2.7. Современная модель NG SDH……250

5.3. Структура протокола GFP……..252
5.3.1. Общие основы GFP……..252
5.3.2. Подсистема GFP-C……...255
5.3.3. Подсистема GFP-F……264

5.3.4. Подсистема GFP-T……266
5.4. Механизм работы системы VCAT……267
5.4.1. Модель механизма VCAT……267
5.4.2. VCAT уровня VC-3/4……268
5.4.3. VCAT уровня VC-2/12……272
5.5. Струтура протокола LCAS……274
5.5.1. Изменение структуры VCAT при введении LCAS……274
5.5.2. Принципы сигнализации LCAS……277
5.5.3. Обмен сигналами LCAS……278
5.5.4. Преимущества LCAS……285
5.6. некоторые дополнения к NG SDH……286
5.6.1. Процедура коммутации каналов TSI……286
5.6.2. Концепция автоматической коммутации транспортной сети ASTN……287
5.6.3. Автоидентификация в сетях NG SDH……289
5.7. Концепция упругого пакетного кольца RPR……292
5.7.1. Основы концепции упругого кольца RPR……294
5.7.2. Преимущества RPR……297
5.8. Системы SDH второго поколения MSPP и MSSP……299

Глава 6. Принципы контроля сетей NG SDH……305
6.1. Особенности NG SDH с точки зрения практики контроля ……305
6.2. Многоуровневое решение по контролю NG SDH……306
6.2.1. От каналов к виртуальным коридорам……306
6.2.2. Мультисервисный трафик……311
6.2.3. Многоуровневая архитектура и многоуровневое решение по контролю NG SDH……313
6.2.4. Анализ системы NG SDH с точки зрения Эксплуатационных процессов……314

Глава 7. Основные сведения о технологии Ethernet и GE……315
7.1. Общие сведения о технологии Ethernet……315
7.1.1. Физический уровень технологии Ethernet……318
7.1.2. Уровень MAC……320
7.1.3. Струтура кадров Ethernet. MAC – адресация……322
7.1.4. Развитие технологии Ethernet……324
7.1.5. Полудуплексный и полнодуплексный режим передачи. Берстность. Механизм управления потоками……327
7.1.6. Виртуальные локальные сети VLAN……328
7.1.7. Функции автоматического конфигурирования канального уровня……329
7.1.8. Варианты топологии сетей Ethernet……329
7.1.9. Уровень управления логическим соединением (LLC)……330
7.2. Gigabit Ethernet, 10 GE и дальнейшее развитие технологии Ethernet……331
7.2.1. Архитектура технологии Gigabit Ethernet. Стандарт IEEE 802.3……333
7.2.2. Интерфейс 1000Base – X……334
7.2.3. Немного об интерфейсе 1000Base-T……338

Глава 8. Контроль параметров NG SDH……338
8.1. Принципы контроля параметров NG SDH на уровне Ethernet. RFC-2544...338
8.2. Контроль параметров NG SDH на уровне SDH……350
8.2.1. Цели и задачи измерений на уровне NG SDH……350

8.2.2. Специфика контроля системы VCAT……..352
8.2.3. Контроль LCAS…….356
8.2.4. КонтрольGFP…….363
8.2.5. Контроль параметров Ethernet внутри сети NG SDH…….368

Глава 9. Дальнейшее направление развития. Системы SDH третьего поколения……371
9.1. От концепции MSSP к концепции MSSP/MSTP……...371
9.2. OBS – новая концепция транспортных сетей……..377
9.2.1. Концепция OBS…….377
9.2.2. Принципы функционирования OBS……379
9.2.3. Сигнализация в системе OBS……382
9.2.4. Узловые элементы OBS……..384
9.2.5. Потенциальные эксплуатационные прблемы OBS……..385
9.3. NG SDH – магистраль или периферия технического развития……..386

Литература……. …….388

Содержание…….389

В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

КАФЕДРА ФИЗИКИ И ТЕХНИКИ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Кафедра физики и техники оптической связи вошла в состав инженерно-физического факультета в 1976 г. И в 2010 году была переведена на вновь созданный факультет инфокоммуникацонных технологий. Заведующим кафедрой является д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ И.К. Мешковский. На кафедре развились два научно-технических направления: технология оптического волокна и создание новых композиционных оптических материалов. В 1982 году кафедра первой в стране стала осуществлять подготовку инженеров по специальности «Волоконная и интегральная оптика». На базе кафедры были проведены первые в России разработки по технологии производства оптического волокна, оптических жгутов, различных волоконно-оптических приборов и систем. Возникла научная школа в области фотоники дисперсных и нелинейных сред. В 1998 году в связи с развитием систем телекоммуникации и высокими потребностями в специалистах по волоконно-оптической связи кафедра первой в Санкт-Петербурге стала осуществлять подготовку инженеров по специальности «Физика и техника оптической связи». С 2008 года - подготовку бакалавров и магистров по направлению «Телекоммуникации», а с 2011 года - подготовку бакалавров и магистров по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». На кафедре проводятся студенческие научные семинары по телекоммуникациии. Кафедра осуществляет научные разработки совместно со многими зарубежными фирмами и университетами.

Зингеренко Юрий Александрович

ОПТИЧЕСКИЕ ЦИФРОВЫЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ СИНХРОННОЙ ЦИФРОВОЙ ИЕРАРХИИ

Учебное пособие

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел НИУ ИТМО
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99
Подписано к печати
Заказ №
Тираж
Отпечатано на ризографе