

## Раздел 2. СРЕДСТВА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

### 2.1. Основные понятия техники связи

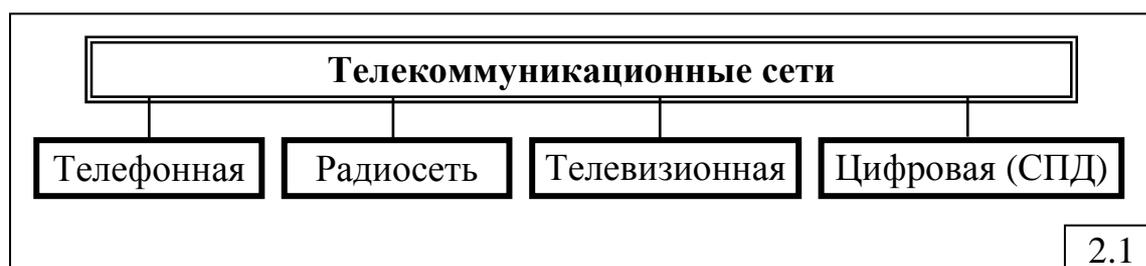
#### 2.1.1. Телекоммуникация

**Телекоммуникация** (греч. *tele* – вдаль, далеко и лат. *communicatio* – общение) – передача данных на большие расстояния.

**Средства телекоммуникации** – совокупность технических, программных и организационных средств для передачи данных на большие расстояния.

**Телекоммуникационная сеть** – множество средств телекоммуникации, связанных между собой и образующих сеть определённой топологии (конфигурации). Телекоммуникационными сетями являются (рис.2.1):

- телефонные сети для передачи телефонных данных (голоса);
- радиосети для передачи аудиоданных;
- телевизионные сети для передачи видеоданных;
- цифровые (компьютерные) сети или сети передачи данных (СПД) для передачи цифровых (компьютерных) данных.



Данные в цифровых телекоммуникационных сетях формируются в виде *сообщений*, имеющих определенную структуру и рассматриваемых как единое целое.

Данные (сообщения) могут быть:

- *непрерывными*;
- *дискретными*.

Непрерывные данные могут быть представлены в виде непрерывной функции времени, например, речь, звук, видео. Дискретные данные состоят из знаков (символов).

Передача данных в телекоммуникационной сети осуществляется с помощью их физического представления – *сигналов*.

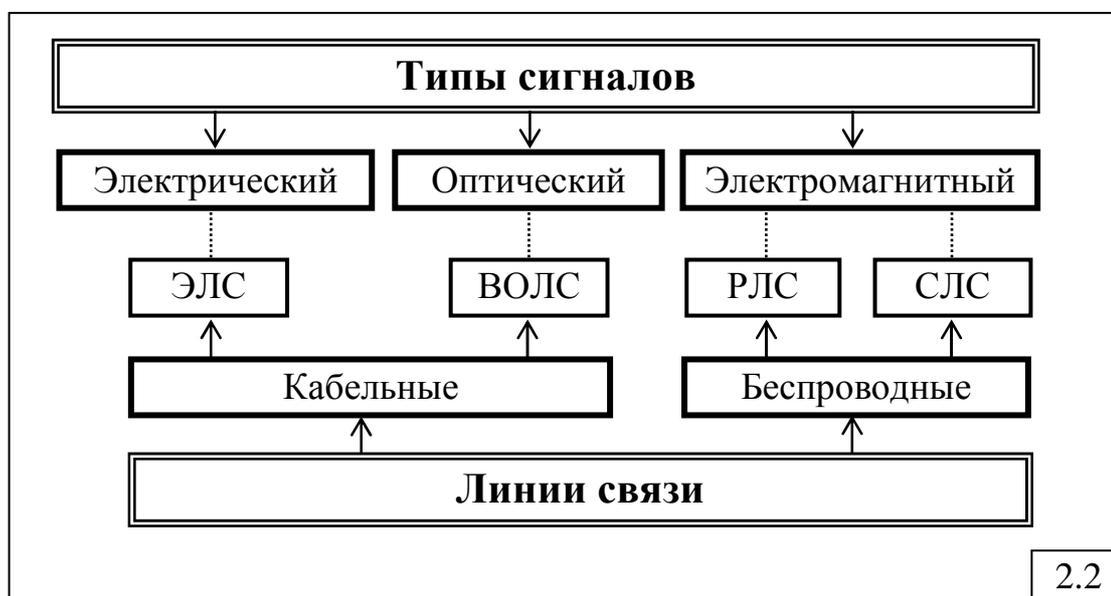
В компьютерных сетях для передачи данных используются следующие **типы сигналов** (рис.2.2):

- электрический (электрический ток);
- оптический (свет);
- электромагнитный (электромагнитное поле излучения – радиоволны).

Для передачи электрических и оптических сигналов применяются кабельные линии связи соответственно (рис.2.2):

- электрические (ЭЛС);
- волоконно-оптические (ВОЛС).

Передача электромагнитных сигналов осуществляется через радиолнии (РЛС) и спутниковые линии связи (СЛС).



Сигналы, как и данные, могут быть:

- непрерывными;
- дискретными.

При этом, непрерывные и дискретные *данные* могут передаваться в телекоммуникационной сети либо в виде непрерывных, либо в виде дискретных *сигналов*.

Процесс преобразования (способ представления) данных в вид, требуемый для передачи по линии связи и позволяющий, в некоторых случаях, обнаруживать и исправлять ошибки, возникающие из-за помех при их передаче, называется **кодированием**. Примером кодирования является представление данных в виде двоичных символов. В зависимости от параметров среды передачи и требований к качеству передачи данных могут использоваться различные методы кодирования.

**Линия связи** – физическая среда, по которой передаются информационные сигналы, формируемые специальными техническими средствами, относящимися к линейному оборудованию (передатчики, приемники, усилители и т.п.). Линию связи часто рассматривают как совокупность физических цепей и технических средств, имеющих общие линейные сооружения, устройства их обслуживания и одну и ту же среду распространения. Сигнал, передаваемый в линии связи, называется **линейным** (от слова линия).

Линии связи можно разбить на 2 класса (см. рис.2.2):

- кабельные (электрические и волоконно-оптические линии связи);
- беспроводные (радиолнии).

На основе линий связи строятся каналы связи.

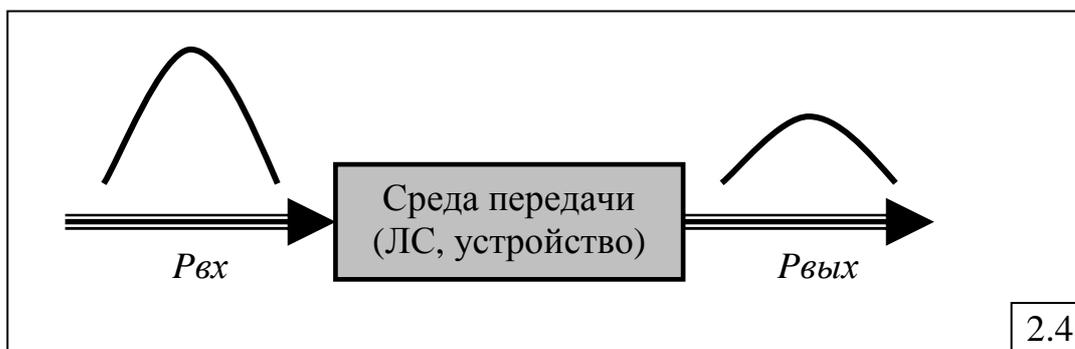
**Канал связи** представляет собой совокупность одной или нескольких линий связи и каналообразующего оборудования, обеспечивающих передачу данных между взаимодействующими абонентами в виде физических сигналов, соответствующих типу линии связи.

Канал связи может состоять из нескольких последовательных линий связи, образуя составной канал, например, как это показано на рис.2.3: между абонентами А1 и А2 сформирован канал связи, включающий телефонные (ТфЛС) и волоконно-оптическую (ВОЛС) линии связи. В то же время, в одной линии связи, как будет показано ниже, может быть сформировано несколько каналов связи, обеспечивающих одновременную передачу данных между несколькими парами абонентов.



### 2.1.2. Сигналы

При передаче сигнала через некоторую среду передачи (линия связи, некоторое устройство) происходит изменение сигнала (усиление или ослабление), обусловленное техническими и физическими свойствами среды передачи (рис.2.4.).



Усиление и ослабление (отношение энергий или мощностей) некоторой физической величины – *сигнала* (напряжения, тока, мощности, энергии поля и т.д.) в электротехнике, радиотехнике, электросвязи и акустике измеряют в **децибелах** (дБ) – логарифмических единицах усиления (ослабления):

$$d[\text{дБ}] = 10 \lg \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}},$$

где  $P_{\text{вх}}$  и  $P_{\text{вых}}$  – значения мощности (энергии) соответственно входного и выходного сигналов.

Отношение  $K = P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}}$  называется **коэффициентом передачи**.

Величина  $d$ , выраженная в децибелах, называется **коэффициентом усиления**, если  $d > 0$ , и **коэффициентом затухания**, если  $d < 0$ . На практике обычно знак минус перед коэффициентом затухания опускают и определяют часто коэффициент затухания как положительную величину.

Соответствие между значением коэффициента затухания (усиления), вычисленного в децибелах, и значением коэффициента передачи иллюстрируется следующей таблицей:

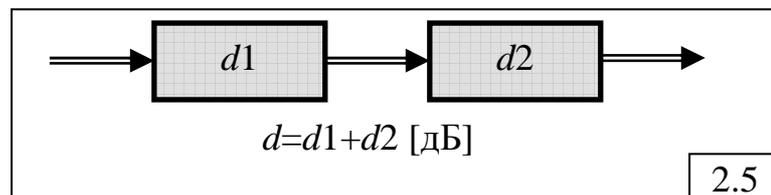
$d$ , дБ	1	2	3	5	10	13	16	17	20	25	30
K	1,26	1,59	2,0	3,16	10	19,95	39,8	50,1	100	316,2	1000

В децибелах также может быть выражено отношение двух напряжений  $U$  или токов  $I$ :

$$d[\text{дБ}] = 20\lg\left(\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}\right) \quad \text{или} \quad d[\text{дБ}] = 20\lg\left(\frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}}\right).$$

Например, ослабление  $d=10$  дБ/км означает, что ослабление напряжения или тока на расстоянии в 1 км согласно уравнению  $10 = 20\lg K$  будет равно  $K = \sqrt{10} \approx 3,3$  раза.

Удобство вычисления ослабления (усиления) в децибелах состоит в том, что при каскадном включении нескольких участков линии или технических устройств значения  $d$  складываются (рис.2.5).



Например, в случае  $d=10$  дБ/км ослабление на расстоянии в 2 км будет равно 20 дБ.

Сигналы, как и данные, могут быть:

- **непрерывными (аналоговыми)** – в виде непрерывной функции времени (изменение тока, напряжения, электромагнитного поля излучения);
- **дискретными (цифровыми)** – в виде импульсов тока, напряжения, света.

Сигналы, используемые для передачи данных, должны быть *информативными*, то есть нести информацию о передаваемом сообщении. Очевидно, что постоянный ток, не изменяющий своего значения и направления передачи, не может служить переносчиком информации. Сигнал должен иметь некоторые изменяющиеся параметры, которые на приёмном конце позволят идентифицировать передаваемые данные. В качестве такого информативного сигнала часто используют так называемый гармонический сигнал.

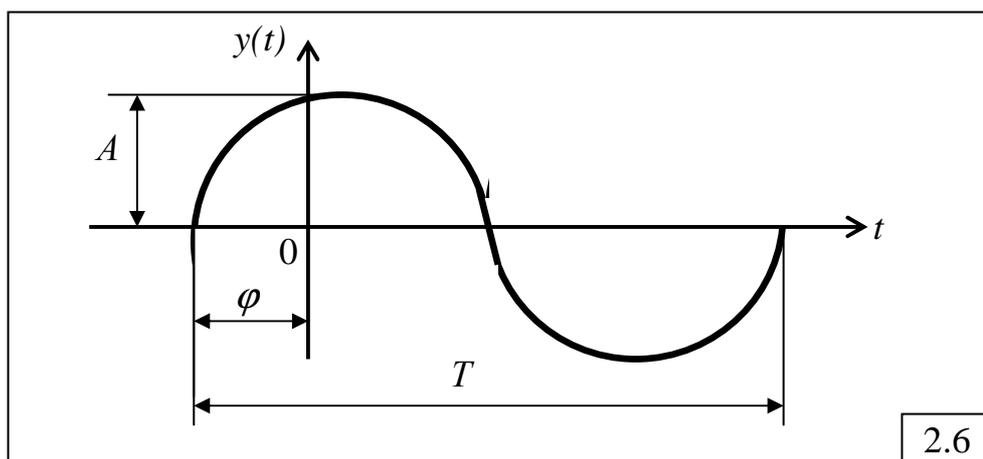
### 2.1.3. Спектр

В простейшем случае *непрерывный сигнал* может быть представлен в виде гармонического колебания (рис.2.6), описываемого синусоидой:

$$y(t) = A \sin(\omega t + \varphi) = A \cos(\omega t + \varphi'),$$

где  $A$  – амплитуда;  $\omega$  – круговая частота:  $\omega = 2\pi f$  (здесь  $f$  – линейная частота:  $f = 1/T$  – величина, обратная периоду  $T$ );  $\varphi, \varphi'$  – начальная фаза,

причем:  $\varphi' = \varphi - \frac{\pi}{2}$ .



Синусоидальный сигнал несет в себе информацию в виде трех параметров: *амплитуды, частоты и фазы*, причем с точки зрения обеспечения высокой скорости передачи данных основной является частота сигнала – чем выше частота, тем больше скорость передачи данных. Среда передачи должна обеспечивать качественный перенос сигнала с минимально возможными искажениями его параметров.

Функция времени  $y(t)$ , описывающая некоторый непрерывный сигнал, в общем случае, может быть произвольной и иметь временные изменения любой скорости – от самых медленных и вплоть до бесконечно быстрых скачкообразных изменений. Тогда широкий класс периодических функций  $y(t)$  может быть представлен *рядом Фурье*:

$$y(t) = \sum_{i=0}^{\infty} A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) = \frac{A_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i),$$

где  $A_i$  – амплитуда;  $\varphi_i$  – начальная фаза;  $\omega_i$  – круговая частота  $i$ -й синусоиды, причем эти синусоиды пронумерованы таким образом, что:  $\omega_0 < \omega_1 < \dots < \omega_{\infty}$ ,  $\omega_0 = 2\pi f_0 = 0$  ( $T_0 = 1/f_0 = \infty$ ) и  $\omega_{\infty} = 2\pi f_{\infty} = \infty$  ( $T_{\infty} = 1/f_{\infty} = 0$ ).

Таких сигналов, обладающих бесконечным спектром, которые содержат синусоиды (гармоники) с частотами в интервале от  $f_0 = 0$  до  $f_{\infty} = \infty$ , в природе практически нет. Преобладающая часть энергии реальных сигналов сосредоточена в ограниченной полосе частот. Такие сигналы и отображающие их функции называются **сигналами**

(функциями) с ограниченным спектром и могут быть представлены в виде конечной суммы синусоидальных сигналов:

$$y(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i).$$

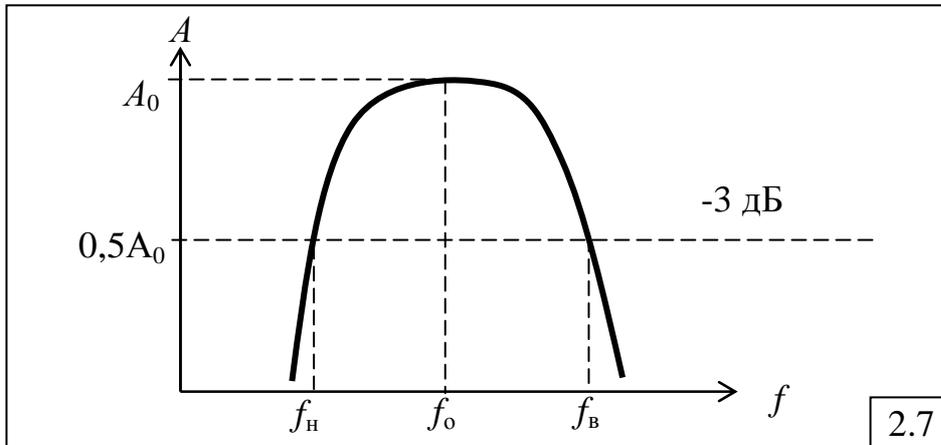
Пусть, как и ранее,  $\omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_n$ , причём  $\omega_1 = 2\pi f_1 > 0$  и  $\omega_n = 2\pi f_n < \infty$ . Тогда:  $S = (f_n - f_1)$  представляет собой **спектр сигнала**  $y(t)$ , где  $f_n$  – верхняя граница частот (верхняя частота);  $f_1$  – нижняя граница частот (нижняя частота).

Для того чтобы передать такой сигнал *без искажений*, канал связи должен иметь *полосу пропускания* шириной не менее  $S$ .

### 2.1.4. Полоса пропускания

**Полосой пропускания (частот)** канала (линии) связи называется диапазон частот, в пределах которого амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) канала достаточно равномерна для того, чтобы обеспечить передачу сигнала без существенного искажения.

**Полоса пропускания  $F$**  для канала (линии) связи определяется как область частот в окрестности  $f_0$ , в которой амплитуда сигнала (напряжение или ток) уменьшается не более чем в  $\sqrt{2} = 1,41$  раз (в 2 раза для мощности) по сравнению с максимальным значением  $A_0$ , что примерно соответствует значению  $-3$  дБ (рис.2.7):  $F = f_e - f_n$ .



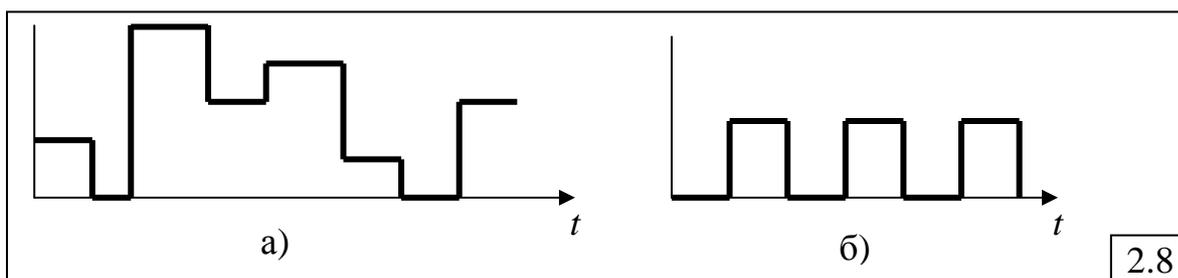
**Дискретные сигналы** (рис.2.8,а) характеризуются бесконечным спектром частот и могут быть представлены в виде бесконечной суммы синусоидальных сигналов:

$$y(t) = \sum_{i=0}^{\infty} A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i).$$

Бесконечную ширину имеет также спектр двоичного сигнала, представляющего собой последовательность чередующихся посылок "0" и "1" (рис.2.8,б).

При проектировании системы передачи данных, в частности, при расчете ее пропускной способности, важно знать *максимальную ширину*

спектра частот передаваемого сигнала, независимо от его структуры (непрерывный, дискретный).



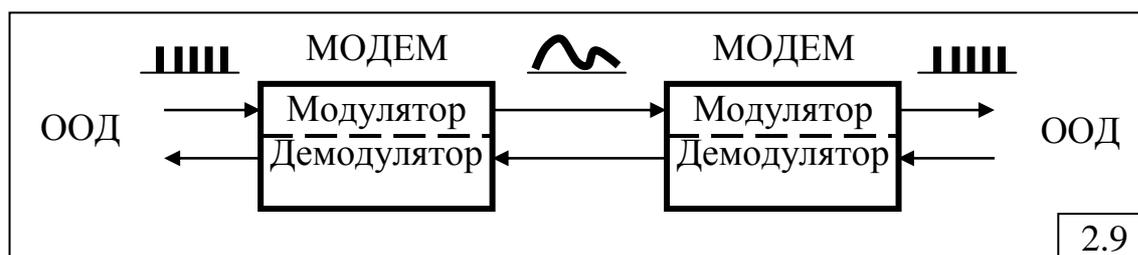
Для качественной передачи сигнала по каналу связи с возможностью его восстановления (распознавания) в точке приёма необходимо, чтобы выполнялись следующие условия:

- *полоса пропускания (частот)*  $F = f_в - f_н$  канала связи должна быть не менее чем *спектр частот* сигнала  $S = f_н - f_1$ :  $[F \geq S]$ ;
- *ослабление (затухание) сигнала* не превышало некоторой пороговой величины, необходимой для его корректного восстановления (распознавания) в точке приема сигнала (**искажение амплитуды сигнала**);
- *дрожание фазы (джиттер)* не превышало пороговой величины, необходимой для его корректного восстановления (распознавания) в точке приема сигнала (**искажение фазы сигнала**).

### 2.1.5. Модуляция

При использовании низкочастотных кабельных каналов связи (например телеграфных), полоса частот которых начинается примерно от нуля, дискретные сигналы можно передавать в их естественном виде – без модуляции (в первичной полосе частот) – с небольшой скоростью 50 – 200 бит/с.

В высокоскоростных каналах связи с резко ограниченной полосой пропускания передача сигналов осуществляется посредством модуляции и демодуляции с помощью специальных устройств, называемых **модемами** (**модулятор-демодулятор**). На рис.2.9 показано применение модемов для преобразования дискретного сигнала, поступающего от оконечного оборудования данных (ООД), представляющего собой, например, компьютер, в непрерывный сигнал, передаваемый по линии связи (**модуляция**), и обратное преобразование непрерывного сигнала в дискретный на приёмном конце (**демодуляция**).



**Модуляция** (modulation) – перенос сигнала в заданную полосу частот путем изменения параметра (амплитуды, частоты, фазы; величины или направления постоянного тока) переносчика сигнала, называемого *несущей*, в соответствии с функцией, отображающей передаваемые данные. Другими словами *модуляция* – это изменение характеристик *несущей* в соответствии с информативным сигналом.

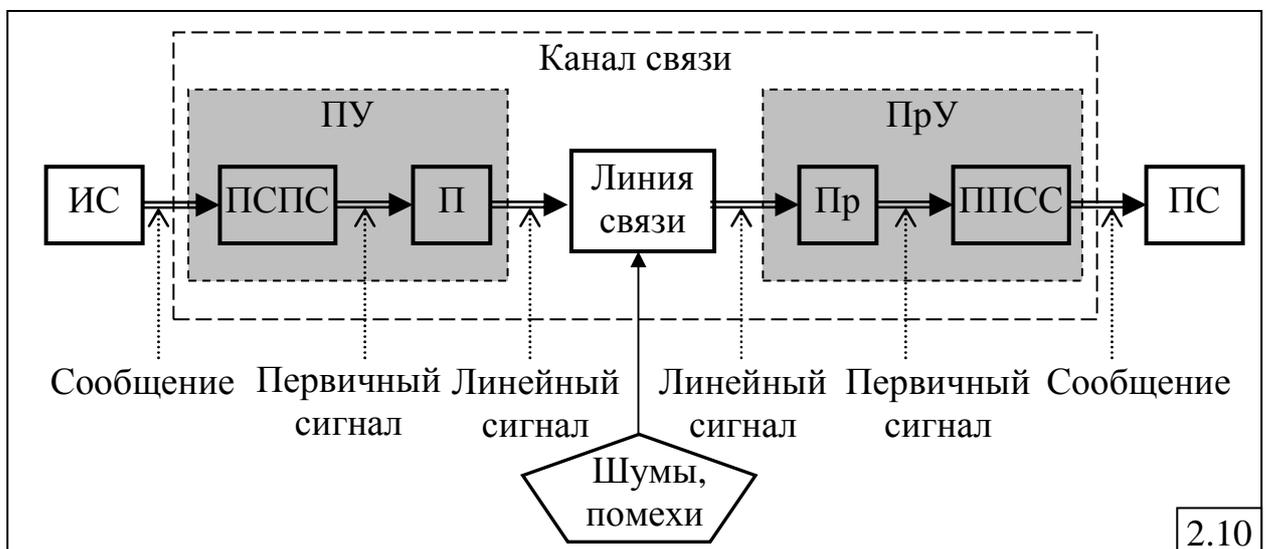
**Несущая** (carrier) – аналоговый высокочастотный сигнал, подвергаемый модуляции в соответствии с некоторым информативным сигналом. Несущая, как правило, имеет *меньшие показатели затухания и искажения*, чем немодулированный информативный сигнал.

## 2.2. Система связи

**Система связи** – совокупность среды передачи (канала связи), *оконечного оборудования* (терминальное устройство) источника и получателя данных (сообщения), характеризующаяся определенными способами преобразования передаваемого сообщения в сигнал и восстановления сообщения по принятому сигналу.

Система связи в общем случае включает в себя (рис.2.10):

- источник сообщения (ИС);
- передающее устройство (ПУ), включающее в себя:
  - преобразователь сообщения в первичный сигнал (ПСПС), реализующий кодирование;
  - передатчик (П), преобразующий первичный сигнал в линейный сигнал для передачи по линии связи (модуляция);
- приемное устройство (ПрУ), включающее в себя:
  - приемник (Пр), преобразующий линейный сигнал, поступающий из линии связи, в первичный сигнал (демодуляция);
  - преобразователь первичного сигнала в сообщение (ППСС), реализующий декодирование;
- получатель сообщения (ПС).



На линию связи воздействуют внутренние шумы и внешние помехи, искажающие передаваемые сигналы. Способность системы противостоять вредному воздействию помех называется **помехоустойчивостью**.

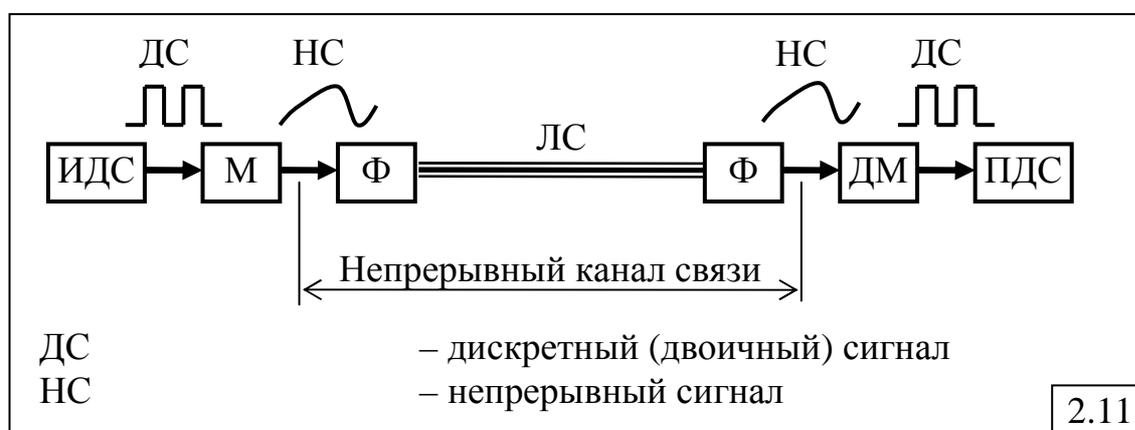
Линия связи может содержать усилители и регенераторы. **Усилитель**, обычно используемый в *аналоговых* системах связи, просто усиливает сигнал вместе с помехами и передаёт дальше. **Регенератор** («переприёмник»), используемый в *цифровых* системах связи, восстанавливает сигнал без помех и заново формирует линейный сигнал.

Конкретная структура системы связи зависит от вида передаваемых данных. Для передачи дискретных данных, представленных в двоичном виде, используются *двоичные системы связи* как с непрерывными (аналоговыми), так и с дискретными (цифровыми) каналами связи.

### 2.2.1. Системы связи на основе непрерывного канала

Каноническая схема системы связи на основе *непрерывного (аналогового) канала связи* для передачи двоичных сигналов, представленная на рис.2.11, содержит:

- источник двоичных сигналов (ИДС);
- модулятор (М);
- фильтры (Ф);
- демодулятор (ДМ);
- приёмник двоичных сигналов (ПДС).



**Фильтры** выполняют функции корректирующих устройств, обеспечивая требуемые динамические или частотные свойства передаваемого сигнала:

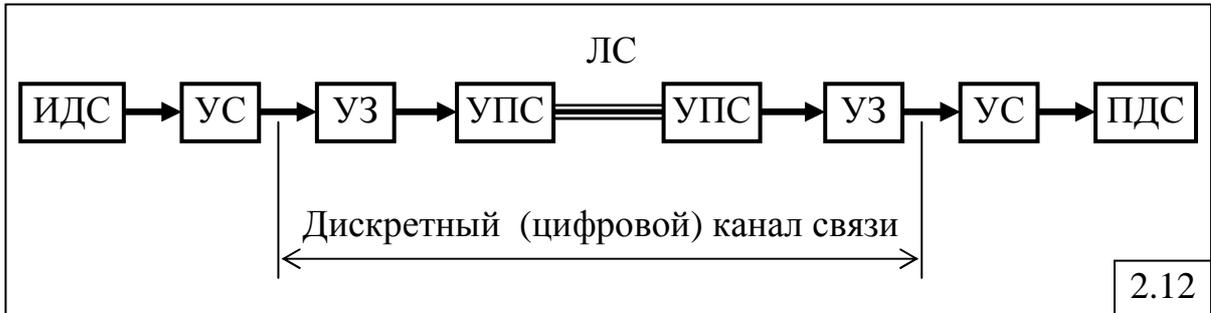
- *при передаче* – преобразование сигнала, передаваемого в ЛС, таким образом, чтобы он обладал определенными свойствами;
- *при приеме* – выделение полезного сигнала на фоне помех.

Примером непрерывно канала связи может служить телефонный канал, называемый *каналом тональной частоты (ТЧ)*, с полосой пропускания 3100 Гц. Строгое ограничение полосы пропускания канала ТЧ связано с использованием аппаратуры уплотнения и коммутации каналов в телефонных сетях и реализуется с помощью фильтров, отсекающих частоты менее  $f_n=300$  Гц и более  $f_v=3400$  Гц.

### 2.2.2. Системы связи на основе дискретного канала

Каноническая схема системы связи на основе *дискретного (цифрового) канала связи*, представленная на рис.2.12, содержит:

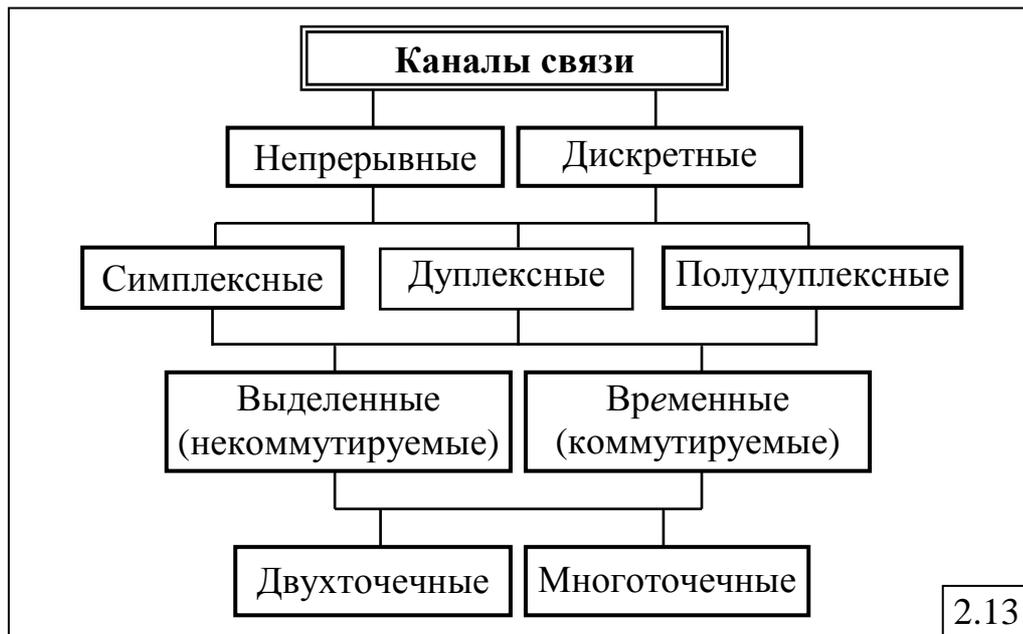
- устройство сопряжения с каналом связи (УС);
- устройство защиты от ошибок (УЗО);
- устройство преобразования сигналов (УПС).



2.12

### 2.2.3. Классификация каналов связи

Классификация каналов связи представлена на рис.2.13.



2.13

В зависимости от типа передаваемых данных каналы связи делятся на **непрерывные**, предназначенные для передачи непрерывных (аналоговых) сигналов, и **дискретные**, предназначенные для передачи дискретных (цифровых) сигналов.

В зависимости от направления передачи данных различают каналы связи:

- **симплексные**, в которых данные передаются только *в одном направлении*;
- **дуплексные**, представляющие собой два симплексных канала, в которых данные могут передаваться *в один и тот же момент времени* в двух направлениях – прямом и обратном;

• **полудуплексные**, в которых данные могут передаваться *поочерёдно* в прямом и обратном направлении.

Каналы связи могут быть всегда доступны для передачи данных за счёт постоянно существующего соединения между абонентами. Такие каналы называются **выделенными** или **некоммутируемыми**. Альтернативой им являются **коммутируемые** или **временные** каналы связи, передача данных по которым возможна только после установления соединения между абонентами, причём канал существует только в течение времени передачи данных (сеанса связи).

**Двухточечный** канал связи строится по принципу «точка-точка», то есть связывает только двух абонентов. **Многоточечный** канал связи строится по принципу «точка-многоточка» и обеспечивает передачу данных от одного абонента к нескольким абонентам, например так, как это происходит при конференцсвязи.

#### 2.2.4. Характеристики каналов связи

В качестве основных *характеристик каналов связи* используются следующие величины.

1. **Скорость модуляции** [бод] – число интервалов модуляции передаваемого сигнала в секунду (число переключений, сделанных за секунду); величина, обратная единичному интервалу:  $B = 1/T$ .

2. **Пропускная способность канала связи** [бит/с или bps – bits per second] – *предельная скорость* передачи данных – количество данных, которое может быть передано по каналу связи за единицу времени.

Предельная пропускная способность **непрерывного (аналогового) КС** зависит от *полосы пропускания*  $F = f_b - f_n$  и *SNR (Signal-to-Noise Ratio)* – отношения мощности сигнала  $P_c$  к мощности шума (помех)  $P_{ш}$  и может быть рассчитана по формуле Шеннона:

$$C = F \log_2 \left( 1 + \frac{P_c}{P_{ш}} \right).$$

Как следует из формулы Шеннона, пропускная способность канала связи может быть повышена за счёт увеличения полосы пропускания  $F$  или увеличения отношения сигнал/шум, причём более эффективным является первый способ, поскольку логарифмическая зависимость пропускной способности  $C$  от отношения  $P_c/P_{ш}$  делает второй способ менее эффективным и более трудоёмким.

При передаче данных по телефонному каналу с полосой пропускания  $F=3,1$  кГц ( $f_n=0,3$  кГц;  $f_b=3,4$  кГц) с использованием *модемов* основной способ повышения пропускной способности состоит в увеличении отношения сигнал/шум. С учётом того, что максимальное значение SNR в аналоговом телефонном канале составляет примерно 3000, получим предельную пропускную способность  $C$  около 34 кбит/с, что согласуется со стандартным значением 33600 бит/с. Более высокие скорости передачи могут быть обеспечены только при условии передачи данных по

цифровым телефонным линиям связи, причём на пути передачи должны находиться только цифровые телефонные станции.

Пропускная способность **дискретного КС**, построенного на основе непрерывного канала, *без учета шума на линии* может быть вычислена по формуле Найквиста:

$$C = \frac{1}{T} \log_2 n_c = 2F \log_2 n_c = B \log_2 n_c ,$$

где  $T = \frac{1}{2F}$  – длительность единичного интервала;  $n_c$  – число значащих позиций в коде (количество различных состояний информационного параметра).

Реальная **скорость передачи** по каналу связи, измеряемая как количество данных, передаваемое за единицу времени (бит/с), обычно меньше пропускной способности и зависит от параметров каналообразующей аппаратуры и способа организации передачи данных.

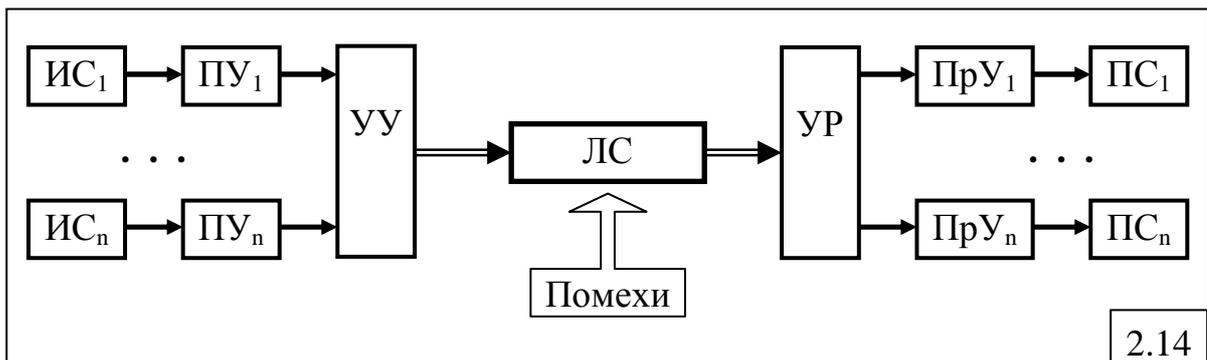
3. **Достоверность передачи данных** – вероятность искажения бита из-за воздействия помех и наличия шумов в канале связи (обычно для КС без дополнительных средств защиты составляет от  $10^{-4}$  до  $10^{-6}$ ); иногда используется единица измерения BER (Bit Error Rate) – *интенсивность битовых ошибок*.

### 2.2.5. Многоканальные системы связи

Системы связи, в которых по одной линии связи осуществляется одновременная независимая передача сигналов между несколькими парами абонентов, называются **многоканальными**.

Использование общей линии для осуществления многоканальной связи называется **уплотнением** линии, а соответствующие технические средства – **аппаратурой уплотнения**.

Схема многоканальной системы связи приведена на рис.2.14 где основными устройствами являются: устройство уплотнения (УУ), объединяющее в единый поток поступающие от передающих устройств (ПУ) сообщения, формируемые источниками сообщений (ИС), и устройство разделения (УР), выделяющее из единого потока данных сообщения, поступающие в приемные устройства (ПрУ) и предназначенные соответствующим получателям сообщений (ПС).



Традиционные методы уплотнения (мультиплексирования, разделения) каналов:

1) **частотный** – предоставление каждой паре взаимодействующих абонентов в разных частотных диапазонах определенной полосы пропускания, достаточной для передачи данных;

2) **временной** – поочередное подключение в разных временных интервалах взаимодействующих абонентов к общей линии связи.

Таким образом, в одной ЛС может быть организовано несколько КС. В этом случае ЛС можно рассматривать как совокупность технических средств для передачи сигналов, а КС – как долю ресурсов ЛС с соответствующей каналообразующей аппаратурой (аппаратурой уплотнения), предоставляемых одной паре взаимодействующих абонентов для передачи данных.

### 2.2.6. Методы мультиплексирования

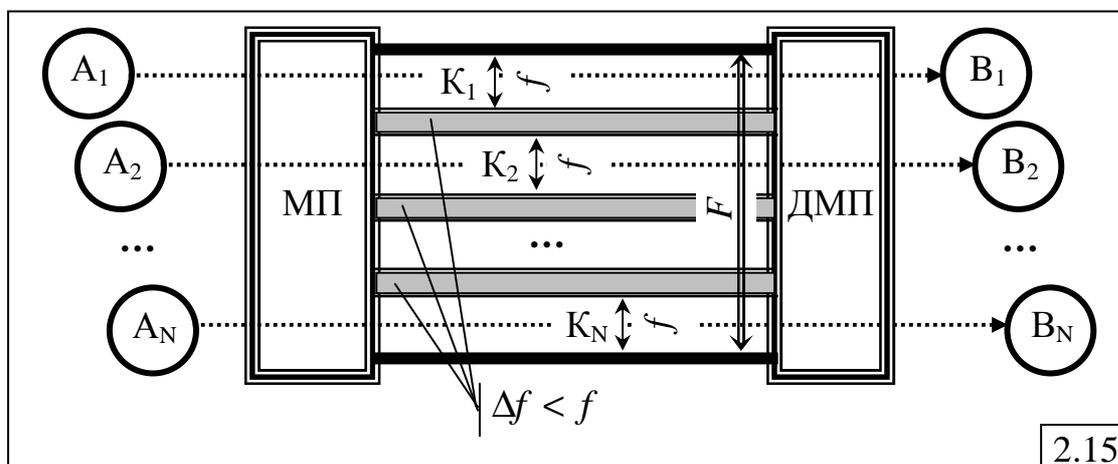
**Мультиплексирование** - технология разделения среды передачи данных между несколькими парами пользователей. В результате мультиплексирования в одном физическом канале создается группа логических каналов.

В компьютерных сетях используются следующие методы мультиплексирования:

- частотное мультиплексирование;
- временное мультиплексирование;
- волновое мультиплексирование.

#### 2.2.6.1. Частотное мультиплексирование

**Частотное мультиплексирование** (Frequency Division Multiplexing – FDM) состоит в формировании в пределах полосы пропускания  $F$  физического канала (линии связи) нескольких логических каналов  $K_1, K_2, \dots, K_N$ , связывающих соответственно пользователей  $A_1-B_1, A_2-B_2, \dots, A_N-B_N$ . Каждый такой логический канал занимает полосу  $f \ll F$  (рис.2.15).



2.15

Для исключения влияния друг на друга сигналов, передаваемых по соседним логическим каналам, между ними формируется частотный промежуток  $\Delta f < f$ , служащий границей между каналами.

Примерами частотного мультиплексирования могут служить радиовещание и сотовая связь.

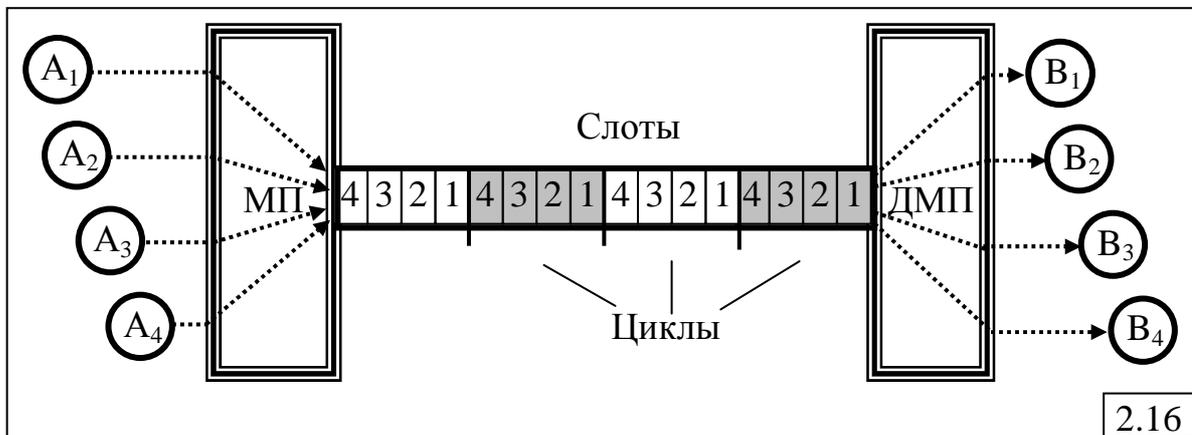
### 2.2.6.2. Временное мультиплексирование

**Временное мультиплексирование** (Time Division Multiplexing – TDM) заключается в поочерёдном предоставлении взаимодействующим пользователям на небольшой промежуток времени, называемый **временным слотом**, всей пропускной способности канала.

В качестве такого временного слота может служить интервал времени, необходимый для передачи одного байта, кадра или пакета.

Временное мультиплексирование появилось и разрабатывалось для цифровых сетей связи.

На рис.2.16 иллюстрируется временное мультиплексирование, обеспечивающее параллельную передачу данных между четырьмя парами пользователей:  $A_1-B_1$ ,  $A_2-B_2$ ,  $A_3-B_3$ ,  $A_4-B_4$ . Для передачи одного байта каждой паре пользователей в строго определённой последовательности предоставляется временной слот: слот 1 для передачи байта от  $A_1$  к  $B_1$ , слот 2 – от  $A_2$  к  $B_2$ , слот 3 – от  $A_3$  к  $B_3$ , слот 4 – от  $A_4$  к  $B_4$ . Четыре таких слота, содержащие по одному байту для каждой пары пользователей, образуют **цикл**. Циклы последовательно повторяются до тех пор, пока не закончится передача данных. Если в цикле отсутствуют данные для передачи от пользователя  $A_i$ , то соответствующий слот  $i$  остаётся пустым и не может быть занят другим пользователем. Это необходимо для того, чтобы на приёмной стороне демультиплексор (ДМП) мог корректно разделять поступающий поток байтов по номеру слота и направлять каждый байт именно тому пользователю, которому он предназначен. Рассмотренный метод временного мультиплексирования называется **статическим** или **синхронным**, поскольку каждый байт от пользователей  $A_1, A_2, A_3, A_4$  занимает строго определённый слот в каждом цикле.



Очевидно, что *недостатком* синхронного мультиплексирования является снижение реальной пропускной способности канала связи в тех

случаях, когда в пределах цикла не все временные слоты заняты, причём чем больше слотов не занято, тем ниже реальная пропускная способность канала.

Альтернативой синхронному временному мультиплексированию служит *статистическое* или *асинхронное* мультиплексирование, отличающееся тем, что слоты не привязаны строго к конкретной паре пользователей. Это означает, что при отсутствии данных для передачи у какого-то пользователя, очередной слот не остаётся пустым, а предоставляется другому пользователю. Таким образом, за счёт сокращения простоев реальная пропускная способность канала связи оказывается выше, чем при синхронном мультиплексировании.

Для того чтобы на приёмной стороне ДМП мог направить поступившие в очередном слоте данные именно тому пользователю, которому они предназначены, необходимо, чтобы эти данные имели некоторый идентификатор (например, адрес), определяющий конкретного пользователя-получателя. Это означает, что такой метод временного мультиплексирования, используемый например в АТМ-сетях, предполагает в качестве содержимого слота не байт, а некоторый блок данных, называемый в АТМ-сетях *ячейкой* и содержащий идентификаторы отправителя и получателя.

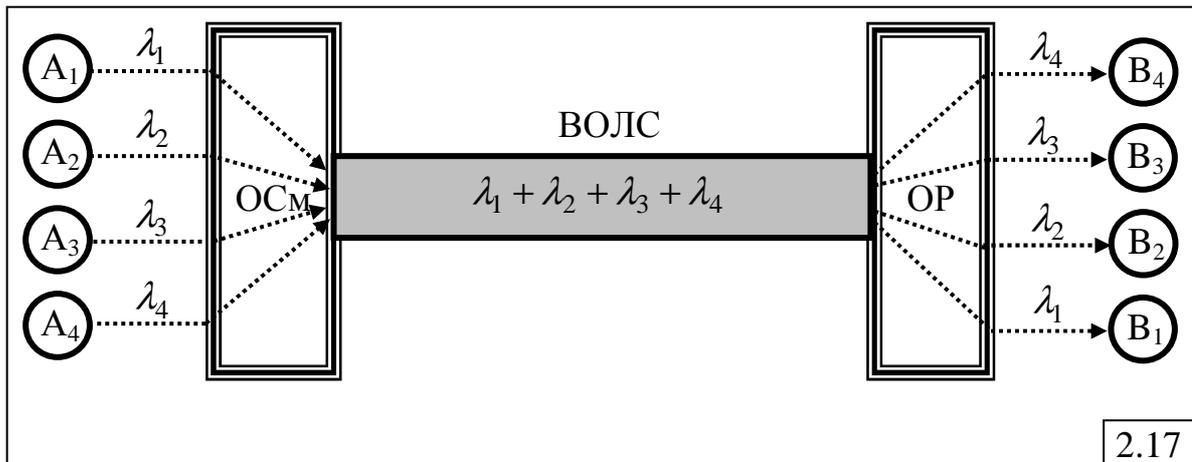
### 2.2.6.3. Волновое мультиплексирование

*Волновое мультиплексирование* (Wavelength Division Multiplexing – WDM), называемое также *спектральным уплотнением*, используется в волоконно-оптических линиях связи. По своей сути, волновое мультиплексирование представляет собой частотное уплотнение на очень высоких частотах (сотни ТГц).

На рис.2.17 показана передача данных по волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) от четырёх пользователей  $A_1, A_2, A_3, A_4$  к пользователям  $B_1, B_2, B_3, B_4$  соответственно. Для одновременной передачи по одной и той же линии связи используются разные длины волн:  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  или, что то же самое, разные частоты светового диапазона. На передающей стороне оптические лучи объединяются с помощью оптического сумматора (ОСм) в единый световой поток  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4$ . На приёмной стороне оптический разделитель (ОР) выделяет оптические сигналы по известной длине волны и направляет их соответствующим пользователям.

Технология WDM появилась в начале 90-х годов прошлого века. Первые реализации позволяли передавать одновременно данные по 8 спектральным каналам со скоростью 2,5 Гбит/с по каждому каналу. Затем появились реализации, содержащие 16, 32, 40 и более спектральных каналов со скоростями 10 Гбит/с по каждому каналу. Увеличение числа логических каналов привело к появлению оптических магистралей нового поколения, построенных по технологии *уплотнённого волнового*

**мультиплексирования** – DWDM (Dense WDM), отличающегося от WDM значительно меньшим расстоянием между длинами волн.



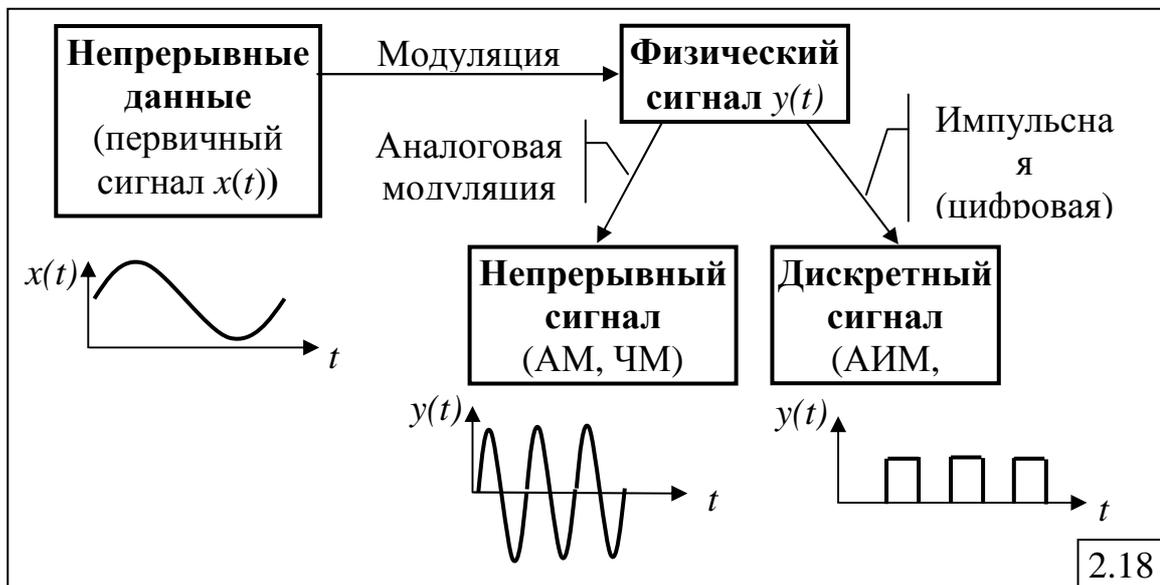
### 2.3. Методы модуляции и кодирования данных

Передача данных осуществляется в виде физических сигналов различной природы (электрические, оптические, радиоволны) в зависимости от среды передачи. Для обеспечения качественной передачи используются различные способы преобразования данных, представляемых в виде непрерывных или дискретных *первичных* сигналов, в *линейные* физические сигналы (непрерывные или дискретные), передаваемые по линии связи.

Процесс преобразования *непрерывных сигналов* и их представление в виде физических сигналов для качественной передачи по каналам связи называется **модуляцией**.

Модуляция может осуществляться (рис.2.18):

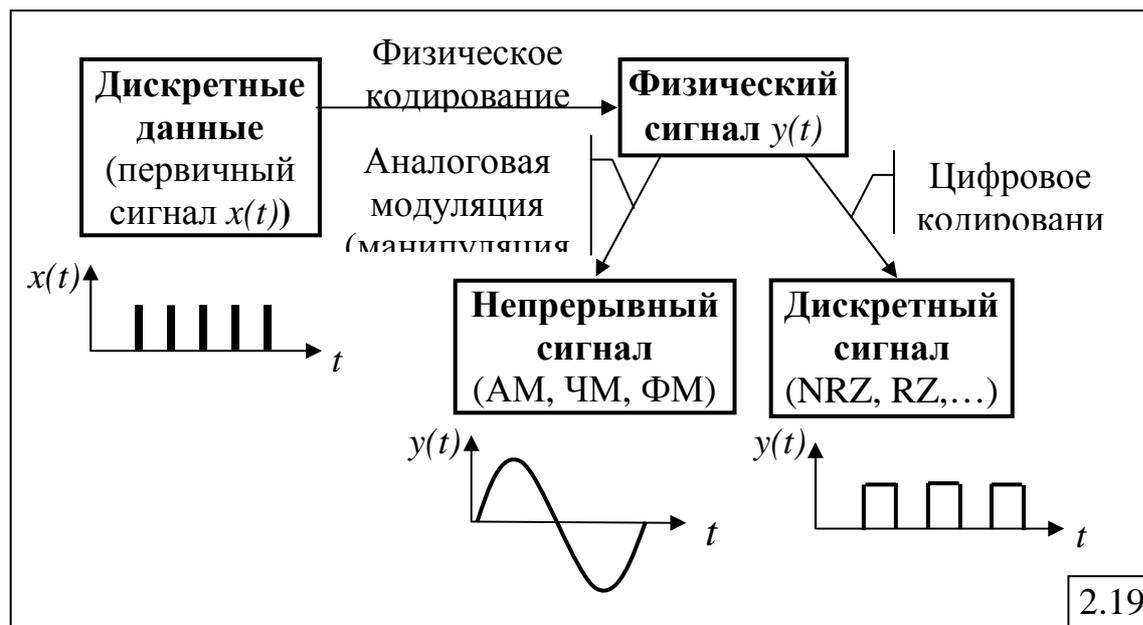
- на основе *непрерывного* (аналогового) высокочастотного синусоидального сигнала, называемого *несущей* (**аналоговая модуляция**);
- на основе *дискретного* (цифрового) сигнала в виде импульсов (**импульсная** или **цифровая модуляция**).



Процесс преобразования дискретных данных, представляемых дискретными *первичными* сигналами, в физические *линейные* сигналы (непрерывные или дискретные), передаваемые по каналу (линии) связи, называется **физическим кодированием**.

Основные типы физического кодирования (рис.2.19):

- на основе *непрерывного* (аналогового) синусоидального несущего сигнала (**манипуляция**);
- на основе последовательности прямоугольных импульсов (**цифровое кодирование**).



### 2.3.1. Методы модуляции непрерывных данных

#### 2.3.1.1. Аналоговая модуляция

**Аналоговая модуляция** – преобразование непрерывного низкочастотного сигнала  $x(t)$  (рис.2.20,а) в непрерывный высокочастотный сигнал  $y(t)$ , называемый *несущей* и обладающий более высокими характеристиками в отношении дальности передачи и затухания. Аналоговая модуляция может быть реализована двумя способами:

1) **амплитудная модуляция**, при которой амплитуда высокочастотного сигнала  $y(t)$  изменяется в соответствии с исходной функцией  $x(t)$  так, как это показано на рис.2.20,б: огибающая амплитуды несущей повторяет форму исходной функции  $x(t)$ ;

2) **частотная модуляция** (рис.2.20,в), при которой в соответствии с исходной функцией  $x(t)$  изменяется частота несущей – чем больше значение  $x(t)$ , тем больше частота несущей  $y(t)$ .

Аналоговая модуляция используется в радиовещании при работе множества радиостанций в одной общей среде передачи (радиоэфире): *амплитудная модуляция* для работы радиостанций в АМ-диапазоне

(Amplitude Modulation) и *частотная модуляция* для работы радиостанций в FM-диапазоне (Frequency Modulation).

### 2.3.1.2. Импульсная модуляция

Использование цифровых каналов связи для передачи телефонных данных (речевого сигнала) в начале 60-х годов прошлого века потребовало разработки методов преобразования непрерывных сигналов в дискретные, таких как:

- 1) амплитудно-импульсная модуляция;
- 2) импульсно-кодовая модуляция.

#### *Амплитудно-импульсная модуляция*

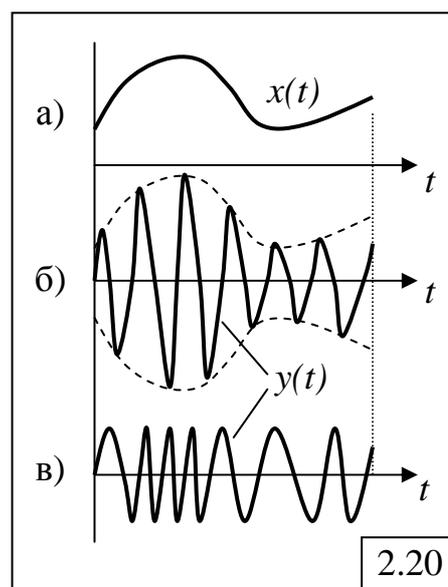
(АИМ) (Pulse Amplitude Modulation – PAM) заключается в преобразовании непрерывного сигнала в совокупность дискретных сигналов (*импульсов*) с определенной *амплитудой*. Для этого исходная непрерывная функция  $x(t)$  подвергается дискретизации (квантуется) по времени так, как это показано на рис.2.21,а. Частота дискретизации по времени определяется в соответствии с *теоремой Котельникова*, которая гласит, что для восстановления без потерь непрерывного сигнала, представленного в дискретном виде, частота дискретизации  $F_d$  должна удовлетворять условию:  $F_d > 2f_v$ , где  $f_v$  – верхняя частота передаваемого сигнала  $x(t)$ . В полученные таким образом дискретные моменты времени передаются импульсы  $y(t)$ , амплитуда которых *пропорциональна* значениям функции  $x(t)$  в эти же моменты времени (рис.2.21,б).

Существенным недостатком АИМ при передаче оцифрованных данных по каналу связи является сложность корректного восстановления функции  $x(t)$  на приёмном конце, что обусловлено непропорциональным изменением (затуханием) амплитуд разных импульсов  $y(t)$  в процессе передачи по каналу связи. В связи с этим, более широкое распространение получил другой метод передачи непрерывных данных в дискретном виде – импульсно-кодовая модуляция.

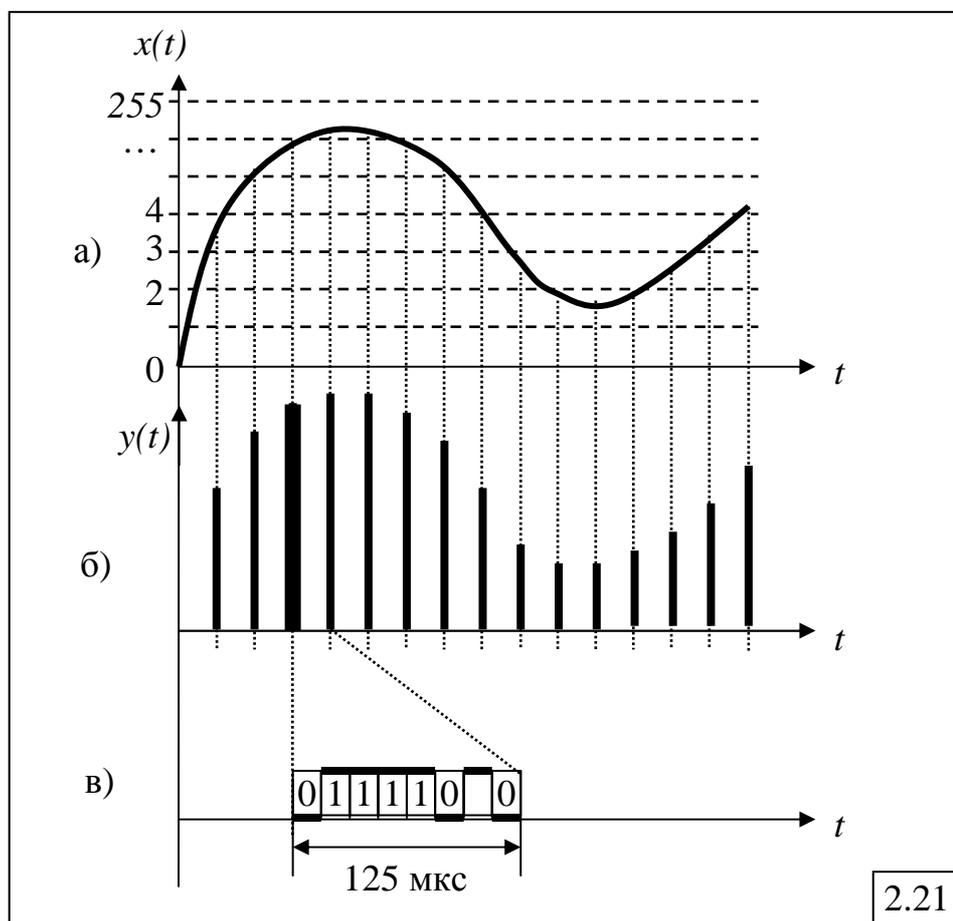
*Импульсно-кодовая модуляция (ИКМ)* (Pulse Code Modulation – PCM) – метод модуляции, при котором аналоговый сигнал кодируется сериями импульсов, представляющими собой *цифровые коды* амплитуд в точках отсчета аналогового сигнала.

Для этого исходный сигнал подвергается дискретизации (квантуется) по двум координатам:

- по оси абсцисс – дискретизация по времени;
- по оси ординат – дискретизация по уровню.
- Дискретизация по времени, как и в случае АИМ, выполняется в соответствии с теоремой Котельникова. Поскольку ИКМ первоначально разрабатывалась для передачи телефонных данных (голоса) по



телефонным каналам, имеющим резко ограниченную полосу пропускания в интервале от 300 Гц до 3400 Гц, то в соответствии с теоремой Котельникова частота дискретизации должна быть больше, чем 6800 Гц. Стандартом была рекомендована частота дискретизации 8000 Гц. Таким образом, амплитуда аналогового сигнала измеряется 8000 раз в секунду, то есть каждые 125 мкс.



Кроме того, было установлено, что для качественного восстановления аналогового сигнала (голоса) достаточно иметь 256 уровней дискретизации (рис.2.21,а), что позволяет передавать в каждый момент времени значение амплитуды (номер уровня) сигнала с помощью 8-разрядного цифрового кода (8 битов), как это показано на рис.2.21,в.

Таким образом, *результурующий дискретный поток данных передается со скоростью*  $8000 \text{ [раз в секунду]} * 8 \text{ [бит]} = 64\,000 \text{ бит/с}$ , то есть для передачи оцифрованного голоса требуется канал связи с пропускной способностью 64 кбит/с.

Для уменьшения требуемой для передачи оцифрованного голоса пропускной способности канала связи применяется модифицированный метод ИКМ, стандартизованный комитетом ИТУ-Т (стандарт G.726) – **адаптивная дифференциальная импульсно-кодовая модуляция** (АДИКМ, Adaptive Differential Pulse Code Modulation – ADPCM).

Термин «дифференциальная (разностная)» означает, что по каналу связи передаётся не значение амплитуды, а *разность* между текущим

значением непрерывного сигнала в точке квантования и предыдущим. Поскольку скорость изменения исходного аналогового сигнала меньше частоты квантования, то вероятность большого различия между соседними амплитудами чрезвычайно мала, и для кодирования этой разности достаточно 4-х бит, позволяющих закодировать эту разность в интервале от 0 до 15. Тогда при условии, что частота квантования по времени составляет 8000 раз в секунду, получим скорость передачи  $8000 \cdot 4 = 32$  кбит/с, что вдвое меньше стандартной скорости ИКМ.

Более сложным вариантом дифференциальной импульсно-кодовой модуляции является *кодирование с предсказанием*, при котором кодируется и передаётся разница между реальным и предсказанным на основе нескольких предыдущих отсчётов значением сигнала. Это позволяет ещё больше уменьшить количество битов для кодирования одного замера сигнала и, следовательно, уменьшить требование к пропускной способности канала связи. Стандарт G.726 допускает использование 5-и, 3-х и 2-х битов для кодирования одного замера сигнала, что позволяет получить скорости передачи (*битрейты*) 40, 24 и 16 кбит/с.

Адаптивность модуляции заключается в динамической подстройке шага квантования разницы по предыдущим значениям.

### 2.3.2. Методы модуляции дискретных данных

Процесс представления дискретных (цифровых) данных в виде непрерывного высокочастотного синусоидального сигнала (несущей) по своей сути является аналоговой модуляцией дискретных данных. Однако, для того чтобы его отличать от аналоговой модуляции непрерывных данных, такое преобразование часто называют **манипуляцией**.

Манипуляция применяется для передачи дискретных данных (сигналов) в виде непрерывных сигналов по каналам с узкой полосой частот, например по телефонным каналам, имеющим ограниченную полосу пропускания в 3100 Гц, и реализуется с помощью модемов.

Компьютерные данные – двоичные «1» и «0» – обычно изображаются в виде потенциалов соответственно высокого и низкого уровней (рис.2.22,а). Такой метод представления двоичных данных является наиболее естественным и простым и называется **потенциальным кодированием**.

Время, затрачиваемое на передачу одного бита («1» или «0»), называется **битовым интервалом**. Длительность  $t_b$  битового интервала связана с пропускной способностью канала связи  $C$  (скоростью передачи) зависимостью:  $t_b = 1/C$ .

При потенциальном кодировании *скорость модуляции*  $V$  численно совпадает с *пропускной способностью* канала:  $V$  [бод] =  $C$  [бит/с].

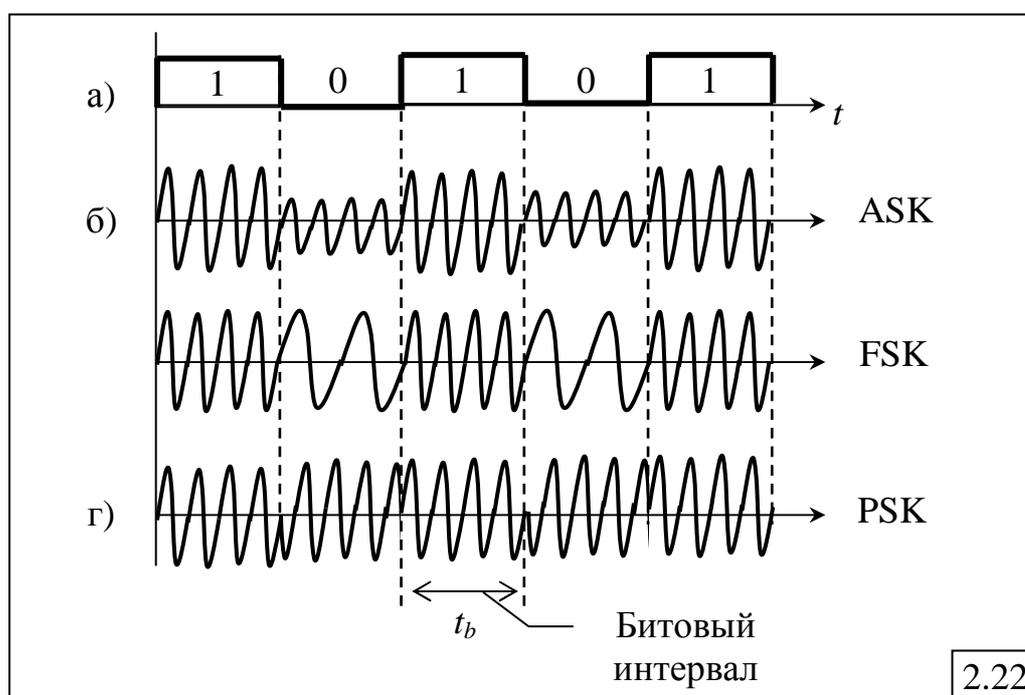
Например, для канала связи с пропускной способностью =10 Мбит/с длительность битового интервала = 100 нс, а скорость модуляции =10 Мбод.

Для передачи двоичных данных могут использоваться следующие методы манипуляции:

- **амплитудная манипуляция** (Amplitude Shift Keying, ASK): для представления «1» и «0» используются разные уровни амплитуды высокочастотной несущей (рис.2.22,б); из-за низкой помехоустойчивости этот метод обычно применяется в сочетании с другими методами, например с фазовой манипуляцией;

- **частотная манипуляция** (Frequency Shift Keying, FSK): значения «0» и «1» передаются синусоидами с различной частотой (рис.2.22,в); этот метод прост в реализации и обычно применяется в низкоскоростных модемах;

- **фазовая манипуляция** (Phase Shift Keying, PSK): значениям «0» и «1» соответствуют синусоиды одинаковой частоты и с одинаковой амплитудой, но с различной фазой, например 0 и 180 градусов (рис.2.22,г).



На практике обычно используются комбинированные методы модуляции, обеспечивающие более высокие скорости передачи и лучшую помехозащищённость. Например, метод *квадратурной амплитудной модуляции* (*Quadrature Amplitude Modulation, QAM*) основан на сочетании фазовой модуляции с 8 значениями величин сдвига фазы и амплитудной модуляции с 4 уровнями амплитуды. Распознавание ошибок при передаче осуществляется за счёт избыточности кодирования, заключающейся в использовании не всех 32-х возможных комбинаций сигнала.

### 2.3.3. Цифровое кодирование

При цифровом кодировании дискретных данных применяются потенциальные и импульсные коды. В потенциальных кодах для представления двоичных единиц и нулей используются разные значения

потенциала сигнала, а в импульсных кодах – импульсы разной полярности или же перепады потенциала в разном направлении.

### **2.3.3.1. Особенности передачи цифровых сигналов**

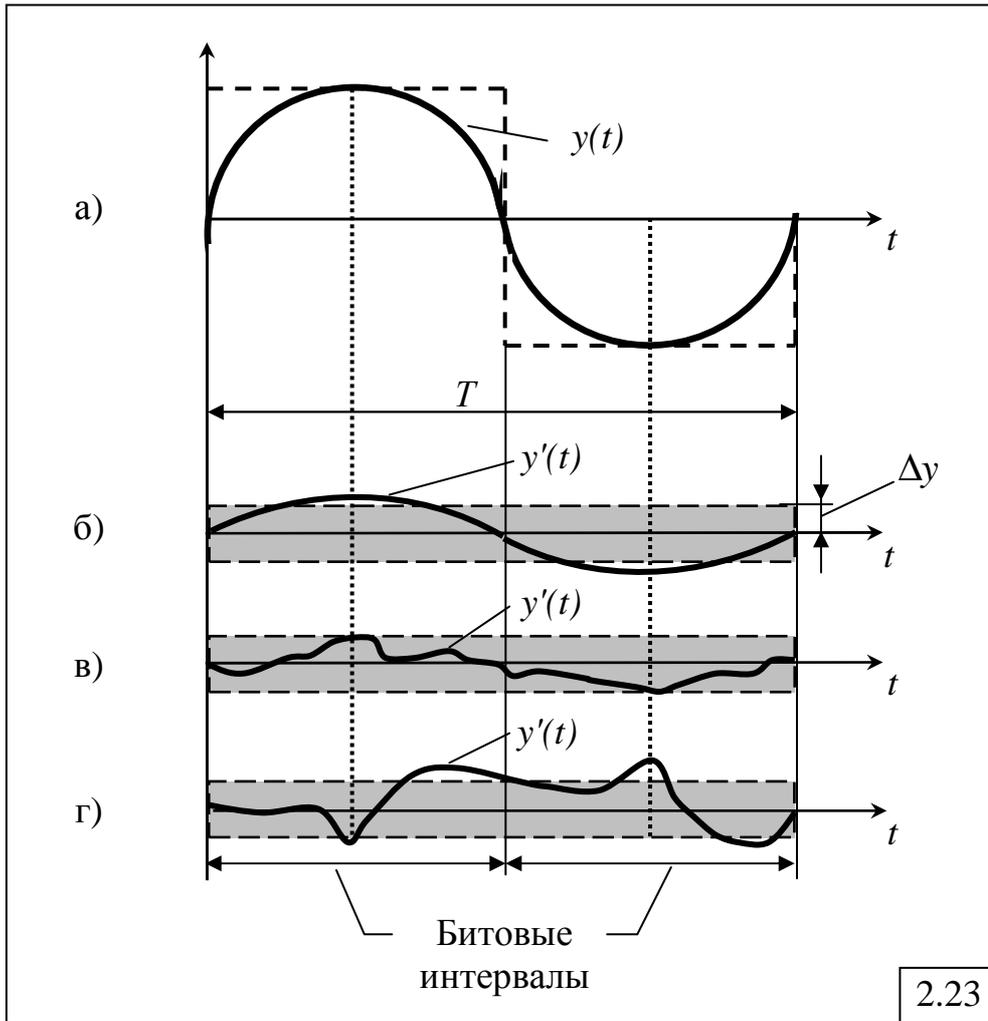
Для того чтобы разобраться в проблемах, возникающих при передаче цифровых данных на большие расстояния, рассмотрим, каким изменениям подвержен сигнал в процессе передачи по каналу связи.

В простейшем случае двоичные данные могут быть представлены в виде синусоидального сигнала, в котором положительная часть синусоиды соответствует двоичной «1», а отрицательная – «0» (рис.2.23,а). Частота

такого сигнала определяется величиной битового интервала  $t_b$ :  $f_0 = \frac{1}{2t_b}$ , связанного с пропускной способностью канала  $C$  зависимостью  $t_b = 1/C$ , откуда:  $f_0 = C/2$ .

Передача сигнала на большие расстояния связана со следующими особенностями.

Как известно, сигнал в процессе передачи по каналу связи затухает, его мощность в точке приёма оказывается значительно меньше мощности исходного информативного сигнала (рис.2.23,б). В любом реальном канале связи имеются внутренние шумы, обусловленные техническими характеристиками среды передачи (линии связи) и каналобразующей аппаратуры. Эти шумы приводят к появлению некоторого фонового сигнала, налагающегося на информативный сигнал. Для того чтобы шум в канале связи не воспринимался на приёмной стороне как информативный сигнал, в приёмнике обычно устанавливается некоторое предельное значение уровня сигнала  $\Delta_u$ , которое рассматривается как уровень естественного шума и не воспринимается как информативный сигнал. Если мощность информативного сигнала в точке приёма меньше  $\Delta_u$ , то он будет не различим и, следовательно, потерян. Очевидно, что на приёмной стороне наибольшую мощность синусоидальный сигнал сохраняет в центре битового интервала. Следовательно, для того чтобы с уверенностью распознать его значение, желательно снимать отсчёт в центре битового интервала. Для этого в передающем и принимающем узле необходимо иметь высокоточные часы (таймеры), с помощью которых определяются: в передатчике – моменты формирования сигналов, в приёмнике – моменты снятия значения информативного сигнала в центре битового интервала. Очевидно, что для качественного распознавания сигналов на приёмной стороне, необходимо, чтобы часы передатчика и приёмника работали синхронно. Однако известно, что все часы имеют некоторую погрешность, которая с течением времени приводит к различию в показаниях двух разных часов, находящихся в узле-передатчике и узле-приёмнике, причём это различие со временем растёт. Всё это может привести к тому, что на приёмной стороне некоторые биты могут быть не считаны (пропущены), либо значения некоторых битов будут считаны дважды.



Покажем это на следующих примерах.

**Пример 1.** Пусть длительность битового интервала  $t_b = 100$  нс, что соответствует пропускной способности канала связи  $C = 10$  Мбит/с. Положим, что часы приёмника за один битовый интервал *отстают* от часов передатчика на 2 нс. Это означает, что в каждом следующем битовом интервале значение очередного бита будет считано на 2 нс позже по отношению к моменту считывания значения предыдущего интервала, как это показано на рис.2.24.



Здесь предполагается, что в начальный момент времени «0» часы передатчика и приёмника синхронизированы, поэтому считывание значения первого битового интервала произойдёт на 51-й наносекунде,

поскольку за первые 50 нс часы приёмника отстанут только на 1 нс. Моменты считывания значений битов отмечены стрелками, а их значения указаны относительно начала очередного битового интервала. Как видно из рисунка, при отсутствии синхронизации часов передатчика и приёмника не будет считано значение 26-го битового интервала.

**Пример 2.** Положим теперь, что при той же длительности битового интервала в 100 нс часы приёмника за один битовый интервал *опережают* часы передатчика на 2 нс. Это означает, что в каждом следующем битовом интервале значение очередного бита будет считано на 2 нс раньше по отношению к моменту считывания значения предыдущего интервала, как это показано на рис.2.25. После синхронизации часов передатчика и приёмника считывание значения первого битового интервала произойдёт на 49-й наносекунде. Как видно из рисунка, при отсутствии синхронизации приёмник дважды считает значение 25-го битового интервала.



Для того чтобы не возникали такие ситуации, необходимо поддерживать синхронизацию часов передатчика и приёмника. В компьютерах при обмене цифровыми данными между устройствами эта проблема решается путём использования дополнительного специального канала, по которому передаются тактовые импульсы, определяющие моменты времени, в которые должна сниматься информация. Однако такое решение не приемлемо при передаче информации на большие расстояния ввиду высокой стоимости дополнительного «тактового» канала, а также неодинаковой скорости распространения информативного сигнала и тактовых импульсов из-за неоднородности среды передачи. Последнее может привести к тому, что тактовый импульс придет позже или раньше соответствующего сигнала, в результате чего бит данных будет пропущен или считан повторно. Для решения проблемы синхронизации в компьютерных сетях применяются специальные методы кодирования, позволяющие выполнять синхронизацию часов приёмника и передатчика автоматически. Такие коды называются *самосинхронизирующимися*.

Заметим, что рассмотренная ситуация в действительности оказывается более сложной, поскольку шумы влияют не только на устанавливаемый уровень чувствительности приёмника, но и искажают форму информативного сигнала. Кроме того, канал связи подвержен влиянию различного рода помех, также искажающих сигнал. Поэтому

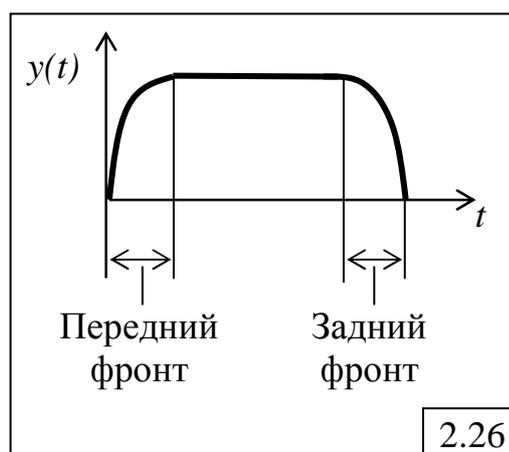
реальный сигнал в точке приёма оказывается мало похожим на исходный синусоидальный сигнал (рис.2.23,в). Это может привести к тому, что даже при абсолютно точной синхронизации передатчика и приёмника значение сигнала либо пропадёт, если его уровень окажется меньше  $\Delta u$  (рис.2.23,в), либо будет считано неверное значение (рис. 2.23,г).

Для того чтобы не возникало таких ситуаций, желательно приблизить форму передаваемого информативного сигнала к исходному прямоугольному виду.

При потенциальном кодировании исходный прямоугольный сигнал, отображающий двоичные «1» и «0», является идеальным теоретическим сигналом, обладающим бесконечным спектром, который получается непосредственно из формул Фурье для периодической функции. Если дискретные данные, содержащие последовательность чередующихся «1» и «0», передаются с битовой скоростью  $C$  бит/с, то спектр состоит из постоянной составляющей нулевой частоты и бесконечного ряда гармоник с частотами  $f_0, f_1 = 3f_0, f_2 = 5f_0, \dots, f_i = (2i+1)f_0, \dots$ , где  $f_0 = C/2$  – частота основной гармоники;  $i = 0, 1, 2, \dots$ . Амплитуды этих гармоник убывают с коэффициентами  $1/3, 1/5, \dots, 1/(2i+1), \dots$  от амплитуды  $A_0$  основной гармоники. Таким образом, спектр потенциального кода требует для качественной передачи большую полосу пропускания – в пределе равную бесконечности.

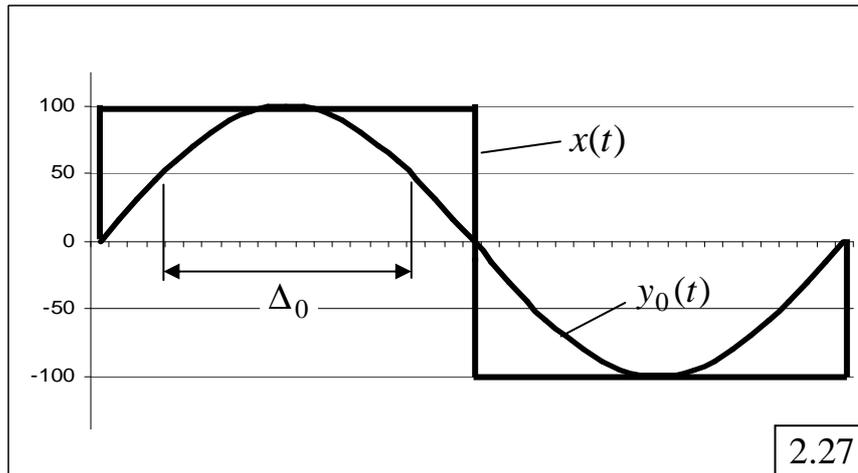
Действительно, в начале и в конце такого сигнала скорость изменения его значения (верхняя частота) равна бесконечности, а между ними скорость изменения сигнала (нижняя частота) равна нулю. Реальные сигналы обладают ограниченным спектром, обусловленным наличием переднего и заднего фронта потенциального сигнала (рис.2.26), скорость изменения которых конечна и определяется быстродействием элементной базы передатчика, формирующего потенциальный сигнал.

Однако передача и такого сигнала с конечным спектром оказывается проблематичной из-за наличия в спектре нулевой составляющей. Дело в том, что линии связи с большой полосой пропускания имеют нижнюю границу частот, значительно отличающуюся от нуля. Следовательно, такой сигнал будет передаваться с большими искажениями, что затруднит его восстановление на приёмном конце. Для того чтобы сузить спектр потенциального сигнала, необходимо увеличить нижнюю границу спектра. Это может быть достигнуто, например, наложением высокочастотной составляющей на постоянную составляющую сигнала, заключённую между передним и задним фронтами потенциального сигнала.



Для того чтобы представить, как это можно реализовать, рассмотрим, как изменяется синусоидальный сигнал при добавлении высокочастотных гармоник, приближающих форму передаваемого сигнала к прямоугольной. На рис.2.27-2.30 показаны 4 вида сигналов, которые могут использоваться для передачи потенциального кода, различающиеся количеством гармоник.

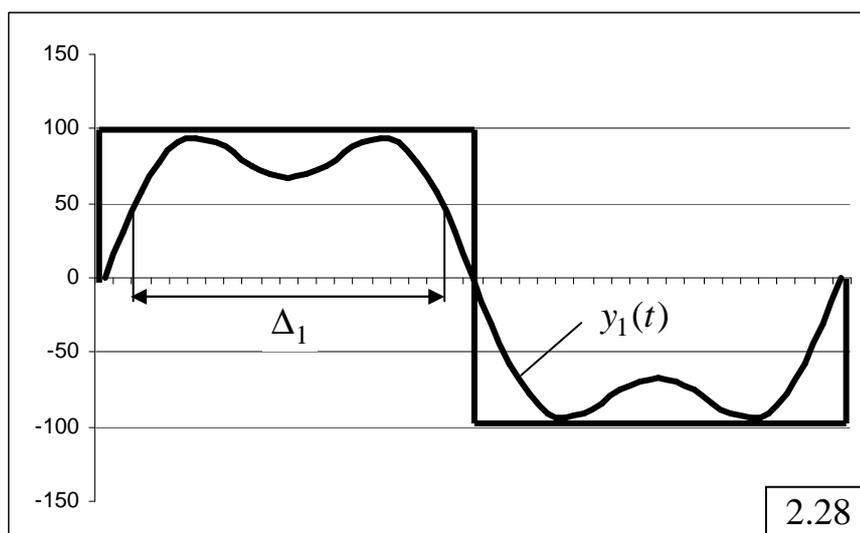
На рис.2.27 показан сигнал, содержащий одну гармонику, которая называется *основной гармоникой*.



Основная гармоника  $y_0(t)$  имеет частоту  $f_0 = \frac{1}{2t_b}$ , где  $t_b$  — длительность битового интервала, и амплитуду  $A_0 = 100$ , равную уровню потенциала исходного потенциального кода  $x(t)$ :  $y_0(t) = A_0 \sin(2\pi f_0 t)$ . Здесь же показан интервал  $\Delta_0$ , в котором значения сигнала  $y_0(t) \geq 50$ . Интервал  $\Delta_0$  можно рассматривать как область битового интервала, в пределах которого с высокой вероятностью гарантируется правильное распознавание значения передаваемого бита.

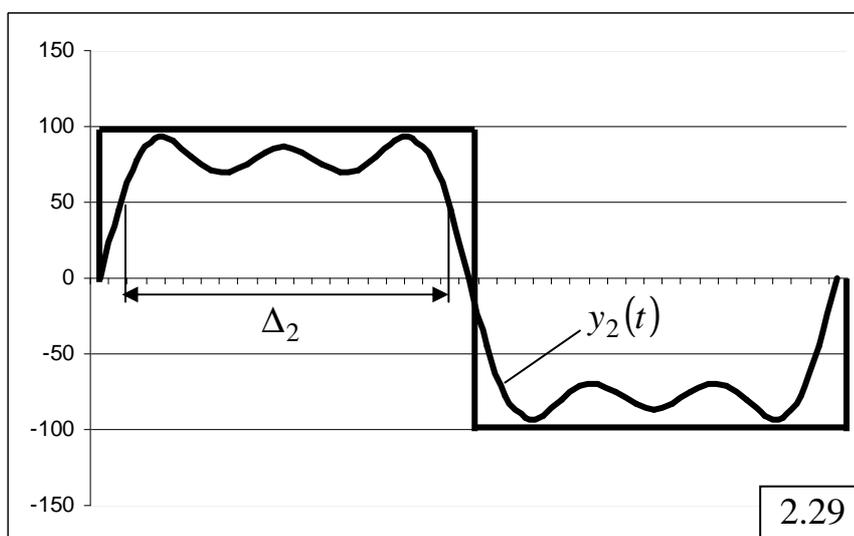
На рис.2.28 показан сигнал, содержащий две гармоники:  $y_1(t) = A_0 \sin(2\pi f_0 t) + A_1 \sin(2\pi f_1 t)$ , где  $A_1 = \frac{A_0}{3}$  и  $f_1 = 3f_0$ . Кроме основной гармоники сигнал  $y_1(t)$  содержит ещё одну синусоиду, частота которой в 3 раза больше, а амплитуда — в 3 раза меньше, чем у основной гармоники.

Отметим, что интервал  $\Delta_1$ , в котором значения сигнала  $y_1(t) \geq 50$ , больше, чем  $\Delta_0$ . Благодаря этому увеличивается вероятность правильного распознавания значения переданного бита на приёмном конце и уменьшается требование к точности синхронизации часов передатчика и приёмника. Заметим, что это достигается за счёт трёхкратного увеличения спектра сигнала и, как следствие, увеличения требуемой полосы пропускания канала связи.



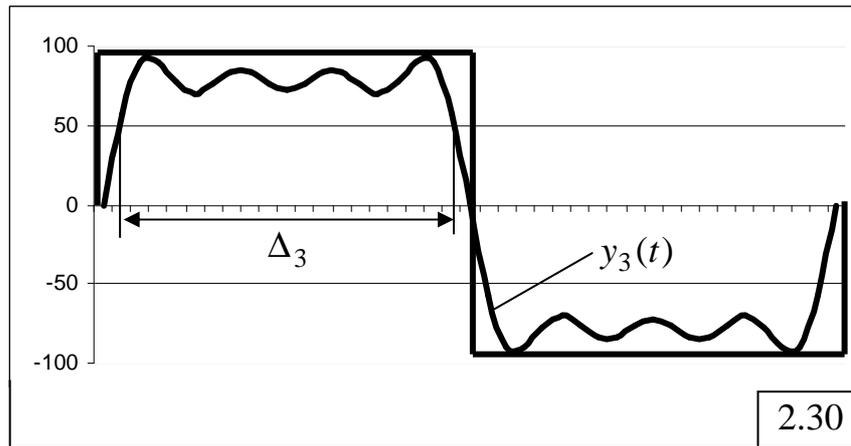
На рис.2.29 показан сигнал, содержащий три гармоники:  
 $y_2(t) = A_0 \sin(2\pi f_0) + A_1 \sin(2\pi f_1) + A_2 \sin(2\pi f_2)$ , где  $A_2 = \frac{A_0}{5}$  и  $f_2 = 5f_0$ .

Таким образом, сигнал  $y_2(t)$  содержит ещё одну синусоиду, частота которой в 5 раз больше, а амплитуда – в 5 раз меньше, чем у основной гармоники, а интервал  $\Delta_2$ , в котором значения сигнала  $y_2(t) \geq 50$ , больше, чем интервал  $\Delta_1$ .



И, наконец, на рис.2.30 показан сигнал, содержащий 4 гармоники:  
 $y_3(t) = A_0 \sin(2\pi f_0) + A_1 \sin(2\pi f_1) + A_2 \sin(2\pi f_2) + A_3 \sin(2\pi f_3)$ , где  $A_3 = \frac{A_0}{7}$   
 и  $f_3 = 7f_0$ .

Частота четвёртой гармоники в 7 раз больше, а амплитуда – в 7 раз меньше, чем у основной гармоники. Интервал  $\Delta_3$ , в котором значения сигнала  $y_3(t) \geq 50$ , больше интервала  $\Delta_2$ .



Следует помнить, что спектр сигнала меняется в зависимости от передаваемых данных. Например, передача длинной последовательности нулей или единиц сдвигает спектр сигнала потенциального кода в сторону низких частот и приводит к появлению в сигнале так называемой **постоянной составляющей**. В предельном случае, когда передаваемые данные состоят только из единиц (или только из нулей), частота передаваемого сигнала будет равна нулю. При передаче чередующихся единиц и нулей постоянная составляющая отсутствует. Поэтому спектр результирующего сигнала потенциального кода при передаче произвольных данных занимает полосу от некоторой величины, близкой к 0 Гц, до, в пределе, бесконечности. Однако на практике верхний предел спектра обычно ограничивается значениями  $3f_0$ ,  $5f_0$  или  $7f_0$ . Гармониками с частотами выше  $7f_0$  можно пренебречь из-за их малого вклада в результирующий сигнал – амплитуда этих гармоник составляет 11% и менее от амплитуды основной гармоники.

Требование отсутствия постоянной составляющей, то есть наличия постоянного тока между передатчиком и приемником, связано также с применением трансформаторных схем гальванической развязки, которые не пропускают постоянный ток. Необходимость гальванической развязки в электрических линиях связи обусловлена требованием защиты компьютеров сети от непредвиденных ситуаций. В частности, короткое замыкание в одном из компьютеров сети не должно приводить к выходу из строя всех остальных компьютеров, объединённых единой электрической средой передачи данных.

Рассмотренные особенности передачи цифровых сигналов позволяют сделать следующий вывод.

При цифровой передаче данных для восстановления исходного сигнала требуется меньше гармоник, чем при аналоговой передаче. Технология передачи и приема цифровых сигналов позволяет восстановить исходный сигнал по основной гармонике (несущей), однако для уменьшения числа ошибок необходимо присутствие хотя бы первой гармоники, что, правда, втрое увеличивает спектр передаваемого сигнала и, следовательно, требуемой полосы пропускания канала связи.

### 2.3.3.2. Требования к методам цифрового кодирования

Методы цифрового кодирования оказывают существенное влияние на качество передачи дискретных данных (надёжность и достоверность доставки сообщений, возможность обнаружения и исправления ошибок, стоимость реализации) и в значительной мере определяют требуемую пропускную способность среды передачи.

В связи с этим, к методам цифрового кодирования предъявляются следующие **требования** (рис.2.31):

- *минимизация спектра результирующего сигнала* при одной и той же битовой скорости;
- *поддержка синхронизации* между передатчиком и приёмником сигналов за счёт наличия свойства самосинхронизации;
- *отсутствие постоянной составляющей*;
- *возможность обнаружения ошибок* и их исправления;
- *низкая стоимость реализации* метода кодирования.



**Минимизация спектра результирующего сигнала** позволяет при одной и той же полосе пропускания канала связи передавать больший объем данных за единицу времени, например, за счёт частотного мультиплексирования и организации нескольких логических каналов в одной и той же линии связи, что обеспечивает более высокую скорость передачи данных.

Кроме того, часто к спектру сигнала предъявляется требование отсутствия постоянной составляющей, то есть наличия постоянного тока между передатчиком и приемником, поскольку применение различных трансформаторных схем *гальванической развязки* в электрических линиях связи препятствует прохождению постоянного тока.

Спектр результирующего сигнала зависит от:

- метода кодирования (модуляции);
- скорости модуляции, определяющей скорость передачи данных;
- состава передаваемых данных.

**Поддержка синхронизации** между передатчиком и приёмником сигналов для определения момента считывания в приёмнике значения очередного битового интервала может быть реализована за счёт применения *самосинхронизирующихся методов кодирования*. Указанием

для синхронизации приемника с передатчиком в этих методах может служить любой резкий перепад сигнала – так называемый **фронт**.

**Отсутствие постоянной составляющей** необходимо для поддержки синхронизации приёмника с передатчиком, а также для того, чтобы нижняя частота кодированного сигнала как можно больше отличалась от нуля, что, соответственно, уменьшает спектр сигнала и не препятствует прохождению постоянного тока при наличии трансформаторных схем гальванической развязки в электрических линиях связи.

**Возможность обнаружения ошибок** и их исправления – желательное, но не обязательное требование, предъявляемое к методам кодирования. Обнаружение ошибки на физическом уровне экономит время, так как приёмник отбрасывает ошибочный кадр, не ожидая полного его приёма в буфер.

**Низкая стоимость реализации** метода кодирования связана с количеством уровней сигнала – чем больше уровней сигнала, тем выше стоимость реализации. Это обусловлено необходимостью применения более мощного и, следовательно, более дорогого приёмно-передающего оборудования.

Требования, предъявляемые к методам кодирования, являются взаимно противоречивыми, поэтому каждый из рассматриваемых ниже методов цифрового кодирования по сравнению с другими обладает своими достоинствами и недостатками.

### 2.3.3.3. Потенциальный код без возврата к нулю (NRZ)

На рис.2.32,а показан метод потенциального кодирования, называемый также кодированием *без возврата к нулю* – NRZ (Non Return to Zero). В этом методе высокий потенциал соответствует значению бита «1», а низкий – значению «0».

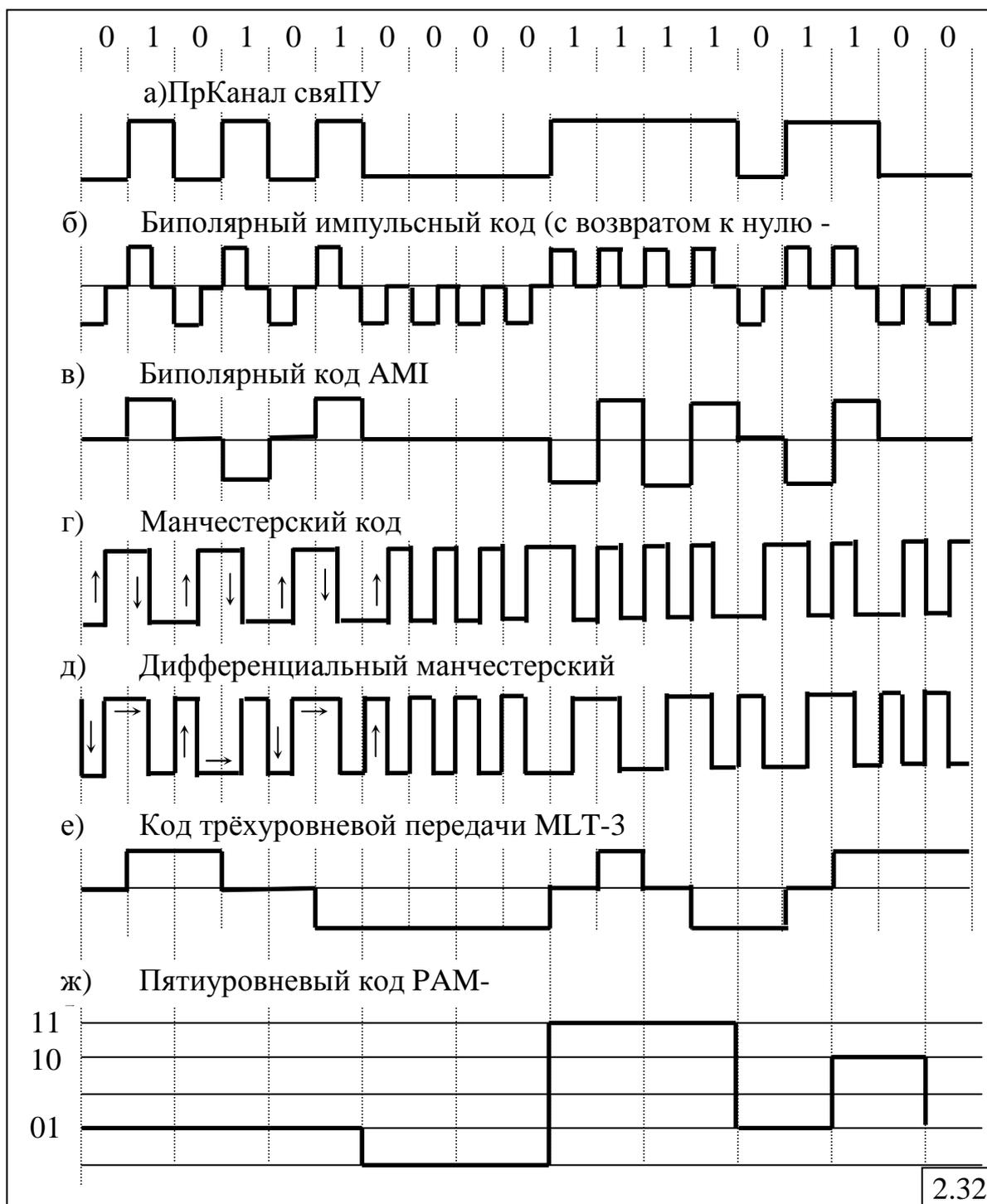
#### Достоинства:

- низкая частота основной гармоники:  $f_0 = \frac{1}{2C}$  Гц (C – битовая скорость передачи данных), которая меньше, чем у других методов кодирования;
- наличие только двух уровней потенциала и, как следствие, простота и низкая стоимость.

#### Недостатки:

- не обладает свойством самосинхронизации: при передаче длинной последовательности единиц или нулей сигнал не изменяется и возможна рассинхронизация часов приёмника и передатчика;
- наличие низкочастотной составляющей не позволяет использовать этот вид кодирования в каналах связи, не обеспечивающих прямого гальванического соединения между приемником и источником.

По этим причинам в компьютерных сетях код NRZ в чистом виде не используется. Тем не менее, используются его модификации, в которых устраняют постоянную составляющую и отсутствие самосинхронизации.



#### 2.3.3.4. Биполярный импульсный код (RZ)

Кроме потенциальных кодов в компьютерных сетях используются импульсные коды, в которых данные представлены полным импульсом или же его частью – фронтом. Наиболее простым является *биполярный импульсный код*, называемый также кодированием с *возвратом к нулю* (Return to Zero, RZ), в котором единица представлена импульсом одной полярности, а ноль – импульсом другой полярности (рис.2.32,б). Каждый импульс длится половину такта (битового интервала). В середине каждого битового интервала происходит возврат к нулевому потенциалу.

**Достоинство:**

- обладает свойством самосинхронизации – возврат в середине каждого битового интервала к нулевому потенциалу служит признаком (стробом) для синхронизации часов приёмника.

**Недостатки:**

- наличие трех уровней сигнала, что требует увеличения мощности передатчика для обеспечения достоверности приема и, как следствие, большая стоимость реализации;

- спектр сигнала шире, чем у потенциальных кодов; так, при передаче всех нулей или единиц частота основной гармоники кода будет равна  $C$  Гц, что в два раза выше основной гармоники кода NRZ.

Из-за слишком широкого спектра биполярный импульсный код используется редко.

**2.3.3.5. Биполярное кодирование с альтернативной инверсией (АМІ)**

Одной из модификаций метода RZ является метод *биполярного кодирования с альтернативной инверсией* (Bipolar Alternate Mark Inversion, АМІ), в котором используются три уровня потенциала – положительный, нулевой и отрицательный (рис.2.32,в). Двоичный «0» кодируется нулевым потенциалом, а двоичная «1» – либо положительным потенциалом, либо отрицательным, при этом потенциал следующей единицы противоположен потенциалу предыдущей.

**Достоинства:**

- ликвидируется проблема постоянной составляющей и отсутствия самосинхронизации при передаче *длинных последовательностей единиц*, поскольку сигнал в этом случае представляет собой последовательность разнополярных импульсов с тем же спектром, что и у кода NRZ, передающего чередующиеся нули и единицы, то есть с частотой основной гармоникой Гц;

- в целом, использование кода АМІ приводит к более узкому спектру сигнала, чем для кода NRZ, а значит и к более высокой пропускной способности канала связи, в частности, при передаче чередующихся единиц и нулей частота основной гармоникой Гц;

- предоставляет возможность распознавать ошибочные сигналы при нарушении чередования полярности сигналов; сигнал с некорректной полярностью называется *запрещенным сигналом*.

**Недостатки:**

- наличие трёх уровней сигнала, что требует увеличения мощности передатчика;

- наличие постоянной составляющей в сигнале в случае длинных последовательностей нулей.

### 2.3.3.6. Потенциальный код с инверсией при единице (NRZI)

*Потенциальный код с инверсией при единице* (Non Return to Zero with ones Inverted, NRZI) похож на АМІ, но имеет только два уровня сигнала. При передаче нуля он передает потенциал, который был установлен в предыдущем такте, а при передаче единицы потенциал меняется на противоположный.

### 2.3.3.7. Манчестерский код

В локальных сетях (ЛВС Ethernet и Token Ring) до недавнего времени применялся *манчестерский код* (рис.2.32,г), в котором для кодирования двоичных единиц и нулей используется переход сигнала в середине каждого битового интервала:

- «1» кодируется переходом от высокого уровня сигнала к низкому;
- «0» – обратным переходом от низкого уровня сигнала к высокому.

Если данные содержат подряд несколько единиц или нулей, то в начале каждого битового интервала происходит дополнительный служебный переход сигнала.

#### Достоинства:

- обладает свойством самосинхронизации, так как значение потенциала всякий раз изменяется в середине битового интервала, что может служить сигналом для синхронизации приёмника с передатчиком;
- имеет только *два уровня* потенциала;
- спектр манчестерского кода *меньше*, чем у биполярного импульсного, в среднем в 1,5 раза: основная гармоника при передаче последовательности единиц или нулей имеет частоту  $f_0 = \frac{1}{C}$  Гц, а при передаче чередующихся единиц и нулей она равна  $f_0 = \frac{1}{2C}$  Гц, как и у кода NRZ;

- нет постоянной составляющей.

#### Недостатки:

- спектр сигнала шире, чем у кода NRZ и кода АМІ.

### 2.3.3.8. Дифференциальный манчестерский код

*Дифференциальный* или *разностный манчестерский код* используется в сетях Token Ring (стандарт 802.5) и FDDI и представляет собой разновидность манчестерского кода с двумя уровнями потенциала:

- «0» кодируется изменением потенциала в начале битового интервала;
- «1» – сохранением предыдущего уровня потенциала.

В середине каждого битового интервала обязательно присутствует переход с одного уровня потенциала на другой (рис.2.32,д).

### 2.3.3.9. Код трехуровневой передачи MLT-3

Код трехуровневой передачи MLT-3 (Multi Level Transmission-3) имеет много общего с кодом AMI. Единице соответствует *последовательный* переход на границе битового интервала с одного уровня сигнала на другой. При передаче нулей сигнал не меняется (рис. 2.32,е).

Максимальная частота сигнала достигается при передаче длинной последовательности единиц. В этом случае изменение уровня сигнала происходит последовательно с одного уровня на другой с учетом предыдущего перехода.

MLT-3 используется в сетях FDDI на основе медных проводов, известных как CDDI, и Fast Ethernet стандарта 100Base-TX совместно с избыточным методом логического кодирования 4В/5В.

#### **Недостатки:**

- отсутствие свойства самосинхронизации;
- наличие трех уровней сигнала;
- наличие постоянной составляющей в сигнале в случае длинной последовательности нулей.

### 2.3.3.10. Пятиуровневый код PAM-5

В пятиуровневом коде PAM-5 используется 5 уровней амплитуды сигнала и двухбитовое кодирование (рис.2.32,ж), означающее наличие четырёх уровней, соответствующих двум битам передаваемых данных: 00, 01, 10, 11, то есть в одном битовом интервале передаются сразу два бита. Пятый уровень добавлен для создания избыточности кода, используемого для исправления ошибок.

#### **Достоинства:**

- при одной той же скорости модуляции (длительности битового интервала) по каналу связи можно передавать данные в два раза быстрее по сравнению с AMI или NRZI, так как в одном битовом интервале передаются сразу два бита.

#### **Недостатки:**

- длинные последовательности одинаковых пар бит приводят к появлению в сигнале постоянной составляющей;
- наличие 4-х уровней требует большей мощности передатчика, чтобы уровни четко различались приемником на фоне помех.

Код PAM-5 используется в сетях 1000Base-T (Gigabit Ethernet).

## 2.3.4. Логическое кодирование

**Логическое кодирование** предназначено для улучшения потенциальных кодов типа AMI, NRZI или MLT-3 и направлено на ликвидацию длинных последовательностей единиц или нулей, приводящих к постоянному потенциалу.

Для улучшения потенциальных кодов используются два способа:

- избыточное кодирование;
- скремблирование.

Оба способа относятся к логическому, а не физическому кодированию, так как они не определяют форму сигналов.

#### 2.3.4.1. Избыточное кодирование

При **избыточном кодировании** исходный двоичный код рассматривается как совокупность символов, представляющих собой последовательность нескольких битов, каждый из которых заменяется новым символом, содержащим большее количество бит, чем исходный.

Примерами методов избыточного кодирования являются 4В/5В (используется в ЛВС Fast Ethernet стандартов 100Base-TX и 100Base-FX и в сети FDDI), 5В/6В (100VG-AnyLAN), 8В/10В (10GBase-X), 64В/66В (10GBase-R и 10GBase-W). Буква «В» в названии кода означает, что элементарный сигнал имеет 2 состояния (от английского binary – двоичный), а цифры указывают, какое количество бит содержится в одном символе исходного и результирующего кода соответственно. В частности, метод 4В/5В означает, что каждые 4 бита в исходном коде заменяются 5-ю битами в результирующем коде, то есть четырёхбитные символы исходного кода заменяются символами, содержащими по 5 бит. Для этого используется специальная **таблица перекодировки** (табл.2.1), устанавливающая соответствие между исходными четырёхбитовыми символами и результирующими пятибитовыми символами.

Таблица 2.1.

<i>Исходные символы</i>	<i>Результирующие символы</i>	<i>Исходные символы</i>	<i>Результирующие символы</i>
0000	11110	1000	10010
0001	01001	1001	10011
0010	10100	1010	10110
0011	10101	1011	10111
0100	01010	1100	11010
0101	01011	1101	11011
0110	01110	1110	11100
0111	01111	1111	11101

Количество результирующих символов больше количества исходных символов. Так, в коде 4В/5В результирующих символов может быть  $2^5=32$ , в то время как исходных символов только  $2^4=16$ . Поэтому среди результирующих символов можно отобрать 16 таких, любое сочетание которых не содержит длинных последовательностей нулей или единиц (в худшем случае 3 нуля или 8 единиц). Остальные 16 символов рассматриваются как *запрещенные*, появление которых означает ошибку в передаваемых данных.

Избыточность кода 4В/5В составляет 25% ( $1/4 = 0,25$ ), поскольку на 4 информационных бита приходится 1 «лишний» избыточный бит. Это означает, что реальная пропускная способность канала будет на 25% меньше номинальной. Для обеспечения заданной пропускной способности канала передатчик должен работать с повышенной тактовой частотой. В частности, для передачи кодов 4В/5В со скоростью 100 Мбит/с передатчик должен работать с тактовой частотой 125 МГц. При этом спектр сигнала увеличивается по сравнению со случаем, когда передается не избыточный код. Тем не менее, спектр избыточного кода меньше спектра манчестерского кода, что оправдывает использование логического кодирования.

#### **Достоинства:**

- код становится самосинхронизирующимся, так как прерываются длинные последовательности нулей и единиц;
- исчезает постоянная составляющая, а значит, сужается спектр сигнала;
- появляется возможность обнаружения ошибок за счёт запрещённых символов;
- простая реализация в виде таблицы перекодировки.

#### **Недостатки:**

- уменьшается полезная пропускная способность канала связи, так как часть пропускной способности тратится на передачу избыточных бит;
- дополнительные временные затраты в узлах сети на реализацию логического кодирования.

В сети Fast Ethernet стандарта 100Base-T4 используется метод логического кодирования 8В/6Т с тремя состояниями результирующего сигнала, в котором для кодирования 8 бит (В) исходного сообщения используется код из 6 троичных (Т) символов, имеющих 3 состояния. Количество избыточных, то есть запрещённых кодов:  $3^6 - 2^8 = 729 - 256 = 473$ .

#### **2.3.4.2. Скремблирование**

Скремблирование состоит в преобразовании исходного двоичного кода по заданному алгоритму, позволяющему исключить длинные последовательности нулей или единиц. Технические или программные средства, реализующие заданный алгоритм, называются *скремблерами* (scramble – свалка, беспорядочная сборка). На приёмной стороне *дескремблер* восстанавливает исходный двоичный код.

В качестве алгоритма преобразования может служить соотношение:

$$B_i = A_i \oplus B_{i-3} \oplus B_{i-5} \quad (i = 1, 2, \dots),$$

где  $A_i$ ,  $B_i$  – значения  $i$ -го разряда соответственно исходного и результирующего кода;  $B_{i-3}$  и  $B_{i-5}$  – значения соответственно  $(i-3)$ -го и  $(i-5)$ -го разряда результирующего кода;  $\oplus$  – операция исключающего ИЛИ (сложение по модулю 2).

Например, для исходной последовательности  $A=110110000001$  скремблер даст следующий результирующий код:

$$B_1 = A_1 = 1;$$

$$B_2 = A_2 = 1;$$

$$B_3 = A_3 = 0;$$

$$B_4 = A_4 \oplus B_1 = 1 \oplus 1 = 0;$$

$$B_5 = A_5 \oplus B_2 = 1 \oplus 1 = 0;$$

$$B_6 = A_6 \oplus B_3 \oplus B_1 = 0 \oplus 0 \oplus 1 = 1;$$

$$B_7 = A_7 \oplus B_4 \oplus B_2 = 0 \oplus 0 \oplus 1 = 1;$$

$$B_8 = A_8 \oplus B_5 \oplus B_3 = 0 \oplus 0 \oplus 0 = 0;$$

$$B_9 = A_9 \oplus B_6 \oplus B_4 = 0 \oplus 1 \oplus 0 = 1;$$

$$B_{10} = A_{10} \oplus B_7 \oplus B_5 = 0 \oplus 1 \oplus 0 = 1;$$

$$B_{11} = A_{11} \oplus B_8 \oplus B_6 = 0 \oplus 0 \oplus 1 = 1;$$

$$B_{12} = A_{12} \oplus B_9 \oplus B_7 = 1 \oplus 1 \oplus 1 = 1.$$

Таким образом, на выходе скремблера появится последовательность  $V=110001101111$ , в которой нет последовательности из шести нулей, присутствовавшей в исходном коде.

Дескремблер восстанавливает исходную последовательность на основании обратного соотношения:

$$C_i = B_i \oplus B_{i-3} \oplus B_{i-5} \quad (i = 1, 2, \dots).$$

Легко убедиться, что  $C_i = A_i$ .

Различные алгоритмы скремблирования отличаются количеством слагаемых, дающих цифру результирующего кода и величиной сдвига между слагаемыми. Так, в сетях ISDN при передаче данных от сети к абоненту используется преобразование со сдвигами в 5 и 23 позиции, а при передаче данных от абонента в сеть – со сдвигами 18 и 23 позиции.

#### **Достоинство:**

- не уменьшается полезная пропускная способность канала связи, поскольку отсутствуют избыточные биты.

#### **Недостатки:**

- дополнительные затраты в узлах сети на реализацию алгоритма скремблирования-дескремблирования;
- не всегда удаётся исключить длинные последовательности нулей и единиц.

## **2.4. Кабельные линии связи**

При организации компьютерных сетей широко используются кабельные линии связи.

**Кабельная линия связи** (КЛС) – линия связи, состоящая из кабеля, кабельной арматуры и кабельных сооружений (туннели, колодцы, распределительные шкафы, кабельные столбы).

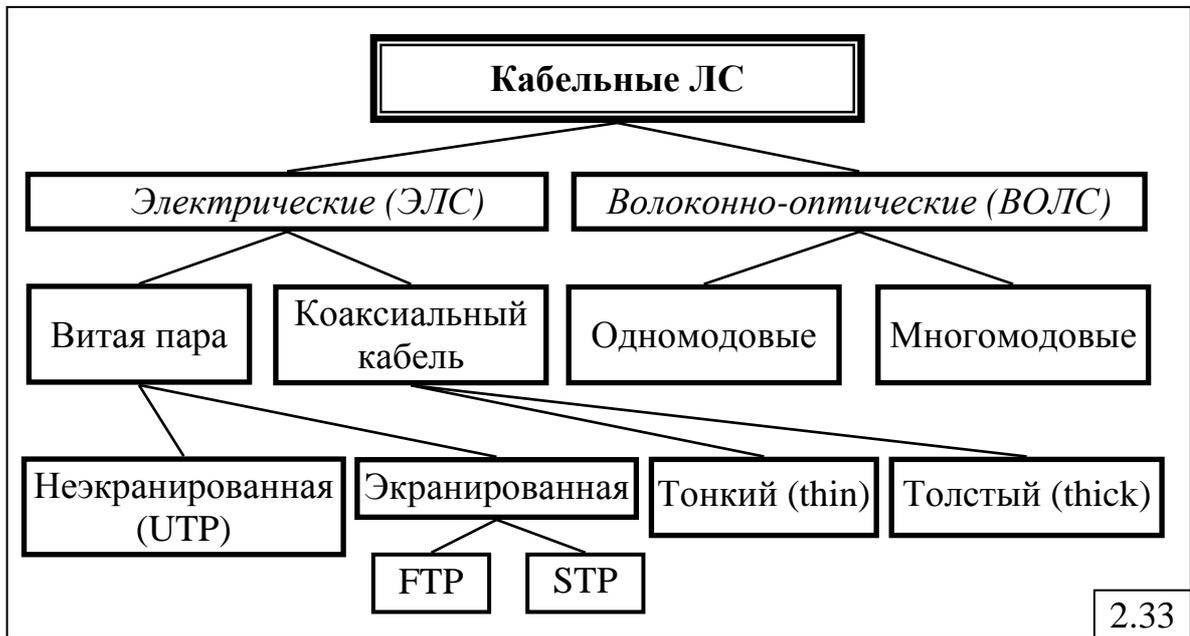
**Кабель** (от голл. kabel – канат, трос) – совокупность гибких изолированных проводов, заключенных в защитную (обычно герметичную) оболочку.

**Электрический (медный) кабель** – кабель из электрических (медных) проводников (токопроводящих жил), применяемый для передачи на расстояние электрической энергии (*силовой кабель*) или электрических сигналов (*кабель связи*).

**Волоконно-оптический кабель** – кабель из оптических волокон для передачи светового потока.

**Кабель связи** предназначен для передачи информации электрическими или оптическими (световыми) сигналами.

Таким образом, кабельные линии связи делятся на две большие группы: электрические (ЭЛС) и волоконно-оптические (ВОЛС). Типы кабельных линий связи, используемых в компьютерных сетях, представлены на рис.2.33.



### 2.4.1. Электрические кабельные линии связи

В сетях передачи данных применяются следующие типы электрических кабелей (рис.2.33):

- 1) витая пара:
  - неэкранированная;
  - экранированная;
- 2) коаксиальный кабель:
  - толстый (thick);
  - тонкий (thin).

#### 2.4.1.1. Основные электромагнитные характеристики электрических кабелей связи

Основные электромагнитные характеристики электрических кабелей связи представлены на рис.2.34.

1. **Затухание (коэффициент затухания)** – уменьшение мощности сигнала (потеря амплитуды) при передаче между двумя точками:

- является одной из основных характеристик, учитываемых при проектировании ЭЛС и определении максимальной длины кабеля между узлами;
- зависит от частоты передаваемого сигнала;
- измеряется в [дБ/м].



2. **Импеданс** (волновое сопротивление) – полное (активное и реактивное) сопротивление электрической цепи:

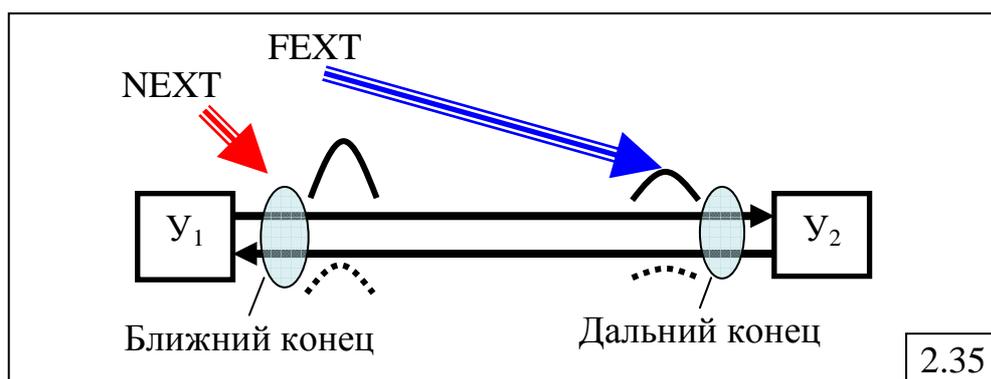
- измеряется в Омах и является относительно постоянной величиной для кабельных систем (в высокоскоростных сетях зависит от частоты);
- резкие изменения импеданса по длине кабеля могут вызвать процессы внутреннего отражения, приводящие к возникновению стоячих волн, при этом станция, подключенная вблизи узла стоячей волны, не будет получать адресованные ей данные.

3. **Перекрыстные наводки** между витыми парами **на ближнем конце (NEXT – Near End Crosstalk)** и **на дальнем конце (FEXT – Far End Crosstalk)** – результат интерференции электромагнитных сигналов (рис.2.35):

- значения NEXT и FEXT зависят от частоты передаваемого сигнала;
- чем *больше абсолютное* значение NEXT (FEXT), тем лучше, так как наводки в соседних проводниках будут меньше;
- измеряется в дБ при определённой частоте.

Из рис.2.35 видно, что на ближнем конце проводника (по отношению к передающему узлу) высокий уровень сигнала, передаваемого от узла  $U_1$  к узлу  $U_2$ , наводит паразитный сигнал (показан пунктиром), искажающий информационный (полезный) сигнал во втором проводнике, по которому передаются данные от  $U_2$  к  $U_1$ . Из рисунка также видно, что на дальнем конце паразитный сигнал во втором проводнике значительно меньше, поскольку в результате затухания меньше уровень информационного сигнала, передаваемого в первом проводнике от  $U_1$  к  $U_2$ . С учётом того, что уровень информационного сигнала во втором проводнике на «дальнем конце» имеет максимальное значение, можно сделать вывод, что наведённый паразитный сигнал незначительно исказит информационный сигнал. Отсюда следует, что NEXT является более важной

характеристикой, чем FEXT, так как его значение в большей мере сказывается на качестве передачи сигналов.



4. **Активное сопротивление** – сопротивление электрической цепи постоянному току:

- не зависит от частоты и возрастает с увеличением длины кабеля;
- измеряется в Омах на 100 м.

5. **Ёмкость** – свойство металлических проводников накапливать электрическую энергию:

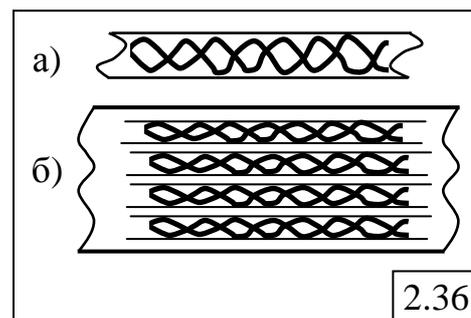
- является нежелательной величиной и должна быть минимальной;
- высокое значение ёмкости в кабеле приводит к искажению сигнала и ограничивает полосу пропускания линии.

#### 2.4.1.2. Витая пара

**Витая пара** (*Twisted Pair – TP*) – изолированные проводники, попарно свитые между собой минимально необходимое число раз на определенном отрезке длины (рис.2.36,а), что требуется для уменьшения перекрестных наводок между проводниками, и заключённые в изолирующую оболочку.

Витая пара – самый распространенный вид кабеля в телефонии. Скручивание применяется с целью *уменьшения излучения и повышения помехозащищенности* кабеля.

Несколько витых пар (обычно 4 или 8), заключённые в общую пластиковую оболочку, образуют **кабель** (рис.2.36,б).



Существует несколько категорий **неэкранированной витой пары** (*Unshielded Twisted Pair – UTP*), причём чем выше категория кабеля, тем больше его полоса пропускания.

Кабели 1-й и 2-й категорий используются для передачи речи и данных на низких скоростях и не включены в стандарты для передачи данных в компьютерных сетях.

Стандарт EIA/TIA-568, разработанный American National Standards Institute (ANSI, США) определяет спецификации для 3-й, 4-й и 5-й категорий UTP и нормирует следующие характеристики:

- коэффициент затухания,

- волновое сопротивление,
- емкость,
- переходное затухание на ближнем конце и др.

Например, для кабеля 5-й категории определены следующие характеристики:

- затухание – не более 23,6 дБ на 100 м (0,236 дБ/м) при частоте 100 МГц;
- волновое сопротивление – не более 100 Ом $\pm$ 15%;
- NEXT – не менее 27 дБ при частоте 100 МГц;
- активное сопротивление – не более 9,4 Ом на 100 м;
- емкость не более 5,6 нФ на 100 м.

**Экранированная витая пара** – кабель, содержащий одну или несколько пар скрученных медных проводов, заключенных в изолирующую оболочку. Снаружи кабель покрыт экранирующей оплеткой и еще одной изолирующей оболочкой, за счёт чего меньше излучает и лучше защищён от электромагнитных помех, чем неэкранированная витая пара. Применяется в сетях Token Ring.

Экранированная витая пара подразделяется на две разновидности:

- с экранированием каждой пары и общим экраном (Shielded Twisted Pair – STP);
- с одним общим экраном (Foiled Twisted Pair – FTP).

Для высокоскоростных сетей разработаны еще две категории медного кабеля:

- категория 6 – обеспечивает работу на частоте 250 МГц и может быть реализована как экранированный, так и неэкранированный кабель;
- категория 7 – обеспечивает работу на частоте до 600 МГц и использует экранирование каждой пары кабеля и общий экран.

В табл.2.2 приведены значения полосы пропускания для разных категорий современных медных кабелей.

Наиболее широко в настоящее время в локальных сетях применяется электрический кабель категории 5.

Таблица 2.2

Категория кабеля	Полоса пропускания, МГц
3	16
4	20
5	100
6	250
7	600

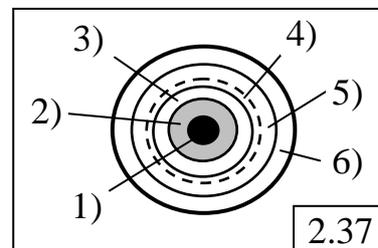
#### 2.4.1.3. Коаксиальный кабель

**Коаксиальный кабель** (от лат. *co* – совместно и *axis* – ось) – кабель, в котором проводники представляют собой 2 соосных металлических цилиндра, разделенных диэлектриком. Коаксиальный кабель используется для передачи высокочастотных сигналов (до нескольких ГГц) и характеризуется высокой помехозащищенностью и малым затуханием

сигналов. Это обусловлено отсутствием внешнего электромагнитного поля – вся энергия распространяется только внутри кабеля.

Коаксиальный кабель содержит (рис.2.37):

- 1) *внутренний проводник* диаметром от 0,4 мм до 2,5 мм;
- 2) *диэлектрик*, в качестве которого обычно применяется обычный полиэтилен или физически вспененный полиэтилен с низкой плотностью, позволяющий уменьшить коэффициент затухания;
- 3) *внешний проводник*, в качестве которого обычно используется фольга;
- 4) *медную оплетку* с покрытием из олова;
- 5) *защитную пленку*;
- 6) *внешнюю оболочку*.



В ранних сетях Ethernet применялись два типа коаксиального кабеля:

- **толстый (thick)** диаметром около 1 см, для которого, в отличие от тонкого, характерны следующие особенности:
  - более надежная защита от внешних помех;
  - прочнее;
  - требует применения специального отвода (прокалывающего разъема и отводящего кабеля) для подключения компьютера или другого устройства;
- **тонкий (thin)** диаметром около 0,5 см, для которого, в отличие от толстого, характерны следующие особенности:
  - передает данные на более короткие расстояния;
  - дешевле;
  - использует более простые соединители.

Основные *недостатки* коаксиальных кабелей:

- сложность прокладки, а также добавления и отключения станций;
- высокая удельная стоимость.

### 2.4.2. Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС)

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) используются для высокоскоростной передачи данных, представляемых в виде *оптических сигналов*, по оптическим диэлектрическим *световодам*, являющимся самой перспективной физической средой для передачи данных.

**Оптический сигнал** представляет собой модулированный световой поток, генерируемый *светодиодами* или *диодными лазерами*.

Основными *компонентами ВОЛС* являются:

- 1) оптическое волокно;
- 2) волоконно-оптический кабель;
- 3) оптические компоненты и устройства;
- 4) электронные компоненты систем оптической связи.

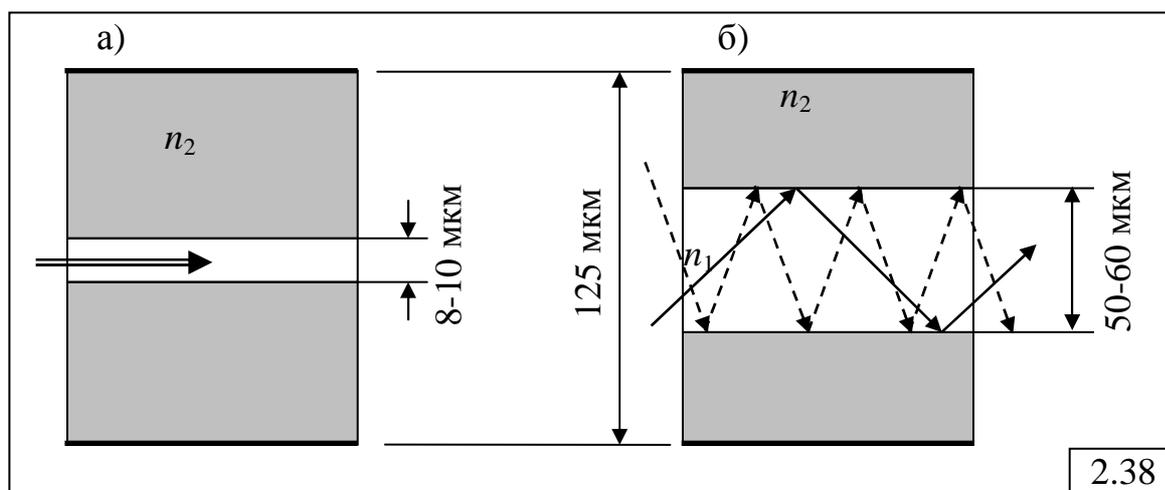
### 2.4.2.1. Оптическое волокно

**Оптическое волокно** – главный компонент ВОЛС – состоит из **сердцевины (световодной жилы)** и **оболочки** с разными показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$  (рис.2.38).

Оптические волокна в зависимости от способа распространения в них излучения делятся на:

- **одномодовые** (рис.2.38,а), в которых световодная жила имеет диаметр 8–10 мкм, в которых может распространяться только один луч (одна мода);

- **многомодовые** (рис.2.38,б), в которых световодная жила имеет диаметр 50–60 мкм, что делает возможным распространение в них большого числа лучей (много мод).



Важнейшими параметрами оптического волокна являются:

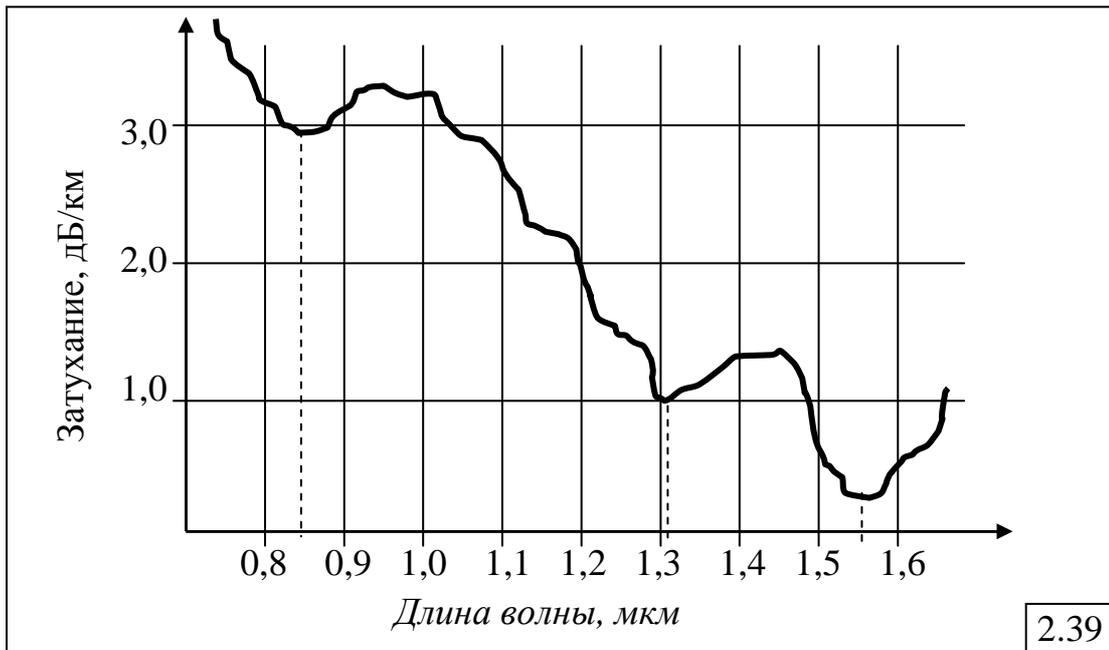
- затухание;
- дисперсия.

**Затухание** определяется потерями на поглощение и рассеяние излучения в оптическом волокне и измеряется в децибелах на километр (дБ/км). Потери на поглощение зависят от чистоты материала, а потери на рассеяние – от неоднородностей его показателя преломления.

Затухание зависит и от длины волны излучения, вводимого в волокно. Передача сигналов по оптическому волокну осуществляется в трех диапазонах: 0,85 мкм, 1,3 мкм и 1,55 мкм, так как именно в этих диапазонах кварц имеет повышенную прозрачность (рис.2.39).

Оптическое волокно характеризуется малым затуханием светового сигнала, составляющем 0,1–0,2 дБ/км при длине волны 1,55 мкм, что позволяет строить ЛС длиной до нескольких десятков километров без регенерации сигналов.

Ведутся разработки еще более "прозрачных", так называемых, **фтороцирконатных волокон** с затуханием порядка 0,02 дБ/км при длине волны 2,5 мкм, на основе которых могут быть созданы ЛС, обеспечивающие гигабитные скорости передачи и с регенерационными участками через каждые 4-5 тысяч километров.



В последние годы наряду с когерентными системами связи развивается альтернативное направление – **солитоновые** системы.

**Солитон** – уединенная волна, которая не затухает и не поглощается средой, а сохраняет свои размеры и форму сколь угодно долго.

*Солитон* – это световой импульс с необычными свойствами: он сохраняет свою форму и теоретически может распространяться по "идеальному" световоду бесконечно далеко. Длительность импульса составляет примерно 10 пс.

Солитоновые системы, в которых отдельный бит информации кодируется наличием или отсутствием солитона, имеют пропускную способность не менее 5 Гбит/с при расстоянии 10 000 км.

**Дисперсия** – рассеяние во времени спектральных и модовых составляющих оптического сигнала.

Поскольку при передаче информации светодиод или лазер излучает некоторый спектр длин волн, дисперсия приводит к уширению импульсов при распространении по волокну и тем самым порождает искажения сигналов (рис.2.40). При оценке дисперсии пользуются термином "**полоса пропускания**" – величина, обратная величине уширения импульса  $\Delta t$  при прохождении им по оптическому волокну расстояния в 1 км:  $\Pi = \frac{1}{\Delta t}$ .

Измеряется полоса пропускания в мегагерцах на километр (МГц\*км).

Из определения полосы пропускания следует, что дисперсия налагает ограничения на дальность передачи и верхнее значение частоты передаваемых сигналов. Если полоса пропускания оптического волокна составляет 1000 МГц\*км (что соответствует величине уширения импульса в 1 нс/км), то пропускная способность линии связи длиной в 1 км будет не более 1 Гбит/с, а при длине линии связи в 10 км – не более 100 Мбит/с.

Значения дисперсии и затухания различны для разных типов волокон.



**Достоинства** одномодовых волокон:

- *лучшие характеристики по затуханию и полосе пропускания*, так как в них распространяется только один луч;
- *максимальное затухание составляет 0,5 дБ/км* при длине волны 1,31 мкм и 1,55 мкм;
- *при использовании лазерных передатчиков расстояние между узлами может составлять до 40 км.*

**Недостатки** одномодовых волокон:

- *одномодовые источники излучения дороже* многомодовых;
- *в одномодовое волокно труднее ввести световой луч* из-за малого диаметра световодной жилы;
- *по этой же причине трудно минимизировать потери сигнала при сращивании* одномодовых волокон;
- *дороже монтаж* оптических разъемов на концах одномодовых кабелей.

**Достоинства** многомодовых волокон:

- *более удобны при монтаже*, так как в них больше размер световодной жилы;
- *проще снабдить оптическими разъёмами с малыми потерями* (до 0,3 дБ).
- *имеют меньшую стоимость.*

**Недостатки** многомодовых волокон:

- *большое затухание*, составляющее при длине волны 0,85 мкм – 3-4 дБ/км;
- *обеспечивает передачу данных без применения промежуточных повторителей на расстояние не более 2-х км;*
- *недостаточная полоса пропускания* многомодовых волокон для магистральных линий связи, которая составляет порядка 1000 МГц\*км (но вполне приемлемая для локальных сетей).

Результаты сравнительного анализа одномодовых и многомодовых волокон представлены в табл.2.3, где **полу жирным шрифтом** выделены лучшие показатели.

Таблица 2.3

<i>Показатель</i>	<i>Одномодовое волокно</i>	<i>Многомодовое волокно</i>
<i>Затухание</i>	<b>0,5 дБ/км</b>	1,5 – 3 дБ/км
<i>Полоса пропускания</i>	<b>более 500 МГц*км</b>	до 500 МГц*км
<i>Расстояние</i>	<b>+ (до 50 км)</b>	(до 2 км)
<i>Стоимость</i>	высокая	<b>низкая</b>
<i>Ввод светового луча</i>	сложнее	<b>легче</b>
<i>Потери при сращивании</i>	выше	<b>ниже</b>

#### 2.4.2.2. Волоконно-оптический кабель

**Волоконно-оптический кабель (ВОК)** – среда передачи данных, состоящая из оптических волокон (стеклянных или пластиковых), заключенных в защитную герметичную оболочку.

Информация в ВОК переносится модулированным световым потоком, генерируемым светодиодами или диодными лазерами.

**Достоинства ВОК** по сравнению с электрическими кабелями:

- высокая пропускная способность;
- отсутствие электромагнитного излучения, что исключает утечку информации;
- помехоустойчивость;
- большое расстояние передачи (не менее 2 км без повторителей);
- малый вес;
- высокое электрическое сопротивление, обеспечивающее гальваническую развязку соединяемых устройств;
- умеренная стоимость, незначительно превышающая стоимость медного кабеля.

**Недостатки ВОК:**

- трудоемкость монтажа, требующая специального оборудования;
- высокая стоимость сетевых устройств.

#### 2.4.2.3. Оптические компоненты

Оптические компоненты включают в себя:

- оптические соединители;
- системы спектрального уплотнения;
- оптические шнуры;
- оптические разветвители;
- распределительные панели;
- кроссовые шкафы;
- соединительные муфты;
- аттенюаторы и т.д.

**Оптические соединители (коннекторы)** предназначены для соединения ВОК с приёмо-передающей аппаратурой через специальные розетки.

Системы спектрального (волнового) уплотнения WDM (фильтры WDM) реализуют мультиплексирование и демультиплексирование оптических сигналов.

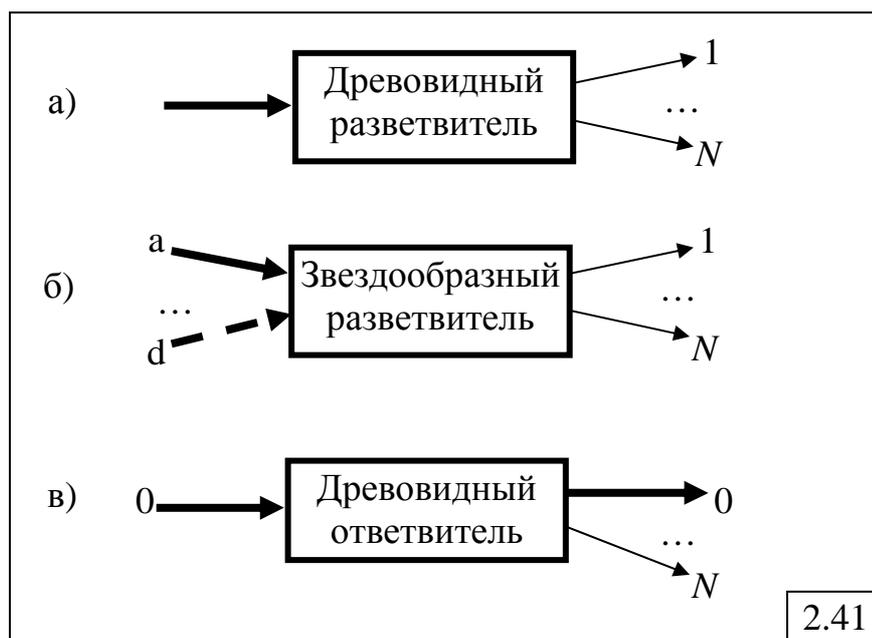
*Оптический шнур* – это оптический миникабель, оба конца которого снабжены соединителями.

*Оптический разветвитель* – многополюсное устройство, в котором подаваемый на вход оптический сигнал разветвляется по нескольким выходным направлениям.

Типы оптических разветвителей:

- *древовидный* (рис. 2.41,а) – разветвляет один входной оптический сигнал по нескольким выходам (в равной степени по мощности) или наоборот объединяет несколько сигналов в один выходной;
- *звездообразный* (рис. 2.41,б) – разветвляет поступающий по одному из входов оптический сигнал по нескольким выходам (в равной степени по мощности);
- *ответвитель* (рис. 2.41,в), где большая часть мощности остается в магистральном канале.

*Аттенюаторы* используются для уменьшения мощности входного оптического сигнала.



#### 2.4.2.4. Особенности ВОЛС

*Физические свойства ВОЛС:*

- *высокая частота несущей* ( $f_n = 10^{14}$  Гц), обуславливающая широкополосность оптических сигналов, то есть возможность передачи данных со скоростью порядка  $10^{12}$  бит/с = 1 Тбит/с;
- *высокая пропускная способность* за счет передачи данных в одном оптическом волокне сразу на нескольких длинах волн;
- *малое затухание светового сигнала*, что позволяет строить протяженные ЛС до сотен километров без регенерации сигналов.

### **Достоинства ВОЛС:**

- *невысокая стоимость* материала – кварца (основу которого составляет двуокись кремния), из которого изготавливается волокно, по сравнению с медью;
- оптические волокна *компактны и легки* (их диаметр около 100 мкм), а, следовательно, перспективны для использования в авиации, приборостроении и т.д.;
- обеспечивается *гальваническая развязка сегментов*, так как стеклянные волокна не проводят электричество;
- *безопасны в электрическом отношении*, так как не содержат металла, и, следовательно, могут монтироваться на мачтах существующих линий электропередач;
- *устойчивы к электромагнитным помехам*;
- *данные, передаваемые по ВОЛС, защищены от несанкционированного доступа*, так как ВОЛС чрезвычайно трудно подслушать неразрушающим способом, а всякие воздействия на ВОЛС могут быть зарегистрированы с помощью мониторинга (непрерывного контроля) целостности линии;
- возможно применение разных вариантов *скрытой передачи информации*, например путем:
  - модулирования сигналов по фазе и их перемешивания со смещенным на некоторое время сигналом из того же информационного потока;
  - распределения передаваемой информации по множеству сигналов;
  - передачи нескольких шумовых сигналов;
- *долговечность*, означающая сохранение свойств волокна в определенных пределах в течение 25 и более лет;
- обеспечивают *сверхвысокие скорости передачи данных* – десятки и более Гбит/с.

### **Недостатки ВОЛС:**

- необходимы специальные технические средства, а именно:
  - высоконадежные адаптеры, преобразующие электрические сигналы в световые и обратно;
  - оптические коннекторы (соединители) с малыми оптическими потерями и большим ресурсом на включение-выключение;
- для монтажа оптических волокон необходимо прецизионное, а, следовательно, дорогое технологическое оборудование;
- высокие затраты по сравнению с медным кабелем на восстановление оптического кабеля при его повреждении (обрыве).

#### **2.4.2.5. Применение ВОЛС в ЛВС**

Наряду с глобальными сетями оптическое волокно широко используется и при создании ЛВС – Ethernet, FDDI, Token Ring.

Основные **преимущества** применения ВОЛС в ЛВС:

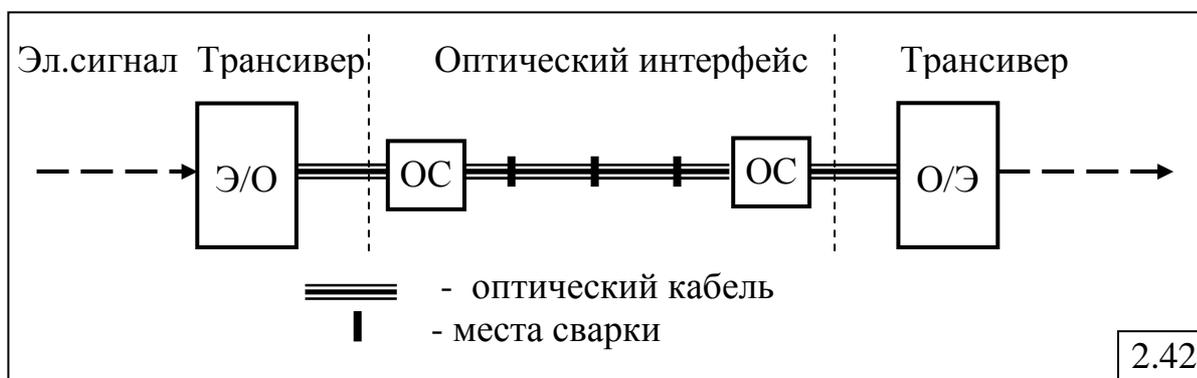
- не требуются повторители на протяженных сегментах ЛВС;
- вероятность искажения информации – не более  $10^{-10}$  благодаря низкому уровню шумов в оптических линиях связи;
- возможность наращивания вычислительной мощности сети без замены кабельных коммуникаций.

**Недостатки** использования ВОЛС в ЛВС:

- несмотря на возможно невысокую стоимость кабеля, стоимость работы по его прокладке может быть значительной.

В состав схемы ВОЛС (рис.2.42) входят:

- сетевой адаптер, устанавливаемый в рабочую станцию или сервер;
- приемопередатчик (трансвер), преобразующий электрический сигнал в оптический (Э/О) и обратно (О/Э);
- оптический соединитель (ОС);
- оптический кабель.



**2.4.2.6. Способы сращивания оптических волокон**

Для сращивания оптических волокон используются следующие средства.

**1. Специальные сварочные аппараты, обеспечивающие:**

- возможность сваривать любые типы волокон в ручном и автоматическом режимах;
- предварительное тестирование волокна;
- оценку качества поверхности волокон перед сваркой;
- установку оптимальных параметров работы;
- измерение потерь в точке их соединения.

При сварке одно- и многомодовых волокон потери составляют всего 0,01 дБ, что является превосходным результатом.

*Достоинства:*

- высокое качество сварки;
- большая скорость проведения работ, что немаловажно при ликвидации аварий на магистральных линиях связи.

*Недостаток:* высокая стоимость сварочных аппаратов;

**2. Механические "сплайсы" (splice),** представляющие собой пластиковые устройства размером со спичечный коробок (40x7x4 мм) и состоящие из крышки и корпуса со специальным желобом, в который с двух сторон вставляются соединяемые волокна, закрепляемые крышкой-

замком. Особая конструкция сплайса обеспечивает надежное центрирование, герметичное и качественное соединение волокон с потерями на стыке порядка 0,1 дБ.

Достоинства:

- простота и дешевизна способа соединения;
- малое время на соединение двух волокон (около 30 с после соответствующей подготовки волокон);
- удобство при работе в труднодоступном месте, так как монтаж ведется без применения клея и специального оборудования.

3. **Прецизионные втулки**, в которых в месте стыка волокон находится гель на основе силикона высокой прозрачности с показателем преломления, близким к показателю преломления оптического волокна, что обеспечивает оптический контакт между торцами сращиваемых волокон и одновременно герметизирует место стыка.

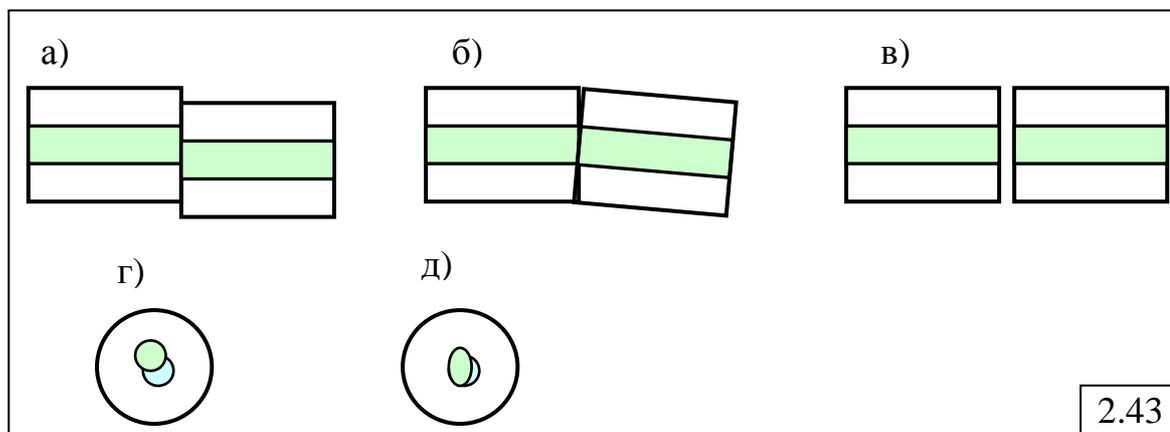
В местах сращивания оптических волокон возникают *потери энергии*, обусловленные:

1) внешними факторами:

- линейное смещение оптических волокон (рис.2.43,а);
- угловое смещение оптических волокон (рис. 2.43,б);
- воздушный зазор между сращиваемыми волокнами (рис. 2.43,в);

2) внутренними факторами:

- эксцентриситет сердцевин (рис. 2.43,г);
- эллиптичность сердцевин (рис. 2.43,д).



#### 2.4.2.7. Перспективы ВОЛС

Работы по увеличению пропускной способности оптических сетей ведутся в двух направлениях:

- увеличивается скорость передачи данных на одной длине волны: в коммерческих системах достигнут уровень 40 Гбит/с, а в тестовых – 320 Гбит/с;
- увеличивается число длин волн, передаваемых по одному волокну: 80 длин волн в коммерческих системах и до 1000 в тестовых.

Теоретическая пропускная способность одного волокна составляет около 300 Тбит/с, что превышает объем всего Интернет-трафика. С учетом

того, что в выпускаемых сегодня кабелях может находиться до 864 волокон, можно говорить о неограниченной полосе пропускания оптических сетей связи.

Кроме того, появляются новые полностью оптические сетевые устройства, обрабатывающие трафик без преобразования оптических сигналов в электрические и обратно.

### 2.4.3. Кабельные системы

*Кабельная система* представляет собой совокупность:

- кабелей разных типов (неэкранированная витая пара, коаксиальный кабель, волоконно-оптический кабель);
- соединительных розеток;
- кроссовых кабелей;
- распределительных панелей.

*Основными причинами сбоев и отказов* в работе локальной вычислительной сети являются:

- отказ кабельной системы – около 50% (в крупных сетях – до 70%);
- сбои программного обеспечения – около 20%;
- сбои серверов и рабочих станций – около 15%;
- сбои сетевых плат – около 5%;
- прочие – около 10%.

*Для диагностики и сертификации* кабельных систем используется специальное оборудование, а именно:

- **сетевые анализаторы** – дорогостоящие измерительные приборы для диагностики и сертификации кабелей и кабельных систем в лабораторных условиях специально обученным персоналом;
- **приборы для сертификации кабельных систем** – более простые и компактные (размером с видеокассету) приборы, чем сетевые анализаторы, выполняющие те же функции, но обеспечивающие меньшую точность;
- **кабельные сканеры** – приборы для определения длины кабеля, электромагнитных характеристик (NEXT, затухание, импеданс), схемы разводки кабеля, уровня электрических шумов;
- **тестеры (мультиметры)** – наиболее простые и недорогие приборы, позволяющие определить только факт обрыва кабеля.

### 2.4.4. Структурированные кабельные системы

К современным кабельным системам, используемым, в первую очередь, в компьютерных сетях, предъявляются следующие **требования**:

- *интеграция систем связи*, реализующих передачу различных видов данных (компьютерных, речи, видео), с системами контроля и управления;
- *открытость архитектуры* кабельной системы, обеспечивающей монтаж, последующее обслуживание и развитие комплексных,

стыкующихся со всем сертифицированным оборудованием систем проводки для различных сооружений;

- *обеспечение эффективного функционирования* и развития компьютерных сетей;

- *обеспечение высокой скорости передачи* данных – 100 и более Мбит/с.

Для достижения указанных требований была разработана и стандартизована технология построения кабельных систем, получившая название «СКС - структурированная кабельная система».

**Структурированная кабельная система (СКС)** представляет собой иерархическую кабельную систему здания или группы зданий, разделенную на структурные подсистемы, основными среди которых являются:

- вертикальная проводка между этажами здания;
- горизонтальная проводка на этажах;
- кроссовые (коммутационные) панели (кросс-панели);
- модульные розетки на рабочих местах.

К основным **особенностям** СКС можно отнести следующее:

- для передачи компьютерных данных, голоса и видеoinформации используется единая кабельная система;

- большие капиталовложения (по сравнению с традиционным подходом) оправдываются за счет длительной эксплуатации сети;

- обладают модульностью и возможностью внесения изменений и наращивания кабельной сети;

- допускают одновременное использование нескольких различных сетевых протоколов;

- не зависят от изменений сетевых технологий и смены поставщика оборудования;

- используют стандартные компоненты и материалы и позволяют комбинировать в одной сети кабели разных видов.

К **достоинствам** структурированного подхода относятся:

- максимальная *гибкость* в размещении соответствующего коммуникационного оборудования;

- возможность внедрения новых приложений и технологий;

- гарантированное соответствие всех ее компонентов международным стандартам;

- возможность подключения различных видов оборудования с помощью универсальных розеток на рабочих местах.

**Недостатки** структурированного подхода:

- больший срок построения, чем при традиционном подходе;

- дополнительные капитальные затраты на избыточное оборудование (кабели, розетки, кросс-панели), которые, впрочем, быстро окупаются в процессе эксплуатации.

Основным стандартом, описывающим СКС, является стандарт ANSI/TIA/EIA-568-A, разработанный и утвержденный комитетами American

National Standards Institute (ANSI), Telecommunications Industry Association (TIA) и Electronics Industry Association (EIA).

## 2.5. Беспроводные системы связи

*Недостатки*, присущие *кабельным линиям связи* (включая оптоволоконные):

- высокая стоимость арендуемых выделенных каналов;
- подверженность механическим воздействиям в процессе эксплуатации (обрывы и замыкания) и, в связи с высокой трудоемкостью их устранения, выход системы из строя на длительный срок;
- невозможность организации мобильной (подвижной) связи.

### 2.5.1. Общие принципы организации беспроводной связи

Для построения беспроводных сетей передачи данных необходимо иметь специальные технические и программные средства. Кроме того, необходимо иметь *лицензию* Государственной инспекции электросвязи на право использования определенных частот или арендовать у других организаций уже выделенные им частоты.

Беспроводная связь основана на использовании в качестве информационных сигналов **радиоволн** или, точнее, **электромагнитного поля излучения (ЭПИ)**. Источниками и приемниками ЭПИ являются разного вида *антенны*.

#### 2.5.1.1. Виды беспроводной связи

На рис.2.44 представлена классификация традиционных видов беспроводной связи, которая включает в себя:

- наземную радиосвязь в диапазоне частот от 30 МГц до нескольких десятков ГГц;
- радиорелейную связь (РРС) в диапазоне частот от 1 до 300 ГГц;
- спутниковую связь в диапазоне частот от 1 до 100 ГГц;
- лазерную (на ИК-лучах) в диапазоне частот от 300 до 400 ТГц.



Эти же виды беспроводной связи находят всё более широкое применение и в компьютерных сетях.

#### 2.5.1.2. Характеристики ЭПИ

Основными характеристиками ЭПИ (радиоволн) являются:

- *длина волны:*  $\lambda = \frac{c}{f}$ , где  $c$  – скорость света;  $f$  – частота колебаний радиоволн;
- *мощность излучения*  $P$  (энергия за секунду), измеряемая в ваттах;
- *напряженность поля излучения*, измеряемая в вольтах на метр.

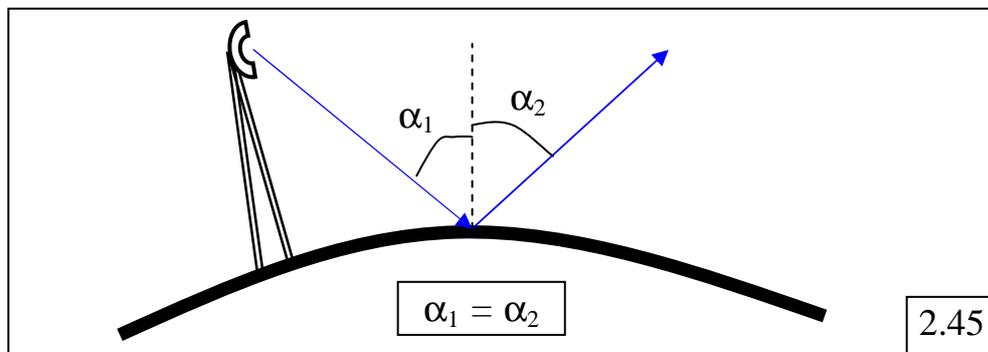
### 2.5.1.3. Условия распространения ЭПИ разных частот

На передачу ЭПИ в точке приема оказывают влияние 3 фундаментальных физических процесса:

- 7) *отражение* электромагнитного поля (от Земли, зданий и т.п.);
- 8) *преломление* его лучей в ионизированных слоях атмосферы;
- 9) явление *дифракции*.

**Отражение** электромагнитного поля от Земли (рис.2.45) приводит:

- к ослаблению поля (чем больше частота, тем больше ослабление);
- к изменению его фазы.

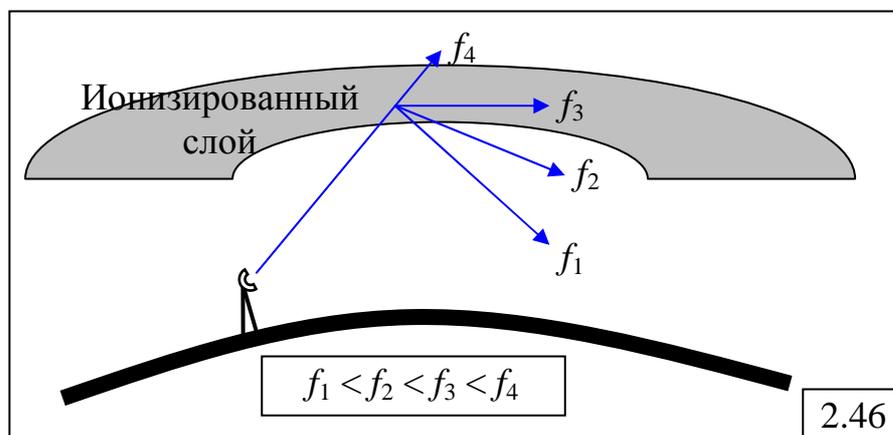


**Ионизированный слой** в атмосфере создается в основном ультрафиолетовым излучением солнца и меняет свои свойства в течение суток и в разные времена года.

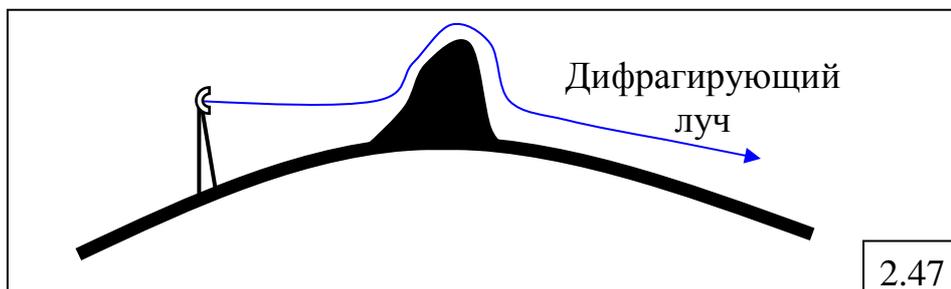
В ионосфере происходит (рис.2.46):

- *преломление лучей*, при этом чем короче волна, то есть чем больше частота, тем меньше преломление при прочих равных условиях, поэтому для связи с космическими объектами используются высокочастотные радиоволны;

- поглощение энергии.



**Дифракция** (рис.2.47) – явление огибания препятствий, приводящее к ослаблению поля: чем больше расстояние и чем больше частота, тем слабее явление дифракции и больше ослабление поля в точке приема.



При выборе длины волны (частоты передачи) для беспроводной передачи необходимо принимать во внимание условия распространения радиоволн, зависящие от:

- трех выше рассмотренных факторов (поглощение, отражение, дифракция);
- интенсивности помех;
- скорости передачи и др.

#### 2.5.1.4. Диапазоны радиоволн

В радиовещательных приёмниках радиоволны условно разделены на следующие диапазоны:

- *длинные* (2000 – 600 м или 150 – 500 кГц);
- *средние* (600 – 200 м или 500 – 1500 кГц);
- *короткие* (100 – 10 м или 3 – 30 МГц);
- *ультракороткие* (менее 10 м или более 30 МГц).

Более научно обоснованным и узаконенным Госстандартом является деление волн на:

- *километровые* (частота < 300 кГц);
- *гектометровые* (300 – 3000 кГц);
- *декаметровые* (3 – 30 МГц);
- *метровые* (30 – 300 МГц);
- *дециметровые* (300 – 3000 МГц);
- *сантиметровые* (3 – 30 ГГц);
- *миллиметровые и субмиллиметровые* (> 30 ГГц).

#### 2.5.1.5. Свойства радиоволн разных диапазонов

Использование радиоволн разных диапазонов в тех или иных областях определяется их свойствами, которые кратко рассматриваются ниже.

##### **Километровые волны:**

- *Диапазон длин волн (частот)*: более 1 000 м (менее 300 кГц).
- *Недостаток*: плохая излучательная способность антенн (низкий к.п.д. антенны).

- Используются для создания систем устойчивого радиовещания и связи на большие расстояния, для связи под водой, куда не проникают волны более высоких частот.

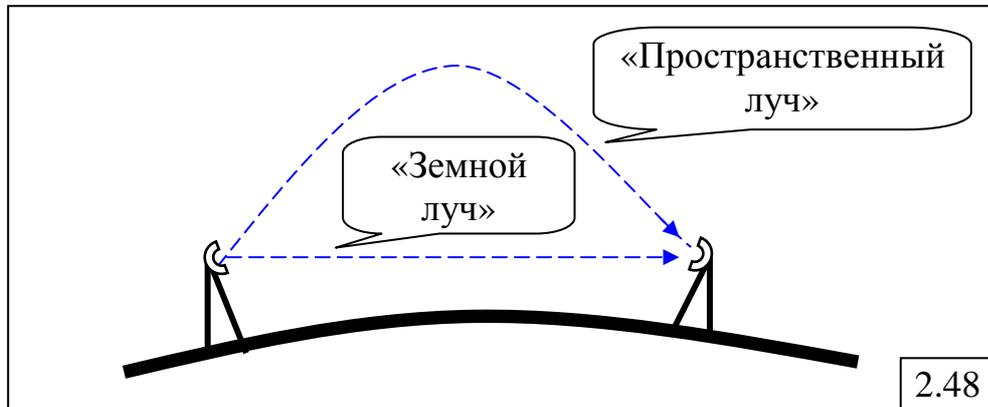
**Гектометровые волны:**

- Диапазон длин волн (частот): 1000 – 100 м (300 – 3000 кГц).
- Имеет место эффект замирания поля (фединг) из-за:
  - изменения плотности ионосферы;
  - взаимодействия "пространственных" и "земного" лучей, пришедших в одну точку (рис.2.48).
- Используется для радиовещания и связи на флоте и в авиации.

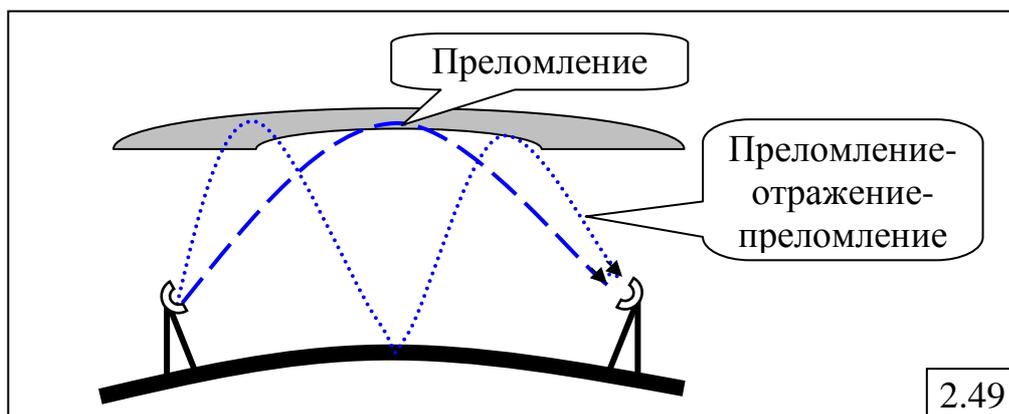
На волне  $\lambda = 600$  м передавался международный сигнал бедствия "SOS".

**Декаметровые волны:**

- Диапазон длин волн (частот): 100 – 10 м (3 – 30 МГц).
- Явление дифракции несущественно из-за резкого возрастания потерь энергии при отражении от Земли (рис.2.49).



- Поле в точке приема создается в основном за счет преломления волн в ионизированном слое атмосферы (пунктирная линия на рис.2.49).
- Имеет место замирание поля и пропадание связи из-за преломления волн в ионосфере и взаимодействия лучей (рис.2.48 и рис.2.49).
- На создание поля влияют солнечные вспышки, рассеяние волн на мелких неоднородностях ионосферы, "расщепление" (разделение) лучей из-за наличия магнитного поля Земли.
- Применяются при создании протяженных (магистральных) линий радиосвязи и для любительской связи.



**Метровые волны:**

- *Диапазон длин волн (частот):* 10 – 1 м (30 – 300 МГц).
- Практически отсутствует явление дифракции.
- Имеет место явление *рефракции волн в атмосфере*, когда волны распространяются не по прямым линиям, а по дугам.
  - На волнах короче 4 м начинает существенно сказываться явление *рассеяния радиоволн* на малых неоднородностях атмосферы и ионосферы, в результате чего поле оказывается очень слабым, но по-прежнему устойчивым.
  - При повышении мощностей передатчиков до нескольких киловатт можно осуществлять радиосвязь на расстояния до нескольких тысяч километров.

**Дециметровые волны:**

- *Диапазон длин волн (частот):* 1 – 0,1 м (300 – 3000 МГц).
- Ионосфера для дециметровых волн полностью прозрачна – поле ею не преломляется, поэтому возможна связь с космическими объектами.
- Энергия поля значительно уменьшается из-за поглощения в каплях дождя, тумана, в молекулах кислорода и других газов.

**Сантиметровые волны:**

- *Диапазон длин волн (частот):* 0,1 – 0,01 м (3 – 30 ГГц).
- Распространяются практически только в пределах прямой видимости.
  - Используются специальные остронаправленные антенны: параболические, рупорные и др.
  - Для волн короче 1,5 см начинают проявляться *процессы молекулярного поглощения* электромагнитного поля.

**Миллиметровые и субмиллиметровые волны:**

- *Диапазоны длин волн (частот):* 0,01 – 0,001 м (30 – 300 ГГц) – миллиметровые волны и менее 0,001 м (более 300 ГГц) – волны субмиллиметровые.
  - Ослабление поля из-за поглощения в тумане и дожде возрастает до 30-100 дБ/км.
  - В настоящее время диапазон волн, используемых в беспроводной связи, простирается до:
    - *инфракрасных:* 100–0,75 мкм (3–400 ТГц);
    - *видимых*, генерируемых лазерами: 0,75–0,4 мкм (400–750 ТГц).
  - Поглощение в тумане и дожде инфрокрасных и видимых волн может достигать сотен дБ/км, что означает их практическую неприменимость в открытом пространстве – их использование целесообразно в закрытых системах: волноводах и световодах.

**Метровые и дециметровые** волны используются в телевидении, радиовещании, для местной связи и навигации на аэродромах, для связи с подвижными объектами в городах.

На **сантиметровых** волнах работают: радиорелейные линии, радиолокационные системы, системы связи с космическими объектами.

При построении компьютерных сетей используются высокочастотные радиоволны, начиная с дециметрового диапазона частот: сантиметровые и миллиметровые.

### 2.5.2. Наземная радиосвязь

К **техническим средствам** наземной радиосвязи относятся:

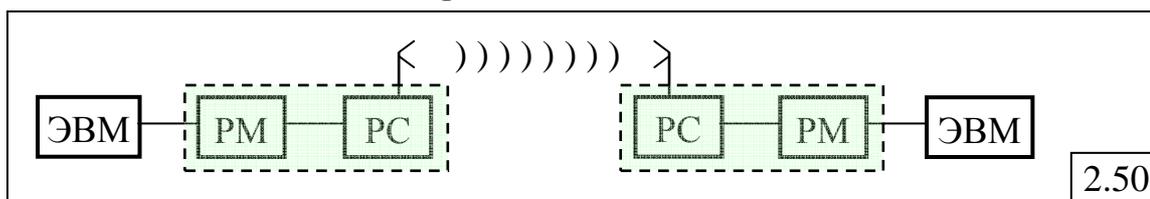
- радиостанции КВ- и УКВ-диапазонов;
- терминальные сетевые контроллеры – *радиомодемы*.

**Радиомодем** (PM) предназначен для управления обмена данными по радиоканалу и включается между ЭВМ и радиостанцией (РС) (рис.2.50).

PM обычно предоставляет следующие возможности:

- выбор скорости передачи;
- установка адреса получателя;
- регулировка чувствительности, предотвращающая прием фонового сигнала в отсутствие информативного.

Для предотвращения приема фонового сигнала в отсутствие информативного в радиомодем встраивается регулятор чувствительности, который задает пороговое значение входного сигнала, при котором радиомодем включается на прием.



**Чувствительность** – пороговое значение входного сигнала, при котором PM включается на прием.

Конструктивно PM и РС обычно выполняются в виде одного устройства.

**Достоинства** использования наземной радиосвязи:

- сравнительно невысокая стоимость передачи данных, поскольку, несмотря на значительные начальные вложения по сравнению с телефонной связью, арендная плата за один радиоканал значительно ниже арендной платы за выделенный телефонный канал;
- возможность работы на одном радиоканале нескольких абонентов;
- возможность организации мобильной связи.

Типичным примером беспроводной наземной радиосвязи может служить беспроводная телефония, получившая название сотовой связи, обеспечивающая передачу не только речи, но и других типов данных, включая мультимедийные, а также выход в Интернет и другие телекоммуникационные сети.

В последнее десятилетие всё более широкое распространение получают беспроводные локальные вычислительные сети, реализуемые в рамках наземной радиосвязи. Отличительными особенностями таких сетей (по сравнению с «традиционной» наземной радиосвязью) являются:

- используемые диапазоны частот 1 и более ГГц;

- сравнительно небольшой территориальный охват (до нескольких сотен метров);
- специальные методы кодирования передаваемых данных.

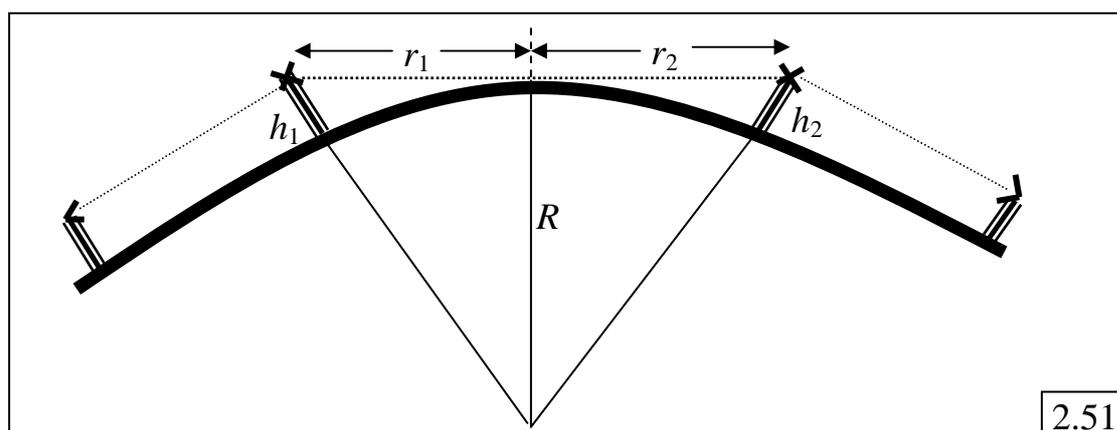
### 2.5.3. Радиорелейные линии связи

Радиорелейные линии связи (РРЛС) представляют собой цепочку приемно-передающих станций, антенны которых отстоят друг от друга на расстоянии прямой видимости. РРЛС использует **принцип ретрансляции**, когда каждая станция, входящая в РРЛС, принимает, усиливает и излучает сигнал в направлении соседней станции (рис.2.51).

Полагая, что Земля – шар, расстояние  $r$  между двумя находящимися на прямой видимости антеннами в случае гладкой поверхности Земли (равнина без леса или водная поверхность) определяется из условия (см. рис.2.51):

$$r = r_1 + r_2 = \sqrt{(R + h_1)^2 - R^2} + \sqrt{(R + h_2)^2 - R^2} = \sqrt{2Rh_1 + h_1^2} + \sqrt{2Rh_2 + h_2^2}$$

где  $h_1, h_2$  – высота установки соответственно передающей и приемной антенн соседних станций;  $R$  – радиус земного шара.



Учитывая, что  $h_1^2 \approx h_2^2 \approx 0$  по сравнению с  $2Rh_1$  и  $2Rh_2$ , получим:  
 $r \approx \sqrt{2Rh_1} + \sqrt{2Rh_2} = \sqrt{2R}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$ .

Принимая, что  $R \approx 6400 \text{ км} = 6\,400\,000 \text{ м}$ , получим:

$$r \approx \sqrt{13\,000\,000}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) [\text{м}] = 3,6 \cdot 1000(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) [\text{м}] = 3,6(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) [\text{км}].$$

Таким образом, в случае абсолютно гладкой земной поверхности расстояние (в километрах), обеспечивающее прямую видимость между антеннами, может быть рассчитано по формуле:

$$r \approx 3,6(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad [\text{км}],$$

где  $h_1, h_2$  – высоты установки соответственно передающей и приемной антенн соседних станций (в метрах).

При  $h_1 = h_2 = 100 \text{ м}$  получим:  $r \approx 72 \text{ км}$ .

Для передачи сигналов по РРЛС применяются остронаправленные антенны с большим коэффициентом усиления 30-40 дБ ( $10^3 - 10^4$  раз по мощности), что позволяет применять передатчики небольшой мощности (не более 10-20 Вт).

Для работы РРЛС выделяются частоты в области от 1 до 30 ГГц.

Достоинства этих диапазонов:

- 1) высокая пропускная способность;
- 2) высокая помехоустойчивость и надежность.

Для увеличения пропускной способности РРЛС на каждой станции обычно устанавливается несколько комплектов приемно-передающей аппаратуры, подключаемых к одной общей антенне и использующих разные несущие (рабочие) частоты. Цепочка станций с одним комплектом однотипной высокочастотной приемно-передающей аппаратуры, установленной на каждой станции (без модуляторов и демодуляторов), образуют так называемый **высокочастотный (ВЧ) ствол** РРЛС или **радиоствол**.

**Цифровые радиорелейные линии связи (ЦРРЛС)** предназначены для передачи высокоскоростных потоков цифровых данных, которые характеризуются широким спектром частот и требуют широких полос пропускания приемно-передающей аппаратуры. ЦРРЛС работают на частотах более 10 ГГц и в миллиметровом диапазоне волн с частотой от 30 ГГц до 300 ГГц. ЦРРЛС используются в многоканальных цифровых сетях связи и характеризуются высокой скоростью передачи данных.

## 2.5.4. Спутниковые системы связи

### 2.5.4.1. Общие сведения

В общем случае, под **спутниковой связью** понимают связь между *земными станциями (ЗС)* через *космические станции (КС)*, представляющие собой пассивные *искусственные спутники Земли (ИСЗ)*, реализующие функции *ретранслятора*.

Организационно-техническая совокупность ЗС связи различного базирования, КС (спутники-ретрансляторы) и автоматизированной системы управления образуют **спутниковую систему связи (ССС)**.

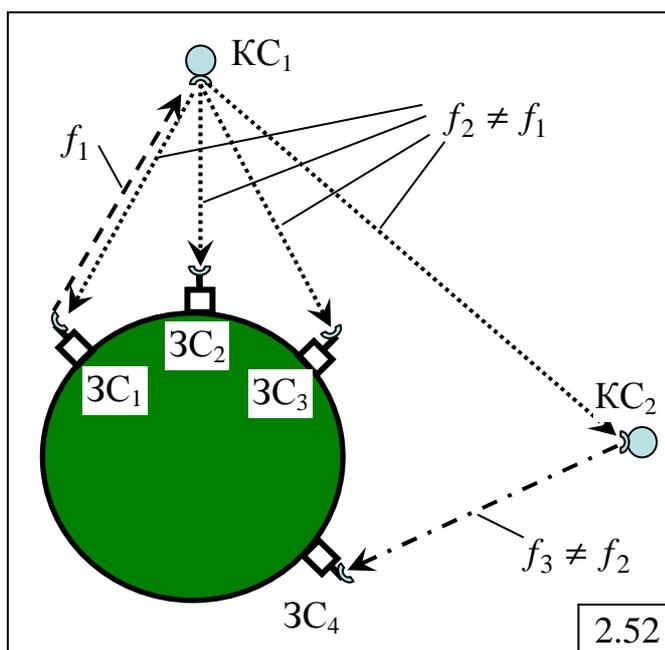
Спутники могут обеспечивать прямые каналы между двумя точками в сетях связи, разделяя пропускную способность канала посредством частотного или временного уплотнения. Однако более эффективным является способ организации, при котором каждому пользователю для передачи данных предоставляется вся полоса пропускания. При этом на одной частоте  $f_1$  формируется канал от земных станций к принимающей спутниковой станции, а на другой частоте  $f_2 \neq f_1$  – широкоэвещательный канал к земным станциям от спутника, который ретранслирует пакеты, используя также всю полосу пропускания. Эти пакеты принимаются всеми земными станциями, находящимися в радиусе действия антенны спутника. Анализируя адрес, содержащийся в заголовке пакета, земная станция

принимает те пакеты, которые предназначены непосредственно ей, и игнорирует остальные.

На рис.2.52 показан принцип реализации спутниковой связи. Земная станция  $ЗС_1$  передаёт пакет космической станции  $КС_1$  на частоте  $f_1$ , которая ретранслирует полученные данные на частоте  $f_2 \neq f_1$ . Все станции ( $ЗС_1, ЗС_2, ЗС_3$ ), находящиеся в зоне видимости  $КС_1$ , включая станцию-отправитель  $ЗС_1$ , получают передаваемый пакет, то есть передача от  $КС_1$  к земным станциям реализуется по схеме «точка-многоточка». Земная станция, адрес которой указан в передаваемом пакете как адрес назначения, заносит этот пакет в буфер. Остальные  $ЗС$  игнорируют этот пакет.

Для передачи данных станции  $ЗС_4$ , находящейся вне зоны видимости  $КС_1$ , может использоваться ещё один спутник  $КС_2$ , который на частоте  $f_3 \neq f_2$  ретранслирует пакет, поступивший от  $КС_1$ .

Описанный принцип работы имеет много общего с наземными радиосистемами. Самое большое различие между спутниковыми и наземными радиосистемами состоит во времени распространения передаваемых сигналов. При нахождении геостационарного



спутника на высоте около 36 000 км общее время распространения сигнала (к спутнику и обратно) составляет от 240 мс до 270 мс в зависимости от того, находится ли спутник в зените или вблизи горизонта, а с учетом мультиплексирования, коммутации и задержек обработки сигнала общая задержка может составлять до 400 мс. Благодаря высокой скорости передачи пакетов земная станция может успеть передать большое число пакетов, прежде чем первый из пакетов возвратится на Землю. Поэтому в спутниковых системах неприемлемы методы предотвращения столкновений пакетов с помощью контроля несущей, которые используются в наземных радиосистемах.

В спутниковой системе не нужен механизм подтверждения правильности принятых данных с помощью квитанций, поскольку все земные станции принимают пакеты от  $КС$  (в том числе и станция-источник  $ЗС_1$  на рис.2.52). Если станция-источник принимает свой пакет в том же виде, в каком он был передан космической станции, то это с высокой степенью вероятности свидетельствует о том, что пакет правильно принят станцией назначения. В то же время, правильный прием пакета станцией-

источником показывает, что столкновения пакетов в канале коллективного доступа не произошло. Конечно, ошибка может возникнуть в самой станции назначения. В этом случае она может запросить повторную передачу пакета.

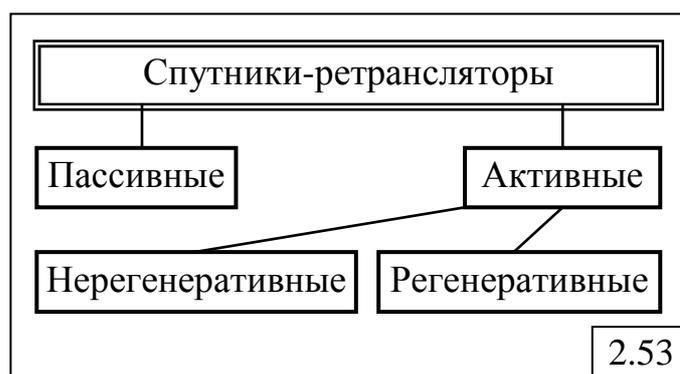
Спутники-ретрансляторы могут быть пассивными и активными (рис.2.53). Все современные спутники-ретрансляторы являются **активными**, которые в отличие от **пассивных**, представляющих собой простой отражатель радиосигнала, оборудованы аппаратурой для *приема, обработки, усиления и ретрансляции* сигнала.

Активные спутники могут быть **нерегенеративными** и **регенеративными** (рис.2.53).

**Нерегенеративный** спутник, приняв сигнал от одной земной станции, переносит его на другую частоту, усиливает и передает другой земной станции.

**Регенеративный** спутник производит демодуляцию принятого сигнала и заново модулирует его. Благодаря этому исправление ошибок производится дважды: на спутнике и на принимающей земной станции. Недостаток этого метода – сложность и, следовательно, более высокая стоимость, а также увеличенная задержка сигнала.

Один и тот же спутник связи может использоваться несколькими системами связи, имеющими свои комплексы ЗС.



Основные достоинства ССС:

- высокая пропускная способность;
- возможность перекрытия больших расстояний;
- возможность обеспечения связью труднодоступных районов;
- независимость стоимости и качества спутниковых каналов от их протяженности.

#### 2.5.4.2. Классификация спутниковых систем по типу орбиты

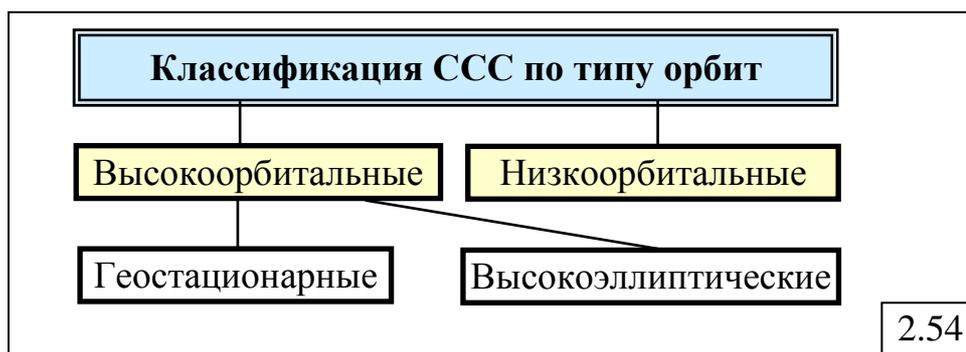
**Орбита** – траектория движения спутника связи.

ССС могут быть классифицированы в зависимости от типа орбит (рис.2.54).

**Высокоорбитальные ССС** используют *высокие* орбиты (диаметром десятки тысяч км), к которым относятся:

- *геостационарная* орбита;
- *высокоэллиптическая* орбита;
- **Низкоорбитальные ССС** используют низкие круговые орбиты, имеющие сравнительно небольшой диаметр (от нескольких сотен до

нескольких тысяч км), наклоненные под некоторым углом относительно экватора.

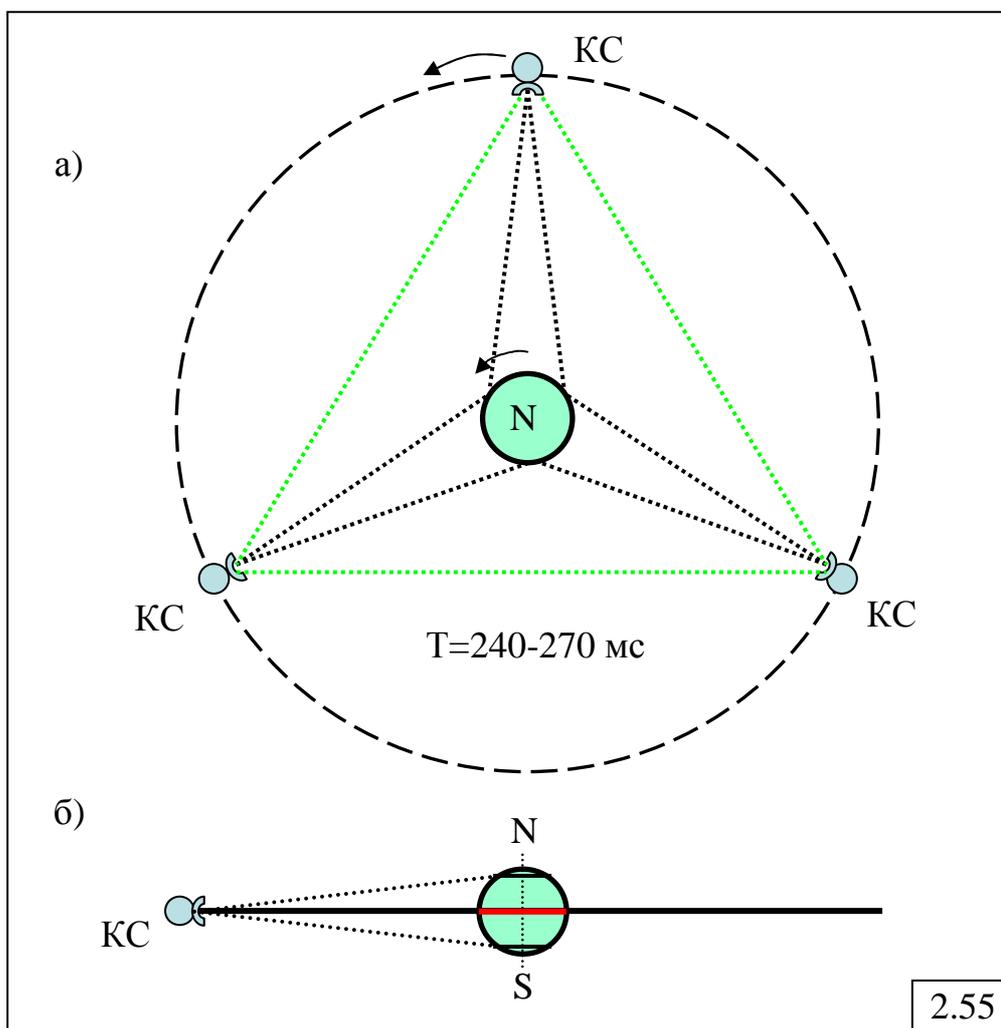


2.54

### 2.5.4.3. Геостационарная орбита

**Геостационарная орбита** или орбита геостационарного спутника – это *круговая* (эксцентриситет эллипса  $e = 0$ ) *экваториальная* (наклонение – угол между плоскостью орбиты и плоскостью экватора –  $\alpha = 0$ ) *синхронная* орбита с периодом обращения 24 ч, с движением ИСЗ в восточном направлении (рис.2.55).

Геостационарный спутник оказывается "зависшим", неподвижным относительно земной поверхности. Он располагается над экватором на высоте 35 875 км с неизменной долготой подспутниковой точки.



2.55

**Достоинства** геостационарных орбит:

- 1) связь осуществляется непрерывно, круглосуточно, без переходов с одного ИСЗ на другой и без необходимости отслеживания антеннами положения спутника;
- 2) ослабление сигнала на трассе между ЗС и спутником является стабильным вследствие неизменности расстояния от ИСЗ до ЗС;
- 3) отсутствует или, по крайней мере, весьма мал сдвиг частоты сигнала со спутника связи, вызываемый его движением (эффект Доплера);
- 4) зона видимости геостационарного спутника – около трети земной поверхности, что обуславливает теоретическую достаточность трех ИСЗ для создания глобальной системы связи (см. рис.2.55,а).

Благодаря указанным преимуществам геостационарную орбиту используют очень широко.

Геостационарные спутники Земли стали использоваться для передачи информации на несколько лет раньше, чем возникли первые сети с коммутацией пакетов. Коммерческие спутники связи начали работать с 1965 г. Геостационарную орбиту используют спутниковые системы связи: ГОРИЗОНТ, ЭКРАН-М (Россия), INTELSAT; EUTELSAT и другие.

**Недостатки** геостационарных орбит:

- 1) в высоких широтах (больше 75 градусов) геостационарный спутник практически не виден (см. рис.2.55,б);
- 2) углы места наведения антенны на спутник дополнительно уменьшаются с удалением по долготе точки приема от долготы ИСЗ.

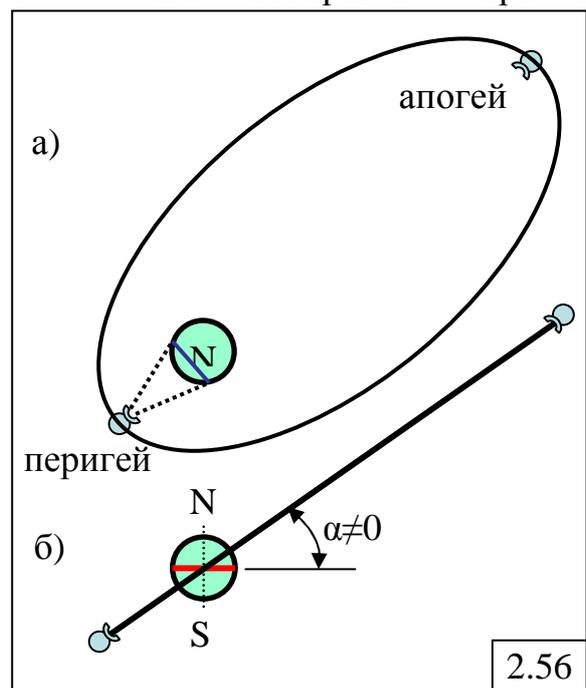
Все это приводит к необходимости использовать другие типы орбит для обеспечения спутниковой связью соответствующих районов Земного шара.

**2.5.4.4. Высокоэллиптическая орбита**

**Высокоэллиптическая орбита** – эллипсообразная орбита (эксцентриситет эллипса не равен 0) с ненулевым наклоном (угол между плоскостью орбиты и плоскостью экватора отличен от 0) с периодом обращения 12 ч. Земля расположена в плоскости орбиты близко к одному из концов эллипса (рис.2.56).

**Апогей** – наиболее удалённая точка орбиты; **перигей** – наименее удалённая точка орбиты.

Высокоэллиптическая орбита используется с апреля 1965 года системами связи и вещания нашей страны при эксплуатации спутников связи типа "Молния". Обслуживание всей территории России возможно в



течение примерно 8 часов, поэтому трех-четырёх ИСЗ, сменяющих друг друга, достаточно для организации круглосуточной радиосвязи.

Основное **достоинство** высокоэллиптической орбиты – организация связи для территорий, находящихся в высоких широтах.

#### **2.5.4.5. Низкоорбитальные ССС**

Для обеспечения связью потребителей с небольшим трафиком используются две концепции построения низкоорбитальных ССС:

- 1) использование малых низкоорбитальных спутников связи;
- 2) технология малоапертурных спутниковых терминалов (VSAT-технология).

**Системы малых низкоорбитальных спутников связи** представляют собой многоспутниковую (от десятка до нескольких сотен спутников) низкоорбитальную группу малых космических аппаратов, размещённых на круговых орбитах высотой от 600 до 2000 км и наклоном от 30 до 85 градусов. При этом для любой точки обслуживаемой области земной поверхности в зоне ее радиовидимости будет находиться хотя бы один космический аппарат.

*Достоинства* системы малых низкоорбитальных спутников связи:

- 1) сравнительно небольшие расстояния от ЗС до спутников-ретрансляторов приводит к:
  - значительному энергетическому выигрышу по сравнению с системами связи через высокоорбитальные спутники связи;
  - возможности применения земных станций с малой мощностью передатчика;
  - упрощению конструкции ретранслятора;
  - снижению массогабаритных показателей космического аппарата;
- 2) стоимость системы связи примерно на порядок ниже, чем связь через геостационарные ИСЗ.

Примеры систем малых низкоорбитальных спутников связи: IRIDIUM, GLOBALSTAR, TELEDESIC.

**Технология малоапертурных спутниковых терминалов (VSAT – Very Small Aperture Terminal)** заключается в разработке и использовании земных станций с очень малыми размерами антенн (диаметром 0,9–2,4 м) и усилителем высокой частоты небольшой мощности (1–5 Вт), находящимися непосредственно у абонента. Это позволяет существенно уменьшить габариты и стоимость таких станций и делает их доступными мелким и средним фирмам и компаниям.

С момента своего появления сети спутниковой связи наряду с проводными, радиорелейными, тропосферными и т.д. рассматривались в качестве так называемых **первичных сетей связи**, т.е. систем образования типовых каналов связи и групповых трактов передачи сигналов.

На базе типовых каналов первичных сетей организуются **вторичные сети связи** – телефонные, телеграфные, передачи данных, факсимильной

связи и др. Это обусловило определенную самостоятельность в разработке средств спутниковой связи и ориентирование при создании вторичных сетей на возможности и особенности спутниковых каналов связи.

### 2.5.5. Беспроводные сети на ИК-лучах

**Назначение:** для быстрого развертывания сетей и ноутбуков.

**Особенности** построения и функционирования сетей на ИК-лучах:

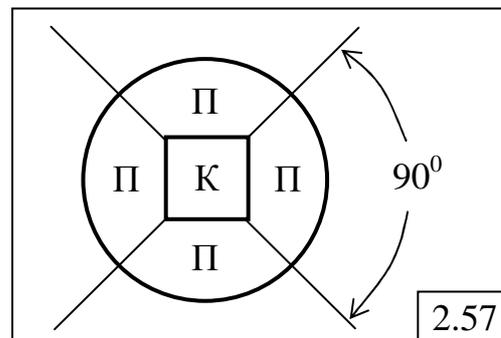
- 1) нет необходимости тянуть кабели, когда нет таких возможностей, например, в полевых условиях;
- 2) небольшой радиус действия: 5–10 м – в пределах одного помещения, что обеспечивает конфиденциальность;
- 3) излучаемая мощность невысока, а воздействие ИК-излучения на организм, в отличие от СВЧ, изучено предельно хорошо;
- 4) устойчивость к радиопомехам;
- 5) не требуется лицензирование частот.

**Технические характеристики:**

- 1) дальность работы приемо-передатчика (П):
  - внутри помещения: 10 м – 20 м;
  - между зданиями или внутри длинных коридоров: до 500 м;
- 2) рабочие длины волн: 800 – 900 нм (частоты 300 – 400 ТГц);
- 3) скорость передачи данных: до 10 Мбит/с;
- 4) концентратор (К) с охватом  $360^{\circ}$  (рис.2.57) обеспечивает одновременную работу с 255 станциями.

**Недостатки** сетей на ИК-лучах:

- 1) ПП требуют ручной ориентации друг на друга;
- 2) нет технических средств для мобильных пользователей;
- 3) малые расстояния;
- 4) зависимость от погодных условий (дождь, туман, снег).



Беспроводные сети на ИК-лучах не получили широкого распространения и в последние годы практически полностью вытеснены беспроводными сетями, использующими радиодиапазон.

## 2.6. Телекоммуникационные сети

### 2.6.1. Классификация телекоммуникационных сетей

В зависимости от вида передаваемых данных телекоммуникационные сети делятся на:

- аналоговые сети;
- цифровые сети.

К современным телекоммуникационным сетям предъявляются два основных *требования*:

- интеграция – возможность передачи в сети данных разных типов (неоднородного трафика), предъявляющих разные требования к качеству передачи;

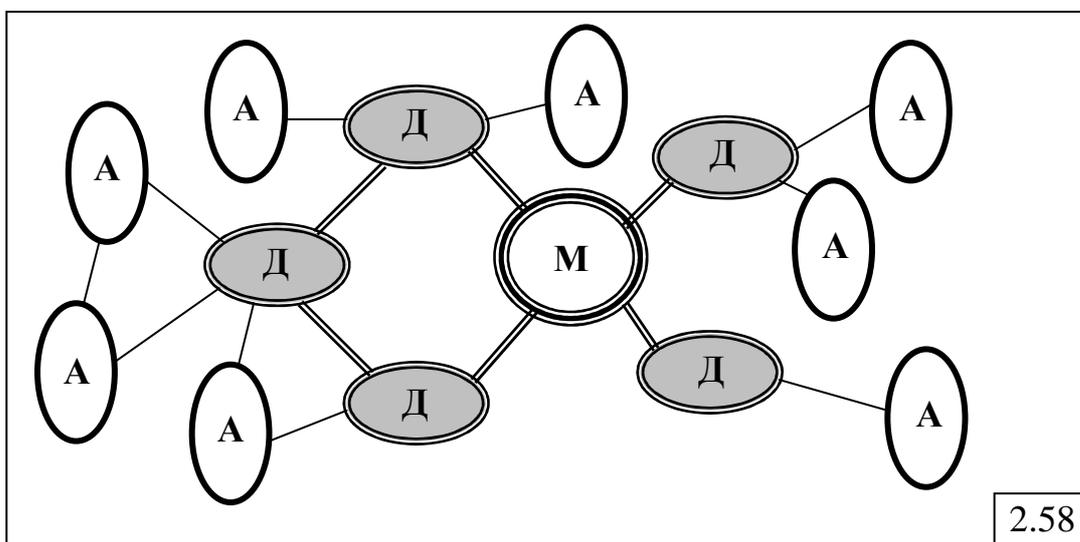
- высокие скорости передачи за счет использования широкополосных каналов связи (построения широкополосных сетей передачи данных).

В зависимости от назначения в структуре современных телекоммуникационных сетей выделяют несколько уровней иерархии (рис.2.58):

- **абонентские сети (А)**, представляющие собой домашние, офисные и корпоративные сети на основе LAN или WAN;

- **сети доступа (Д)**, объединяющие потоки от нескольких абонентских сетей в единый поток, направляемый в магистральную сеть;

- **магистральная сеть (М)**, представляющая собой высокоскоростную широкополосную сеть на основе первичных транспортных сетей (волоконно-оптических, спутниковых и т.д.).



**Сети доступа** могут быть построены на основе:

- *коммутируемых каналов* – традиционные аналоговые телефонные сети (ТфОП) и цифровые сети ISDN;

- *выделенных каналов* – от аналоговых каналов ТЧ с полосой пропускания 3,1 кГц до цифровых каналов SDH с пропускной способностью десятки Гбит/с;

- *коммутации пакетов* – технологии X25, Frame Relay, ATM, а также TCP/IP (Internet).

**Магистральные сети** строятся обычно на основе выделенных цифровых каналов с пропускными способностями до десятков Гбит/с.

Сети доступа и магистральные сети образуют транспортную (опорную) систему, назначение которой быстрая и надежная доставка данных.

Транспортные системы на основе выделенных каналов можно разбить на 2 класса: *цифровые (цикловые)* и *аналоговые (нецикловые)*.

Аналоговые транспортные системы реализуются в основном на основе существующих телефонных каналов

Цифровые транспортные системы могут быть реализованы на основе следующих технологий:

- плезиохронные (PDH);
- синхронные (SDH);
- асинхронные (ATM).

### 2.6.2. Передача данных на основе телефонных сетей

Телефонная сеть объединяет телефонные станции разных уровней – сельские, городские, междугородные и т.д.

*АТС* – автоматическая телефонная станция, основной функцией которой является коммутация потока речевых (телефонных) данных. В общем случае, АТС можно рассматривать как пространственный коммутатор.

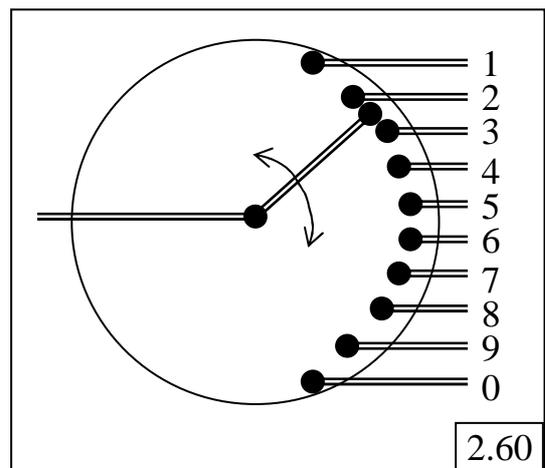
В процессе эволюции АТС прошли путь от *электромеханических станций* до современных станций с программным управлением (рис.2.59).



**Электромеханические АТС** представлены двумя типами станций.

1. *Декадно-шаговые АТС*, в которых в качестве коммутационного элемента используется декадно-шаговый искатель – электромеханическое устройство, представляющее собой набор из 10 контактов, которые замыкаются бегунком в зависимости от поданного числа электрических импульсов, формируя электрическую цепь (рис.2.60).

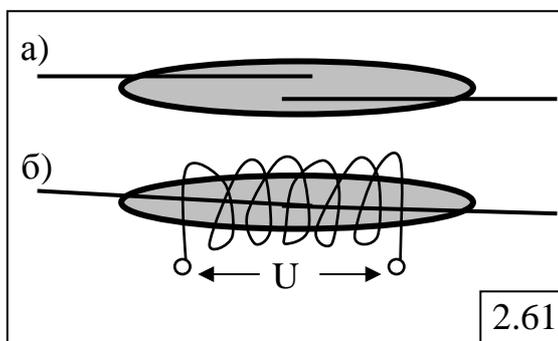
При подаче одного импульса бегунок замыкает контакт 1, двух – контакт 2, ..., десяти импульсов – контакт 0. Наличие подвижных электромеханических контактов обуславливает появление значительных помех, что существенно осложняет передачу цифровых данных и не позволяет достичь сколь-нибудь приемлемой скорости передачи.



2. **Координатные АТС**, в которых в качестве коммутационных устройств используются многократные координатные соединители (МКС), представляющие собой приборы релейного действия, имеющие по сравнению с декадно-шаговыми искателями более простое устройство, что позволяет удешевить эксплуатационное обслуживание коммутационного оборудования и обеспечить более высокое качество коммутации разговорного тракта.

**АТС с программным управлением** также представлены двумя типами станций.

1. **Квазиэлектронные АТС**, в которых коммутационное устройство реализовано на основе герконов, а управление коммутационным устройством – средствами микропроцессорной техники. **Герконы** (сокращение от «герметичный контакт») представляют собой пару ферромагнитных контактов, запаянных в герметичную стеклянную колбу (рис.2.61,а), которые вместе с электромагнитной катушкой образуют герконовое реле. При прохождении тока через электромагнитную катушку контакты замыкаются, формируя электрическую цепь для передачи данных (рис.2.61,б).



2. **Цифровые (электронные) АТС**, в которых коммутация и управление полностью цифровые. Аналоговый сигнал оцифровывается в абонентском комплекте и передаётся внутри АТС и между АТС в цифровом виде, что гарантирует отсутствие затухания и уменьшает влияние помех на передаваемые данные. Это обеспечивает качественную передачу данных с максимально возможной скоростью.

Упрощённо структуру электронной АТС можно представить в виде четырёх основных блоков (рис.2.62).

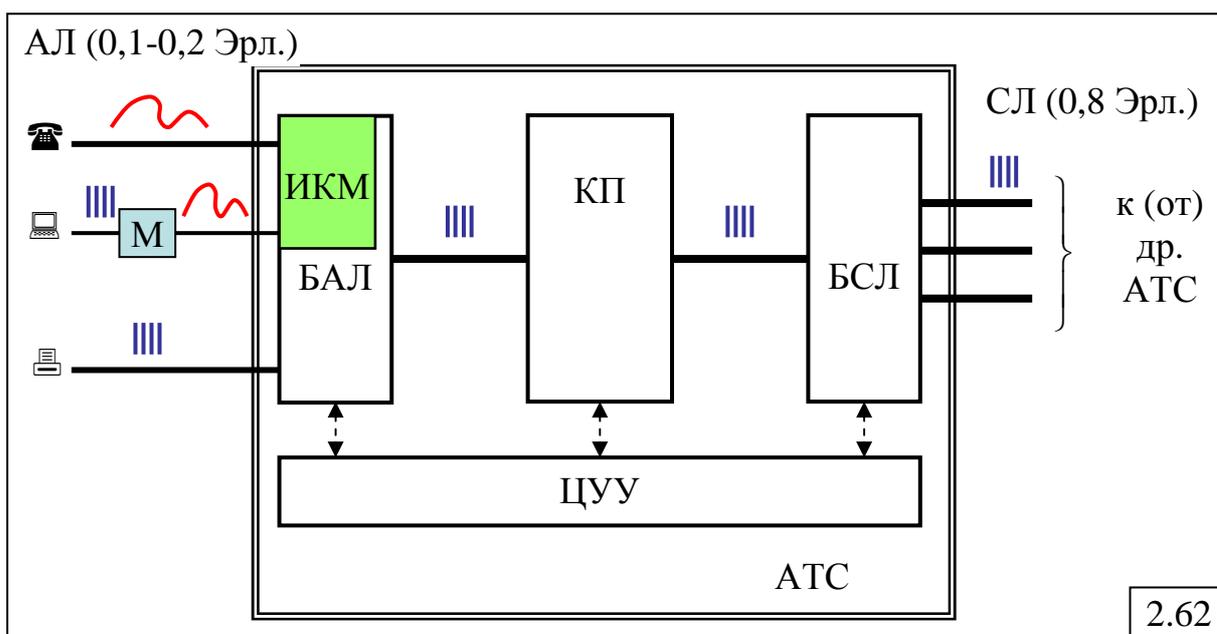
1. БАЛ – блок абонентских линий (АЛ), реализующий функции обслуживания абонентов, в качестве которых могут выступать:

- обычные аналоговые телефоны, передающие к АТС данные в виде непрерывных сигналов по аналоговым АЛ;
- компьютеры, дискретные сигналы от которых преобразуются с помощью модемов в непрерывные, передаваемые по аналоговым АЛ;
- цифровое оборудование (компьютеры, принтеры и т.п.), дискретные сигналы от которых передаются к АТС по цифровым АЛ.

Аналоговые сигналы, поступающие от абонентов с использованием ИКМ преобразуются в АТС в цифровой вид.

Уровень нагрузки в телефонии принято измерять в Эрлангах (Эрл.). Единица измерения нагрузки получила название в честь основоположника методов расчёта телефонной нагрузки.

Нагрузка на одну АЛ принимается равной 0,1-0,2 Эрл.



2. БСЛ – блок соединительных линий (СЛ), обеспечивающих связь с другими АТС. При связи с другой цифровой АТС сигналы по СЛ передаются в цифровом виде. Если же соседняя АТС является аналоговой, то цифровые сигналы преобразуются в аналоговый вид.

При расчёте необходимого количества СЛ нагрузка на одну СЛ принимается равно 0,8 Эрл.

3. КП – коммутационное поле может быть реализовано либо в виде некоторого электронного коммутатора, либо в виде «речевого запоминающего устройства» (РЗУ). В последнем случае речь, представленная в цифровом виде сначала записывается в РЗУ, а затем передаётся в соответствующую АЛ к абоненту-получателю или в СЛ к другой АТС.

4. ЦУУ – цифровое управляющее устройство предназначено для управления оборудованием АТС (БАЛ, БСЛ, КП), потоками данных в станции и всей АТС в целом.

Современные цифровые АТС строятся в соответствии с принципом коммутации пакетов и реализуют передачу данных на основе протокола IP. Таким образом, современная АТС представляет собой фактически большой специализированный компьютер, реализующий функции коммутатора, который может входить в состав цифровой сети передачи данных. При этом через АТС могут передаваться не только речевые (телефонные) данные, но и компьютерные данные, а также аудио и видео.

В зависимости от времени существования телефонные каналы могут быть двух типов:

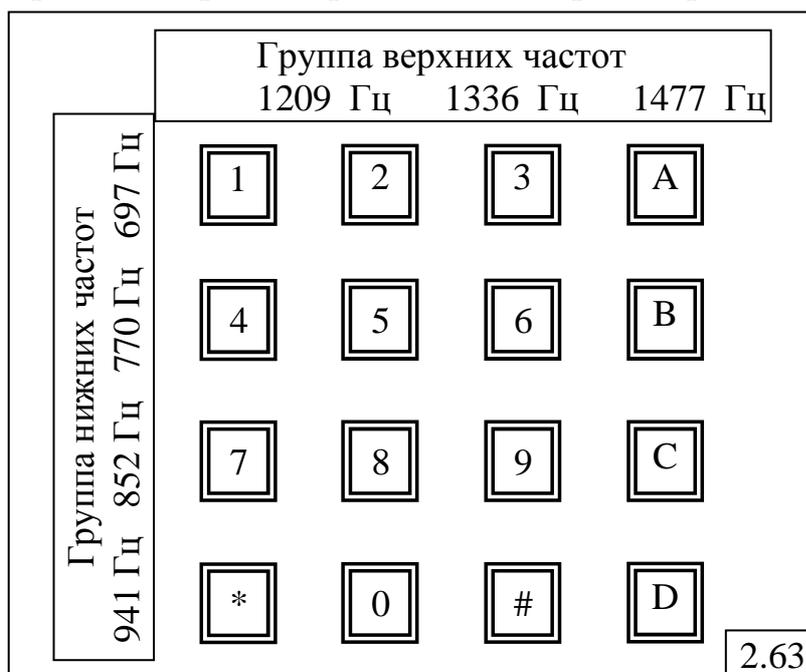
- *коммутируемые* или *временные*, создаваемые только на время передачи данных;

- *выделенные* или *постоянные*, создаваемые на длительный промежуток времени и существующие не зависимо от того, передаются данные или нет.

В случае коммутируемых телефонных каналов подключение абонентов к АТС или сети может выполняться путём набора номера одним из двух способов:

- **импульсный (декадный)** способ, при котором набор цифры номера приводит к формированию импульсов с частотой 10 Гц: длительность импульса 50 мс и длительность паузы 50 мс, причём количество импульсов равно значению цифры (цифре «0» соответствует 10 импульсов);

- **тоновый (частотный)** способ, при котором набор абонентом номера приводит к формированию сигналов с частотой 10 Гц, причём каждой цифре соответствует сигнал определённой частоты; для повышения надёжности распознавания для каждого сигнала (для каждой цифры) используются 2 частоты – из нижней и верхней группы частот, значения которых подобраны определенным образом (рис.2.63).



Благодаря широкому распространению телефонных сетей связи, они находят массовое применение в качестве средств доступа к ресурсам цифровых сетей и для выхода в Интернет. При этом передача компьютерных данных может выполняться:

- по аналоговым АЛ;
- по цифровым АЛ.

Передача цифровых данных по аналоговым АЛ реализуется на частотах разговорного канала с применением модемов, причем максимальная скорость передачи – 56 кбит/с достигается только в том случае, если на пути передачи данных все АТС – цифровые.

Цифровая АЛ может обеспечить гораздо большие скорости передачи и с меньшей стоимостью, чем при связи в полосе тональных частот.

*К преимуществам* цифровых АЛ перед аналоговыми относятся:

- легкость мультиплексирования нескольких разговорных каналов по принципу временного уплотнения;

- простота кодирования;
- новые возможности абонентской сигнализации.

*Недостатками* цифровой передачи являются:

- искажения при преобразовании речевых сигналов в цифровой вид;
- более жесткие требования к полосе пропускания;
- проблемы с эхом из-за увеличения задержек.

### 2.6.3. Модемная связь

#### 2.6.3.1. Принципы организации модемной связи

Методы передачи данных по телефонным каналам с использованием модемов задаются в виде **рекомендаций (стандартов)** серии V.

Модемы должны обеспечивать защиту передаваемых данных от ошибок, возникающих в каналах связи и в аппаратуре передачи данных, путем контроля и коррекции ошибок.

**Коррекция ошибок** (error correction) – отделение полезного сигнала от шумов и исправление возникающих в процессе связи ошибок.

Для контроля и коррекции ошибок при передаче данных используются **протоколы контроля ошибок**, в частности, протокол сетевого обмена MNP (Microcom Network Protocol), который стал частью *стандарта коррекции ошибок V.42*.

Модемы при передаче данных используют алгоритмы сжатия данных, что повышает скорость обмена и уменьшает время передачи.

**Сжатие данных** (data compression) – кодирование информации с целью уменьшения её объёма.

При передаче данных по телефонному каналу используются средства для *автоматической упаковки-распаковки данных*.

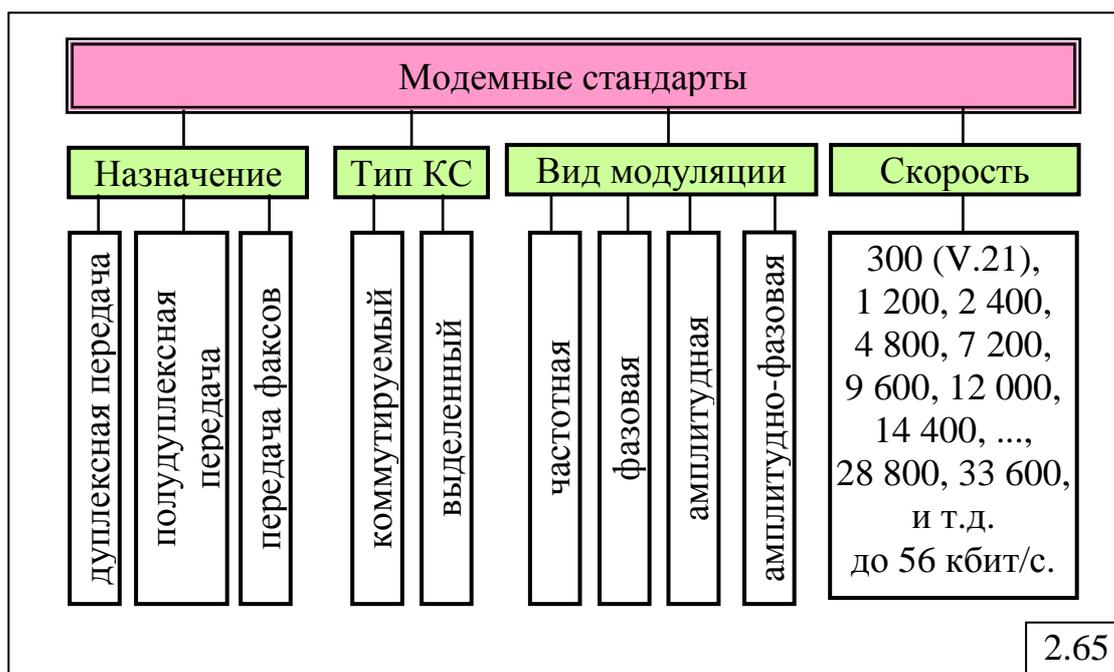
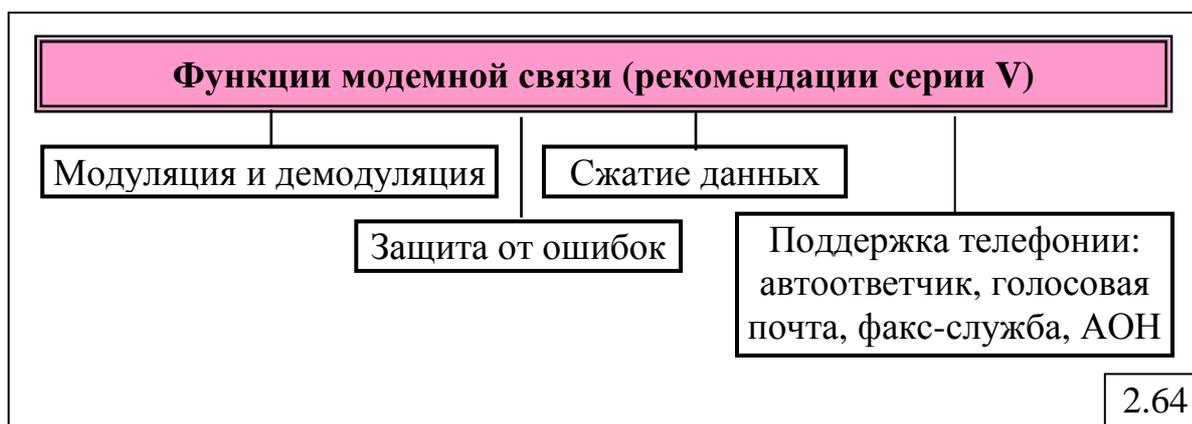
Стандарт **ТАРІ** (Telephony Application Programming Interface) – описывает взаимодействие ПК с телефонной линией и позволяет интегрировать в приложения для ПК обращения к услугам телефонной связи: от простого набора номера до блокировки звонков, переадресации вызовов и конференцсвязи.

На рис.2.64 перечислены основные функции модемной связи, сформулированные в рекомендациях серии V.

#### 2.6.3.2. Модемные стандарты

Модемные стандарты серии V по передаче данных по телефонным линиям определяют (рис.2.65):

- 1) назначение;
- 2) тип канала связи;
- 3) вид модуляции;
- 4) скорость передачи.



### 2.6.3.3. Классификация модемов

На рис.2.66 представлена классификация модемов по:

- функциональному назначению;
- конструктивному исполнению;
- способу передачи данных;
- способу реализации протоколов.

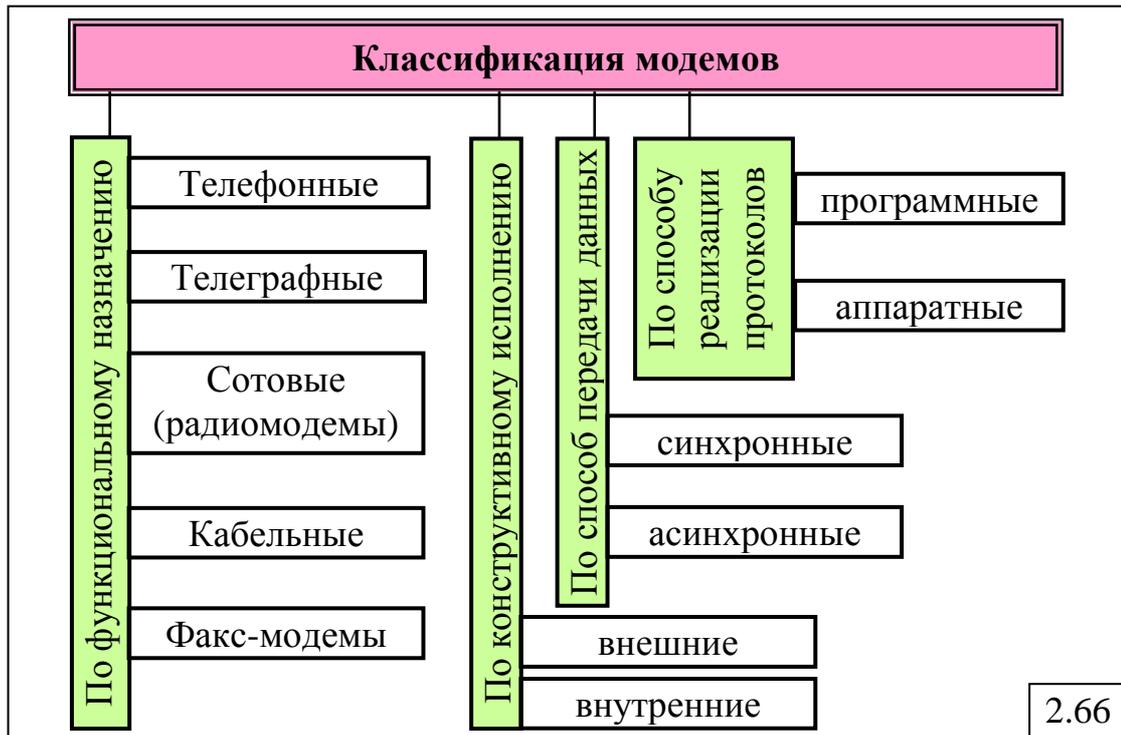
1. По **функциональному назначению** модемы делятся на:

- а) телефонные;
- б) телеграфные;
- в) сотовые (радиомодемы);
- г) факс-модемы;
- д) *кабельные*, предназначенные для передачи данных по кабельным

линиям связи, в частности по сети кабельного телевидения со скоростью до 10 Мбит/с

2. По **конструктивному исполнению** модемы могут быть:

- внешние, подключаемые кабелем к разъему RS-232 персонального компьютера;
- внутренние – в виде платы, устанавливаемой внутри компьютера.



3. По **способу передачи данных** (принципу работы в линии) модели делятся на:

а) *синхронные*, использующие синхронный способ передачи данных, при котором каждый бит посылается через фиксированный интервал времени с использованием синхронизации приемного и передающего устройства; синхронизация обеспечивается путем передачи управляющей информации и использования в обоих устройствах тактовых генераторов; синхронный режим целесообразно применять при организации связи по типу "точка-точка" через выделенные каналы связи;

б) *асинхронные*, использующие асинхронный способ передачи данных, при котором каждый символ (реже слово или небольшой блок) посылается отдельно и между данными могут быть произвольные промежутки времени; для распознавания поступающих данных каждый переданный элемент содержит стартовый и стоповый биты; этот способ известен также как старт-стоповая передача; модем работает в асинхронном режиме при использовании коммутируемых каналов связи;

4. По **способу реализации протоколов** коррекции ошибок и сжатия данных модемы бывают:

- с аппаратной реализацией;
- с программной реализацией.

#### 2.6.4. Цифровые сети с интегральным обслуживанием (ISDN-технология)

Модемная передача компьютерных данных по абонентским линиям телефонных сетей позволяет в идеальных условиях (на пути передачи имеются только цифровые АТС и все каналы связи высокого качества) достичь предельной скорости в 56 кбит/с, что явно не достаточно для

передачи мультимедийных данных, в частности видео, со сколь-нибудь приемлемым качеством. Для обеспечения более высоких скоростей передачи данных по АЛ была разработана технология, получившая название ISDN.

**Цифровые сети с интегральным обслуживанием – ЦСИО (Integrated Services Digital Networks – ISDN)** – цифровая сеть, построенная на базе телефонной сети связи, в которой могут передаваться сообщения разных видов – данные, а также оцифрованные видеоизображения и речь.

Обычная телефонная связь ориентирована на передачу голоса и позволяет модемам обмениваться данными со скоростью не выше 56 кбит/с. ISDN разработана специально для того, чтобы обойти ограничение по скорости передачи данных, но сохранить совместимость с существующими телефонными сетями.

Сеть ISDN совместима "сверху вниз" с телефонными сетями: можно позвонить с обычного телефона на номер ISDN и в обратном направлении в режиме "голосовая связь", а передача данных со скоростью 64 кбит/с и выше возможна только между двумя терминалами ISDN.

Существенная особенность ISDN – это **многоканальность**, т.е. возможность передавать данные и речь одновременно. Поскольку в интерфейсе ISDN предусмотрен служебный канал, режим передачи может быть изменен без разрыва соединения.

ISDN по сравнению с обычной модемной связью обеспечивает:

- более высокую скорость передачи данных;
- более высокую надежность;
- принципиально иное качество взаимодействия между абонентами.

**Преимущества сетей ISDN:**

1) *сокращение времени установления соединений* за счет использования выделенного канала сигнализации и передачи по нему сигналов управления и взаимодействия (занятие линии, набор номера, ответ, разъединение и т.д.) в цифровом виде;

2) *универсальность использования линий* – возможность осуществлять по одним и тем же линиям как телефонные переговоры, так и передачу данных;

3) *сопряжение служб* – возможность организации телетекста, телекса или телефакса с соответствующим устройством в любой точке земного шара.

ISDN одновременно предоставляет различные виды связи:

- телефонную;
- модемную;
- по выделенному каналу связи.

ISDN целесообразно применять в тех случаях, когда необходимо *периодически* (но не постоянно) передавать *средние и большие объемы данных на любые расстояния с высокой скоростью и надежностью*.

Реализация ISDN осуществляется в соответствии с рекомендациями ИТУ-Т серии I.

**Абонентское оборудование и интерфейсы ISDN** показаны на рис.2.67, где:

TE1 – терминальное оборудование ISDN;

TE2 – несовместимое с ISDN терминальное оборудование;

TA – терминальный адаптер;

NT1 – сетевое окончание уровня 1 (подача питания к абонентской установке, обеспечение ТО линии и контроля рабочих характеристик, синхронизация, мультиплексирование на 1-м (физическом) уровне, разрешение конфликтов доступа); представляет собой обычно настенную коробку;

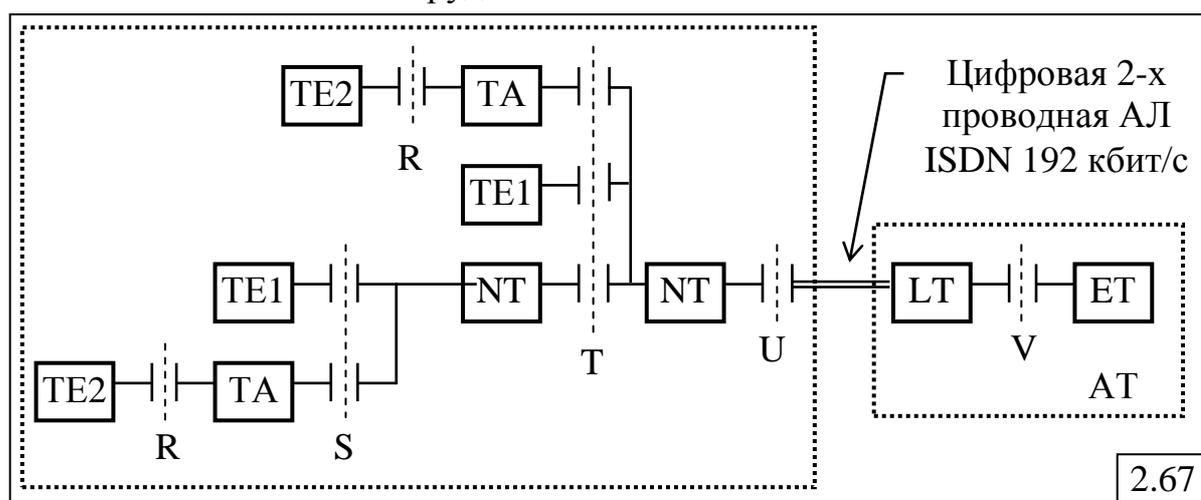
NT2 – сетевое окончание уровня 2 (функции 2-го и 3-го уровней: мультиплексирование, коммутация и концентрация, а также функции ТО и некоторые функции 1-го уровня); в качестве функционального блока NT2 могут выступать УАТС, локальная сеть или терминальный адаптер;

(функции NT1 и NT2 могут объединяться в едином физическом оборудовании, обозначаемом просто NT);

LT – линейное окончание;

ET – станционное окончание.

R, S, T, U, V – интерфейсы ISDN, в частности R-интерфейс связывает несовместимое с ISDN оборудование TE2 с TA.



В отличие от традиционных телефонных сетей управляющая информация передаётся по специальным каналам, не загружая каналы передачи данных.

В ISDN различают два типа канала:

- **канал В** – для передачи голоса и данных с пропускной способностью 64 кбит/с;

- **канал D** – служебный (сигнальный) канал передачи управляющей информации. Один канал типа D обслуживает 2 или 30 В-каналов и обеспечивает возможность быстрой генерации и сброса вызовов, а также передачу информации о поступающих вызовах, в том числе о номере обращающегося к сети абонента.

Стандарты определяют **3 интерфейса доступа к ISDN** (типа ISDN):

1) базовый – BRI;

- 2) первичный – PRI;
- 3) широкополосный – В-ISDN.

**Интерфейс BRI** (Basic Rate Interface) – стандартный (базовый) интерфейс, обозначаемый как (2B+D). Это означает, что для передачи данных используется 2 канала В со скоростью передачи 64 кбит/с по каждому каналу и 1 служебный (сигнальный) канал D со скоростью передачи 16 кбит/с. Таким образом, пропускная способность интерфейса BRI равна:  $2 \cdot 64 \text{ кбит/с} + 1 \cdot 16 \text{ кбит/с} = 144 \text{ кбит/с}$ .

BRI предназначен для подключения телефонной аппаратуры (телефонов, факсов, автоответчиков и т.п.) и компьютеров к ISDN.

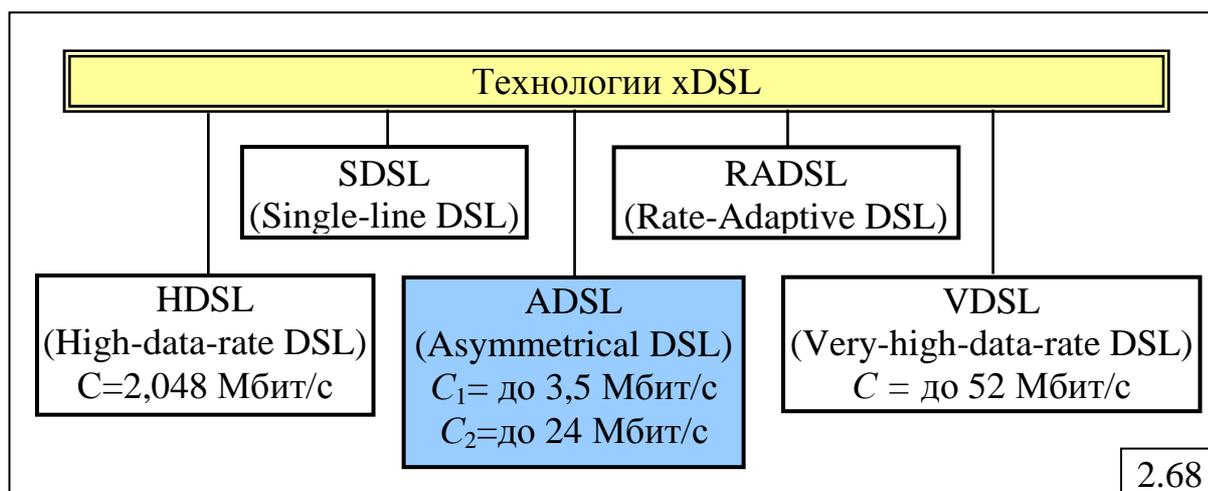
**Интерфейс PRI** (Primary Rate Interface) объединяет несколько BRI и соединяется с узлом. В зависимости от конкретных местных стандартов он включает в себя 23 В-канала (США и Япония) или 30 В-каналов (Европа), поддерживая интегральные скорости передачи данных 1,544 Мбит/с и 2,048 Мбит/с соответственно.

**В-ISDN** (Broadband ISDN) обеспечивает высокие скорости передачи (155 Мбит/с и 622 Мбит/с), что позволяет реализовать передачу видеоданных.

### 2.6.5. Технологии xDSL

**xDSL (Digital Subscriber Line)** – технологии передачи цифровых данных по телефонным каналам связи, обеспечивающие гораздо более высокие скорости передачи по обычным медным проводам, чем традиционная модемная связь и ISDN. Высокие скорости достигаются за счет использования ряда технических решений, в частности эффективных линейных кодов и адаптивных методов коррекции искажений на линии.

xDSL объединяет различные технологии (рис.2.68), которым в аббревиатуре xDSL соответствуют разные значения символа «х». Эти технологии различаются в основном по используемому способу модуляции и скорости передачи данных.



**HDSL (High-data-rate DSL)** – высокоскоростная цифровая абонентская линия, обеспечивающая симметричную дуплексную передачу

данных по двум телефонным парам со скоростями до 2,048 Мбит/с в каждом направлении на расстояние до 4,5 км.

**SDSL (Symmetrical DSL)** – однопарная версия HDSL, обеспечивающая симметричную дуплексную передачу цифрового потока со скоростью 2048 кбит/с по одной паре телефонного кабеля.

**ADSL (Asymmetrical DSL)** – асимметричная цифровая абонентская линия, позволяющая по одной паре телефонного кабеля передавать данные от пользователя в сеть на скоростях от 16 кбит/с до 3,5 Мбит/с и в обратном направлении из сети к пользователю со скоростями до 24 Мбит/с на максимальное расстояние до 5,5 км.

**RADSL (Rate-Adaptive ADSL)** – ADSL с адаптируемой скоростью, учитывающей характеристики конкретной линии (длина, соотношение сигнал-шум и т.п.), за счет чего достигается максимальная пропускная способность в реальных условиях.

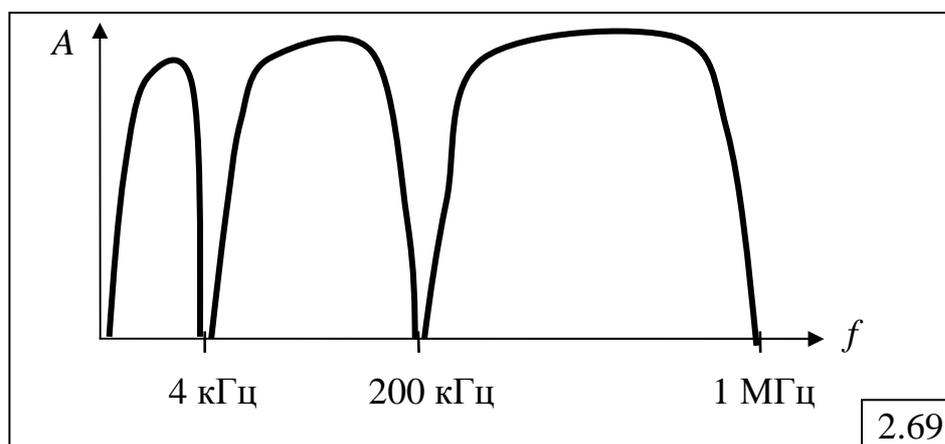
**VDSL (Very-high-data-rate DSL)** – сверхвысокоскоростная цифровая абонентская линия, имеющая по сравнению с ADSL значительно более высокие скорости передачи данных: до 56 Мбит/с в направлении от сети к пользователю и до 11 Мбит/с от пользователя к сети при работе в асимметричном режиме и при работе в симметричном режиме – примерно 26 Мбит/с в каждом направлении при максимальном расстоянии до 1,3 км.

Наиболее распространённой технологией является ADSL, основные принципы организации которой рассматриваются ниже.

Увеличение скорости передачи данных в ADSL обусловлено предоставлением пользователю большей полосы пропускания абонентской линии, чем при традиционной телефонной связи: 1 МГц вместо 3100 Гц. Это достигается за счёт исключения на пути передачи данных фильтров, ограничивающих полосу телефонного канала в интервале от 300 Гц до 3400 Гц.

В пределах полосы в 1 МГц формируется 3 частотных диапазона для передачи трёх потоков данных (рис.2.69):

- телефонных (голосовых) в диапазоне частот от 300 Гц до 4 кГц;
- компьютерных от пользователя в сеть в диапазоне частот от 4 кГц до 200 кГц;
- от сети к пользователю в диапазоне частот от 200 кГц до 1 МГц.



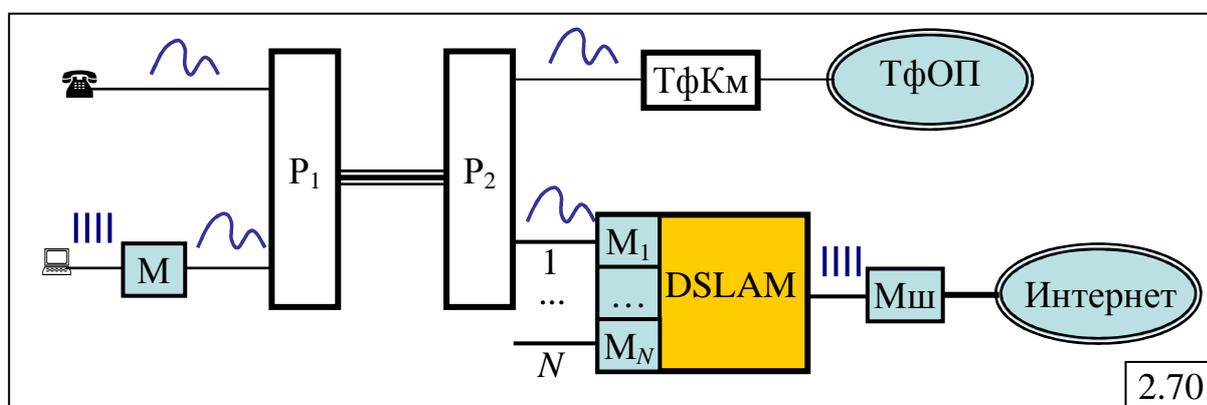
Таким образом, для передачи цифровых данных формируются два **асимметричных** частотных каналов:

- высокоскоростной (до 24 Мбит/с) нисходящий канал передачи данных из сети в компьютер пользователя;
- низкоскоростной (от 16 кбит/с до 3,5 Мбит/с) восходящий канал передачи данных из компьютера в сеть.

Третий канал предназначен для передачи телефонных разговоров.

Асимметричность каналов для передачи компьютерных данных обусловлена тем, что традиционно объём передаваемых данных от пользователя в сеть гораздо меньше объёма данных, передаваемых в обратном направлении. Отметим, что при необходимости можно изменять границы частотных диапазонов для перераспределения скоростей передачи данных в исходящем и восходящем каналах.

На рис.2.70 представлена схема организации ADSL.



Оборудование пользователя (телефон и компьютер на схеме) подключается к точке доступа – *распределителю*  $P_1$ , выделяющему определённую полосу частот для передачи голосовых сигналов от аналогового телефона и данных от компьютера. Компьютер подключается к распределителю через ADSL-модем ( $M$ ), осуществляющего модуляцию, то есть преобразование сигнала из цифрового вида в аналоговый. На другом конце к распределителю  $P_2$ , отделяющему потоки компьютерных данных от голосовых сигналов, подключены *телефонный коммутатор* (ТфКМ), обеспечивающий доступ в телефонную сеть общего пользования (ТфОП), и *мультиплексор доступа к цифровой абонентской линии* (DSLAM – DSL Access Multiplexer), который преобразует сигнал из аналогового вида в цифровой вид (демодуляция) и направляет его к маршрутизатору, обеспечивающему доступ в Интернет. Количество  $N$  ADSL-модемов  $M_1, \dots, M_N$ , входящих в состав DSLAM, определяет количество пользователей, которые могут быть подключены к DSLAM.

Высокие скорости передачи данных и сравнительно невысокая стоимость абонентской платы для пользователей делают технологии xDSL наиболее перспективными для организации доступа в Интернет, полностью вытесняющими традиционную модемную связь и ISDN.

## 2.6.6. Мобильная телефонная связь

Мобильная телефонная связь относится к средствам беспроводной связи и может быть двух типов:

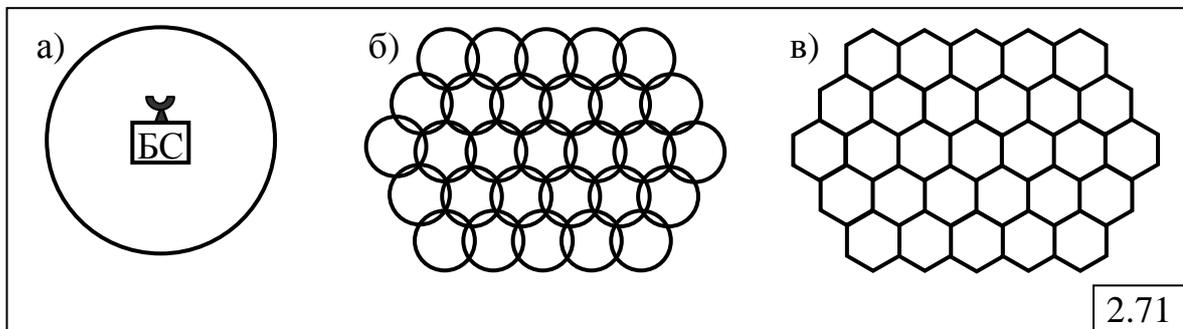
- домашние *радиотелефоны*;
- мобильные *сотовые телефоны*.

**Радиотелефоны** обеспечивают ограниченную мобильность в пределах одного или нескольких рядом расположенных помещений и состоят из базовой станции и одной или нескольких переносных трубок.

Значительно большую, практически неограниченную, мобильность обеспечивает **мобильная сотовая связь**, которая в настоящее время позволяет передавать, кроме голоса, цифровые данные и даже видео.

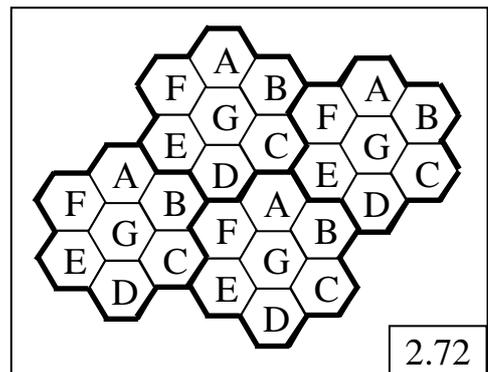
### 2.6.6.1. Принципы организации сотовой связи

Основной принцип сотовой связи заключается в разделении всей зоны охвата телефонной связью на ячейки, называемые сотами. В центре каждой соты находится базовая станция (БС), поддерживающая связь с мобильными абонентами (сотовыми телефонами), находящимися в зоне её охвата. Базовые станции обычно располагают на крышах зданий и специальных вышках. На идеальной (ровной и без застройки) поверхности зона покрытия одной БС представляет собой круг (рис.2.71,а), диаметр которого не превышает 10-20 км. Соты частично перекрываются и вместе образуют сеть (рис.2.71,б), которая для простоты обычно изображается в виде множества шестиугольных сот (рис.2.71,в).



Каждая сота работает на своих частотах, не пересекающихся с соседними (рис.2.72). Все соты одного размера и объединены в группы по 7 сот. Каждая из букв (А, В, С, D, E, F, G) соответствует определённому диапазону частот, используемому в пределах одной соты. Соты с одинаковыми диапазонами частот разделены сотами, работающими на других частотах. Небольшие размеры сот обеспечивают ряд преимуществ по сравнению с традиционной наземной беспроводной связью, а именно:

- большое количество пользователей, которые одновременно могут работать в сети в разных частотных диапазонах (в

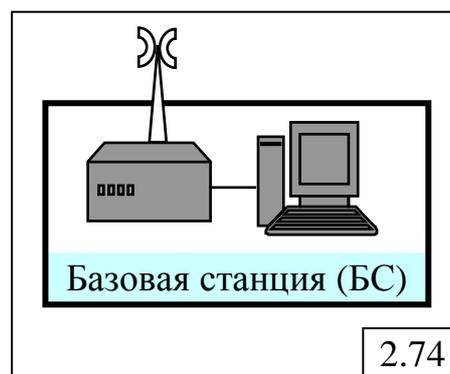
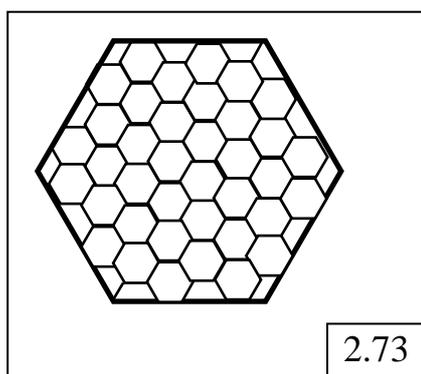


разных сотах);

- небольшая мощность приемно-передающего оборудования, обусловленная небольшим размером сот (выходная мощность телефонных трубок составляет десятые доли ватт);
- меньшая стоимость устройств сотовой связи как маломощных устройств.

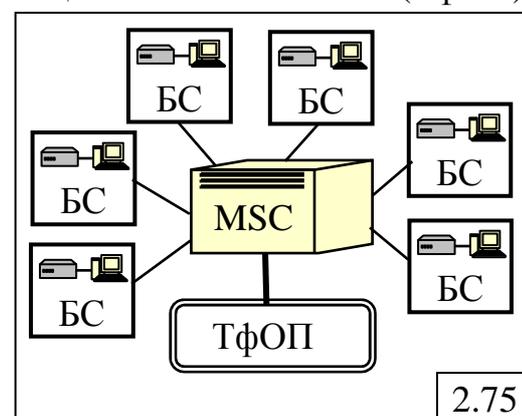
Если в какой-то соте количество пользователей оказывается слишком большим, то она может быть разбита на соты меньшего размера, называемые микросотами, как это показано на рис.2.73.

Базовая станция, в общем случае, содержит приёмопередатчик (ПП), поддерживающий связь с мобильными телефонами, и компьютер, реализующий протоколы беспроводной мобильной связи (рис.2.74).



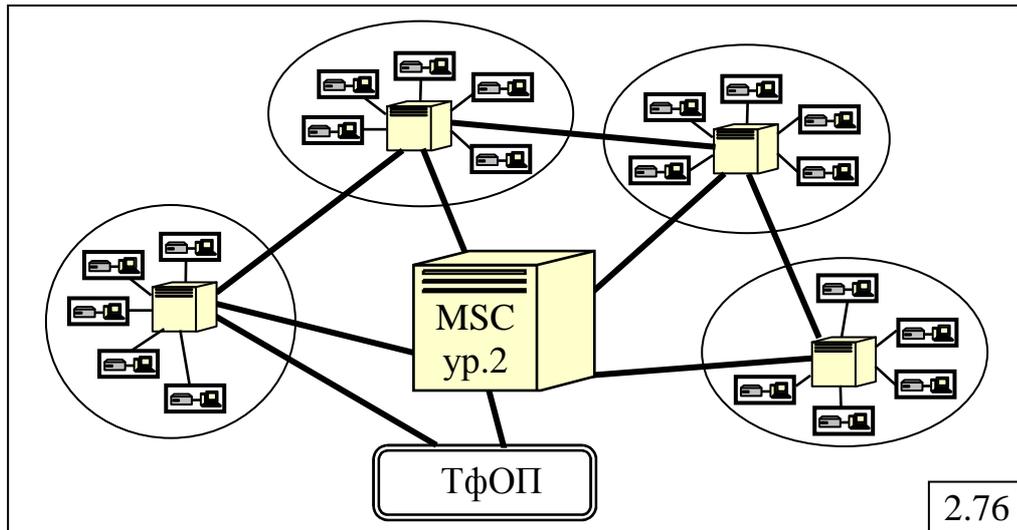
В небольших сетях все базовые станции соединены с коммутатором MSC (Mobile Switching Center – мобильный коммутационный центр) и имеют выход в телефонную сеть общего пользования (ТфОП), обеспечивающий связь мобильных телефонов со стационарными (рис.2.75).

В больших сетях коммутаторы 1-го уровня (MSC) соединяются с коммутатором 2-го уровня (рис.2.76) и т.д., при этом все MSC имеют выход в ТфОП напрямую, либо через коммутатор более высокого уровня (см.рис.2.76). Связанные таким образом базовые станции и коммутаторы образуют *сеть сотовой связи*, административно подчиняющиеся одному оператору, предоставляющему услуги мобильной связи.



Базовые станции совместно с коммутационным оборудованием реализуют функции по определению текущего местоположения подвижных пользователей и обеспечивают непрерывность связи при перемещении пользователей из зоны действия одной БС в зону действия другой БС. При включении сотовый телефон ищет сигнал базовой станции и посылает станции свой уникальный идентификационный код. Телефон и БС поддерживают постоянный радиоконтакт, периодически обмениваясь служебными данными. При выходе телефона из зоны действия БС (или

ослаблении радиосигнала) устанавливается связь с другой БС. Для этого базовая станция, фиксирующая ослабление сигнала, опрашивает все окружающие БС с целью выявить станцию, которая принимает наиболее мощный сигнал от мобильного телефона. Затем БС передаёт управление данным телефоном базовой станции той соты, в которую переместился мобильный телефон. После этого, телефону посылаётся информация о переходе в новую соту и предлагается переключиться на новую частоту, которая используется в этой соте. Этот процесс называется *передачей* и длится доли секунды.



Сотовые сети разных операторов соединяются друг с другом, а также со стационарной ТфОП, что позволяет абонентам разных операторов связываться друг с другом, а также делать звонки с мобильных телефонов на стационарные и, наоборот, со стационарных на мобильные телефоны. Используя возможности роуминга, абонент, находясь вне зоны покрытия своей сети, может совершать и принимать звонки через сеть другого оператора.

#### **2.6.6.2. Поколения мобильной сотовой связи**

Различают 4 поколения мобильной сотовой связи, обозначаемые как 1G, 2G, 3G, 4G. В то же время, между 2G и 3G, 3G и 4G выделяют промежуточные поколения, получившие обозначения 2.5G и 3.5G соответственно.

Эти поколения можно разбить на две группы (рис.2.77):

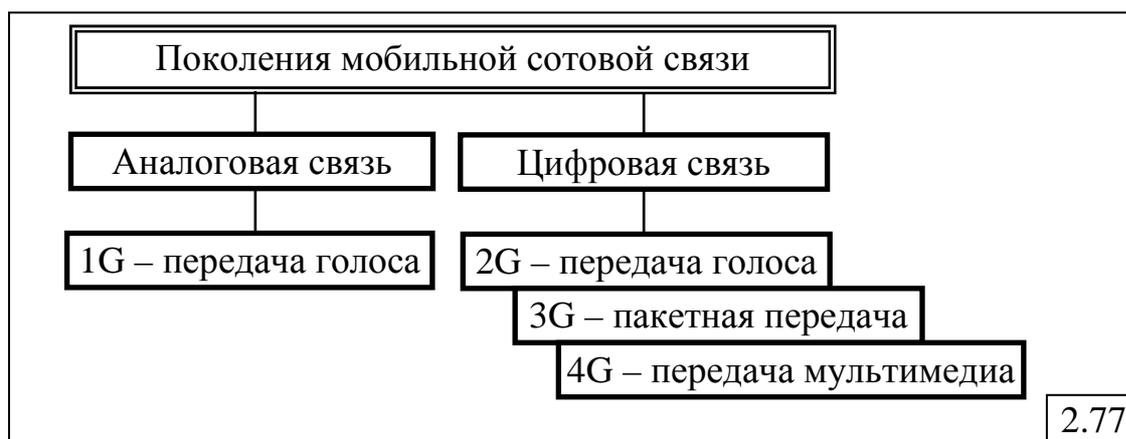
- аналоговая связь (1G);
- цифровая связь (все остальные, начиная с 2G, различающиеся прежде всего предоставляемыми возможностями по передаче цифровых данных, а также скоростями передачи).

Рассмотрим кратко каждое из поколений.

#### **2.6.6.3. Поколение 1G**

Первые сети мобильной сотовой связи поколения 1G появились в начале 80-х годов прошлого века и представляли собой аналоговые

беспроводные сети, основной и, фактически, единственной функцией которых была передача речи со скоростями, не превышавшими 9,6 кбит/с.



Наиболее известными стандартами сотовой связи первого поколения являются AMPS и NMT.

Стандарт **AMPS (Advanced Mobile Phone System)**, разработанный в США, использует частотное уплотнение, формируя 832 дуплексных канала, каждый из которых состоит из двух симплексных каналов шириной по 30 кГц, в диапазоне частот от 824 до 894 МГц. Радиус действия одной базовой станции от 10 до 20 км.

Стандарт **NMT (Nordic Mobile Telephone system)**, разработанный пятью скандинавскими странами (Данией, Финляндией, Исландией, Норвегией и Швецией), предписывает работу в диапазоне частот 453-458 МГц (NMT-450), используя до 180 каналов связи по 25 кГц каждый. Радиус действия базовой станции в зависимости от нагрузки достигает 5-25 км. Модернизированная версия NMT-900, работающая на частоте 900 МГц, позволила уменьшить размеры телефонных аппаратов, а также добавить несколько новых сервисов.

В начале 90-х годов на смену аналоговой сотовой связи пришла цифровая связь, которая в настоящее время полностью её вытеснила.

Основной *недостаток* аналоговой беспроводной связи – отсутствие защиты от несанкционированного перехвата разговора.

#### 2.6.6.4. Поколение 2G

Второе и последующие поколения мобильной сотовой связи относятся к цифровым сетям связи и, в отличие от первого поколения, предоставляют пользователям, кроме передачи речи, множество дополнительных видов услуг (сервисов).

Стандартами сотовой связи второго поколения являются D-AMPS, GSM, CDMA, в основе которых лежит метод мультиплексирования TDMA.

**TDMA (Time Division Multiple Access)** – *множественный доступ с разделением по времени* – метод мультиплексирования в беспроводной связи, при котором несколько пользователей для передачи данных используют разные временные интервалы (слоты) в одном частотном

диапазоне, при этом каждому пользователю предоставляется полный доступ к выделенной полосе частот в течение короткого периода времени.

Стандарт **D-AMPS (Digital-AMPS)** был разработан так, чтобы мобильные телефоны первого и второго поколений могли работать одновременно в одной и той же соте. Коммутатор может определять и динамически изменять тип канала (цифровой, аналоговый).

Наибольшее распространение среди перечисленных стандартов получили GSM (заменивший NMT) и CDMA.

**GSM (Global System for Mobile Communications)** – глобальная система мобильной связи, использующая частотное уплотнение. Каждая пара (для передачи в прямом и обратном направлении) частотных каналов разбивается с помощью временного уплотнения (TDMA) на кадровые интервалы, используемые несколькими абонентами. Каналы GSM имеют полосу пропускания в 200 кГц, что значительно шире каналов AMPS с полосой пропускания 30 кГц. Это обуславливает более высокие скорости передачи данных.

GSM, как и D-AMPS, использует частотное и временное уплотнение для разделения спектра на каналы и разделения каналов на временные интервалы соответственно.

GSM обеспечивает поддержку следующих услуг:

- передача данных (синхронный и асинхронный обмен данными, в том числе пакетная передача данных — GPRS);
  - передача речевой информации;
  - передача коротких сообщений (SMS);
  - передача факсимильных сообщений.
  - определение вызывающего номера;
  - переадресация вызовов на другой номер;
  - ожидание и удержание вызова;
  - конференцсвязь (одновременная голосовая связь между тремя и более пользователями);
  - голосовая почта
- и многие другие.

К основным *достоинствам* стандарта GSM следует отнести:

- меньшие по сравнению с аналоговыми стандартами размеры и вес телефонных аппаратов при большем времени работы без подзарядки аккумулятора;
- хорошее качество связи;
- возможность большого числа одновременных соединений;
- низкий уровень промышленных помех в выделенных частотных диапазонах;
- защита от прослушивания и нелегального использования за счёт применения алгоритмов шифрования с разделяемым ключом.

*Недостатками* стандарта GSM являются:

- искажение речи при цифровой обработке и передаче;

- большее, чем в NMT-450, количество передатчиков, используемых для покрытия определённой площади.

В стандарте GSM определены 4 диапазона частот для передачи данных: 850 МГц, 900 МГц, 1800 МГц, 1900 МГц, наиболее популярными среди которых являются 900 МГц (стандарт GSM-900) и 1800 МГц (GSM-1800). Соты могут иметь диаметр от 400 м до 50 км.

Основные *отличия* GSM-1800 от GSM-900:

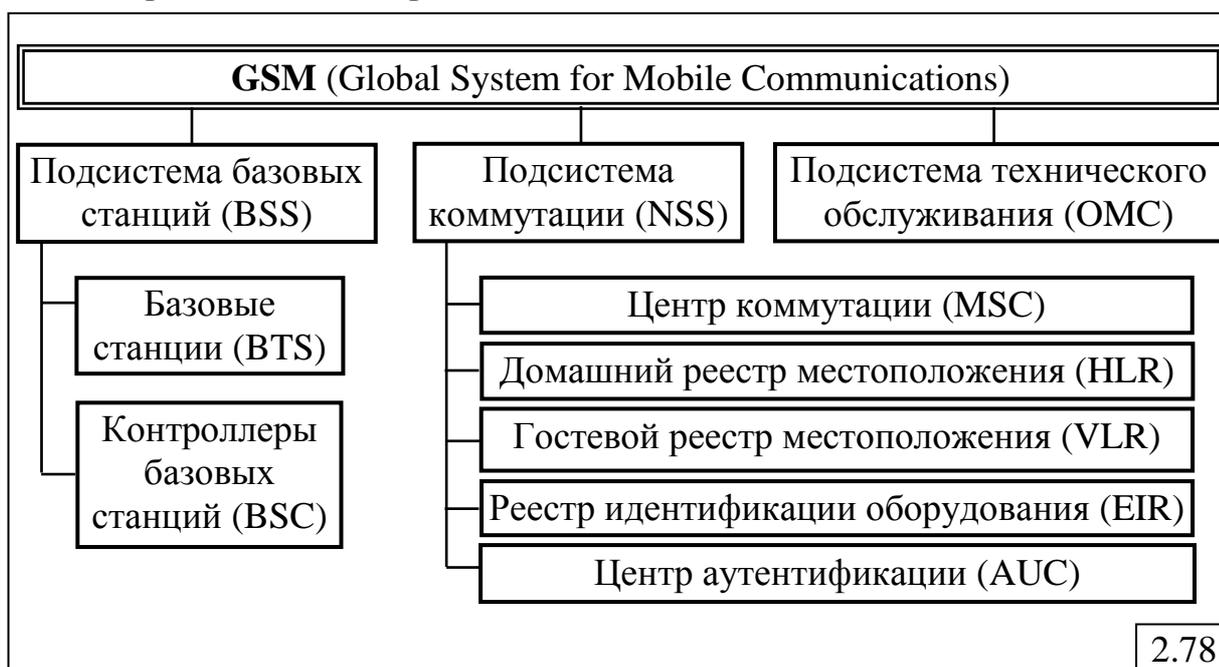
- максимальная излучаемая мощность мобильных телефонов стандарта GSM-1800 (около 1 Вт) вдвое меньше, чем у GSM-900, что увеличивает время непрерывной работы без подзарядки аккумулятора и снижает уровень радиоизлучения;

- большая ёмкость сети;

- возможность совместного использования телефонных аппаратов стандартов GSM-900 и GSM-1800 в одной и той же сети;

- зона охвата для каждой базовой станции значительно меньше и, как следствие, необходимо большее число базовых станций.

В состав системы GSM, кроме мобильных сотовых телефонов, называемых в стандарте *мобильными станциями* (MS – Mobile Station), входят три подсистемы (рис.2.78).



### 1. Подсистема базовых станций (BSS – Base Station Subsystem)

состоит из собственно базовых станций и контроллеров базовых станций.

*Базовая станция (BTS – Base Transceiver Station)* обеспечивает приём/передачу сигнала между мобильной станцией и контроллером базовых станций.

*Контроллер базовых станций (BSC – Base Station Controller)* контролирует соединения между базовой станцией и подсистемой коммутации, а также управляет очередностью соединений, скоростью передачи, распределением радиоканалов, сбором статистики и переходом MS в другую соту.

**2. Подсистема сетевой коммутации (NSS – Network Switching Subsystem)** построена из следующих компонентов.

- центр коммутации;
- домашний реестр местоположения;
- гостевой реестр местоположения;
- реестр идентификации оборудования;
- центр аутентификации.

*Центр коммутации (MSC – Mobile Switching Centre)* реализует следующие функции:

- устанавливает соединения внутри сети GSM;
- обеспечивает интерфейс с ТфОП и другими сетями;
- выполняет маршрутизацию и управление вызовами;
- управляет передачей обслуживания при перемещении мобильной станции из одной соты в другую;
  - постоянно отслеживает положение мобильной станции, используя данные из домашнего (HLR) и гостевого (VLR) реестров местоположения, что необходимо для быстрого нахождения и установления соединения с мобильной станцией в случае её вызова;
  - собирает статистические данные;
  - по завершению вызова передаёт данные в центр расчётов для формирования счета за предоставленные услуги.

*Домашний реестр местоположения (HLR – Home Location Registry)* содержит базу данных абонентов, приписанных к нему, с информацией о предоставляемых абоненту услугах и о состоянии каждого абонента, а также **международный идентификатор мобильного абонента (IMSI – International Mobile Subscriber Identity)**, который используется для аутентификации абонента. Каждый абонент приписан к одному домашнему реестру. К домашнему реестру имеют доступ все центры коммутации и гостевые реестры данной GSM-сети, а в случае межсетевых роуминга и центры коммутации других сетей.

*Гостевой реестр местоположения (VLR – Visitor Location Registry)* содержит базу данных о перемещающихся абонентах, которые находятся в данный момент в этой зоне, в том числе об абонентах других систем GSM, называемых **роумерами**. Если абонент переместился в другую зону, данные о нём удаляются из гостевого реестра. Такая схема позволяет сократить количество запросов к домашнему реестру и, следовательно, время обработки вызова.

*Реестр идентификации оборудования (EIR – Equipment Identification Registry)* содержит базу данных, необходимую для установления подлинности мобильной станции по **международному идентификатору мобильного устройства IMEI (International Mobile Equipment Identity)** в виде трёх списков:

- *белый* – мобильная станция допущена к использованию;
- *серый* – имеются проблемы с идентификацией мобильной станции;

- *чёрный* - мобильная станция запрещена к использованию.

*Центр аутентификации (AUC – Authentication Centre)* осуществляет аутентификацию абонента по SIM-карте (Subscriber Identity Module). Для этого он посылает на мобильный телефон случайное число, которое шифруется параллельно в центре аутентификации и в мобильном телефоне с использованием специального алгоритма. Результаты шифрования возвращаются в центр коммутации, где они сравниваются. Если результаты шифрования совпадают, аутентификация считается успешной, и пользователь получает доступ к сети.

**3. Центр технического обслуживания (ОМС – Operations and Maintenance Centre)** обеспечивает:

- управление всей сетью;
  - контроль качества функционирования;
  - обработку аварийных сигналов;
  - проверку состояния сети
- и ряд других функций.

В сетях **CDMA (Code Division Multiple Access)** используется совершенно иной принцип передачи данных, подробно рассмотренный ниже. В отличие от GSM скорость передачи данных в CDMA может достигать 1,23 Мбит/с. Кроме того, существенным отличием является использование распределённого спектра, что усложняет обнаружение и идентификацию передаваемого сигнала и, соответственно, обеспечивает надёжную защиту от случайного подслушивания.

#### **2.6.6.5. Поколение 2.5G**

В процессе разработки принципов и стандартов третьего поколения мобильной сотовой связи появилось промежуточное поколение 2.5G, отличающееся от второго поколения большей ёмкостью сети и пакетной передачей данных. Поколение 2.5G реализовано в виде стандартов GPRS, EDGE и 1xRTT, наиболее распространённым среди которых является GPRS.

**GPRS (General Packet Radio Service)** – технология пакетной радиосвязи общего пользования, ориентированная на реализацию «мобильного Интернета».

GPRS использует базовые станции GSM для передачи данных в виде пакетов, что делает его внедрение достаточно простым и позволяет обеспечить доступ в Интернет. Пакеты передаются через свободные в данный момент каналы. Возможность использования сразу нескольких каналов обеспечивает достаточно высокие скорости передачи данных (до 171,2 кбит/с). Передача данных разделяется по направлениям: «вниз» (downlink, DL) – от сети к абоненту, и «вверх» (uplink, UL) – от абонента к сети. Один и тот же канал поочерёдно могут использовать несколько абонентов, при этом ресурсы канала предоставляются только на время

передачи пакета, что приводит к появлению очереди на передачу пакетов и, как следствие, к увеличению задержки пакетов.

Принцип работы GPRS аналогичен Интернету: данные разбиваются на пакеты и отправляются получателю (возможно разными маршрутами), где происходит их сборка. При установлении сессии каждому устройству присваивается уникальный адрес. Пакеты могут иметь формат IP или X.25, при этом в качестве протоколов транспортного и прикладного уровней могут использоваться любые протоколы Интернета: TCP, UDP, HTTP и др. Мобильный телефон в GPRS рассматривается как клиент внешней сети, которому присваивается постоянный или динамический IP-адрес.

#### **2.6.6.6. Поколение 3G**

Первые реализации третьего поколения сотовой связи появились в 2002 году. Существует три основных стандарта 3G:

- UMTS;
- CDMA2000;
- WCDMA (Wide CDMA).

Все они ориентированы на пакетную передачу данных и, соответственно, на работу с цифровыми компьютерными сетями, включая Интернет. Скорость передачи данных может достигать 2,4 Мбит/с что позволяет передавать качественный звук, а также реализовать «видеозвонок».

При необходимости сеть 3G может быть наложена на уже ранее развёрнутую сеть GSM или другую сеть второго поколения.

**UMTS** (Universal Mobile Telecommunications System – универсальная мобильная телекоммуникационная система) – технология сотовой связи третьего поколения, разработанная Европейским Институтом Стандартов Телекоммуникаций (ETSI) для внедрения в Европе. UMTS поддерживает скорость передачи до 21 Мбит/с и позволяет пользователям проводить сеансы видеоконференций, загрузку музыкального и видео контента.

UMTS обычно реализуется на основе технологий радиointерфейса, например W-CDMA. При переходе от GSM к UMTS сохраняется значительная часть прежней инфраструктуры. Основным отличием UMTS от GSM является возможность осуществлять стыки с сетями ISDN, Internet, GSM или другими сетями UMTS.

Для передачи данных от мобильного станции к базовой станции и обратно использует разные диапазоны частот: 1885 МГц – 2025 МГц и 110 МГц – 2200 МГц соответственно, причём оба канала имеют ширину 5 МГц (для сравнения CDMA2000 – 1,25 МГц).

К недостаткам UMTS-технологии следует отнести:

- относительно высокий вес мобильных терминалов наряду с низкой ёмкостью аккумуляторных батарей;

- сложность реализации перехода абонента из зоны действия одной базовой станции в зону действия другой без потери разговора (хэндовера) между сетями UMTS и GSM;

- небольшой радиус соты: 1-1,5 км.

В перспективе планируется эволюция UMTS в сети четвёртого поколения 4G, позволяющие базовым станциям передавать и принимать данные на скоростях 100 Мбит/с и 50 Мбит/с соответственно.

**CDMA2000** представляет собой развитие технологии CDMA и обеспечивает скорость передачи данных до 153 кбит/с, что позволяет предоставлять услуги голосовой связи, передачу коротких сообщений, работу с электронной почтой, интернетом, базами данных, передачу данных и неподвижных изображений.

Основными достоинствами CDMA2000 являются:

- широкая зона обслуживания;
- высокое качество речи;
- гибкость и дешевизна внедрения новых услуг;
- высокая помехозащищённость;
- устойчивость канала связи от перехвата и прослушивания;
- низкая излучаемая мощность радиопередатчиков абонентских устройств - менее 250 мВт (для сравнения: в GSM-900 этот показатель составляет 2 Вт, а GSM-1800 – 1 Вт).

**WCDMA** (Wideband Code Division Multiple Access) – технология широкополосного множественного доступа с кодовым разделением каналов в диапазоне частот 1900 – 2100 МГц. Термин WCDMA также используется для стандарта сотовой сети, который разрабатывался как надстройка над GSM. WCDMA ориентирована на предоставление мультимедийных услуг, доступа в Интернет и видеоконференции со скоростями передачи данных:

- до 2 Мбит/с на коротких расстояниях;
- 384 кбит/с на больших расстояниях с полной мобильностью.

Такие скорости обеспечиваются за счёт широкой полосы частот канала в 5 МГц, что больше, чем в стандарте CDMA2000, использующем один или несколько каналов с полосой 1,25 МГц для каждого соединения.

#### **2.6.6.7. Поколение 3.5G**

Поколение 3.5G, как промежуточное поколение, характеризуется более высокими скоростями передачи данных по сравнению с 3-м поколением.

Начиная с 2006 года на сетях UMTS повсеместно распространяется технология HSDPA.

**HSDPA** (High Speed Downlink Packet Access – высокоскоростная пакетная передача данных от базовой станции к мобильной станции) – стандарт поколения 3.5G, представляющий собой модернизированный 3G

со средней скоростью передачи данных 3 Мбит/с и максимальной – 14 Мбит/с.

#### **2.6.6.8. Поколение 4G**

Четвёртое поколение мобильных коммуникаций представляет собой эволюционное развитие 3G. Инфраструктура стандарта 4G базируется на IP-протоколе, что позволяет обеспечивать простой и быстрый доступ к Интернету. Высокие скорости передачи данных (100-200 Мбит/с) должны обеспечить передачу не только качественного звука, но и видео. Планируется дальнейшее увеличение скорости передачи данных до 2,5 Гбит/с. Такие высокие скорости объясняются тем, что в четвёртом поколении используется только пакетная передача данных, включая голосовой трафик, передаваемый через протокол IP (мобильная VoIP-телефония). Помимо этого, сети 4G должны обеспечивать глобальный роуминг, связь корпоративных сетей, мобильное телевидение высокой чёткости.

В качестве стандарта 4G активно продвигается технология *широкополосной беспроводной связи для быстрого доступа в Интернет с мобильных компьютеров WiMAX*, описанная стандарте IEEE802.16.

**WiMAX** (Worldwide Interoperability for Microwave Access) – телекоммуникационная технология, предоставляющая высокоскоростной беспроводной доступ к сети на больших расстояниях для широкого спектра устройств (от рабочих станций и портативных компьютеров до мобильных телефонов).

Скорости работы WiMAX-сетей будут достигать 75 Мбит/с и выше, что обеспечит не только доступ в Интернет, но и качественную передачу аудио- и видеоинформации, а также позволит использовать эту технологию в качестве «магистральных каналов».

Разработаны два стандарта технологии WiMAX – IEEE 802.16 d и IEEE 802.16 e, определяющие:

- рабочие диапазоны частот;
- ширину полосы пропускания;
- мощность излучения;
- методы передачи и доступа;
- способы кодирования и модуляции сигнала;
- принципы повторного использования радиочастот и другие показатели.

**Стандарт IEEE 802.16 d**, известный как *фиксированный* WiMAX и утверждённый в 2004 году, позволяет обслуживать только «статичных» абонентов, которые могут находиться как в зоне прямой видимости, так и вне зоны прямой видимости.

**Стандарт IEEE 802.16 e**, известный как *мобильный* WiMAX и утверждённый в 2005 году, ориентирован на работу с пользователями, передвигающимися со скоростью до 120 км/ч, и поддерживает ряд специфических функций, таких как хэндовер, режим ожидания (idle mode)

и роуминг, что позволяет использовать его в *сетях сотовой связи*. Возможна работа при отсутствии прямой видимости. Естественно, что мобильный WiMAX может применяться и для обслуживания фиксированных пользователей. Частотные диапазоны для сетей Mobile WiMAX расположены в интервале 2,3 - 3,8 ГГц.

Сети WiMAX состоят из следующих основных частей: базовых и абонентских станций, а также оборудования, связывающего базовые станции между собой, с поставщиком сервисов и с Интернетом. Для соединения базовой станции с абонентской используется диапазон частот от 1,5 ГГц до 11 ГГц. В идеальных условиях скорость обмена данными может достигать 70 Мбит/с, при этом не требуется наличия прямой видимости между базовой станцией и приёмником.

Конкурирующей по отношению к WiMAX является технология LTE.

**LTE** (Long Term Evolution) – технология мобильной передачи данных, предназначенная для повышения эффективности, снижения издержек, расширения оказываемых услуг путём интегрирования с существующими протоколами. Скорость передачи данных в соответствии со стандартом может достигать: 173 Мбит/с «вниз» (download) и 58 Мбит/с «вверх» (upload). Радиус действия базовой станции LTE зависит от мощности и используемых частот и составляет около 5 км, а при высоко расположенной антенне может достигать 100 км.

Важной проблемой в сетях 4-го поколения является поддержка высокой скорости передачи данных при перемещении мобильных станций с высокими скоростями, учитывая, что скорость передачи данных падает с увеличением скорости перемещения и с удалением от базовой станции. Кроме того, необходимо обеспечить передачу управления мобильной станцией при её переходе с высокой скоростью (например, при движении в автомобиле или в поезде) из одной соты в другую без прерывания передачи данных и потери качества передаваемой информации.

Предполагается, что 4G станет единым стандартом, который заменит GSM, CDMA, UMTS и другие стандарты.

### **2.6.7. Цифровые выделенные линии**

Цифровые выделенные линии строятся на основе коммутационной аппаратуры, работающей на принципе разделения канала во времени – Time Division Multiplexing (TDM).

Основными технологиями передачи данных по цифровым выделенным линиям являются:

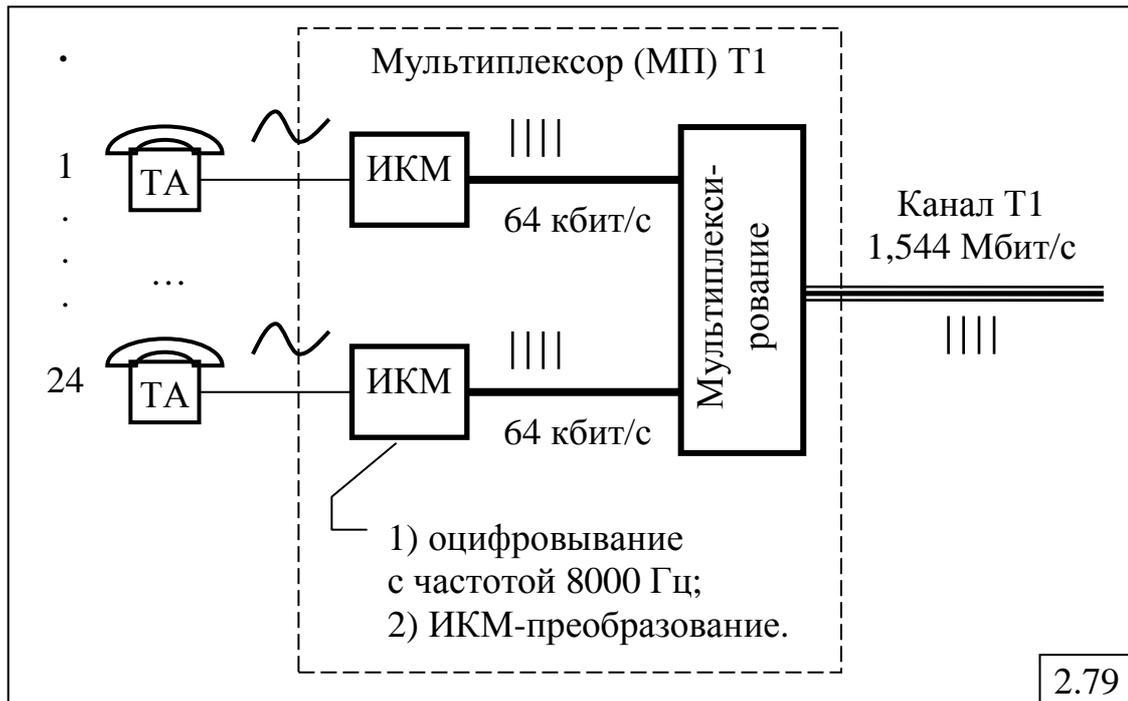
- плезиохронная (почти синхронная) цифровая иерархия (ПЦИ);
- синхронная цифровая иерархия (СЦИ).

#### **2.6.7.1. Плезиохронная цифровая иерархия**

Плезиохронная цифровая иерархия (Plesiochronous Digital Hierarchy, PDH) была разработана фирмой AT&T в конце 60-х годов для связи крупных АТС между собой по высокоскоростным соединительным линиям

и реализована в виде цифровой аппаратуры мультиплексирования и коммутации, которая получила название T1 и позволяла в цифровом виде мультиплексировать, передавать и коммутировать данные 24-х абонентов.

Схема формирования канала T1 показана на рис.2.79. Поскольку абоненты пользовались обычными аналоговыми телефонными аппаратами, функции оцифровывания и кодирования голоса на основе ИКМ-преобразования возлагались на мультиплексор (МП). Таким образом, мультиплексор T1, объединяя 24 речевых каналов со скоростями 64 кбит/с, обеспечивал формирование канала с пропускной способностью 1,544 Мбит/с, который получил название «канал T1».



Каналы T1 представляют собой дуплексные цифровые каналы для передачи цифровых сигналов. Первоначально каналы T1 выполняли роль магистральных каналов телефонной сети, обеспечивающих повышенную пропускную способность. По мере совершенствования цифровой технологии и снижения стоимости каналы T1 стали использоваться в качестве выделенных или арендуемых каналов.

Для подключения узла компьютерной сети к каналу T1 используется специальное оборудование:

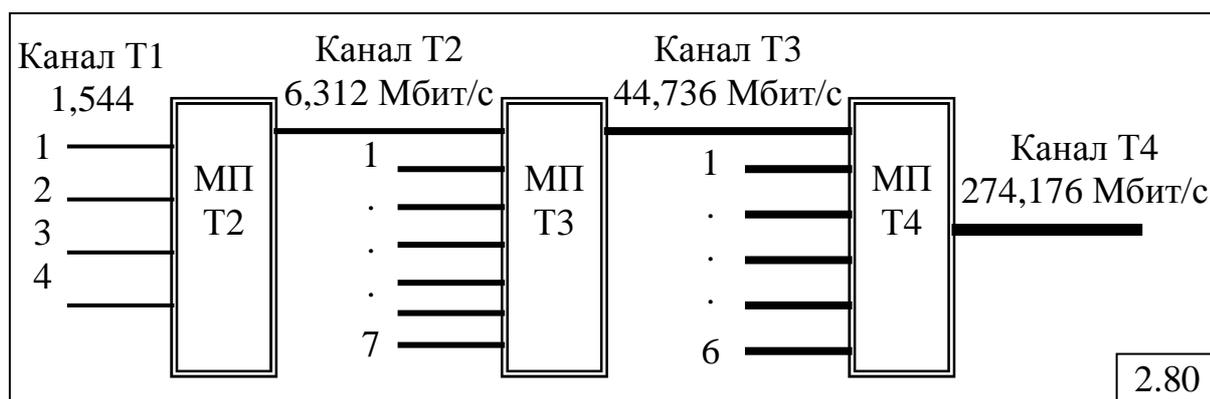
- **CSU** (Channel Service Unit) – устройство обслуживания канала;
- **DSU** (Data Service Unit) – устройство обслуживания данных.

CSU реализует фактический интерфейс между каналом T1 и узлом, поддерживает качество канала, отслеживает соединения и выполняет в канале T1 роль физической оконечной точки. DSU преобразует сигналы, выполняет синхронизацию, формирует кадры каналов T1/E1, усиливает сигнал и осуществляет выравнивание загрузки канала. DSU подключается к CSU и обычно обозначается как одно устройство – DSU/CSU, которое подключается к мостам и маршрутизаторам.

В дальнейшем была разработана аппаратура мультиплексирования цифровых потоков более высокого уровня, которая получила обозначения T2, T3 и T4 и позволила сформировать иерархию скоростей передачи данных по каналам, обозначаемым аналогичным образом:

- канал T2 с пропускной способностью 6,312 Мбит/с получен путём мультиплексирования 4-х каналов T1;
- канал T3 с пропускной способностью 44,736 Мбит/с получен путём мультиплексирования 7-и каналов T2;
- канал T4 с пропускной способностью 274,176 Мбит/с получен путём мультиплексирования 6-и каналов T3.

Схема формирования каналов T2-T4 представлена на рис.2.80.



В Европе применяется отличающийся от американского международный стандарт, использующий следующие обозначения каналов:

- канал E1 с пропускной способностью 2,048 Мбит/с, полученной в результате мультиплексирования 30 речевых каналов;
- канал E2 с пропускной способностью 8,488 Мбит/с, полученной в результате мультиплексирования 4-х каналов E1;
- канал E3 с пропускной способностью 34,368 Мбит/с, полученной в результате мультиплексирования 4-х каналов E2;
- канал E4 с пропускной способностью 139,264 Мбит/с, полученной в результате мультиплексирования 4-х каналов E3.

*Скорости* (пропускные способности) каналов  $T_i$  и  $E_i$  обозначаются в виде **DS-n** (Digital Signal):

- DS-0: 1 речевой канал с пропускной способностью 64 кбит/с;
- DS-1: канал T1/E1 (1,544 Мбит/с / 2,048 Мбит/с);
- DS-2: канал T2/E2 (6,312 Мбит/с / 8,488 Мбит/с);
- DS-3: канал T3/E3 (44,736 Мбит/с / 34,368 Мбит/с);
- DS-4: канал T4/E4 (274,176 Мбит/с / 139,264 Мбит/с).

На практике в основном используются каналы T1/E1 и T3/E3.

На рис.2.81 показаны форматы кадров T1 (DS-1) и T2 (DS-2).

Кадр T1 (рис.2.84,а) объединяет 24 речевых каналов, в каждом из которых передаётся 1 байт, и бит синхронизации S. Длина кадра составляет:  $24 \cdot 8 + 1 = 193$  бит. Кадры передаются 8000 раз в секунду. Тогда скорость передачи данных:  $193 \text{ бит} \cdot 8000 = 1,544 \text{ Мбит/с}$ .

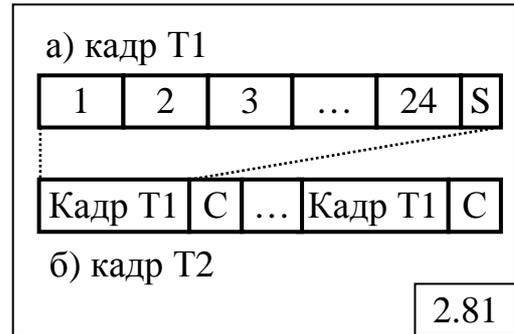
Кадр T2 (рис.2.84,б) объединяет 4 кадра T1, которые разделены служебным полем C, обеспечивающим в том числе синхронизацию.

Аналогично, кадр T3 объединяет 7 кадров T2, а кадр T4 – 6 кадров T3.

Физический уровень PDH поддерживает:

- витую пару;
- коаксиальный кабель;
- волоконно-оптический кабель.

Последние два типа кабеля используются для каналов T3/E3.



### Недостатки PDH:

- сложность мультиплексирования и демуплексирования;
- отсутствие развитых встроенных процедур контроля и управления сетью, а также процедур поддержки отказоустойчивости;
- невысокие по современным меркам скорости передачи данных: 139 Мбит/с для E4, в то время как ВОК позволяет реализовать десятки Гбит/с и более.

### 2.6.7.2. Синхронная цифровая иерархия

Синхронная цифровая иерархия (Synchronous Digital Hierarchy, SDH) первоначально появилась в США под названием **SONET** – Synchronous Optical NETs (стандарт принят в 1984 году). Европейский стандарт SDH описан в спецификациях G.707 - G.709. SDH и SONET полностью совместимы.

*Цель разработки SDH* – создание универсальной технологии для передачи трафика цифровых каналов T1/E1 и T3/E3 и обеспечение иерархии скоростей до нескольких Гбит/с на основе ВОК.

Обозначение уровней иерархии:

- в **SDH**: STM-n (Synchronous Transport Module);
- в **SONET**:
  - STS-n (Synchronous Transport Signal) – при передаче электрическим сигналом;
  - OC-n (Optical Carrier) – при передаче данных световым лучом по ВОК.

Форматы кадров STS и OC – идентичны.

Иерархия скоростей технологий SDH и SONET представлена в табл.2.4.

Структура сети SDH показана на рис.2.82.

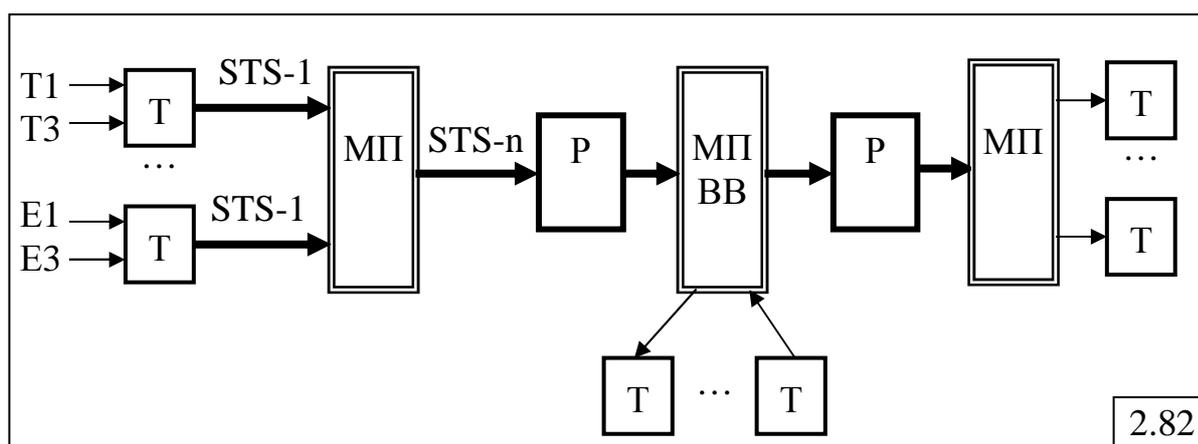
В состав SDH входят следующие устройства:

- *терминальные устройства (T)* – сервисные адаптеры (Service Adapter, SA);
- *мультиплексоры (МП)*;

- мультиплексоры ввода-вывода (МПВВ); принимают и передают транзитом поток STS-n, вставляя или удаляя без полного демультиплексирования пользовательские данные;
- регенераторы (P);
- цифровые кросс-коннекторы для коммутации высокоскоростных потоков данных.

Таблица 2.4

SDH	SONET		Скорость
	STS	OC	
-	STS-1	OC-1	51,840 Мбит/с
STM-1	STS-3	OC-3	155,520 Мбит/с
STM-3	STS-9	OC-9	466,560 Мбит/с
STM-4	STS-12	OC-12	622,080 Мбит/с
STM-6	STS-18	OC-18	933,120 Мбит/с
STM-8	STS-24	OC-24	1,244 Гбит/с
STM-12	STS-36	OC-36	1,866 Гбит/с
STM-16	STS-48	OS-48	2,488 Гбит/с
STM-64	STS-192	OS-64	9,953 Гбит/с
STM-256	STS-768	OS-256	39,81 Гбит/с



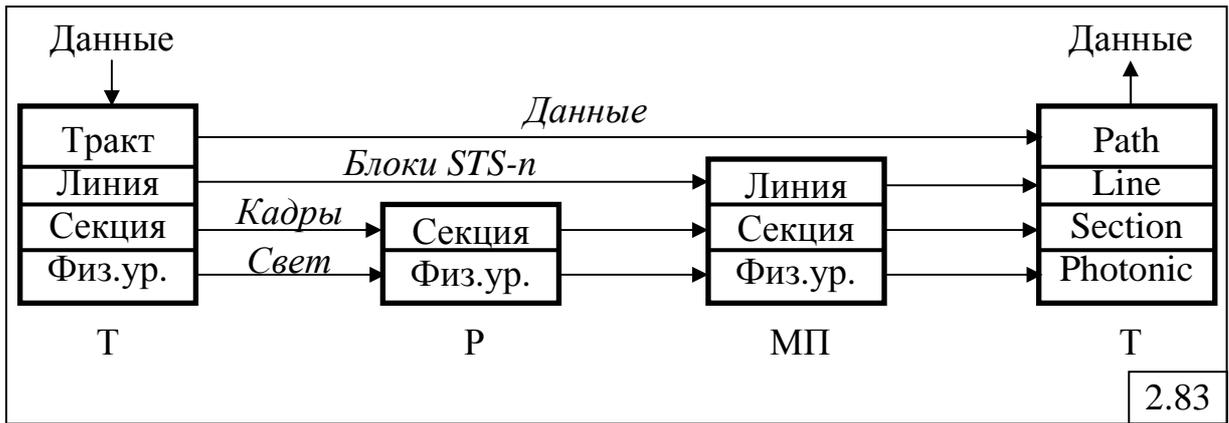
Стек протоколов SDH содержит 4 уровня (рис.2.83).

1. **Физический уровень (Photonic).** Кодирование методом NRZ (модуляция света).

2. **Уровень секции (Section).** Секция – непрерывный отрезок ВОК между двумя устройствами. Проводит тестирование секции и поддерживает операции административного контроля.

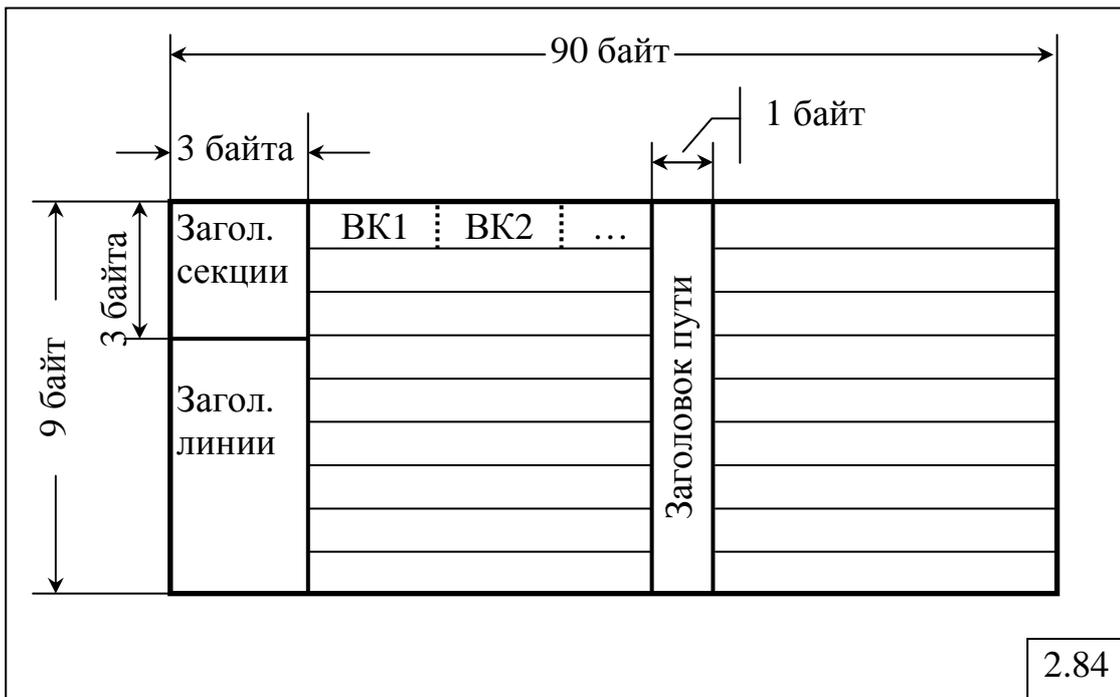
3. **Уровень линии (Line).** Отвечает за передачу данных между МП. Протокол этого уровня выполняет операции мультиплексирования и демультиплексирования, а также вставки и удаления пользовательских данных.

4. **Уровень тракта (Path).** Отвечает за доставку данных между конечными пользователями. Тракт – составное виртуальное соединение между пользователями. Протокол принимает и преобразовывает данные из Ti/Ei в STS-n.



На рис.2.84 представлен формат кадра STS-1 в виде матрицы размером 9 на 90 байт, содержащей:

- заголовок секции – для контроля и реконфигурации секции;
- заголовок линии – для реконфигурации, контроля и управления линией;
- заголовок пути – указывает местоположение виртуальных контейнеров в кадре.



**Виртуальный контейнер (ВК)** – это подкадры, которые переносят потоки данных с более низкими скоростями, чем STS-1 (51,84 Мбит/с), т.е. которые вкладываются в кадр STS-1, как это показано на рис.2.87. В качестве таких виртуальных контейнеров могут выступать, например, АТМ-ячейки, кадры T1/E1 и т.д.

С учётом того, что кадр STS-1 размером 90\*9=810 байт передаётся 8000 раз в секунду, получим:  $810[\text{байт}] * 8[\text{бит}] * 8000[\text{с}^{-1}] = 51,840 \text{ Мбит/с}$ .

Таким образом, SDH – это основанная на волоконно-оптических каналах интегрированная сеть связи, позволяющая передавать все виды трафика и обеспечивающая:

- использование синхронной передачи с побайтовым чередованием при мультиплексировании;
- использование стандартного периода повторения кадров в 125 мкс;
- включение в иерархию большого числа уровней;
- использование технологии компоновки (инкапсуляции) протоколов в виде виртуальных контейнеров, их упаковки и транспортировки, позволяющие загружать и переносить в них кадры PDH.