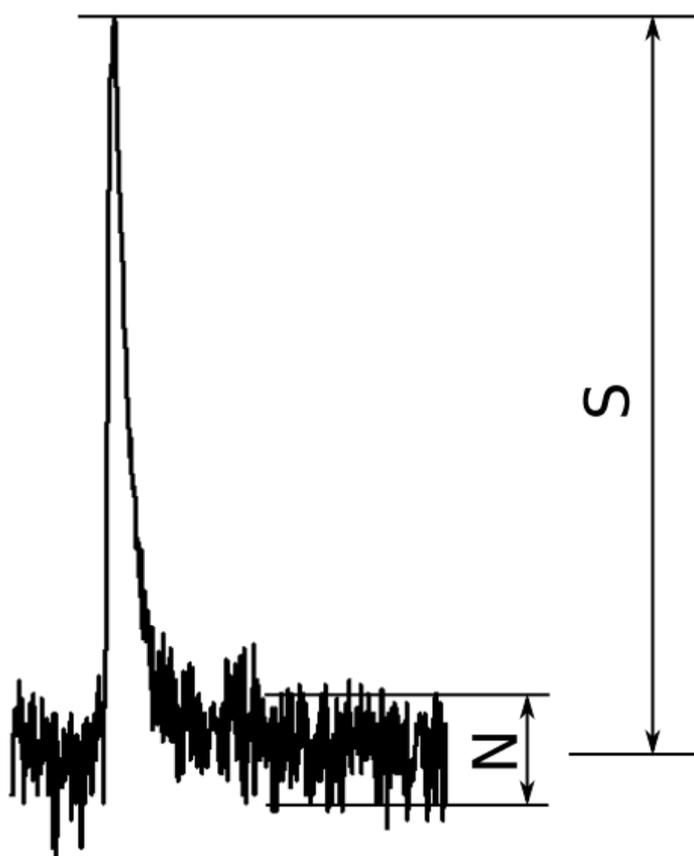


П.С. Парфенов, А.П. Литвин, Д.А. Онищук

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ



Санкт-Петербург

2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

П.С. Парфенов, А.П. Литвин, Д.А. Онищук

**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ**

**РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО**

по направлению подготовки 12.03.03 «Фотоника и
оптоинформатика» в качестве учебно-методического пособия
для реализации основных профессиональных программ
высшего образования бакалавриата

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2017

П.С. Парфенов, А.П. Литвин, Д.А. Онищук. Приборы и методы экспериментальной физики. Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 71 с.

Рецензенты:

А.В. Вениаминов, д.ф.-м.н., Университет ИТМО.

А.А. Рыжов, к.ф.-м.н., АО «ГОИ им. С.И. Вавилова».

Учебное пособие предназначено для бакалавров факультета фотоники и оптоинформатики, обучающихся по программе подготовки «Физика наноструктур» по направлению подготовки 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика», обучающихся по дисциплине «Приборы и методы экспериментальной физики». Практикум также может быть рекомендован студентам старших курсов физико-технических специальностей, а также магистрантам, специализирующимся в области применения оптических методов в исследовании наноструктур.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2017

© П.С. Парфенов, А.П. Литвин, Д.А. Онищук, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ЭКСПЕРИМЕНТ В ФИЗИКЕ	4
2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ДАТЧИКИ	8
3. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ	14
4. ПРИЕМНИКИ СВЕТА	20
5. ТЕХНИКА СПЕКТРОСКОПИИ.	26
6. ПОМЕХИ	33
7. РЕГИСТРАЦИЯ ВРЕМЕН ЗАТУХАНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ	42
8. АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА	54
9. ИНТЕРПОЛЯЦИЯ, АППРОКСИМАЦИЯ И ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ	59
10. ФИЛЬТРАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА	62
Приложение 1: ОДНО- И ТРЕХФАЗНЫЕ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	66
Приложение 2: ВЫЧИСЛЕНИЕ СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ.	68
Литература	69

ВВЕДЕНИЕ

Учебный курс «Приборы и методы экспериментальной физики» представляет собой часть бакалаврской дисциплины «Физика наноструктур». Курс нацелен на ознакомление с рядом методов экспериментальной физики, систематизацию знаний, полученных в рамках предшествующих дисциплин, и на их приложение к экспериментальному оборудованию, применяемому для изучения физических свойств наноструктур.

В рамках курса студенты должны получить представление о физических основах измерительного процесса и аппаратной реализации экспериментальных методов физики. Первая глава посвящена месту эксперимента в физике и экспериментатора в эксперименте, влиянию экспериментатора на эксперимент и принципиально вероятностной природе физического эксперимента. Рассматривается тема планирования эксперимента, что требуется для уменьшения методических погрешностей, а также влияния экспериментатора.

Вторая глава посвящена преобразованию измеряемого сигнала в электрический сигнал, измерительным приборам, их параметрам и параметрам электрических сигналов, а также согласованию нагрузки при последовательном включении приборов или при самом измерении.

В третьей главе рассматриваются основные параметры усилителей на примере основных схем включения операционных усилителей. Знание способов их включения также позволяет самостоятельно создавать усилители слабых сигналов с требуемыми параметрами.

В следующей главе рассматриваются приемники света от болометров до матричных приемников и их параметры. Рассмотрение шумов, которые присущие приемникам и усилителям, иллюстрируется сравнением разнотипных приемников между собой по шумовым параметрам.

Глава, посвященная технике спектроскопии, охватывает вопросы структуры дифракционных монохроматоров, их параметров, способы управления и калибровки по спектру АЧТ и длинам волн. Приводится информация об основных параметрах дифракционных решеток и особенностях работы с ними.

Помимо шумов, которые присущи элементам измерительной схемы, существует проблема борьбы с помехами извне. В главе про помехи рассматриваются основные виды помех, а также способы борьбы с ними с помощью схемных решений – модуляции, кодирования, синхронного детектирования. Одним из способов борьбы с помехами является и счет фотонов, применяемый для регистрации сверхслабых сигналов. Рассматриваются и свойства, отличающие приемники, ведущие счет фотонов, от других.

Глава про регистрацию времен затухания люминесценции описывает способы измерения времен в диапазоне от пико до миллисекунд. Подробно рассматриваются режимы счета фотонов. Отдельно рассматривается время-коррелированный счет фотонов, дискриминаторы, работающие по методу следящего порога для регистрации импульсов разной амплитуды. Вопросы настройки системы счета фотонов рассматриваются в ракурсе предотвращения наложения импульсов друг на друга, что искажает экспериментальные данные.

В главе об автоматизации измерительного эксперимента рассматривается несколько примеров, когда с помощью поставляемого с приборами комплекта документации на языках разного уровня создается программное обеспечение, позволяющее автоматизировать измерительный процесс. Рассмотрение такой темы не может обойтись без упоминания о системе LabVIEW.

Вопросу поиска функциональной зависимости при обработке экспериментальных данных посвящена глава про интерполяцию, аппроксимацию и экстраполяцию. Оптимальность применяемых методов зависит от объема экспериментальных данных и предполагаемого характера зависимости.

В последней главе рассматривается фильтрация экспериментальных данных, помогающая уменьшить вклад помех и шумов путем математической обработки.

Для самопроверки в конце каждого параграфа приведен список вопросов.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ В ФИЗИКЕ

Эксперимент – метод познания, когда в контролируемых условиях исследуются явления действительности. *Экспериментальная физика* – группа дисциплин физики, заключающаяся в сборе данных и разработке методов сбора данных, и подготовке и проведении экспериментов. Экспериментальные исследования ведутся во всех областях науки и техники. Цель этих экспериментов либо установить новые факты об исследуемом явлении, либо сравнить влияния различных условий на рассматриваемый процесс.

Необходимо понимать, что с одной стороны эксперимента находятся физические процессы, носящие принципиально вероятностный характер. С другой, конечную оценку эксперименту дает *субъект (наблюдатель)*, и только в его силах оценить корректность постановки эксперимента и границы трактовки результатов. Эксперимент должен учитывать первое и предотвращать влияние второго.

1.1. Субъективность эксперимента

Фон Нейман говорил, что должна быть возможность так описать в действительности физический процесс субъективного восприятия, как если бы он был в физическом мире, и приводил пример измерения температуры. Теоретическое описание процесса измерения можно остановить на словах «температуру измеряет термометр», можно продолжить расчеты до измерения наблюдателем длины ртутного столбика, далее рассмотреть построение изображения ртутного столбика на сетчатке наблюдателя, продолжить описывать химические реакции в мозгу и только тогда сказать – эти химические изменения в клетках мозга воспринимает наблюдатель. Однако в любом случае должна быть возможность сказать «это воспринимается наблюдателем». Т.е. мир делится на следующие части – *наблюдаемую* и *наблюдателя*. В первой части в принципе можно исследовать все физические процессы, во второй это бессмысленно. Положение границы между ними произвольно. И опыты можно проводить только с утверждениями типа «наблюдатель испытал определенное восприятие», а не «некоторая физическая величина имеет определенное значение» [1].

Субъект, дающий трактовку эксперименту, вносит в него когнитивное искажение (искажения в процессе познания вследствие стереотипов, особенностей работы мозга, физических ограничений, эмоций и пр.), особенно на этапе обработки данных и трактовки результатов. Люди склонны интерпретировать полученные данные в соответствии с собственной точкой зрения (англ. *confirmation bias*), исключая из рассмотрения отклоняющиеся результаты, и отдавая

предпочтение соответствующим. Правильная постановка эксперимента может уменьшить влияние искажения.

1.2. Эксперимент в квантовой механике

Помимо искажений, возникающих вследствие субъективности экспериментатора, на результаты влияет и принципиально вероятностный характер самого процесса измерения физической величины, что описывается квантовой механикой. Если система находится в чистом состоянии и описывается волновой функцией ψ_n , то ожидаемое значение $\langle A \rangle$ наблюдаемой величины A равно интегралу $\int \psi_n^* \hat{A} \psi_n dq$, где \hat{A} – оператор этой наблюдаемой. В одном измерении можно получить только одно значение из набора собственных состояний оператора (каждое – с определенной вероятностью), и интеграл предсказывает результат серии экспериментов. Однако обычно система пребывает в смешанном состоянии, для описания которой применяется статистическая *матрица плотности* [2]

$$\rho = \sum_n \rho_n |\Psi_n\rangle \langle \Psi_n|.$$

Диагональные элементы матрицы плотности $\langle n|\rho|n\rangle$ задают вероятность обнаружить в эксперименте чистое состояние $|n\rangle$. Более того, в большинстве экспериментов обнаруживается не единственное чистое состояние. Детектор в общем случае реагирует на несколько состояний $|n\rangle$ с относительными вероятностями («эффективностями») ε_n . Полная вероятность срабатывания прибора определяется выражением

$$W = \sum_n \varepsilon_n \langle n|\rho|n\rangle.$$

Если ввести оператор, аналогичный матрице плотности

$$\varepsilon = \sum_n \varepsilon_n |n\rangle \langle n|,$$

то выражение для W можно представить как след произведения двух матриц

$$W = \text{tr } \rho \varepsilon.$$

Оператор ε называется «матрицей эффективности» измерительного прибора и полностью описывает его реакцию. Если прибор с достоверностью реагирует только на одно состояние $|n\rangle$ (т.е. является идеальным фильтром), то $\varepsilon_n = |n\rangle \langle n|$. В этом случае из смеси можно выделить чистое состояние $|n\rangle$, и первое выражение сводится к выражению

$$W = W_n = \langle n|\rho|n\rangle.$$

Вероятностная природа физических процессов влияет на результат даже при идеальном измерительном устройстве и необходима для понимания пределов чувствительности измерительной аппаратуры.

1.3. Планирование эксперимента

В любой экспериментальной задаче два аспекта: планирование эксперимента и статистический анализ данных, причем эти два аспекта

тесно взаимосвязаны, так как метод анализа непосредственно зависит от использованного плана. Организация эксперимента должна позволить применить для анализа данных статистические методы, поскольку если данные эксперимента содержат ошибки, то статистические методы являются единственным объективным подходом к их анализу.

В основе планирования эксперимента лежат два основных принципа: *репликация* и *рандомизация*. Под репликацией понимается повторение основного эксперимента. Повторные опыты позволяют экспериментатору получить оценку ошибки эксперимента (случайной погрешности). Эта оценка становится основной «мерой» при определении того, являются ли наблюдаемые различия в данных в действительности статистически различными.

Рандомизация означает, что распределение экспериментального материала и порядок, в котором должны проводиться отдельные опыты, устанавливаются случайным образом. Для применения статистических методов требуется, чтобы наблюдения (или ошибки) были независимыми случайными переменными. Рандомизация, как правило, обеспечивает справедливость этого допущения.

Примерная схема эксперимента такова:

1. Признание факта существования задачи и ее формулировка. Необходимо уточнить все представления о целях эксперимента.

2. Выбор факторов. Необходимо отобрать независимые переменные или факторы, которые будут исследоваться в эксперименте. Нужно также выбрать диапазон и значения факторов, которые будут использованы в эксперименте. Эти значения могут быть заданы через шаг или выбраны случайным образом.

3. Выбор переменной отклика. Отклик, который предстоит измерять, должен содержать информацию об исследуемой проблеме. Нужно подумать также и о том, как будет измеряться отклик и какова вероятная точность этих измерений.

4. Выбор погрешности эксперимента. Необходимо задать величину отличия от истинного отклика, который планируется обнаружить, и величину риска, на который можно пойти, с тем, чтобы выбрать соответствующий объем выборки (число реплик). Необходимо всегда согласовывать между собой статистическую точность, длительность и стоимость эксперимента.

5. Выбор математической модели эксперимента. Должна быть предложена математическая модель эксперимента, что позволит провести статистический анализ данных. Также надо определить, в каком порядке будут собираться данные, и какой метод рандомизации будет применен.

6. Проведение эксперимента. Эксперимент должен проходить в соответствии с планом. Особое внимание нужно обращать на

рандомизацию, точность измерений и поддержание как можно большей однородности внешних условий эксперимента.

7. Анализ данных. Для анализа данных эксперимента должны применяться статистические методы. При этом важно не забывать и о точности вычислений.

8. Выводы и рекомендации. Нужно дать физическую интерпретацию статистических выводов и оценить их практическое значение, а затем вынести рекомендации об использовании результатов. Представляя свои результаты и выводы, экспериментатор должен стараться использовать как можно меньше специальной статистической терминологии и формулировать свое сообщение по возможности проще [3].

Вопросы для самопроверки:

- Чем определяется вероятность обнаружения в определенном состоянии системы, описываемой матрицей плотности?
- Какие принципы, позволяющие уменьшить случайные и систематические ошибки, должны лежать в основе планирования эксперимента?
- С какими параметрами эксперимента в первую очередь конкурирует точность результатов?

2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ДАТЧИКИ

В общем случае, в измерении участвует датчик (или измерительный преобразователь) и непосредственно измерительный прибор. *Датчик* преобразует измеряемый сигнал в форму, удобную для передачи, преобразования или хранения, но недоступную для непосредственного восприятия человеком (например, электрический сигнал). *Измерительный прибор* получает значение измеряемой величины в форме, доступной для восприятия наблюдателем.

Датчики характеризуются чувствительностью, погрешностью и набором зависимостей, связывающих входной и выходной сигнал, а также выход ряд других параметров, в зависимости от условий измерения. Чувствительность в данном случае – связь измеряемого сигнала с соответствующими показаниями прибора. Например, для фотодиода это отношение падающей мощности к фототоку, и чувствительность в этом случае измеряется в А/Вт.

Измерительные приборы измеряют механические, электрические, термодинамические и пр. параметры. В физическом эксперименте чаще всего измеряются электрические параметры, но не только (см. табл. 1). Выделим три основных устройства, обычно применяемых во всех экспериментах, два из которых входят в состав большинства измерительных приборов:

Табл. 1. Основные физические параметры, измеряемые в экспериментах (на основе статьи [4]).

Временные параметры	Время, период, частота
Механические параметры	Длина (расстояние), площадь, объем Скорость, ускорение Масса Линейный момент Сила, давление Угол, угловой момент, угловая скорость Положение и ориентация в пространстве Энергия, производимая с помощью механической работы
Электрические параметры	Электрический заряд, ток, напряжение Сопротивление и проводимость Емкость и индуктивность Энергия и мощность, перенесенная электричеством Напряженность электрического и магнитного поля
Термодинамические параметры	Количество вещества Температура Тепловая энергия Энтропия Теплоемкость Коэффициент температурного расширения Температура плавления и кипения
Механика сплошных сред	Плотность, твердость, форма Деформация (эластичность, пластичность) Предел текучести, деформации на разрыв Зернистость сплошных сред и суспензий Кристаллическая структура, микроструктура Вязкость жидкостей Оптическая активность Поверхностное натяжение
Электрические свойства сред	Диэлектрическая и магнитная проницаемость Магнитная восприимчивость
Лучи (как волны, так и частицы)	Звуковое давление. Волны упругости. Поляризация фотонов Световое давление Поток излучения Поляризация электронов и атомов Ионизирующее излучение.
Содержание в смесях	Концентрация протонов в растворе (pH) Влажность

Стабилизированный источник питания – это источник, поддерживающий постоянными выходные напряжение или ток вне зависимости от величины нагрузки в заданном диапазоне. В универсальных лабораторных источниках питания при превышении потребления мощности (тока или напряжения) установленного значения обычно автоматически происходит переход от одного режима к другому, обеспечивая тем самым защиту источника питания и потребителя от перегрузки. Так, при размыкании контактов универсальный источник стабилизируется по напряжению, при замыкании – по току. Идеальный источник тока и идеальный источник напряжения достаточно характеризовать током короткого замыкания и напряжением холостого хода соответственно, реальные источники тока и напряжения позволяют такое упрощение только в определенном диапазоне нагрузки.

Мультиметр (тестер) – прибор для измерения напряжений, токов и сопротивлений (а также емкости, частоты, проверки контактов, р-п переходов).

Осциллограф – прибор для измерения и изображения сигналов, меняющихся во времени.

2.1. Параметры электрических сигналов

Базовыми величинами в системе СИ являются единицы длины (м), массы (кг), времени (с), силы тока (А), температуры (К), количества вещества (моль) и силы света (кд). Остальные величины являются производными. Перечислим основные параметры, связанные с электрическими сигналами.

ЭДС, или электродвижущая сила – внешняя сила, вызывающая перемещение заряда вдоль замкнутого контура. Может быть химической, фотоэлектрической, электромагнитной, электростатической, пьезоэлектрической, термоэлектрической и пр.

Постоянный ток (Direct Current, DC) – ток, не меняющий своей величины и направления.

Переменный ток (Alternating Current, AC) – электрический ток, меняющий свою величину и направление с течением времени.

Параметрами переменного сигнала, изменяющегося по гармоническому закону

$$V(t) = V_0 \sin(\omega t + \varphi), \text{ где } \omega = 2\pi f,$$

являются *амплитуда* V_0 (максимальное значение отклонения переменной величины от среднего значения), *частота* $f=1/T$ (значение, обратное периоду T – наименьшему интервалу времени, через который регулярно повторяются значения сигнала), и *фаза* φ (применяется для сравнения двух сигналов).

Для описания негармонических сигналов, например сигналов сложной формы, шума, вышеприведенные параметры недостаточны или неприменимы, поэтому вводят дополнительные:

Пиковая амплитуда (пик, peak amplitude, peak) – это отклонение от среднего значения симметричных периодических сигналов (синусоидальных, прямоугольных, пилообразных);

Среднеквадратичная амплитуда (root mean square, RMS) – квадратный корень среднего по времени значения квадрата отклонения

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt}.$$

Приборы обычно измеряют именно RMS амплитуду переменного сигнала. Для гармонического сигнала связь между эффективным значением, определяемым как среднеквадратичное, и амплитудой, будет

$$U_{эф} = U_0 / \sqrt{2} = 0.707 \cdot U_0 \text{ и } I_{эф} = I_0 / \sqrt{2} = 0.707 \cdot I_0$$

Этот параметр также применяют для сопоставления мощности переменного и постоянного тока, поскольку постоянный сигнал и переменный с RMS амплитудой, равной амплитуде постоянного, характеризуются одинаковой мощностью:

$$P_{RMS} = \frac{1}{RT} \int_0^T V_0^2(t) dt, \text{ или, для гармонического, } P_{RMS} = \frac{V_0^2}{2R} = \frac{I_0^2 R}{2}.$$

При измерении несинусоидального сигнала значение будет отличаться.

Размах – разность между максимальным и минимальным значениями сигнала.

Мгновенное значение – значение сигнала в определённый момент времени.

Среднее значение, или смещение – постоянная (усредненная) составляющая изменяющегося напряжения или силы тока:

$$V_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt$$

Постоянная компонента сдвигает сигнал относительно нуля.

Для обеспечения возможности сравнения с другими результатами, а также во избежание двусмысленности, любое измерение должно характеризоваться типом измерения, величиной, единицей измерения и погрешностью.

2.2. Характеристики средств измерения

Диапазон – характеристика передающей системы, равная разнице максимального и минимального возможных значений величины входного параметра устройства.

Динамический диапазон – характеристика передающей системы, равная отношению (либо логарифму отношений) максимального и минимального возможных значений величины входного параметра устройства. В случае логарифмической оценки выражается в децибелах.

Децибел (дБ) численно равен десятичному логарифму безразмерного отношения физической величины к одноимённой физической величине, принимаемой за исходную, умноженному на десять. Изначально дБ применялся для оценки мощности, поэтому единицы измерения нужно приводить к энергетическим. Поэтому при вычислении усиления по току или напряжению умножают на 20 (т.к. мощность пропорциональна квадрату тока либо напряжения).

Чувствительность – величина, определяемая минимальным уровнем сигнала на входе при заданном отношении уровней полезного сигнала и шума и заданном уровне полезного сигнала на выходе.

Стабильность – способность сохранять параметры неизменными в течение определенного времени (обычно указывается % в час).

Входное (выходное) сопротивление – отношение напряжения на входах (выходах) к току, протекающему через них. Входное сопротивление цепи определяет, какая нагрузка будет подключена к генератору (источнику), выходное сопротивление генератора (источника, цепи) определяет, какая нагрузка может быть подключена к генератору (источника, цепи).

Волновое сопротивление – отношение напряжения падающей волны к току этой волны в линии передачи, для линий бесконечной длины это отношение сводится к корню отношения погонной индуктивности линии к погонной емкости. Выражается в единицах сопротивления:

$$\sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = \frac{U}{I} = Z_0$$

2.3. Согласование нагрузки

Возможность измерения сопротивления элементов и напряжения в цепи во многом определяется входным сопротивлением измерительных приборов. Входное сопротивление нагрузки ограничивает диапазон допустимого выходного сопротивления источника – последнее должно быть много меньше. Это следует из схемы деления сопротивлений (рис. 1). Так, при равенстве сопротивлений напряжение на входе вольтметра составит половину от измеряемой величины, а сопротивление измеряемого участка цепи также упадет вдвое из-за параллельного подключения внутреннего сопротивления.

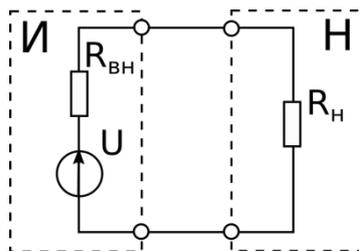


Рис. 1 Схема подключения нагрузки к источнику ЭДС. Пунктиром выделены области цепи, соответствующие источнику (И) и нагрузке (Н)

Высокое входное сопротивление измерителя говорит о том, что его включение в цепь не исказит параметры сигнала, что он не занизит показания, «закорачивая» измеряемый сигнал, а низкое выходное сопротивление источника питания обеспечивает большую подключаемую мощность. Но это имеет место только при измерениях, поскольку процесс измерения не должен вносить заметных изменений в работу измеряемой цепи, и работе на низкой частоте. Внутри самих электрических схем входное сопротивление усилителя должно быть равно выходному сопротивлению источника (т.е. сопротивления согласованы), это обеспечивает условия для полной передачи мощности. И если при работе на постоянном токе или низких частотах несогласованность приводит только к уменьшению мощности сигнала, то на высоких частотах возникает отраженный сигнал и нежелательный резонанс при переходных процессах (т.н. «звон»).

Большая часть современной высокочастотной усилительной техники рассчитана на работу с сопротивлением 50 Ом и оснащено коаксиальными соединениями типа BNC (реже SMA), или похожими разъемами отечественного стандарта СР-50. На такое же волновое сопротивление рассчитаны коаксиальные кабели. В ряде случаев ненагруженные входы и выходы усилителей рекомендуется нагружать «терминаторами» – резисторами с номиналом 50 Ом, соответствующим сопротивлениям источника и приемника. Также их подключают параллельно при высоком входном сопротивлении измерительной техники, если сопротивление приводит к несогласованности в цепи и искажению сигнала. Так, осциллографы хоть и имеют достаточно высокое входное сопротивление (порядка мегаома), но работа с ВЧ сигналами может требовать применения терминаторов или специальных щупов.

Вопросы для самопроверки:

- Что произойдет при замыкании контактов лабораторного источника питания, работающего в режиме стабилизации напряжения?

- Какими параметрами можно охарактеризовать гармонический сигнал?
- При измерении постоянного напряжения с помощью вольтметра каким должно быть его входное сопротивление относительно объекта?
- К чему приводит несогласованность нагрузки при работе на высоких частотах?

3. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ [5]

Усиление фототока, источником которого являются фотодиоды, фототранзисторы и пр., может осуществляться разными способами. Первоначально усиление реализовывали с помощью электронных ламп, затем транзисторов. Хотя транзисторы в виде отдельных элементов схемы по-прежнему применяются, гораздо удобнее рассмотреть вопросы усиления и регистрации сигнала на уровне интегральной электроники – на примере операционных усилителей (ОУ). Кроме того, на работе ОУ можно проиллюстрировать большинство параметров обычных усилителей, а также, при необходимости, собрать собственный, с требуемыми параметрами.

Операционные усилители получили свое название из-за того, что первоначально разрабатывались для создания арифметических аналоговых устройств (сумматоров, умножителей, интеграторов, дифференциаторов). На их основе можно создать почти любое устройство для аналоговой обработки сигнала, но мы ограничимся рассмотрением дифференциального усилителя и некоторых схем на его основе.

Дифференциальный (разностный) усилитель – это электронное устройство, выходной сигнал которого равен разности напряжений на двух входах, умноженного на определенную величину. Т.е. $U_{out} = (U_{вх2} - U_{вх1}) \times K$, где $U_{вх}$ – напряжение на входах, а K – коэффициент усиления. Выходной сигнал при этом может быть тоже дифференциальным, т.е. регистрироваться как разность между двумя выходами, или однофазным, т.е. регистрироваться между выходом и нулем.

Операционный усилитель это дифференциальный усилитель постоянного тока, т.е. работающий на частотах от 0 Гц, с очень большим коэффициентом усиления и однофазным выходом. Усиление разностного сигнала K по напряжению составляет 10^6 и более, выходное сопротивление очень низкое, а выходной сигнал может меняться почти в полном диапазоне напряжения питания. Выходы обозначают как «+» и «-», или *неинвертирующий* и *инвертирующий* (часто на схеме

инвертирующий отмечают кружочком). Символы означают, что выходной сигнал изменится в положительном направлении тогда, когда напряжение на входе «+» будет больше, чем на входе «-». Такое устройство ведет себя крайне нестабильно, и малейшее расхождение сигналов на входах вызывает переключение выходного сигнала между противоположными напряжениями питания. По этой причине ОУ в одиночку можно использовать только в качестве компаратора.

Для придания схемам на основе ОУ необходимых характеристик вводят обратную связь. Для этого выход соединяют с одним из входов, инвертирующим либо неинвертирующим, через сопротивление обратной связи (рис. 2).

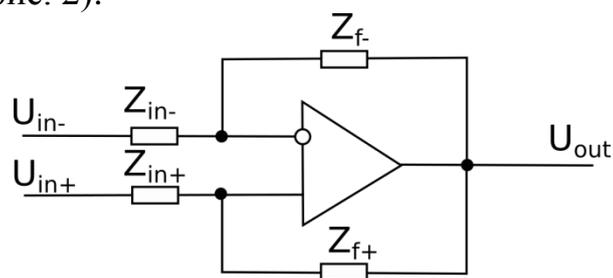


Рис. 2 Базовая конфигурация включения ОУ

Если компоненты обратной связи соединяются с неинвертирующим входом, возникает *положительная обратная связь*. При этом ОУ фактически перестает быть усилителем и либо осциллирует в режиме, определяемом компонентами ОС, либо работает как компаратор. Положительная ОС используется обычно в генераторах.

Более распространенный режим – использование *отрицательной обратной связи*, когда выход соединяется с инвертирующим входом. При этом часть выходного сигнала попадает на инвертирующий вход усилителя в противофазе (поэтому повышение выходного сигнала, попадая на вход, ведет к уменьшению выходного сигнала, и наоборот). Отрицательная ОС уменьшает коэффициент усиления, но при этом устраняет искажения и нелинейность, улучшая общие параметры схемы. Чем больше обратная связь, тем меньше параметры схемы зависят от характеристик ОУ и тем больше от самой схемы ОС. Из-за задержки сигнала на определенных частотах отрицательная обратная связь становится положительной, поэтому часто ОУ имеют схемы внутренней частотной коррекции.

При инвертирующем включении ОУ поддерживает такой уровень выходного напряжения, который обеспечивает равенство напряжения на входах ОУ (поэтому обычно считают, что у ОУ напряжение на входах равно).

При правильном подборе элементов, ОУ может генерировать выходной сигнал как функцию входных и использоваться в качестве

дифференциального усилителя, регулятора тока или напряжения, фильтра, преобразователя и пр., а также реализовывать основные математические функции. Благодаря тому, что ОУ имеет крайне высокое входное сопротивление, низкое выходное сопротивление, и очень высокий коэффициент усиления, основные расчеты можно проводить, исходя из характеристик идеального ОУ (равное напряжение на входе, бесконечное усиление, бесконечное входное сопротивление, и нулевое выходное).

3.1. Варианты схем на основе ОУ [5]

А. Триггер Шмидта

Добавление положительной обратной связи в отсутствие отрицательной превращает ОУ в триггер Шмидта, или триггер с петлей гистерезиса (рис. 3).

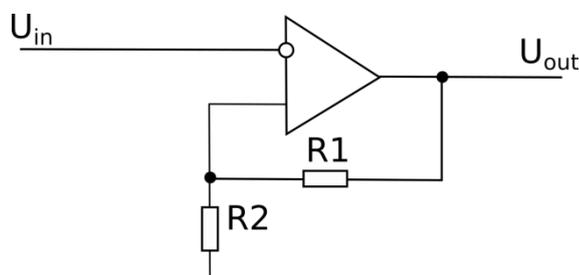


Рис. 3 Триггер Шмидта на ОУ

Схема будет переключаться между положительным и отрицательным напряжением U_{out+} и U_{out-} каждый раз, когда входное напряжение будет переходить через уровень, задаваемый делителем из сопротивлений. При повышении напряжения при уровне срабатывания $U_{ср} = U_{out-}R_1/(R_1 + R_2)$, при понижении – при уровне отпускания $U_{отп} = U_{out+}R_1/(R_1 + R_2)$. Возникает гистерезис $U_{гис} = U_{ср} - U_{отп}$. Пороги срабатывания исключают ненужные переключения под действием шумов, т.е. устраняют так называемый "дребезг" контактов.

Б. Инвертирующий усилитель

Для большинства случаев усиления напряжения или регистрации фототока подходит инвертирующая схема включения ОУ (рис. 4). Усиленный сигнал находится в противофазе с входным и равен $U_{out} = -U_{in} \times R_1/R_2$.

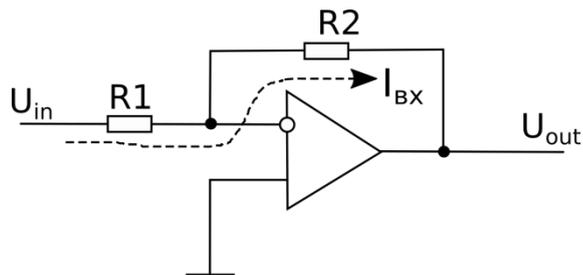


Рис. 4 Инвертирующее включение. Штриховая линия показывает путь входного тока

Через схему протекает фактически входной ток, т.к. потребление входов почти нулевое. Входной ток и создает падение напряжения на R_2 .

В. Неинвертирующий усилитель

При отрицательной обратной связи и подаче сигнала на неинвертирующий вход, как показано на рис. 5, фаза сигнала на входе и на выходе совпадает, а выходное напряжение равно $U_{out} = U_{in} \times (1 + R_2/R_1)$. Основное отличие от инвертирующей схемы заключается в повышенном входном сопротивлении, которое определяется параметрами входов ОУ и может составлять десятки мегаом и более.

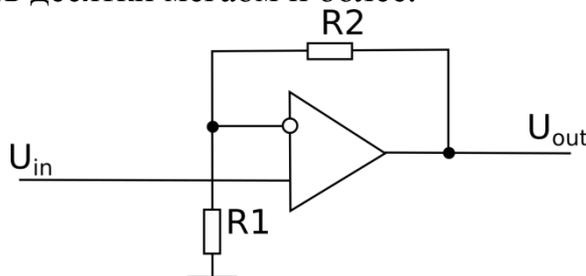


Рис. 5 Неинвертирующий усилитель

Г. Повторитель (неинвертирующий)

Отрицательная обратная связь без сопротивлений, как на рис. 6, образует повторитель, выходной сигнал которого находится в фазе входному $U_{out} = U_{in}$. Схема применяется в качестве буферного усилителя, обеспечивающего повышенный выходной ток.

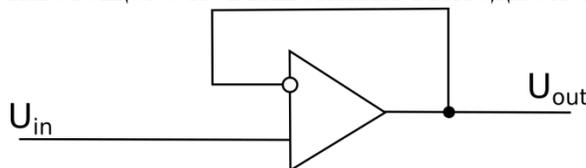


Рис. 6 Инвертирующий повторитель

Д. Дифференциальный усилитель

Обобщенный дифференциальный усилитель (ДУ), схема которого приведена на рис. 7, используется для вычисления разницы двух напряжений, каждое из которых умножено на определенную константу (задаваемую резисторами).

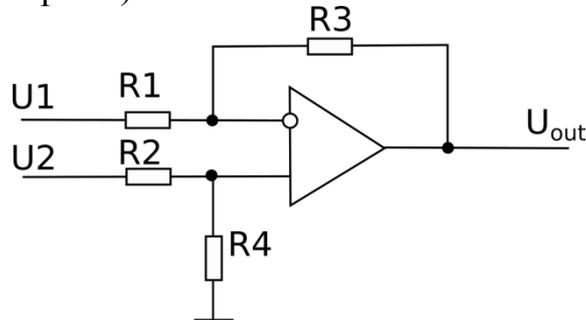


Рис. 7 Общая схема дифференциального усилителя

Выходное напряжение такого ДУ равно

$$U = \frac{(R_3 + R_1)R_4}{(R_4 + R_2)R_1}U_2 - \frac{R_3}{R_1}U_1$$

Если входные сопротивления равны ($R_1 = R_2$), а также $R_3 = R_4$, то выходное напряжение будет определяться выражением $U = \frac{R_4}{R_1}(V_2 - V_1)$.

3.2. Основные параметры усилителей

С точки зрения проведения эксперимента актуальны следующие параметры усилителя сигнала, необязательно основанного на ОУ:

Входное сопротивление – величина, равная отношению входного напряжения к входному току. Может быть представлено в виде эквивалентной нагрузки, но в реальности рассредоточено по элементам схемы. Чем больше входное сопротивление, тем меньше усилитель влияет на источник сигнала (поскольку потребляет из измеряемой цепи меньший ток). У приборов с входом по напряжению входное сопротивление относительно высокое, у токовых входов входное сопротивление относительно низкое. Для дифференциальных входов различают дифференциальное и синфазное входное сопротивление.

Входной ток – ток, протекающий через входы схемы.

Коэффициент усиления – обычно это отношение величины выходного напряжения к входному $K=U_{out}/U_{in}$. Также может быть отношением по току, мощности, входному току к выходному напряжению и наоборот (тогда указывается, какое именно коэффициент).

Выходное сопротивление – отношение выходного напряжения к выходному току в нагрузке. Чем меньше выходное сопротивление – тем больший ток схема может отдавать. В соответствии с формулой

$I=U/(R+r)$, где I – входной ток следующего каскада, r – выходное сопротивление усилителя, R – сопротивление нагрузки. Видно, что чем меньше r – тем меньше ток от него зависит.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) – зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты входного сигнала.

Скорость нарастания выходного сигнала – скорость изменения выходного напряжения при подключенной нагрузке. Напрямую связано с АЧХ, т.к. соответствует наибольшему наклону переменного сигнала (касательная в точке пересечения нуля синусоидой). Указывается для определенного диапазона изменения сигнала, например 10%–90%, или как время, необходимое для достижения уровня 63% (т.е. $1/\sqrt{2}$) от нуля.

Полоса пропускания – диапазон частот, в пределах которого амплитудно-частотная характеристика устройства достаточно равномерна для того, чтобы обеспечить передачу сигнала без существенного искажения его формы. В зависимости от требований к искажениям может иметь разные границы, и задаваться исходя из падения коэффициента усиления на определенную величину. Например, на 3 дБ (или 10%). Также быстродействие можно охарактеризовать через частотную полосу пропускания, поскольку большинство усилителей можно описать моделью конденсатора, который заряжается через сопротивление R_1 и разряжается через параллельно подключенное сопротивление R_2 . На частоте модуляции $f = (2\pi\tau)^{-1}$, где постоянная времени $\tau = CR_1R_2/(R_1+R_2)$, сигнал уменьшится до половины от исходного значения на нулевой частоте, это и будет границей полосы пропускания [6].

Вопросы для самопроверки:

- Что произойдет с выходным сигналом при подаче части положительного выходного напряжения на инвертирующий вход?
- Чем задается коэффициент усиления по напряжению операционного усилителя?
- Перечислите свойства идеального операционного усилителя.
- Из-за чего отрицательная обратная связь может стать положительной?
- Во сколько раз уменьшится сигнал через интервал, равный постоянной времени τ ?

4. ПРИЕМНИКИ СВЕТА

Тепловые приемники (болометры и пирометры) – их чувствительность практически не зависит от длины волны, они обычно применяются для целей калибровки [6]. Применяются во всех диапазонах, особенно в инфракрасной области спектра, где мало чувствительных приемников.

Фоторезисторы – их действие основано на увеличении проводимости полупроводников вследствие поглощения света – как вследствие увеличения концентрации носителей в зоне проводимости, так и увеличения подвижности носителей.

Фотодиоды могут работать в фотовольтаическом или фотопроводящем режиме. В первом они являются источником тока, во втором – они находятся при отрицательном смещении и регистрируется изменение их сопротивления под действием света.

Лавинные фотодиоды представляют собой фотодиоды с отрицательным смещением, в которых свободные носители приобретают энергию, достаточную, чтобы при столкновении с решеткой создать дополнительные носители, обеспечивающие таким образом внутреннее усиление фототока за счет лавинного умножения. При работе в непрерывном режиме удается добиться увеличения фототока до 1000 раз. При работе в импульсном режиме (или гейгеровском) коэффициент усиления достигает до 10^6 .

Фотоумножители (ФЭУ) основаны на внешнем фотоэффекте и характеризуются высочайшим собственным усилением благодаря многократному умножению электронной эмиссии на внутренних диодах. Приемный фотокатод ФЭУ покрыт материалом с малой работой выхода (соединения щелочных металлов и полупроводников). Образующиеся при освещении электроны ускоряются и умножаются на следующих электродах. Типовое усиление фототока ФЭУ составляет около 10^6 . Может работать в режиме постоянного тока или счета фотонов (крайний случай – режим одиночных импульсов).

Приемники на основе *КМОП* (комплементарный металл-оксид-полупроводник, CMOS) и *ПЗС* (прибор с зарядовой связью, CCD) используются в виде многоэлементных матричных приемников и помимо спектральной информации могут давать информацию о пространственном распределении. Отличаются от линеек фотодиодов тем, что линейки – это наборы множества отдельных сенсоров, соединенных внешней цепью, в то время как ПЗС и КМОП сенсоры выполняются в одном монолитном полупроводнике. Кроме того, эти сенсоры накапливают свет в течение периода экспозиции, до того как преобразовать его в сигнал [7].

ПЗС – двумерный массив с МОП структурой. На подложку кремния р-типа наносится тонкий слой изолятора – оксида кремния. Поверх изолятора наносится сетка металлических контактов, или затворов, которые затем снова покрываются защитным слоем оксида. Каждый контакт соответствует элементу изображения – пикселю. Современные сенсоры имеют от 4096 до 10^9 пикселей. При подаче положительного напряжения дырки отходят от затворов, создавая потенциальные ямы для электронов кремния, которые действуют для них как конденсаторы или ловушки. Под действием света в кремнии образуются электрон-дырочные пары, электроны из которых накапливаются в подзатворном пространстве. Для считывания на затворы последовательно подается положительное и нулевое напряжение, и заряд перемещается от затвора к затвору до достижения границы массива, где считывается с помощью АЦП.

Преимуществом ПЗС является способность к регистрации в широком диапазоне длин волн от мягкого рентгена до ближнего ИК (в зависимости от материала подложки). Недостатком – ограниченная емкость подзатворного пространства, при переполнении которой заряд переходит на соседние ячейки. Также отличаются медлительностью из-за необходимости сдвига заряда вдоль строки для считывания заряда. Сдвиг и считывание порождает дополнительный шум (т.н. «шум считывания»).

Ключевое отличие КМОП сенсоров от ПЗС – в них отсутствует перемещение заряда, а усиление сигнала производится внутренней цепью. Образование заряда происходит тем же способом, но каждый пиксель матрицы имеет собственный усилитель, что позволяет преобразовать заряд в напряжение на месте. Это ускоряет считывание и уменьшает шум. Очистка ячейки производится специальным транзистором. Также преимуществом КМОП является то, что они изготавливаются по технологии, идентичной производству микросхем, что уменьшает их стоимость. В то же время собственный шум матрицы больше, чем в ПЗС, доля фоточувствительной площади в них меньше, и присутствует разброс между ячейками, вызванный разбросом параметров усилителей. В общем случае при необходимости миниатюризации приемника выбирают КМОП (фотокамера телефона), при необходимости чувствительности и отсутствии требований к размерам и стоимости – ПЗС (для космического телескопа). По этой причине ПЗС матрица обычно обладает большим динамическим диапазоном (в силу большего размера ячеек). Для спектроскопии обычно применяют ПЗС-матрицы, для наблюдения объекта визуально могут применяться и КМОП.

4.1. Шумы приемников и усилителей [5]

Все детекторы создают небольшие сигналы, которые не соответствуют поглощению фотона, эти сигналы называют общим словом «шум». Шум не содержит полезной информации, поэтому важно минимизировать отношение сигнала, вызванного шумом, к общему сигналу. Чем выше соотношение сигнал/шум, тем более чувствительный детектор. Существует много видов шумов, каждый из которых имеет разную природу.

Тепловой шум (Джонсовский) – генерируется только элементами, поглощающими или рассеивающими мощность, т.е. практически только резисторами. Вызывается тепловым (броуновским) движением электронов, характеризуется плоским спектром (т.н. «белый шум»). Рассеиваемая шумовая мощность при этом

$$P_{\text{ш}}=4kTB=\langle I_{\text{ш}}^2 \rangle R=\langle U_{\text{ш}}^2 \rangle /R,$$

где k – постоянная Больцмана, T – температура, B – полоса частот в Гц, а R – сопротивление. Так, резистор сопротивлением 1 кОм при температуре 300 К и полосе частот 100 МГц представляет собой генератор шумового тока величиной 41 нА.

Тепловой шум обычно дает максимальный вклад в усиленный сигнал. Если детектор является источником токового сигнала, тепловой шум определяется наименьшим сопротивлением, шунтирующим детектор (обычно это нагрузочный резистор). Шум может уменьшен увеличением этого сопротивления ценой ухудшения быстродействия системы. Если детектор является источником напряжения, то тепловой шум можно снизить уменьшением сопротивления нагрузки ценой уменьшения напряжения выходного сигнала. Также шум может быть понижен охлаждением, но обычно это применяют к приемникам.

Фотонный шум – связан со случайным «пуассоновским» распределением времени регистрации отдельных фотонов. Задаёт теоретический предел чувствительности оптических приборов. В большинстве случаев реальный предел задается другими видами шумов.

Дробовый шум – вызван дискретностью носителей заряда, протекающего через устройство. Поскольку случайная погрешность при этих двух шумах является корнем из числа зарегистрированных фотонов или электронов, но основной способ уменьшения его вклада – увеличение времени регистрации, т.е. накопление сигнала.

Фликкер-шум (шум $1/f$, «розовый шум») – вызывается локальными временными флуктуациями сопротивления, температуры и пр. Низкочастотные изменения параметров могут быть усреднены многократным повторением измерений, при этом нельзя забывать про необходимость рандомизации, поскольку медленный температурный дрейф может быть неотличим от сигнала и выявлен только рандомизацией.

Генерационно-рекомбинационный шум – возникает в полупроводниковых приборах и вызван флуктуациями концентрации носителей, электронов и дырок, в результате статистического характера процессов генерации и рекомбинации. Задаёт теоретический предел чувствительности полупроводниковых приборов. В них он падает с ростом частоты, поэтому основным способом борьбы является уход на высокие частоты. Поскольку шум является суммой лоренцевских функций, то его спектр может использоваться для оценки времени жизни носителей зарядов в материале.

Шум считывания – присущ устройствам с ПЗС-матрицами, связан с ошибкой считывания заряда из ячейки даже при отсутствии сигнала. Выражается в числе электронов, поскольку ПЗС-устройства фактически оперируют пакетами зарядов, состоящих из электронов. Основной способ уменьшения вклада – увеличение времени накопления и многократное повторение измерения.

При регистрации оптического сигнала шумы возникают на всех этапах регистрации. Так, регистрируемый световой поток даёт фотонный пуассонов шум, фотодетектор вносит свой набор шумов (темновой ток, поверхностный ток утечки, статистические флуктуации усилителей с большим коэффициентом усиления вообще и флуктуации усиления лавин ЛФД в частности), свой вклад вносит и усилитель (шумы резисторов и полупроводников). Наибольший вклад в выходной сигнал дают шумы, воздействующие на фотодетектор, т.к. сигнал от него проходит через весь усилительный тракт и подвергается максимальному усилению.

В отсутствие падающего на фотодетектор излучения регистрируется темновой шум, состоящий в основном из тока утечки между контактов и генерацией электронно-дырочных пар.

4.2. Основные параметры приемников света [5]

Чувствительность определяется отношением фототока к падающей оптической мощности $\gamma = I/P$. Чувствительность на единицу интервала длин волн на данной длине волны называется спектральной чувствительностью (рис. 8). Чувствительность зависит от ряда условий:

- существует верхняя критическая длина волны, за которой энергия фотона становится ниже энергии запрещенной зоны полупроводника, что приводит к резкому снижению чувствительности,
- при короткой длине волны некоторые фотоны поглощаются за пределами i -области фотодиода,
- происходит снижение чувствительности вследствие промежуточной рекомбинации,

- любые отражения от поверхности или внутри фотодиода уменьшают чувствительность.

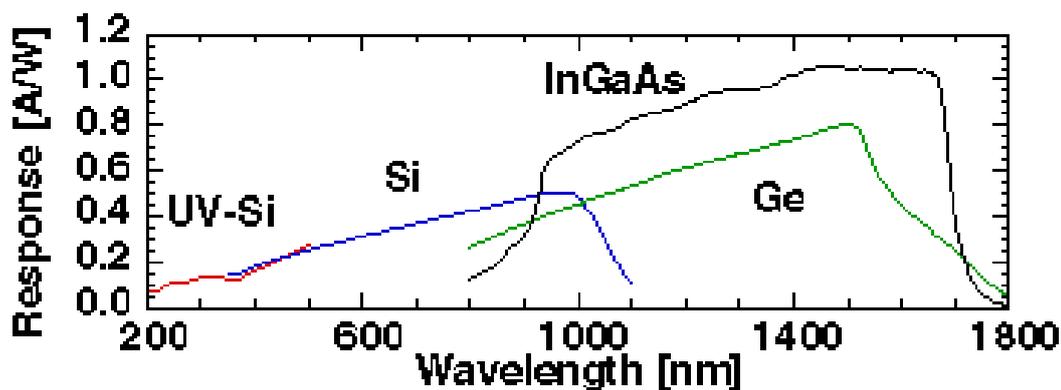


Рис. 8 Спектральная чувствительность нескольких типов фотодиодов. Чувствительность ограничена типом материала и меняется с энергией фотона. Изображение с сайта National Institute of Standards and Technology <http://www.nist.gov/> [7]

Квантовая эффективность определяет, как хорошо детектор преобразует фотоны в электрический сигнал. Обычно выражается как величина η , равная отношению числа электронов, образованных детектором, к числу упавших фотонов. Также она может соответствовать доле фотонов, которые будут преобразованы в измеряемый сигнал. Это определение учитывает влияние шума и других потерь сигнала внутри системы, и более точно измеряет эффективность детектора. Квантовая эффективность идеального детектора 100%, существует несколько типов детекторов, которые приближаются к этому пределу, позволяя обнаруживать поглощение единичных фотонов.

Динамический диапазон детектора измеряет способность генерировать удовлетворительный сигнал при разной интенсивности падающего излучения. Детектор с очень высоким динамическим диапазоном будет способен одновременно измерять как очень слабые, так и мощные источники излучения, но часто это связано с уменьшением общей чувствительности. И наоборот — сверхчувствительные детекторы часто обладают малым динамическим диапазоном. Так ФЭУ, способные обнаружить отдельные фотоны, часто могут быть повреждены при освещении излучением с мощностью, безопасной для ФЭУ, работающих в токовом режиме.

Быстродействие определяет скорость образования электрического сигнала при поглощении фотонов. Время отклика (англ. response time) это количество времени, необходимого для того, чтобы детектор был способен генерировать следующий сигнал. Чем выше быстродействие, тем более короткие флуктуации сигнала могут быть обнаружены. Идеальный детектор обладает нулевым временем отклика,

что невозможно для реальных детекторов. Некоторые детекторы, особенно массивы фотодиодов, больше ориентированные на определение пространственной информации, характеризуются временем в миллисекунды, в то время как ФЭУ и быстродействующие фотодиоды характеризуются наносекундными временами.

Из-за *пространственной неоднородности* полупроводниковой структуры чувствительность ФД может изменяться в разных точках его поверхности, а это приводит к погрешности измерения, так как в процессе измерения положение и диаметр падающего луча, как правило, не контролируются. Данный фактор особенно сказывается при измерениях на многомодовом волокне, где наблюдается существенное изменение распределения мощности в поперечном сечении волокна.

Эквивалентная мощность шума, или нормированная пороговая чувствительность $\Phi_{n,f}$ (или NEP, The Noise Equivalent Power) определяет чувствительность детектора и определяется как минимальная мощность оптического сигнала на входе, обеспечивающая единичное соотношение сигнал/шум в полосе пропускания 1 Гц (которой по теореме Котельникова соответствует половинное время интегрирования 0,5 с). Величина эквивалентна спектральной плотности шума (выражается в А/Гц^{1/2} или В/Гц^{1/2}), деленной на спектральную чувствительность (А/Вт или В/Вт):

$$\Phi_{n,f} = \frac{\Phi_n}{\sqrt{\Delta f}} = \frac{\Phi}{u_c/u_w} \cdot \frac{1}{\sqrt{\Delta f}}$$

Меньшая величина NEP означает большую чувствительность детектора. Например, детектор, характеризующийся NEP=10⁻¹² Вт/Гц^{1/2}, может обнаружить сигнал мощностью 1 пВт с соотношением с/ш равным 1 после полсекунды усреднения (т.к. ширина полосы пропускания 1 Гц эквивалентна 0,5 с времени интегрирования). Если требуемое соотношение с/ш в десять раз больше 10, то усреднять потребуется в 100 раз дольше, т.е. в течение 50 секунд [8].

Для сравнительной характеристики детекторов применяется *нормированная способность к обнаружению D*, или детектируемость (Specific Detectivity, или D*, или просто Detectivity). Эта величина обратно пропорциональна эквивалентной шумовой мощности детектора с единичной рабочей поверхностью и с шириной полосы усилителя 1 Гц:

$D^* = (A\Delta f)^{1/2}/NEP$, где A – площадь детектора, Δf – полоса частот, в которой проводится измерение. Чем выше детектируемость, тем выше производительность. С учетом шумов график сравнения чувствительности приемников выглядит немного иначе (рис. 9).

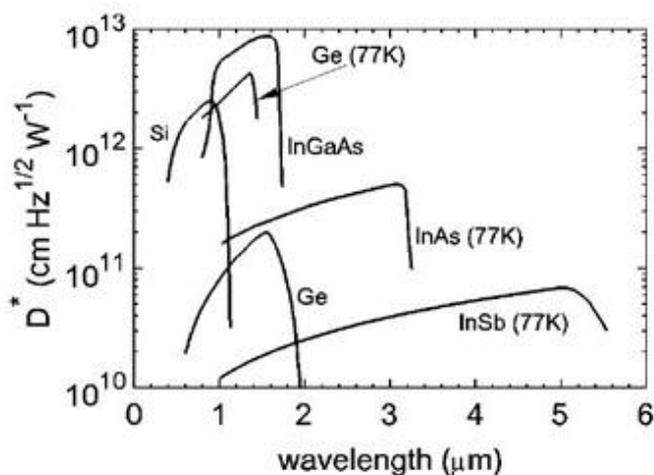


Рис. 9 Нормированная способность к обнаружению D^* для некоторых фотодетекторов. Максимально возможная величина уменьшается с ростом длины волны, поскольку в узкозонных полупроводниках темновой ток выше [7]

Вопросы для самопроверки:

- В чем преимущества ПЗС перед КМОП сенсорами для спектроскопии?
- Что ведет к падению чувствительности фотоприемника на границах полосы чувствительности?
- Какие шумы присущи полупроводниковому фотодиоду в отсутствие падающего излучения?
- Какие шумы присущи ПЗС-приемнику в процессе считывания?

5. ТЕХНИКА СПЕКТРОСКОПИИ.

5.1. Спектрометры

Анализ спектров различных видов излучения, особенно после их взаимодействия с образцом, необходим при обнаружении веществ, исследовании их свойств, а также анализе их энергетической структуры. Спектрометры – самый распространенный класс спектральных приборов. Формирует изображения $S_2(\lambda)$ входной щели S_1 , которые сдвинуты относительно друг друга в боковом направлении для разных длин волн λ . Сдвиг достигается за счет дисперсии в призме или дифракции на решетке. Спектр может регистрироваться с помощью матричного приемника, такого как ПЗС-линейки. Если же с помощью щели вырезается узкий фрагмент спектра, то такой прибор называется монохроматором. В таком случае, регистрация может быть проведена с

помощью единичного фотоприемника, например, фотодиода. В литературе по спектроскопии приборы обоих типов часто называют спектрометром [6]. Схема типичного универсального дифракционного монохроматора показана на рис. 10 [5].

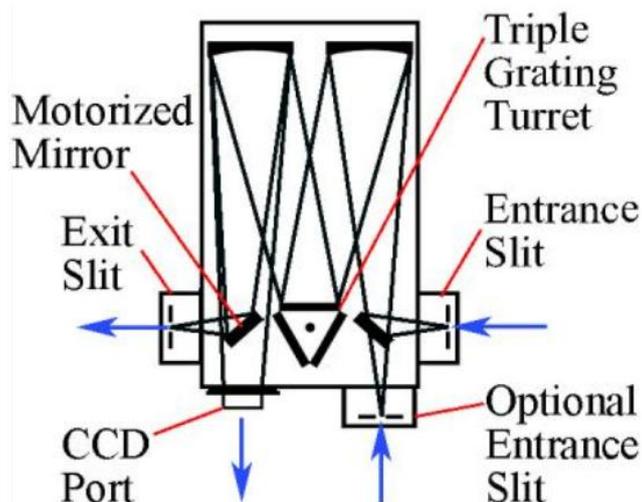


Рис. 10 Схема решетчатого спектрометра Acton SpectraPro-2558i [9]. В зависимости от положения выходного зеркала он может работать как собственно спектрометр (положение CCD Port), и как монохроматор (положение Exit Slit).

Спектрометры характеризуются:

Светосилой – отношение диаметра к фокусному расстоянию коллиматорного объектива, определяет максимальный угловой размер пучка света.

Спектральным пропусканием, ограниченным прозрачностью объективов, линз и призм, и отражательной способностью решеток и зеркал.

Спектральной разрешающей способностью, определяющей минимальный спектральный интервал, который прибор позволяет разрешить.

Рабочим спектральным диапазоном – областью длин волн, в которой длина волны λ может быть однозначно определена по её положению в спектре $x(\lambda)$.

Свет, проходящий через входную щель, попадает на зеркало, где коллимируется и направляется на дифракционную решетку, там он дифрагирует и направляется к другому зеркалу, которое его фокусирует на выходную щель. Одному определенному положению дифракционной решетки соответствует свет в узком диапазоне длин волн, который может пройти через выходную щель. Вся установка размещается в специальном корпусе, содержащем дополнительные диафрагмы и

различные экраны для того, чтобы свести к минимуму эффект рассеивания света [10].

При использовании монохроматора детектором обычно является один фотодиод или ФЭУ, размещенные после выходной щели. В некоторый момент времени на него попадает только один узкий диапазон длин волн, затем решетка поворачивается, и так сканируется определенный диапазон длин волн. Полный спектральный анализ может занять достаточно много времени, если сканирование проводится в широком спектральном диапазоне и особенно с высоким разрешением, т.к. при узких щелях на фотодетектор попадает мало света, и сканирование приходится проводить медленно. Получение спектра проходит быстрее на спектрометре, в котором используется детектор, который может детектировать все компоненты длин волн одновременно. Таким детектором может быть ПЗС-матрица. Существуют еще фурье-спектрометры, в которых приемником также может быть один фотодиод или ФЭУ, но спектр регистрируется сразу во всем диапазоне с последующей математической обработкой.

В общем случае ищется компромисс между требуемым разрешением и светосилой, соответственно выбирается ширина входной и выходной щелей. Их делают равными, поскольку большая входная щель размывает регистрируемый спектр, а большая выходная ухудшает спектральное разрешение без увеличения светосилы.

В ряде случаев, когда не требуется высокое спектральное разрешение и универсальность, могут применяться компактные монохроматоры, где дифракционная решетка исполняет роль фокусирующего элемента. Схема такого прибора приведена на рис. 11.

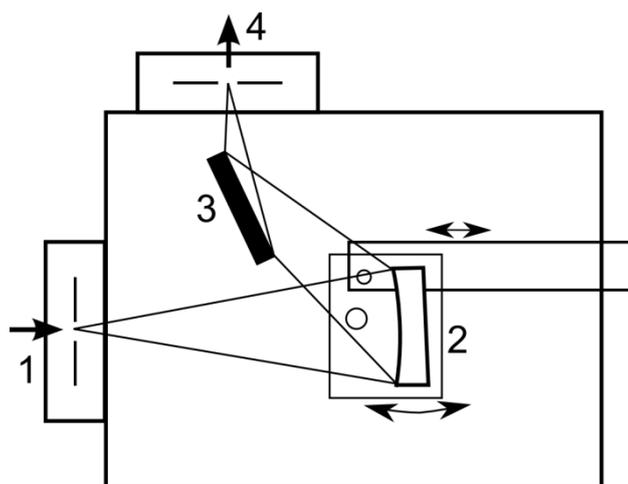


Рис. 11 Схема компактного ИК монохроматора. 1 – входная щель, 2 – вогнутая дифракционная решетка, 3 – зеркало, 4 – выходная щель [5].

Современные приборы предусматривают возможность управления через порты USB, RS-232 или GRIB, которое может быть организовано как альтернатива штатным программам управления. Почти все современные приборы поддерживаются библиотеками графического языка программирования LabVIEW, также оборудование обычно поддерживается библиотеками языка С и некоторых других.

5.2. Дифракционные решетки

Дифракционная решетка состоит из периодической системы штрихов, нанесенных на равном расстоянии. Основные параметры решеток:

Период решетки, обратный плотности штрихов (Groove density, штрихов на мм) определяет дисперсионные свойства решетки и влияет на диапазон механического сканирования (полностью диапазон определяется параметрами конкретной модели монохроматора). Большая плотность дает большую дисперсию и лучшее спектральное разрешение. Поэтому при работе в различных областях спектра используются решетки с различным числом штрихов: для УФ области 3600–1200 штр/мм, для видимой области 1200–600 штр/мм и для ИК области менее 300 штр/мм.

Длина волны блеска (Blaze wavelength) определяет, при каком угле совпадает дифракционный максимум, вызванный интерференцией от разных штрихов, с максимум отражения, вызванным углом нарезки штрихов. Говорит о том, что решетка оптимизирована для максимально эффективного отражения на указанной длине волны в определенном порядке отражения.

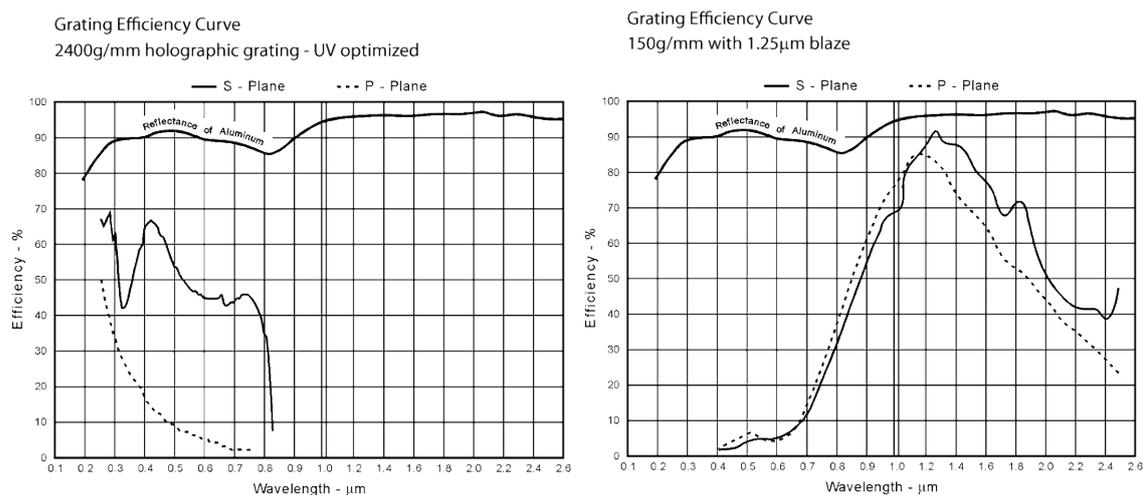


Рис. 12 Отражательная способность двух решеток монохроматоров Acton [11]. Длина волны блеска решетки справа – 1,25 мкм.

Эффективный диапазон (Quantum wavelength range) указывает область длин волн, в котором эффективность отражения максимальна, в

общем случае определяется длиной волны блеска, и если он не указан – то шагом решетки. На рис. 12 приведены примеры отражательной способности решеток в зависимости от длины волны, поляризации излучения и шага решетки. Там же для сравнения приведена отражательная способность алюминия.

При работе с дифракционными решетками следует учитывать излучение высших порядков дифракции (рис. 13). Когда параллельный пучок монохроматического излучения падает на решетку, свет дифрагирует в направлениях, соответствующих разным значениям m уравнения решетки. При освещении решетки полихроматическим светом зеркально, в нулевом порядке, отражается излучение всех длин волн, в остальных порядках каждая длина волны отражается в соответствии с уравнением решетки. В высших порядках дифракции спектры накладываются друг на друга, смешивая цвета. Возбуждающее излучение в высших порядках блокируют светофильтром. Блокировать полезный сигнал можно только двойным монохроматором. Также двойной монохроматор помогает кардинально снизить рассеянное излучение, что существенно при работе с большими щелями. В обычном случае остаточное рассеянное излучение находится в пределах десятых долей процента, поэтому применение второго монохроматора снижает это количество до миллионной доли.

Для уменьшения рассеянного излучения нужно ограничивать апертуру входного излучения, чтобы оно не выходило за границы решетки (это справедливо и для других оптических элементов), тем более что на краях решетки нарушается правило дифракции (краевой эффект). При наличии на поверхности решетки дефектов их иногда заклеивают черной бумагой (или делают маску), чтобы исключить их из работы.

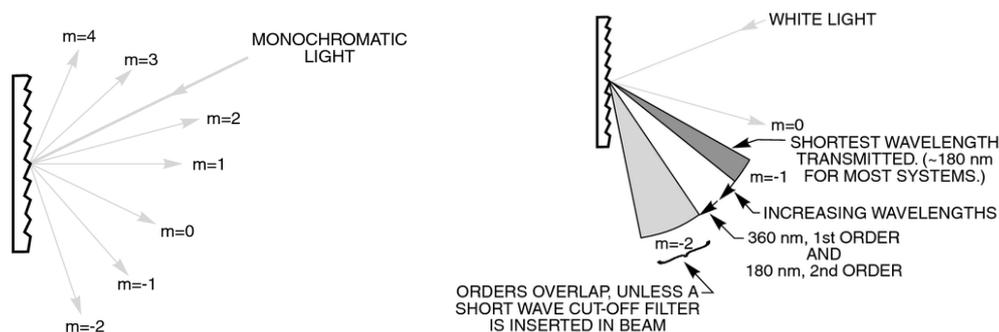


Рис. 13 Схема образования высших порядков дифракции для монохроматического излучения и белого света [12].

5.3. Калибровка по спектру АЧТ [5]

Приемники излучения характеризуются спектральной чувствительностью, а оптические элементы схемы характеризуются спектральным пропусканием. Совокупность этих спектральных характеристик затрудняет количественную и качественную оценку параметров исследуемых веществ, делает невозможным сравнение данных, полученных на разных длинах волн. Для учета изменений, вносимых элементами схемы, проводится калибровка спектральной чувствительности прибора целиком, результатом чего является получение спектральной чувствительности прибора целиком, или его передаточной функции. В ряде современных приборов спектральная характеристика определяется на этапе изготовления, как в измерителях мощности монохроматического излучения. Может уточняться в процессе работы – например в виде автоматической записи базовой линии и спектра встроенного источника излучения. Такая процедура проще реализуется в приборах, измеряющих спектральную оптическую плотность, реализованных по двухканальной схеме. В других случаях, особенно при измерении люминесценции или рамановского рассеяния, пользователям бывает нужно самим устанавливать спектральную чувствительность прибора.

Передаточная функция $T(\lambda)$ включает в себя как спектральные зависимости коэффициентов пропускания (или отражения) всех оптических элементов, находящихся в канале сбора люминесценции, элементов монохроматора, а также спектральную чувствительность приемника излучения. Определив эту функцию, мы сможем получить истинный спектр люминесценции $J(\lambda)$ как отношение:

$$J(\lambda) = U(\lambda) / T(\lambda),$$

где $U(\lambda)$ – спектр люминесценции, полученный при измерении.

Поскольку передаточная функция прибора целиком обычно неизвестна, то её вид необходимо определять с помощью специального эксперимента, т.е. калибровкой. Для калибровки используется излучение эталонных нагретых тел, спектр которых совпадает со спектром излучения абсолютно черного тела (АЧТ) с известной цветовой температурой. Тогда передаточная функция будет найдена как отношение зарегистрированного спектра к спектру идеального АЧТ, поскольку спектр АЧТ известен из формулы Планка

$$u(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}.$$

Для ослабления светового потока в видимой области традиционно используются нейтральные светофильтры, например, стекла НС, и фотометрические сетки. Заметим, что в УФ и ИК области пропускание

стеклол перестает быть равномерным, изменяется также пропускание фотометрических сеток, хотя и не столь существенно.

Очевидно, что условия калибровочного эксперимента должны быть идентичны рабочему эксперименту, т.е. в оптическом тракте установки должны присутствовать те же элементы и один и тот же детектор, геометрия установки также должна быть, по возможности, одинаковой в обоих экспериментах (это касается и ширины входной и выходной щелей). Также считается, что коэффициент усиления электрических схем не зависит от амплитуды сигнала и точно не зависит от длины волны излучения, поэтому его не учитывают. Это связано с тем, что, обычно, в опыте редко стремятся получить абсолютные величины энергетических параметров излучения, а калибровка требуется только для восстановления формы сигнала. Однако на эти моменты следует обращать внимание при проведении серии измерений, когда задачей является сравнение параметров ряда образцов.

Калибровка не способна компенсировать все искажения, вносимые элементами схемы, поэтому большое значение уделяется уменьшению зависимости параметров прибора от длины волны излучения. Это может быть широкополосный источник излучения с постоянным спектром, такой как ксеноновая лампа, правильно подобранные оптические элементы, приемник подходящего диапазона и т.д.

5.4. Калибровка по длинам волн [5]

Калибровка по длинам волн гораздо более редкая задача, и может требоваться обычно только для проверки настроек при возникновении подозрений о нарушениях в работе. При такой калибровке на узкую входную щель монохроматора подается излучение источника, содержащего эмиссионные спектральные линии. Поскольку положение линий заранее известно, становится возможным связать положение поворота решетки с длиной волны. Для этого используют излучение газовых лазеров и газоразрядных ламп – ртутных или специальных, наполненных смесью, дающей спектральные линии в требуемом диапазоне излучения. Применять для калибровки полупроводниковые лазеры не следует из-за того, что длина волны таких источников находится в некотором диапазоне, определяемом структурой гетероперехода, а не задается фиксированным переходом между уровнями в атоме.

Существуют специальные газоразрядные источники излучения для калибровки длины волны спектрометра в диапазоне $\sim 200\text{--}2000$ нм. Основные типы таких источников – ртутно-аргоновый (HG-1), криптоновый (KR-1), неоновый (NE-1), аргоновый (AR-1) и ксеноновый (XE-1). При необходимости можно воспользоваться некоторыми бытовыми, промышленными или естественными источниками

излучения, содержащими известные спектральные линии – ртутные лампы освещения внутреннего освещения, натриевые лампы уличного освещения, и даже световой фон неба.

Самым доступным источником для калибровки в видимом диапазоне, ввиду распространенности таких ламп для освещения, пока еще является ртутная лампа (хотя во всем мире ртутные источники, как и другие изделия, содержащие ртуть, постепенно вытесняются из обращения). Основное излучение паров ртути приходится на УФ диапазон, на линию 253,7 нм, но в видимом диапазоне также есть достаточно сильных линий, а отдельные линии наблюдаются и в ближнем ИК диапазоне.

В случаях, когда требуется меньшая точность, достаточно использовать гармоники твердотельных лазеров, например Nd:YAG (1064, 532 и 355 нм).

Вопросы для самопроверки:

- От чего зависит спектральное пропускание прибора?
- Какой общий принцип выбора ширины щелей монохроматора?
- В каких спектральных приборах в один момент времени регистрируется только узкий фрагмент спектра
- Зависит ли спектральная характеристика решетки от направления поляризации падающего излучения?
- Что наблюдается в высших порядках дифракции при освещении решетки белым цветом? Монохроматическим излучением?
- Какие источники излучения годятся для калибровки по длинам волн?

6. ПОМЕХИ

Основные виды шумов перечислены в разделе приемников и усилителей. Как правило, они носят неустранимый характер, их необходимо учитывать и компенсировать, если не удастся выбрать более подходящий прибор.

Помехи в виде мешающего сигнала, источником которого являются наводки сетей и посторонние электрические сигналы, приходящие по линиям питания или заземления, а также оптические, тепловые и акустические (в т.ч. вибрация) обычно имеют большее значение, чем рассмотренные выше внутренние шумы. В то же время они, в отличие от теплового шума, могут быть уменьшены за счет правильного размещения приборов, заземления и экранирования [13].

6.1. Способы уменьшения помех

1. Исключение помех.

При размещении измерительного оборудования следует избегать соседства с источниками электромагнитных помех, как то: теле- и радиостанции (ВЧ помехи), электрифицированные линии ж.д. (импульсные помехи), высоковольтные линии (радиопомехи), электромоторы (помехи и всплески в сети питания), сварочные аппараты (помехи всех типов), трансформаторы (магнитные наводки), неэкранированные линии передачи данных.

2. Защита входов/выходов и линий питания

С шумами, идущими по сетевым линиям питания, достаточно успешно справляются сетевые фильтры. Внутри приборов на линии питания уже постоянного тока обычно ставят парами два шунтирующих конденсатора – керамический и танталовый (первый обладает достаточной емкостью, второй – высоким быстродействием). Что касается входов и выходов, то провода с сигналами низкого уровня должны быть все экранированы, как и сам корпус.

3. Радиочастотные помехи

Части схем могут работать как резонансные контуры, поэтому, помимо общего экранирования, все провода лучше делать как можно короче и избегать образования петель.

4. Заземление

Ток, протекая по линиям заземления, может создавать падение напряжения между точками, воспринимаемое в другой части схемы как сигнал. Поэтому иногда организуют «Мекку заземления», соединяя все линии заземления в одной точке. В общем случае надо следить, где протекают большие токи и смотреть, чтобы вызываемые ими падения напряжений не влияли на вход. Иногда разумно отделить источник питания от части схемы с низким уровнем небольшой RC-цепью.

5. Межприборное заземление

Если сигналы имеют амплитуду несколько вольт, то достаточно пользоваться коаксиальными кабелями, и заземлить приборы. Для малых сигналов это может оказаться недостаточно. В этом случае можно использовать схемы с дифференциальной передачей сигнала (например с использованием специальных микросхем, устойчивых к большим синфазным помехам), при больших расстояниях применять экранированную витую пару. Против радиочастотных помех применяют ферритовые кольца.

6. Модуляция и цифровое кодирование сигнала.

Действенным способом уменьшения подверженности помехам является модуляция аналогового сигнала, о чем говорится ниже, или преобразование его в цифровую форму. Цифровые сигналы передаются, как правило, в формате транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ), в котором значение входного сигнала лежат в диапазоне от 0 до 0,8 вольт для низкого логического уровня, и от 2 до 5 вольт для высокого логического уровня. Такой зазор между уровнями, составляющий более вольта, обеспечивает достаточный уровень устойчивости в сравнении с аналоговыми сигналами, особенно при кодировании сигнала на наличие ошибок.

6.2. Борьба с помехами схемными решениями

Основные схемные решения, позволяющие устранить или уменьшить влияние ряда помех, рассмотрим на примере спектрофотометра – прибора, измеряющего пропускание как функцию длины волны.

Простейшей схемой реализации спектрофотометра является измерение на постоянном токе, подходящее для измерения постоянных сигналов большой мощности. Такая схема включает в себя источник излучения, монохроматор, образец, и детектор, подключенный к усилителю с компенсацией уровня нуля [14] (рис. 14).

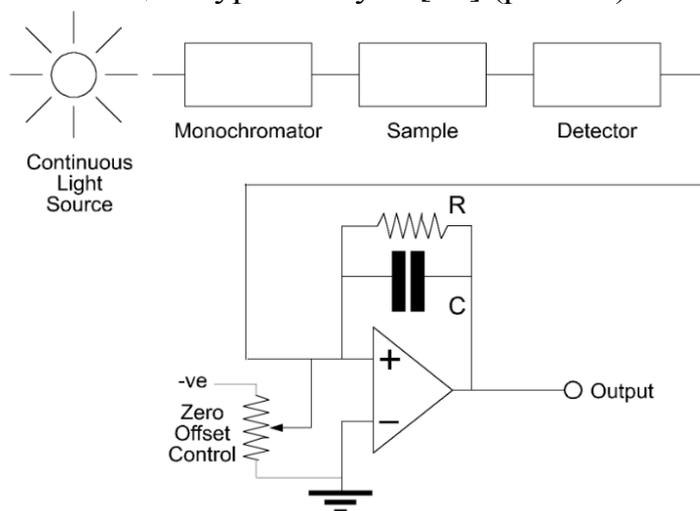


Рис. 14 Схема регистрации на постоянном токе [14]

Схема имеет очень узкий спектр применений, т.к. годится только для сильного постоянного сигнала в отсутствие помех (хотя результаты гораздо точнее, чем при использовании фотодиода в связке с мультиметром). В такой схеме точно не установить уровень нуля из-за его дрейфа, и не отделить сигнал от постороннего светового потока, попадающего на фотоприемник.

Вследствие того, что интенсивность источника излучения изменяется не только по длинам волн, но и медленно во времени (равно как и уровень нуля приемника), широко применяют измерение т.н. «базовой линии», когда предварительно записывают сигнал в отсутствие образца и вычитают эти данные из эксперимента, воспринимая как нулевой уровень сигнала.

Более продвинутой является схема с модуляцией сигнала и демодуляцией на опорной частоте (рис. 15). Источником излучения являются импульсные лазер или лампа, а также же модулированные источники. Поскольку низкочастотные помехи, такие как фоновая засветка, а также часть внутрисхемных помех, таких как температурный дрейф, остаются в области НЧ, то они не проходят через фильтр и отсутствуют в выходном сигнале. Такая схема имеет существенно лучший уровень детектирования слабых оптических сигналов.

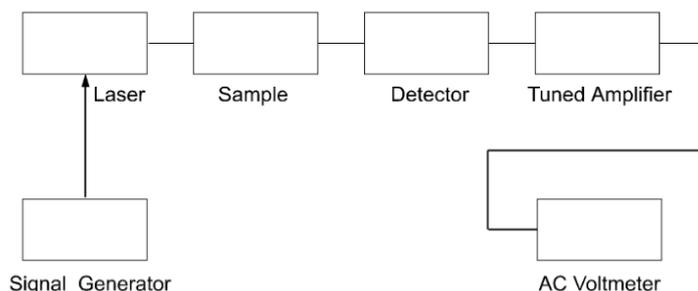


Рис. 15. Схема регистрации по схеме модулятора-демодулятора [14]

Основным ограничением такой схемы является точность настройки демодулятора, а также предел фильтрации, задаваемый добротностью выходного фильтра. Так, при добротности фильтра 10 и частоте модуляции 1кГц полоса пропускания составит 100 Гц, соответственно фильтр пропустит и весь шум в этой полосе. Величина добротности фильтра и частота модуляции сигнала довольно сильно ограничены и обычно не превышают десятков единиц для фильтра и десятков килоггерц для модуляции в силу схемных причин.

Кроме того, демодулированный сигнал относительно зашумлен, что затрудняет его преобразование стандартными фильтрами, рассчитанными на низкошумный сигнал. [14]

Меньше подвержена влиянию флуктуации интенсивности источника излучения во времени двухлучевая схема, в которой луч разделяется на два одинаковых пучка и проходит через измерительную и компенсационную ветвь, при этом сравниваются интенсивности прошедших сигналов. В измерительной ветви пучок проходит через кювету с образцом, а в компенсационной – через пустую кювету. Затем пучки направляются на отдельные фотоприемники, сигналы с которых поступают на дифференциальный усилитель. Схема может быть организована и на одном приемнике излучения, тогда пучки

модулируются прерывателем оптического сигнала в противофазе, а сигнал после регистрации приемником демодулируется.

6.3. Синхронное детектирование

Следующим шагом по улучшению чувствительности является схема синхронного детектирования, позволяющая измерять постоянный сигнал. В отличие от вышеприведенной схемы детектирования на частоте, СД позволяет получить гораздо более узкую полосу выходного фильтра. К схеме добавляется прерыватель, или чоппер (диск с прорезями, число которых, умноженное на частоту вращения диска, задаёт частоту детектирования), и блок, осуществляющий синхронное детектирование сигнала.

Само по себе синхронное детектирование не меняет соотношение сигнал/шум, но позволяет перенести сигнал в другую частотную область, где его можно отфильтровать от помех. Поэтому метод можно применять, даже когда уровень помех превышает измеряемый сигнал.

Синхронный усилитель использует метод фазо-чувствительного детектирования на частоте опорного сигнала. Шумовые компоненты сигнала на других частотах отфильтровываются выходным фильтром низких частот (НЧ).

В основе метода лежит перемножение гармонических сигналов. Если опорный сигнал является синусоидальным: $U_{ref} = A_{ref} \cdot \sin(\omega_{ref}t + \varphi_{ref})$, а входной сигнал записать в виде $U_{sig} = A_{sig} \cdot \sin(\omega_{sig}t + \varphi_{sig})$, то в результате перемножения на выходе имеются два сигнала – на суммарной $(\omega_{sig} + \omega_{ref})$ и разностных $(\omega_{sig} - \omega_{ref})$ частотах. Если частоты совпадают, что будет если модулировать сигнал синхронно с опорным, то получается сигнал на двойной частоте и сигнал постоянного тока с амплитудой $U_{out} = \frac{1}{2} A_{ref} A_{sig} \cos(\varphi_{sig} - \varphi_{ref})$.

Если отфильтровать сигнал на двойной частоте, то останется сигнал постоянного тока. Как видно из выражения, амплитуда сигнала пропорциональна амплитуде входного сигнала и косинусу смещения по фазе относительно опорного сигнала. Т.е. в этом случае синхронный детектор работает подобно амплитудному детектору.

При наличии на входе шумов в широком частотном диапазоне фазовый детектор и фильтр НЧ погасят их вдали от опорной частоты. Но большое влияние могут оказать шумовые компоненты вблизи опорной частоты, т.к. они приведут к низкочастотным колебаниям выходного сигнала. Степень подавления этих колебаний зависит от постоянной времени фильтра НЧ и крутизны границы пропускания его передаточной характеристики. Чем больше постоянная времени, тем уже полоса пропускания фильтра НЧ и тем лучше подавляются шумовые

компоненты. Только сигнал на частоте опорного генератора свободно проходит через синхронный детектор [15].

Частично простейшая схема использования СД напоминает измерение на частоте модуляции, поскольку вращающийся диск с прорезями (чоппер) преобразует сигнал к переменному (рис. 16). Но, дополнительно к этому, чоппер обеспечивает опорный сигнал, поступающий на опорный вход СД. В такой схеме объект может быть полностью засвечен посторонними источниками, и это не мешает провести измерение. Основное требование – посторонние сигналы не должны проходить через чоппер [14].

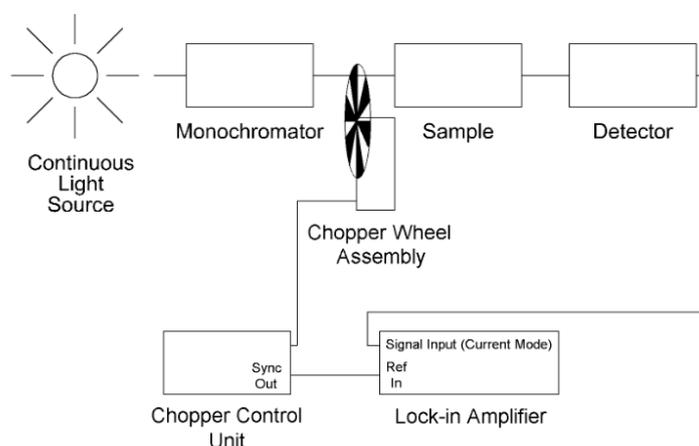


Рис. 16 Простейшая схема использования синхронного детектора и механического прерывателя (чоппера) [14]

Эта схема обеспечивает большой прогресс в сравнении с рассмотренными выше однолучевыми. Но помимо посторонних помех есть еще и другие. Во-первых, источник излучения меняет интенсивность во времени, во-вторых, спектральные элементы, такие как решетка, обладают разной отражательной эффективностью на разных длинах волн. Такие изменения данная схема учесть не может, и они оказываются на выходе вместе с полезным сигналом.

Влияние таких помех можно учесть введением двухлучевой схемы измерения и добавлением схемы, делящей детектированный сигнал на опорный и полезный (рис. 17). Заметим, что в этой схеме по-прежнему недопустимо попадание посторонней засветки через чоппер. Также схема не защищена от неидентичности двух фотоприемников.

Схемой, предусматривающей и это влияние, является двухлучевая схема с использованием двух СД и модуляцией обоих сигналов одним чоппером, но на разной частоте (с помощью прорезей, расположенных на разном уровне), приведенная на рис. 18. Такая схема существенно дороже из-за применения двух синхронных детекторов, которые вносят основной вклад в стоимость. В то же время следует понимать, что максимальная защита по такой схеме не предотвращает влияние самих

блоков синхронного детектирования (например, температурного дрейфа или электрических помех), поэтому принципы репликации и рандомизации также должны иметь тут место. Кроме того, возвращаясь к теме планирования эксперимента, нужно понимать требуемую точность и стоимость. В этом случае это выбор между простыми недорогими схемами и сложными с двумя детекторами.

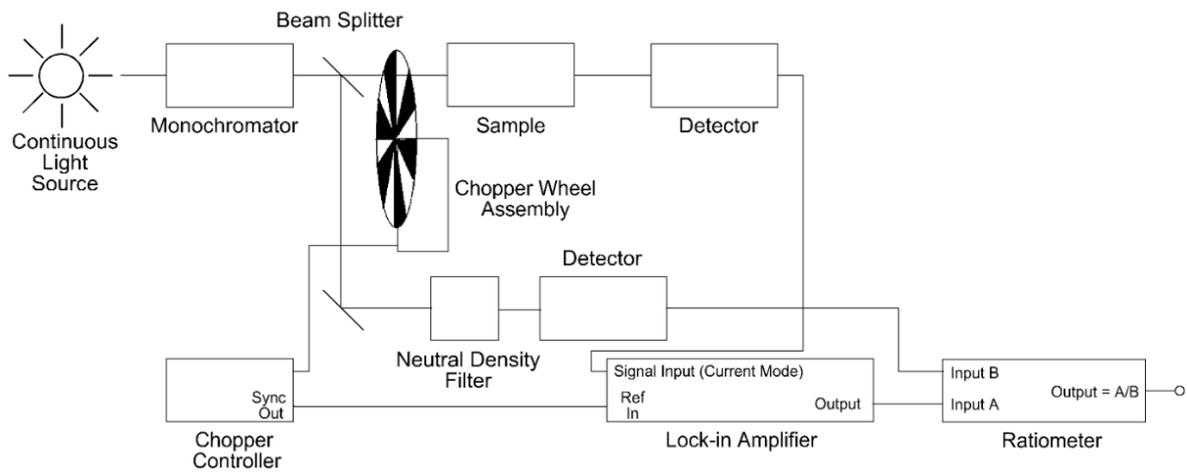


Рис. 17 Двухлучевая схема синхронного детектирования переменного сигнала с использованием одного модуля синхронного детектора, чоппера, и компенсацией изменений мощности источника [14].

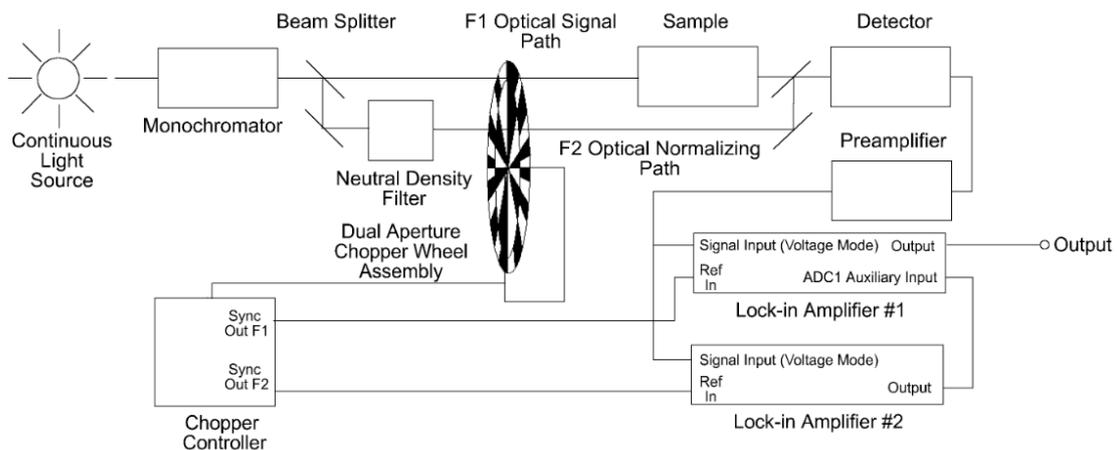


Рис. 18 Двухлучевая схема измерения на основе двух синхронных детекторов, двухлучевого механического прерывателя, и компенсацией изменений мощности источника [14].

Счет фотонов

При очень малой мощности падающего излучения часто выгодно использовать фотоэлектронные умножители (ФЭУ) или лавинные фотодиоды (ЛФД) в режиме счета импульсов, рожденных отдельными фотонами, а не измерять фототок, усредняющий сигнал за некоторый период. Образующиеся импульсы поступают на дискриминатор, не

пропускающий импульсы недостаточной амплитуды, и далее могут регистрироваться в форме цифровых импульсов цифровыми схемами.

Исторически первыми приемниками для счета отдельных фотонов являются ФЭУ. Традиционно ФЭУ предназначались для работы в видимом диапазоне, где они имеют низкий темновой уровень счета. Спектральная чувствительность и рабочий спектральный диапазон ФЭУ зависит от материала катода. В ультрафиолетовом диапазоне – еще и от материала стекла. Квантовая эффективность в видимом диапазоне в среднем составляет несколько процентов, а у лучших экземпляров достигает десятков процентов. В последнее десятилетие диапазон применения ФЭУ расширился в ИК диапазон до 1,7 мкм. Из-за повышенных шумов там требуется дополнительное охлаждение, а квантовая эффективность примерно на порядок ниже. ФЭУ могут работать как в токовом, так и в импульсном (гейгеровском) режиме.

Вторым детектором являются лавинные фотодиоды. В них лавина образуется за счет того, что электронно-дырочная пара, рожденная при поглощении света, из-за соударений при разгоне полем напряжения смещения начинает образовывать новые пары. При работе в импульсном режиме напряжение на ЛФД поддерживается чуть выше пробойного, а для предотвращения разрушения ЛФД лавины, сразу после регистрации, гасятся специальными схемами. Поэтому ЛФД характеризуются большой длительностью т.н. «dead time» – периода релаксации, в течение которого приемник не восприимчив к сигналу или отключен.

Изначально метод счета фотонов применялся в ядерной физике, отчего большое количество оборудования для счета фотонов рассчитано на работу с цифровыми импульсами отрицательной полярности в формате NIM (или Nuclear Instrumentation Module standard, низкий и высокий уровни логического сигнала составляют 0/–0,8 В), в то время как почти вся современная цифровая техника рассчитана стандарт TTL (Transistor-transistor logic, уровнями нуля менее 0,8 В и уровня 1 более 2В). Причина появления стандарта NIM связана с тем, что импульс ФЭУ всегда отрицательной полярности. Кроме того, уже с 1960-х годов максимальным быстродействием, превышающим сотни мегагерц, обладали микросхемы с эмиттерно-связанной логикой и близкими уровнями сигнала –0,8/–1,6 В. Поэтому часто возникает необходимость в применении преобразователей уровней.

Техника счета фотонов имеет следующие преимущества:

1. Некоторые фотоприемники настолько чувствительны, что они позволяют обнаружить одиночные фотоны. Это позволяет анализировать корреляцию квантов между разными детекторами, например в квантовой оптике.
2. Флуктуации коэффициента усиления ФЭУ или ЛФД не так существенны, т.к. каждая лавина индуцирует одинаковый

нормализованный импульс на выходе дискриминатора, пока анодный импульс превышает порог дискриминатора.

3. Темновой поток импульсов, сгенерированный тепловыми электронами из динодов ФЭУ, может быть подавлен корректной установкой дискриминатора.
4. Чрезмерно большие импульсы, образующиеся вследствие β -распада в материале или вызванные космическими лучами, также можно дискриминировать.
5. Цифровая форма сигнала упрощает анализ данных с помощью компьютера и отличается помехоустойчивостью.

Детекторы счета фотонов имеют характерные свойства, которые несколько отличаются от других фотодетекторов. Наиболее важными из них являются следующие:

- Минимальный уровень регистрируемого светового сигнала определяется «темновым» счетом. Из-за нагрева детектора происходит увеличение «темнового» счета, эта проблема устраняется охлаждением катода. В какой-то степени, этому также способствует уменьшение активной области.

- Максимальная скорость счета определяется скоростью детектора или соответствующей электроники. При превышении скорости счета импульсы, следующие сразу за зарегистрированным, могут не учитываться. Это ведет к искажению временного распределения импульсов.

- Квантовая эффективность – это доля поглощенных фотонов, которые могут быть зарегистрированы.

- Для ФЭУ есть также некоторое фиксированное время задержки между временем поглощением фотона и выходом электрического импульса.

- Для ЛФД более актуально т.н. «dead time», в течение которого ЛФД не способен принимать следующий сигнал. Оно требуется для перезапуска фотодиода и рассасывания заряда, образовавшегося при лавине, и составляет десятки нано или даже микросекунд.

Вопросы для самопроверки:

- С какой целью применяют цифровое кодирование сигнала в усилителях?
- Какая наиболее универсальная схема подключения частей схем или нескольких приборов к заземлению с точки зрения уменьшения наводок?
- Какими методами можно установить уровень нуля измерительной системы?
- С какой целью используют двухлучевую схему измерения?

- Какие преимущества обеспечивает синхронное детектирование?
- Что образуется при перемножении двух гармонических сигналов равной частоты?
- Какие логические уровни сигнала TTL?
- Какие экспериментальные способы уменьшения влияния шумов существуют?

7. РЕГИСТРАЦИЯ ВРЕМЕН ЗАТУХАНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Знание времен жизни люминесценции дает информацию о физических процессах в возбужденном состоянии, позволяет оценить скорости переноса энергии фотовозбуждения, частоту столкновений с молекулами тушителей, детально исследовать взаимодействие люминофора с его окружением.

Главным параметром кинетики люминесценции является время затухания люминесценции, которое представляет собой средний промежуток времени, в течение которого атом или молекула находятся в возбужденном состоянии. Затухание свечения единственного люминофора можно описать экспоненциальным законом вида:

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-t/\tau},$$

где I_0 – интенсивность люминесценции в начальный момент времени $t=0$, τ – время затухания. Зачастую кривую затухания люминесценции нельзя представить в виде одноэкспоненциальной зависимости, однако можно представить в виде суммы экспонент, каждой со своим временем затухания τ_i и предэкспоненциальным множителем α_i . Многоэкспоненциальный закон затухания люминесценции может свидетельствовать о множестве физических явлений: различном окружении для отдельных люминофоров одного типа; присутствии смеси различных люминофоров; наличии процессов, происходящих в возбужденном состоянии. При этом каждый процесс характеризуется своей экспонентой. При этом надо учитывать, что не всегда подобранные значения τ_i и α_i точно характеризуют определенные спектральные свойства исследуемой системы и вообще имеют физический смысл.

Измерение времен затухания люминесценции возможно с применением модулированного непрерывного источника излучения (метод фазового сдвига, а также вариации метода синхронного детектирования). Но гораздо проще ситуация, когда образец возбуждается световым импульсом, длительность заднего фронта которого много короче среднего времени жизни возбужденного состояния. Последующие кривые распада

регистрируются по уменьшению люминесценции, которую можно либо непосредственно наблюдать на экране осциллографа либо регистрировать с помощью иного метода, выбор которого зависит от характерного времени затухания [6].

Осциллографический метод применим для анализа относительно больших времен (с временным разрешением не менее нескольких нс). При недостаточном уровне сигнала возможно применение накопление с последующим усреднением [16], а также переход к счету одиночных фотонов.

Самые короткие оптические времена регистрируются с помощью электронно-оптических *стрик-камер*, принцип действия которых немного схож с кинескопом – анализируемый световой импульс с помощью фотокатода преобразуется в поток электронов, которые ускоряются и отклоняются в поле электромагнитной развертки, образуя на приемном экране пространственную картину распределения во времени (рис. 19). Такие стрик-камеры позволяют разворачивать импульсы длительностью от 100 фс. Времена менее фемтосекунды позволяют развернуть стрик-камеры, в которых отклонение электронов осуществляется с помощью оптического излучения (требуемая частота развертки находится уже в оптическом диапазоне).

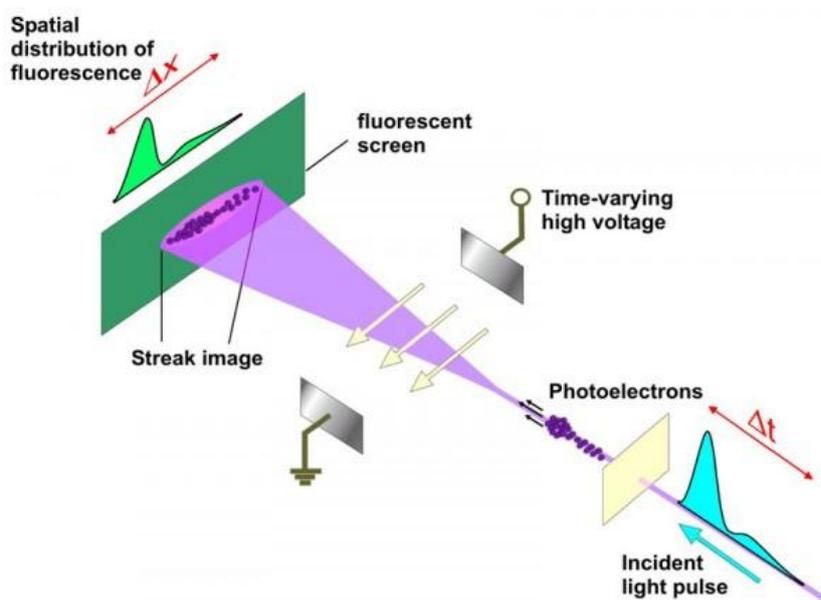


Рис. 19 Схема классической стрик-камеры [17]

7.1. Регистрация времен затухания люминесценции в режиме счета фотонов

Тремя основными режимами счета фотонов являются *гейтированный* (gated photon counting, *GPC*), *многоканальный* (multichannel scaling, *MCS*) и *время-коррелированный* (time correlated single photon counting, *TCSPC*) режимы (рис. 20).

При гейтированном счете счетчик включается на определенный временной интервал (гейт), в течение которого производится подсчет всех импульсов, амплитуда которых больше определенного уровня (Threshold). Повторение измерения с разной величиной задержки позволяет получить временную форму сигнала. Время прихода отдельных импульсов не регистрируется, а подсчитывает их количество внутри интервала. Поэтому основное применение метода – это выделение части фотонов из общего количества излученных. Например, отделение фотонов люминесценции от рассеяния, либо фосфоресценции от флуоресценции.

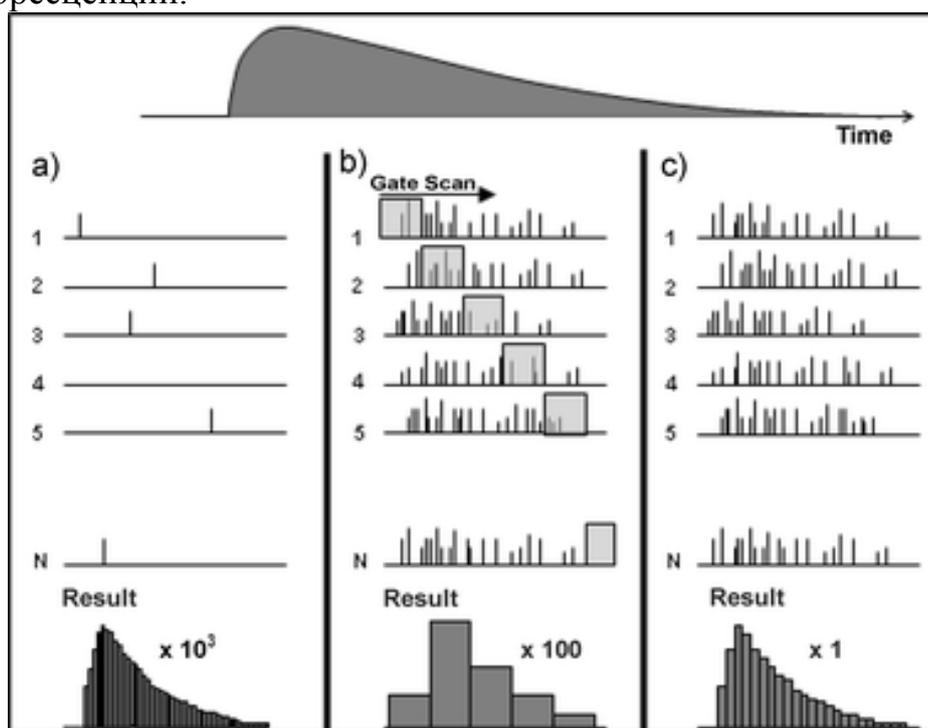


Рис. 20 Сравнение режимов счета фотонов. Слева направо – время-коррелированный счет (TCSPC), гейтированный (GPC) и многоканальный счет (MCS). N – количество измерений. Каждая строчка соответствует отдельному импульсу возбуждения. Полная форма сигналам может быть восстановлена, теоретически, в единичном MCS эксперименте. В TCSPC один отсчет получается в результате, в среднем, 100 экспериментов. Высота гистограммы (и интенсивность сигнала) может быть на порядки ниже полученной при сопоставимом числе измерений методом MCS. Это самый медленный способ получения гистограммы, но с самым высоким разрешением. В GPC методе положение окна должно меняться для построения временного профиля. Результирующая амплитуда, поэтому, будет в 10-1000 раз меньше [18].

Многоканальный счет можно представить как счет с помощью множества гейтированных счетчиков, при котором детектируемые фотоны подсчитываются по времени прибытия в разных ячейках памяти. Временное распределение в таком случае может быть получено сразу.

При время-коррелированном счете подсчитывается только один фотон, зарегистрированный детектором после импульса возбуждения. Такой способ обеспечивает наиболее точное измерение времени среди этих методов, до нескольких пс. Но для получения полной формы сигнала нужно многократное повторение эксперимента.

Первоначально, из-за низкой скорости переключения цифровых управляющих элементов и усилителей, временные интервалы меньше нескольких нс при гейтированном и многоканальном счете не использовались, эта величина ограничивала временное разрешение метода. В настоящее время обычно используют один сбрасываемый счетчик, быстрое действие позволяет работать с разрешением в сотни пс, а время-коррелированный и многоканальный счет реализуется одной и той же схемой на цифровых элементах.

7.2. Время-коррелированный счет

Рассмотрим метод время-коррелированного счета подробнее. Измерение пикосекундных времен – нетривиальная задача. При TCSPC отсчет времени ведется при помощи блока преобразования «время-амплитуда» ТАС (time-amplitude convertor) либо прямого цифрового счета TDC (time-digital convertor). Принцип преобразования напряжения во время ТАС прост – при зарядке постоянным током напряжение U на обкладках конденсатора, подключенного к выходу ОУ, до наступления насыщения будет пропорционально времени зарядки t : $U=a \times t$. Зафиксированное в момент прихода импульса напряжение записывается и преобразуется во время с помощью АЦП (ADC, аналого-цифровое преобразование). Многократное повторение измерения позволяет построить распределение импульсов во времени (рис. 21). Этот метод позволяет измерять времена с точностью до десятков пикосекунд.

При регистрации применяют два варианта счета – прямой и обратный. При первом блок ТАС включается одновременно с импульсом возбуждения, при регистрации фотона рост напряжения прекращается, а его значение измеряется и преобразуется в значение времени. При обратном счете ТАС включается только при регистрации фотона, а рост напряжения прекращается при следующем импульсе возбуждения. Прямой счет не требует стабильности частоты возбуждающих импульсов и проще для понимания. Однако до недавнего времени основным способом являлся обратный счет, т.к. такое включение ТАС не вносит помех в период ожидания импульса, а также

не требует запуска схемы регистрации с полной частотой возбуждения (на что старые схемы были не способны). Проблема стабильности частоты при обратном счете часто преодолевается задержкой импульса синхронизации на период времени, превышающий период измерения, что позволяет считать время не до следующего импульса, а до его же, но сдвинутого во времени. Для этого используется длинный кабель, например.

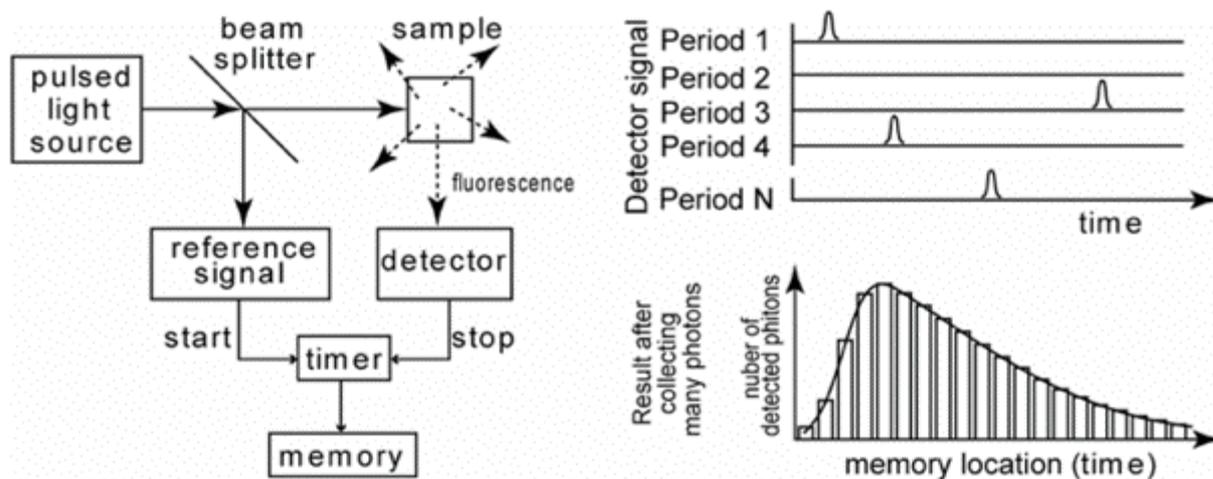


Рис. 21 Схема построения гистограммы распределения импульсов при время-коррелированном счете. Время регистрации каждого импульса сохраняется в память, и гистограмма распределения представляет зависимость интенсивности люминесценции от времени [19]

Способ TDC предусматривает измерение с помощью быстродействующей цифровой линии задержки, где известно время задержки сигнала на каждом элементе цепи, и организации с их помощью циклического счета. Такой способ также позволяет считать более одного фотона за период, и вести прямой, а не обратный отсчет.

Для корректной работы время-коррелированного метода в один период возбуждения не должно приходиться более одного импульса от фотонов, поскольку следующий импульс зарегистрирован не будет. Даже если интенсивность излучения не меняется от периода в период, то даже в этом случае число импульсов в каждом периоде является случайным и описывается законом Пуассона. Так, если интенсивность излучения соответствует одному импульсу в секунду, то один фотоотсчет на период будет получен только в 37% случаях, ноль – тоже в 37%, 2 – в 18% и т.д. [20] Поэтому вероятностью появления второго импульса можно пренебречь, только если на 20-100 периодов будет регистрироваться менее одного импульса. По этой причине метод плохо

подходит для измерения времен более 100 нс, т.к. приводит к очень большим временам накопления. Поэтому для больших времен применяют мультискалярный счет, либо реализуют время-коррелированный счет внутри последовательных коротких интервалов, как при гейтированном, с последующим «сшиванием».

7.3. Дискриминаторы CFD

В устройствах, обеспечивающих счет фотонов, широко используются дискриминаторы не по абсолютному уровню сигнала, а по его доле относительно максимума, или CFD (Constant-Fraction Discriminator). Дискриминация по абсолютному уровню вносит большую погрешность в значение времени прихода сигнала, если импульсы имеют одинаковую форму, но разную амплитуду, что обычно бывает при регистрации импульсов ФЭУ или ЛФД (рис. 22).

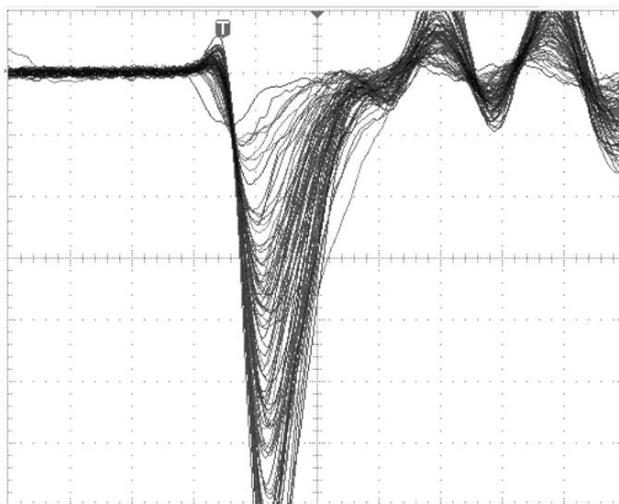


Рис. 22 Однофотонные импульсы ФЭУ на экране осциллографа. Полоса пропускания 500 МГц, временной масштаб 2 нс, чувствительность 20 мВ [21]

В дискриминаторах CFD входной сигнал разделяется на два, один из которых задерживается и инвертируется. После суммирования сигналов образуется двухполярный импульс, для которого точка пересечения нулевой линии остается постоянной, независимо от амплитуды импульса (рис. 23).

Это позволяет регистрировать импульсы разной амплитуды в положении одного и того же процентного отношения от максимума. Второй задачей CFD является дискриминация импульсов малой амплитуды – шумовых либо слабых, время прихода которых точно определить затруднительно. Поэтому задаются два уровня дискриминации: уровень пересечения нуля CFD Zero Cross Level и уровень срабатывания триггера CFD Threshold.

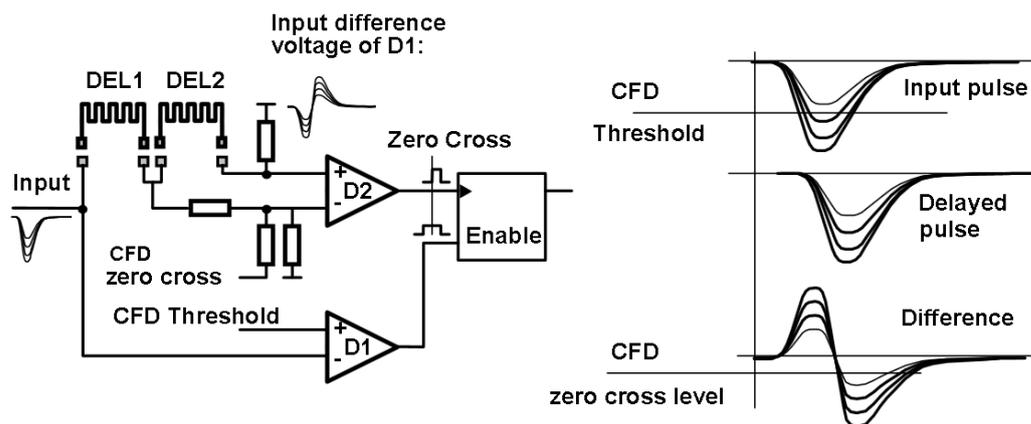


Рис. 23 Принцип работы CFD. D1 и D2 – дискриминаторы. D1 выбирает импульсы, амплитуда которых превышает заданный пороговый уровень CFD Threshold. D2 измеряет разность между входным импульсом и им же, но инвертированным и задержанным. Положение нулевой точки пересечения не зависит от амплитуды импульса. Таким образом CFD генерирует выходной сигнал при пересечении нуля дифференциальным напряжением, если входной сигнал удовлетворяет значению CFD Threshold. [22]

7.4. Настройка системы счета фотонов [21]

Помимо общих рекомендаций по борьбе с электромагнитными помехами, при время-коррелированном счете также необходимо придерживаться дополнительных рекомендаций.

При настройке системы первым делом регистрируется собственная передаточная функция прибора (Instrumental Response Function) IRF [21]. Без её получения сложно говорить о том, настроен прибор в целом или нет, поскольку демонстрирует предел временного разрешения системы, точность настройки каналов, и возможность регистрации в выбранном диапазоне времен.

1. При регистрации IRF ошибки чаще всего возникают при использовании в качестве образцов рассеивающих растворов или кювет большого диаметра. Так, использование обычной 10 мм кюветы может добавить 100 пс к измеряемому значению. Прохождение луча через оптическую систему, особенно содержащую сильно отражающие поверхности (такие как интерференционные фильтры) может привести к появлению вторичных пиков. Присутствие в оптической схеме монохроматора может внести существенную зависимость от длины волны. Поэтому наиболее надежный способ измерения – это поместить достаточный набор нейтральных светофильтров перед приемником и напрямую осветить лазером. После этого можно принять решение о

возможности использования оптической системы или источника излучения, поскольку они могут не устраивать временной дисперсией или низким временным разрешением, и о предварительной величине временных параметров счета (диапазон, смещение).

2. Следует избегать импульсов малой амплитуды, т.к. их временная стабильность (timing jitter) хуже, а подверженность влиянию электрическим помехам – выше. По этой причине при регистрации времени появления импульсов, имеющих разброс по амплитуде (что бывает при работе с ФЭУ), иногда имеет смысл повысить уровень дискриминатора, потеряв основную часть импульсов, но улучшив временное разрешение.

При работе с каналом регистрации сигнала и входом CFD [21]:

1. Полоса пропускания дискриминатора CFD входа зависит от амплитуды входного сигнала. Длина кабелей сказывается на форме распространяющихся сигналов. Это приводит к необходимости настройки уровней после изменения конфигурации подключения. Что важно, сигнал не должен быть завышен, а форма искажена.

2. Необходимо избегать неоправданно низкого уровня порога CFD из-за взаимного влияния между входами детектора и опорного сигнала. Низкое усиление детектора вместе с низким уровнем дискриминации может привести к появлению множества импульсов малой амплитуды, подверженных такому влиянию.

3. Счетчики фотонов имеют повышенную вероятность зарегистрировать темновой импульс в течение первых сотен наносекунд после детектирования фотона (Afterpulsing). Источник такого шума в ФЭУ – ионизация остаточного газа, в ЛФД – носители, захваченные по время предыдущей лавины. При экспериментах на высокой скорости счета такие «послеимпульсы» накапливаются в течение нескольких периодов возбуждения и образуют зависящий от скорости счета фон. Признак этого явления – темновой фон, превышающий обычный уровень в несколько раз. Обычно пропадает при уменьшении усиления.

4. В общем случае попытка уменьшить темновой счет путем уменьшения усиления или увеличением порога CFD не ведет к улучшению ситуации, поскольку темновые импульсы имеют такое же амплитудное распределение, и исключаются только электрические шумы. Это даже может дать видимое увеличение темнового счета, а также медленное повышение уровня примерно через 10 нс после импульса. Причиной этого являются «послеимпульсы». Более того, средняя амплитуда «послеимпульсов» выше амплитуды световых импульсов, и они не вызывают релаксации ФЭУ – «dead time» – и могут появляться внутри них. Поэтому чрезмерно большой уровень порога

CFD приведет к подавлению световых импульсов и росту доли «послеимпульсов».

5. Также слишком высокий уровень порога CFD может привести к тому, что регистрироваться будут только многофотонные импульсы, и форма регистрируемого импульса полностью исказиться, а IRF может достичь очень малой длительности, не имеющей отношения к рабочим параметрам системы (хотя это явление часто используют в лазерных дальномерах).

6. CFD уровень нуля минимизирует временную нестабильность регистрации импульса. Теоретически лучшее значение этого уровня – нулевое. Но на практике это значение имеет смещение несколько мВ. При малом уровне дискриминатор может срабатывать от ложного сигнала от канала синхронизации или от осцилляций в цепи. Противоположная ситуация – слишком высокий уровень нуля CFD в комбинации с низким уровнем триггера CFD приведет к отсутствию импульсов на выходе.

7. Изменение нулевого уровня CFD влияет на временное положение импульса в пределах долей нс, поскольку фронт разностного сигнала имеет наклон.

7.5. Оптимизация параметров синхронизации

Вход SYNC

Как правило, значение параметра SYNC оказывает мало влияния на временное разрешение, поскольку амплитуда сигнала синхронизации стабильна. Тем не менее, если сигнал синхронизации имеет отражения, звон или «послеимпульсы», то возможно возникновение ложного срабатывания. Обычно это возникает при плохом контакте в разъеме или несогласованности нагрузки.

Настройка длины пути импульсов SYNC и SIGNAL

Положение интервала регистрации импульсов внутри измеряемого периода зависит от длины кабелей, оптического пути и приборных задержек, и не всегда оптимально. Рассмотрим основные пути коррекции.

Увеличение длины SYNC кабеля сдвигает кривую сигнала влево на шкале времени, увеличение длины SIGNAL кабеля и оптического пути измеряемого сигнала – вправо. Сдвиг величиной 1 нс примерно равен 30 см оптического пути или 20 см длины кабеля.

Поскольку длительность периода измерения меньше периода сигнала, временная кривая может быть сдвинута также параметром “TAC Offset”. Однако надо избегать попадания измеряемого сигнала за пределы границ периода работы блока TAC, поскольку это приведет к искажению сигнала, т.к. вне этих границ счет не ведется, а в начале работы блок ведет себя нелинейно.

В режиме обратного TCSPC счета значение имеет положение опорного импульса, останавливающего счет. Его задержка от начала регистрируемого импульса должна составлять сумму временной задержки приемника, ширины регистрируемого интервала, и несколько нс, необходимых для запуска блока ТАС. В ином случае часть импульса окажется вне зоны счета, или в счет попадут импульсы из соседнего периода. Наиболее подходящим способом в такой ситуации является введение задержки импульса SYNC с помощью кабеля.

Паразитная связь сигналов

Часто возникает паразитная связь опорного и сигнального кабелей, а также SIGNAL и SYNC цепями. Не следует пренебрегать экранированием детектора и лазера, т.к. проникновение помехи от лазера – наиболее частый источник помех. Следует пространственно разделять сигнальный и опорный кабели, избегать большой амплитуды импульсов SIGNAL и малой SYNC, и наоборот.

Dead Time

Dead time – это время, в течении которого система «слепа» после регистрации очередного фотона. Эта величина не только ограничивает скорость счета, но также вносит искажения в форму сигнала и ошибки в измерения интенсивности. Следует избегать ситуации, когда в интервал Dead time попадает следующий фотон, поскольку он не будет зарегистрирован, что исказит распределение фотонов по времени.

Потери в счете

Поскольку время прихода фотона имеет вероятностную природу, часть из них теряется в любом случае. Но при настройке системы часто имеет смысл выяснить, теряются они из-за случаев, вызванных Dead Time, или по другим причинам? Для этого существует формула вычисления эффективности счета E :

$$E = \frac{r}{r_0} = \frac{1}{1 + r_0 t_d},$$

где r_0 – частота входных импульсов, t_d – dead time, r – регистрируемая частота импульсов. Из-за этого при уровне выше 10% от скорости счета приемника эффективность заметно нелинейна. При временных измерениях TCSPC эти потери не искажают результат, но приводят к «насыщению» при измерении интенсивности или спектров. Максимальная полезная скорость счета считается 50% от максимальной.

7.6. Pile-Up эффект

Классический Pile-Up эффект заключается в том, что в течение одного периода регистрируется только один фотон, следовательно второй игнорируется. Это приводит к искажению распределения (т.е. формы регистрируемого сигнала). Явление наблюдается на скорости счета выше нескольких процентов от максимальной, и, если на один

импульс возбуждения приходят сотни и тысячи фотонов, то длительность искаженного зарегистрированного импульса может оказаться даже меньше временного разрешения детектора. Pile-Up эффект сильнее всего проявляется в измерениях с килogerцовой частотой следования импульсов возбуждения высокой мощности.

Межимпульсный Pile-Up эффект проявляется в экспериментах на высокой частоте. После периода dead time система включается на прием посреди очередного импульса, следовательно, фотоны в первую часть периода импульса не регистрируются. Будучи усредненным по большому числу измерений, результат проявляется как ступенька в распределении, искажая форму сигнала

Способы предотвращения Pile-Up эффекта

1. Измерения на низкой частоте.

Основная проблема – классический Pile-Up эффект. Общий рецепт – снижение интенсивности сигнала. Предпринимались попытки учитывать либо исключать из счета фотон, если в тот же период приходил второй, либо учитывать и второй фотон. В первом случае так исключается много полезных фотонов, т.к. второй импульс часто вызывается отражениями, звоном в цепи и пр. Если сигнал люминесценции короткий, менее нескольких нс, то два фотона все равно не различить, и они пройдут как один. Если длительность люминесценции больше, то можно, в принципе, подсчитывать переходы через порог дискриминатора CFD.

Второй метод стал возможен с переходом на цифровые схемы регистрации TDC (time-to-digital conversion), однако также столкнулся с pile-up. Одним из выходов является многодетекторная регистрация, т.к. в таком случае вероятность многофотонного события в одном детекторе уменьшается. Также можно использовать несколько каналов счета.

2. Измерения на высокой частоте

Присутствуют оба типа эффекта pile-up. Они зависят от соотношения скорости счета к частоте следования импульсов, или, что точнее, частоте стоп-сигнала блока ТАС. Потери в счете зависят от отношения dead time и частоты стоп-сигнала. Следовательно, все вышеперечисленное минимизируется поддержанием высокой эффективной частоты стоп-сигнала блока ТАС. Следует избегать длинных интервалов старт-стоп, выбирая правильную задержку. Иногда можно пренебречь полным затуханием люминесценции и выбрать меньший период следования импульсов, поскольку скорректировать неполное затухание проще, чем pile-up эффект.

7.7. Настройка оптической системы

Обычно оптическая система собирает менее 10% излучения образца, и наибольший потенциал в увеличении сигнала находится именно тут, а не в самом приемнике. Хорошая оптическая система не только увеличивает эффективность детектирования, но и уменьшает типичные ошибки, вызванные искажением сигнала при отражении, временной дисперсией, нестабильностью или зависимостью IRF от длины волны, или проникновением возбуждающего или дневного излучения.

Вопросы для самопроверки:

- Что такое dead-time применительно к однофотонному ФЭУ, однофотонному лавинному фотодиоду?
- К чему ведет превышение максимальной скорости счета импульсов в режиме счета фотонов?
- В чем задачи дискриминатора?
- Каким законом описывается затухание свечения единичного флуорофора?
- Во сколько раз скорость следования регистрируемых фотонов при время-коррелированном счете возбуждения должна быть меньше скорости следования импульсов возбуждения?
- Каким законом описывается распределение фотонов люминесценции во времени?
- Какое отличие дискриминаторов CDF от обычных пороговых дискриминаторов?
- Какой длине электрического кабеля равен сдвиг величиной 1 нс?
- К чему приводит классический Pile-Up эффект?
- Как растет вклад случайных шумов при многократном измерении N раз?

8. АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Большинство современных научных приборов предусматривает возможность управления через стандартные интерфейсы, а также создание специальных управляющих программ. Как правило, все приборы, допускающие внешнее управление либо совместную работу с другими приборами, поставляются с комплектом документации и программного обеспечения для разработчика – SDK (Software Development Kit). В него входит описание функций и типов данных, библиотеки функций и примеры простейших программ.

В зависимости от объема задачи, навыков программирования, наличия ПО (среды программирования, библиотек компонентов), программной поддержке производителя, создание управляющей программы может быть оптимально на разных уровнях программирования – от языков низкого уровня до визуальных сред программирования.

Для примера, вначале рассмотрим состав SDK, предлагаемого компанией Princeton Instruments для линейки монохроматоров Acton. SDK предоставляется с комплектом документации при поставке оборудования. Все функции работы с монохроматорами включены в библиотечный файл ARC_SpectraPro.dll. В описании сказано, что функции разбиты на несколько основных групп:

1. Communications: обмен информации с подключенными устройствами..
2. Information: получение информации о монохроматоре (модель, серийный номер, фокальная длина и пр.)
3. Wavelength: установка и считывание длины волны (в нм).
4. Grating: выбор дифракционной решетки и получение информации о текущей.
5. Diverter Mirrors: управление зеркалами, переключающими выходы.
6. Slits: контроль моторизированных щелей.
7. Filters: контроль встроенного моторизированного набора фильтров.
8. Advanced Functions: дополнительные функции для установки решеток и отладки прибора.
9. Functions for the controlling External Filter Wheel Controllers: контроль внешнего моторизированного набора фильтров.

Там же сказано, что работа с прибором должна проводиться по следующему алгоритму:

1. Получение номеров подключенных приборов вызовом функции ARC_Search_For_Mono.
2. Подключение нужного прибора с помощью функции ARC_Open_Mono.
3. Вызов пользователем необходимых функций. Все это время порт монохроматора должен быть подключен.

4. По окончании работы требуется вызвать функцию `ARC_Close_Mono`, чтобы закрыть порт.

Также в SDK приводятся простейшие примеры на трех языках – Delphi, Visual Basic и Visual C++ – с исходными, заголовочными и уже скомпилированными исполняемыми файлами.

Воспользовавшись указанным SDK, а также документацией по счетчику фотонов SR400, была разработана программа, обеспечивающая автоматизацию работы счетчика фотонов, регистрирующего импульсы с ФЭУ, установленного на монохроматор Acton 2550i. Задача довольно проста – спектрометр должен перестариваться на нужную длину волны, счетчик считать импульсы заданного уровня дискриминации, после чего необходимо наблюдать записанный спектр. Внешний вид программы и алгоритм работы приведены на рис. 24-25.

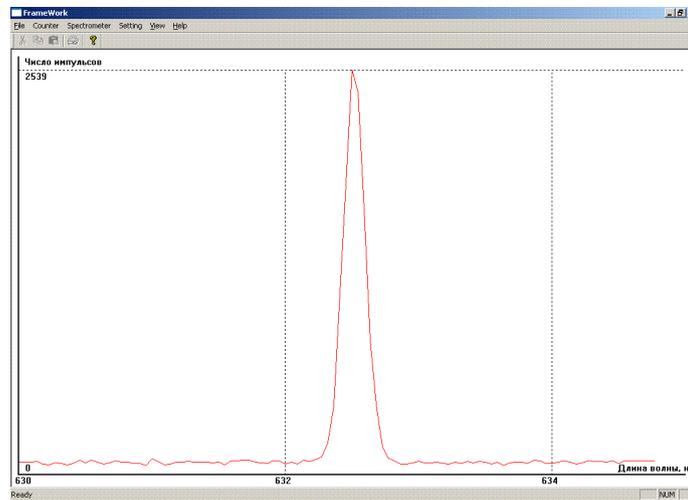


Рис. 24 Скриншот программы управления

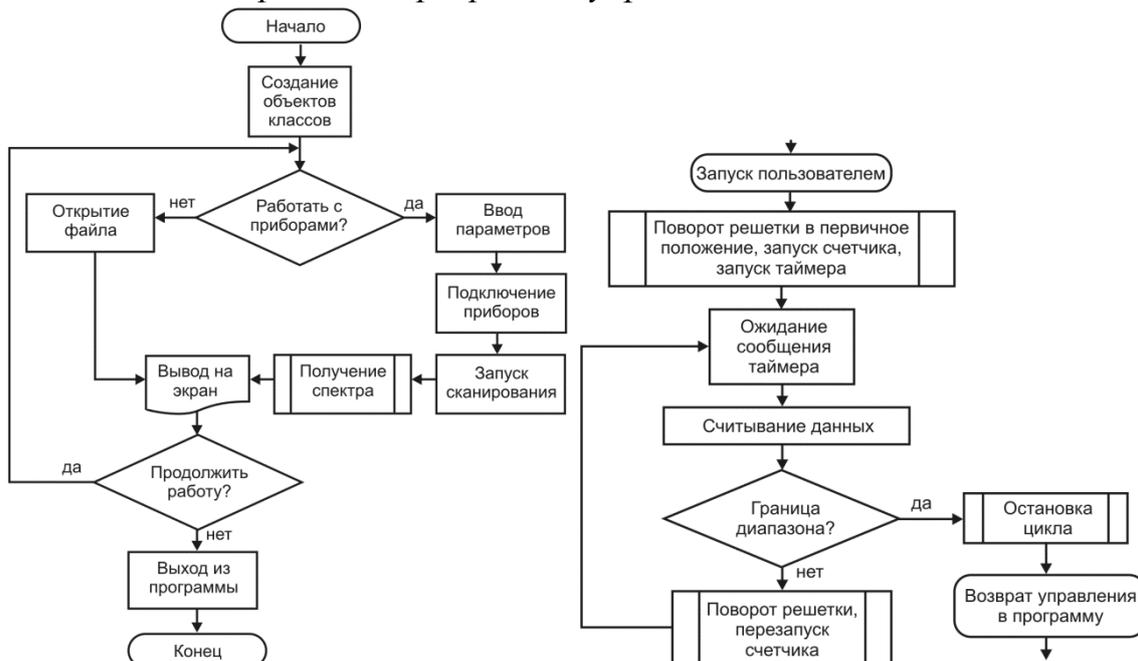


Рис. 25 Алгоритмы программы управления

Полный список команд монохроматора и счетчика фотонов приведен в руководствах по программированию данных приборов – [ARC SpectraPro_dll.pdf](#) и [SR400m.pdf](#).

Теперь рассмотрим пример SDK для PC-осциллографа PicoScope 3206A. Для осциллографов этой серии выпускается SDK в виде архива PS3000sadbk. Помимо заголовочных и библиотечных файлов *.h и *.dll, там также содержится набор примеров на разных языках: LabVIEW, MATLAB, для программы Microsoft Excel, и консольное приложение на C. Перечислять группы функций не будем, их описание приводится в файле руководства по программированию [23].

При многократной выборке сигнала вклад случайных шумов и помех уменьшается как \sqrt{N} , где N – число выборок (разумеется, существуют и другие помехи, которые могут не позволить увеличить соотношение с/ш до уровня, достаточного для обнаружения сигнала). Накопление кривых затухания люминесценции и последующее усреднения мы реализовали на базе этого осциллографа. Для этого на основе демонстрационного файла из SDK создана программа в среде программирования Visual C++. Программа предназначена для работы в консольном режиме, который упрощает процесс создания и тестирования программы. Это, а также то что она создана на чистом C, существенно повышает быстродействие (рис. 26).

```
c:\Documents and Settings\Nanospectrometr\Мои документы\Programming\PicoScope_averager\p...
Picoscope averager for PS3000A. Version 1.5.
Opening the device...
Handle: 16384
Device opened successfully
Reading setting from pigo_setting.dat.
perTimeShift=100, nBufferSize=1024, nTriggerLevel=-20, bEdgeSelect=3,
nWaveForms=25000, timeBase=1, channelRange=2, channelDCcoupled=1,
switchChannelA=1, switchChannelB=0.
Driver Version: 1.0.0.162
USB Version: 2.0
Hardware Version: 1
Variant Info: 3206A
Serial: AT645/198

Readings will be scaled in (mV)
Channel A Voltage Range = 500mV
Channel B Voltage Range = 500mV
Timebase = 1, SampleInterval: 4ns, Trigger = -20 mV.

S - Single sample, no average          U - Set voltages
A - Average of 25000 samples           T - Set timebase
M - Average of Nx25000 samples        V - ADC counts/mV
D - Diff. average Nx12500 samples     X - Exit
Operation:
```

Рис. 26 Рабочее окно программы накопления сигнала осциллографа PicoScope 3206A, созданной на базе примера-приложения работы с осциллографами PicoScope. Консольный режим, чистый C.

Программирование требует следующих обязательных разделов:

- инициализация (подключение устройства, загрузка параметров по умолчанию),
- выбор режима работы, задание параметров для измерения,
- сбор данных,
- передача данных в компьютер, сохранение их на диск,
- отключение оборудования.

Непосредственно для автоматизации эксперимента компанией National Instruments разработан язык LabVIEW, позволяющий создать программу управления на уровне подключения блоков. Ввиду популярности языка, большое число приборов поставляется с библиотеками для него, равно как и наоборот – среда программирования уже снабжена библиотеками большинства приборов.

LabVIEW – это среда графического программирования для быстрого создания комплексных приложений в задачах измерения, тестирования, управления, автоматизации научного эксперимента и образования. Под концепцией графического программирования подразумевается в первую очередь последовательное соединение функциональных блоков на блок-диаграмме. В LabView есть два представления программы – в виде схемы компонентов с установленными связями, а также в виде приборной панели с размещенными компонентами. Добавление элемента на панель добавляет его и в схему. Применение такой среды упрощает создание программы, но при работе компьютере невысокой производительности может сказываться на быстроте действия.

В среде программирования LabVIEW была создана программа накопления сигнала для осциллографа Tektronix TDS 2022B, это хороший пример, показывающий процесс создания программы на языке LabVIEW. На рисунках 27 и 28 приведены примеры двух представлений для программы к осциллографу.

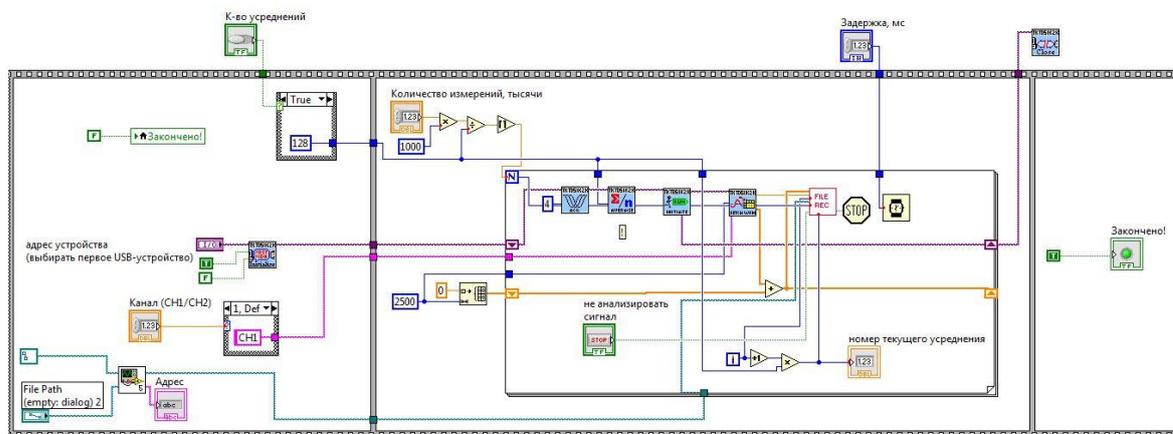


Рис. 27 Схема компонентов программы управления для осциллографа Tektronix в среде установки связей между блоками

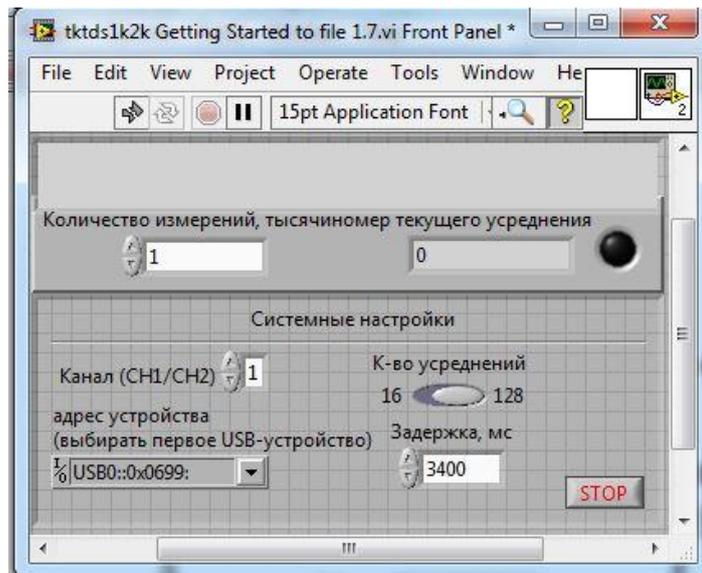


Рис. 28 Размещение элементов приборной панели программы управления для осциллографа Tektronix

Вопросы для самопроверки:

- На языках какого уровня возможно создание программ для автоматизации эксперимента?
- В чем должна заключаться процедура инициализации прибора?
- Что такое SDK?
- Какие, на ваш взгляд, могут быть недостатки у программирования в среде LabView?

9. ИНТЕРПОЛЯЦИЯ, АППРОКСИМАЦИЯ И ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ

Хотя в отличие от теоретической физики, которая исследует математические модели природы, экспериментальная физика призвана исследовать саму природу, но конечной целью эксперимента, по большому счету, является поиск математических моделей, описывающих экспериментальные результаты. Мы ограничимся поиском функциональной зависимости при обработке экспериментальных данных.

Как правило, задачи, возникающие при обработке экспериментальных данных – это широкий класс некорректно поставленных обратных задач определения интересующих нас количественных характеристик явления по результатам их косвенных проявлений, т.е. требуется определить некоторые количественные характеристики z модели изучаемого объекта, тогда как физический эксперимент позволяет получить с какой-то точностью лишь “выходные результаты” эксперимента u : $u = A(z)$ – связывающее их операторное уравнение [24].

При отсутствии предварительных сведений о характере функциональной зависимости решение о выборе обычно принимается исходя из наименьшего расхождения с экспериментом и требуемой точности совпадения. При наличии сведений о такой зависимости гораздо разумнее подбирать параметры именно для такой зависимости, даже если принципиально иная зависимость обеспечивает большую точность, поскольку коэффициенты иной зависимости могут заведомо не иметь физического смысла и не помогут в интерпретации данных.

9.1. Интерполяция

Интерполяция (от слова *inter*, т.е. «через») это замена данных функцией, проходящей через определенные точки.

При интерполяции для представления информации о функции $f(x)$ используется таблица значений этой функции в точках:

$$\begin{array}{cccc} x_0 & x_1 & x_2 & \dots \\ f(x_0) & f(x_1) & f(x_2) & \dots \end{array}$$

Задачей является построение по таблице такой функции $\tilde{f}(x)$, которая бы не сильно отличалась от f , оставаясь равной ей в приведенных точках.

При интерполяции методом ближайшего соседа за значение функции $\tilde{f}(x)$ берется значение функции $f(x)$ в точке, ближайшей к рассматриваемой.

При кусочно-линейной интерполяции значение $f(x)$ интерполируется линейной функцией по двум соседним с точкой x точкам:

$$\tilde{f}(x) = \frac{f(x_i)(x_{i+1} - x) + f(x_{i+1})(x - x_i)}{x_{i+1} - x_i}, x_i < x < x_{i+1}$$

Кусочно-линейная интерполяция обычно применяется только при необходимости пересчитать имеющиеся данные к массиву с другим шагом, чтобы иметь возможность, например, поделить одни данные на другие, если они получены при разных входных значениях, но в одном диапазоне величин.

Интерполяция полиномами – обобщенный случай линейной интерполяции, в котором линейная функция заменяется полиномом высшего порядка. В нашем случае через 7 точек можно провести полином 6-го порядка. Вычисление полинома проводится по интерполяционным формулам Ньютона или через интерполяционный многочлен Лагранжа. Очевидно, что с ростом числа точек сложность растет экспоненциально.

Основная идея *сплайн-интерполяции* функций – построение кусочно-полиномиальной интерполяции, при которой остается непрерывной функция $f(x)$ и несколько ее первых производных. Для этого в точках сшивки должны быть равны соседние полиномы и их производные. Обычно для этого достаточно уже полинома третьего порядка (т.н. кубическая сплайн-интерполяция).

Тригонометрическая интерполяция востребована в случае, когда данные носят периодический характер. Она же – интерполяция полиномом Фурье. Интерполирующая функция представляет собой сумму конечного числа гармоник ряда Фурье:

$$f(x) = a + \sum_j (a_j \cos(jx) + b_j \sin(jx))$$

Во многих случаях, особенно в последнем, возможна неоднозначная интерполяция функцией.

При обработке двумерных данных применяют билинейную и бикубическую интерполяции, при обработке трехмерных – трилинейную, а также многомерную сплайн-интерполяцию (рис. 29).

9.2. Аппроксимация

Аппроксимация (от слова *арпрох* – «примерно») это поиск функции, по возможности приближенной к имеющемуся набору данных. Аппроксимация удобна, когда имеется большой массив данных, или в случае, если приведенные выше натурные данные служат опорными точками для выявления функциональной зависимости (а также в случае, когда зависимость заведомо известна).

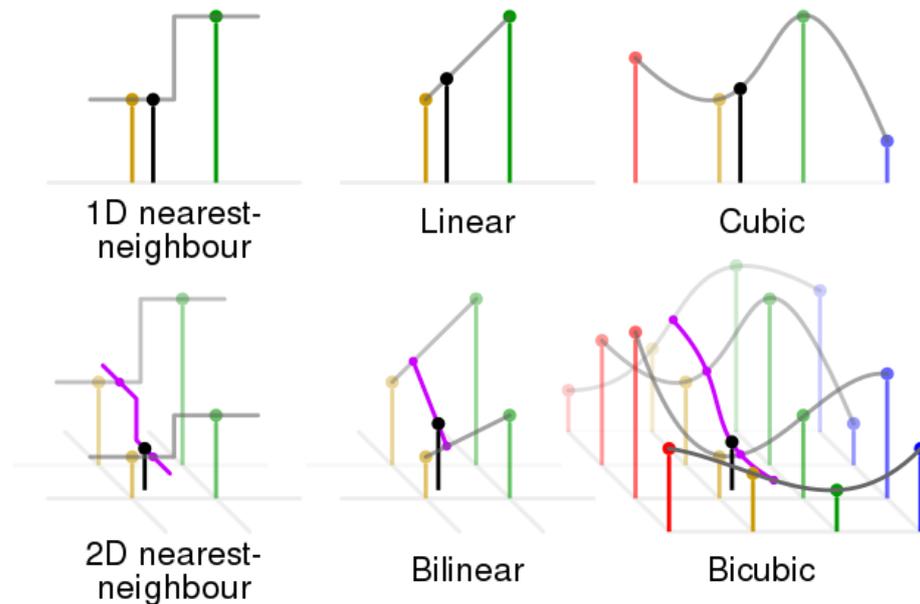


Рис. 29 Методы интерполяции. Слева направо – метод ближайшего соседа, линейная и кубическая. Верхний ряд – интерполяция одномерных данных, нижний – двумерных [25]

Аппроксимация возможна с помощью любых подходящих функций, например полиномов определенного порядка. Результатом аппроксимации нулевого порядка будет константа, первого порядка – прямая с наклоном, второго – парабола. При количестве точек на одну больше порядка результатом будет интерполяция.

Для оптимального подбора параметров уравнений обычно используют метод наименьших квадратов (МНК), в котором ищут такие параметры функции, при которых квадрат отклонения минимизируется:

$$\sum_i e_i = \sum_i (y_i - f_i(x))^2 \rightarrow \min$$

При аппроксимации крайне важно верно выбрать аппроксимирующую функцию, т.к. если она не описывает модель, то интерпретация данных будет затруднена.

9.3. Экстраполяция

Экстраполяция – разновидность аппроксимации, при которой функция рассчитывается вне заданного интервала, а не между точками. В зависимости от аппроксимирующей или интерполирующей функции результаты экстраполяции будут различаться. Но заметнее всего изменения именно вне диапазона точек данных. Поэтому с данными экстраполяции надо обращаться аккуратно.

Вопросы для самопроверки:

- Какой вид обработки данных ведет к экспоненциальному росту расчетов при увеличении числа точек?

- Какие требования к интерполяционным функциям при кубической сплайн-интерполяции?
- Что является результатом аппроксимации второго порядка?
- Какие методы вы бы рекомендовали для выявления неизвестной функциональной зависимости?

10. ФИЛЬТРАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Шумы и помехи очень часто оказываются в итоговом сигнале, несмотря на методы, принимаемые для борьбы с ними. Поэтому ознакомимся с некоторыми способами уменьшения вклада искажений в экспериментальные данные, тем более что подобные фильтры присутствуют во всех программах работы с экспериментальными данными.

Сглаживающие фильтры [26]

Сглаживающие фильтры применяются для уменьшения высокочастотных шумов. Самым простым вариантом сглаживающих фильтров является однородный фильтр, обеспечивающий простое усреднение по некоторой локальной области исходных данных, например 3 или 5 точки.

При гауссовой фильтрации значения внутри выбранного интервала выбираются с учетом весовых коэффициентов, вычисляемых согласно форме гауссовой функции $K(I) = \exp(-i^2/2\sigma)$. Кроме размера, он определяются также значением σ . Если в случае однородного фильтра такие коэффициенты будут равны 0,2 при выборке по 5 точкам, то в случае гауссовой фильтрации могут составить значения (1,2,4,2,1)/5, например.

Принцип работы таких фильтров следующий: окно фильтра, состоящее из N точек, перемещается по экспериментальной кривой от точки к точке. Для каждой точки исходного набора данных рассматривается локальная область, равная размеру фильтра, с анализируемой точкой посередине. Выходному значению точки присваивается значение точек в окне фильтра с учетом весовых коэффициентов [27].

Медианные фильтры

Медианные фильтры являются сглаживающими фильтрами, которые убирают шумы импульсного характера, такие как шумы в виде «отдельных точек», но сохраняют при этом резкость границ. Принцип работы фильтра схож с вышеописанными. Но значения функции в

точках окна фильтра выстраиваются по возрастанию, и значение, стоящее в центре этого ряда, присваивается выходному значению функции в данной точке. Таким образом, случайные «выбросы» и «провалы» при такой сортировке оказываются на краях сортируемого массива и не входят в результирующее изображение [27].

Фурье фильтрация

Этот вид фильтрации основан на преобразовании Фурье и является популярным способом устранения помех из экспериментальных данных – спектров, кривых затухания, а также многомерных данных, включая обычные изображения.

Преимуществом метода является возможность быстрого анализа спектра с одновременной подстройкой параметров фильтрации в режиме реального времени. Как и другие методы спектральной фильтрации, максимальный эффект достигается, когда помеха спектрально отстоит от полезного сигнала.

Фильтрация проводится в несколько этапов: прямое преобразование исходных данных, анализ спектра и выбор параметров фильтра, применение подобранного фильтра, обратное преобразование с получением результирующей функции, соответствующей обработанным данным.

Рассмотрим несколько вариантов применения фильтрации .

1. Измерение шага регулярной структуры. Фурье-образ регулярной структуры представляет собой набор точек, расстояние которых от центра находится в прямой связи с шагом структуры.

2. Низкочастотная фильтрация. Частотная фильтрация заключается в исключении из Фурье-образа участков, лежащих на определенном расстоянии от центра. При этом низкочастотной фильтрации соответствует исключение части спектра снаружи определенного расстояния от центра, а высокочастотной – внутри таких границ (нулевые частоты лежат в самом центре Фурье-изображения). Низкочастотная фильтрация применяется для уменьшения влияния высокочастотных шумов, полезный сигнал в этом случае – во внутренней части Фурье-образа.

3. Высокочастотная фильтрация. Применяется для устранения медленных изменений сигнала, соответствующих низкочастотной части спектра.

Для примера в работе [28] приводится иллюстрация применения Фурье-фильтрации к изображению поверхности кремния с 12 сформированными структурами высотой 1–2 нм. Размер изображения на рис. 29 – 3,5×3,5 мкм. Можно предположить, что искажения поверхности вызваны нестабильным положением образца по высоте либо локальными помехами, вызывающими спонтанное смещение зонда

дальше или ближе к поверхности, из-за чего строки выглядят как «скачущие».

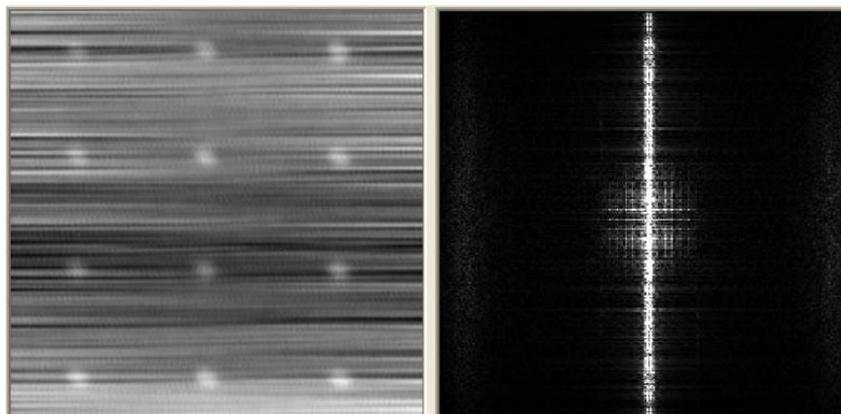


Рис. 29 Поверхность кремния и её Фурье-образ [28]

Поскольку при такой помехе каждая строка отличается от предыдущей, то её на Фурье-образе соответствует вертикальная полоса (если сканирование по строке идет в горизонтальном направлении). Изображение, полученное с помощью НЧ фильтра (рис. 30), показывает, что вертикальная линия соответствует сигналу помехи.

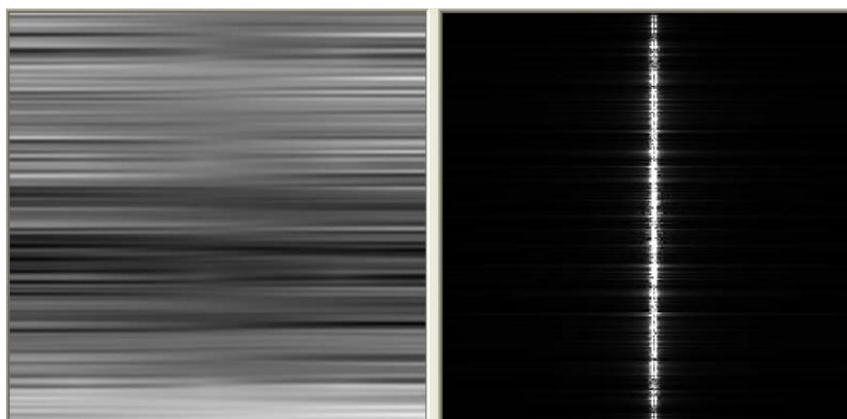


Рис. 30 НЧ шум на изображении и его Фурье-образ [28]

Теперь эту частоту можно вырезать из Фурье-образа. Исключение соответствующей полосы из образа ведет и к исключению основной части помехи из исходного изображения (рис. 31).

Таким образом, удаление из Фурье-образа вертикальной полосы позволило практически полностью избавиться от помехи. Дополнительно изображение можно улучшить, применяя низкочастотный фильтр и удаляя, таким образом, ВЧ часть спектра изображения (рис. 32).

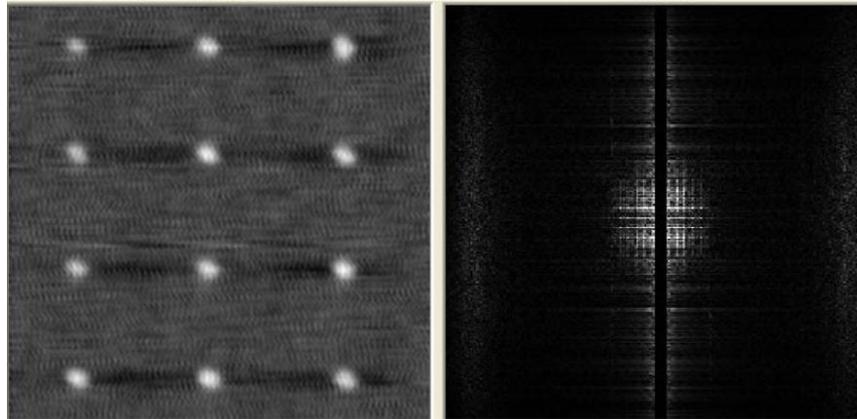


Рис. 31 Применение ВЧ фильтра к изображению и его Фурье-образ [28]

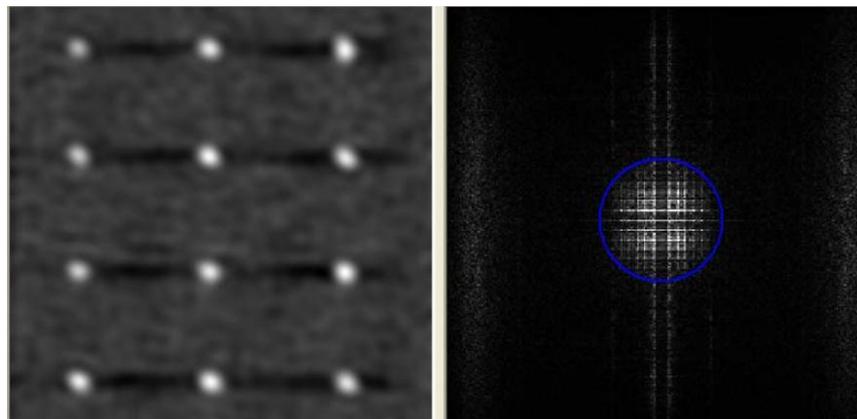


Рис. 32 Применение НЧ фильтра (оставлена только область внутри круга на Фурье-образе) к изображению и Фурье-образ изображения до фильтрации [28]

Остаются провалы между точками, они связаны с тем, что при вырезании вертикальной линии потеряна часть нужного НЧ сигнала, и эту операцию можно повторить, уточнив границы. Пользоваться подобными фильтрами следует осмотнительно, поскольку избыточная фильтрация может исключить из исходных данных нужную информацию, а также существенно исказить исходные данные.

Также при применении Фурье-фильтров следует учитывать краевой эффект (поскольку анализируется ограниченная область пространства), из-за которого данные на краях области данных могут значительно исказиться.

Вопросы для самопроверки:

- В чем отличие гауссовой и однородной фильтрации?
- Шумы какого характера убирает медианный фильтр?
- Какой области спектра соответствует центральная часть Фурье-спектра?
- Чем вызывается краевой эффект при Фурье-фильтрации?

ОДНО- И ТРЕХФАЗНЫЕ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Для корректного подключения приборов к электрической сети имеет смысл представлять некоторые принципы работы электросети. Также это может пригодиться при борьбе с помехами.

В бытовой практике потребитель имеет дело с однофазными сетями переменного тока. Так, в обычных розетках присутствует переменное напряжение, описываемое простой синусоидой. Такая розетка имеет два контакта – ноль и фаза, к которым иногда добавляется третий – заземление. Но обычно однофазная сеть является элементом трехфазной сети (рис. 33).

Трехфазная сеть имеет ряд преимуществ с точки зрения генерации энергии, работы асинхронных двигателей, экономной передачи энергии, распределения нагрузки и возможности получения разных уровней напряжения.

Одно из особенностей трехфазной сети в том, что сумма трех синусоид равной частоты, различающихся по фазе на 120 градусов, дают в сумме ноль, это дает возможность использовать три силовых провода. На практике добавляется один, нейтральный провод, или просто «нейтраль». По нейтральному проводу течет ток, компенсирующий разность токов в отдельных фазах. Для минимизации разности однофазную нагрузку стараются равномерно распределить по всем фазам (например, подключая разных потребителей к разным фазам в пределах одного здания), благодаря чему ток в нейтральном проводе не превышает 20% от тока в линейном проводе (поэтому его могут делать меньшей толщины). Дисбаланс нагрузки, а тем более обрыв нейтрального провода, ведет к т.н. «перекосу фаз» и повреждению однофазного оборудования.

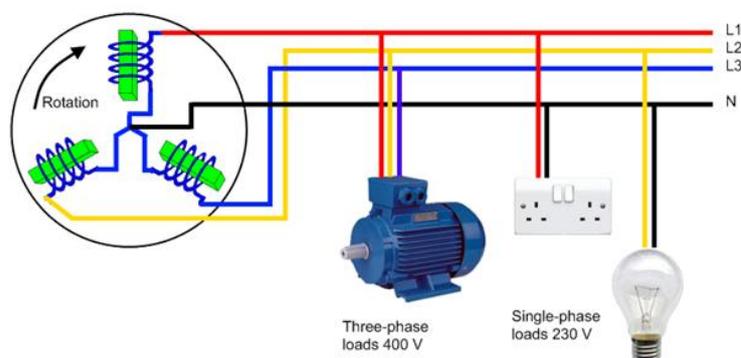


Рис. 33 Четырехпроводная трехфазная сеть. Состоит из 3 линейных L ("фазы") и одного нейтрального N проводов [29].

В РФ трехфазной бытовой сетью является сеть 230/400В с частотой 50 Гц. 230В – это действующее (или среднеквадратичное) значение фазового напряжения (между любой из фаз и нейтралью). 400В – линейное напряжение (напряжение между двумя любыми фазными проводами). В розетке может добавляться и пятый провод заземления (в однофазной сети – третий). В других странах эти значения могут отличаться, также значения другие для высоковольтных сетей и бортовых сетей.

При работе с трехфазной сетью, а также однофазной, следует иметь в виду несколько моментов [30]:

- Нейтраль не обязательно имеет нулевой потенциал.
- Защитные автоматы (тепловые и КЗ) защищают цепь от перегрузки, а не пользователя от удара током.
- Заземление вовсе не обязательно имеет низкое сопротивление (т.е. спасает от удара током).
- Точки с нулевым потенциалом могут иметь бесконечно большое сопротивление.
- УЗО не сработает при возникновении утечек тока из гальванически развязанной цепи.
- Нельзя включать большую нагрузку в сеть без консультаций с электриком здания.
- В однофазной сети возможно увеличение напряжения до 400В

Нелинейные искажения в цепи

Линейная нагрузка, в которой напряжение и ток связаны линейной зависимостью, не меняет синусоидальную форму напряжения питания. Это нагрузки, состоящие из сопротивления, емкости, индуктивности.

Нелинейные нагрузки характеризуются кривой потребления переменного тока, отличной от синусоидальной. Чаще всего это относится к импульсным блокам питания (а также почти ко всей радиоэлектронной аппаратуре).

Искажение возникает из-за частотного преобразования питающего напряжения с последующей фильтрацией частот. При этом суммируются гармоники – синусоиды, имеющие кратные частоты.

Механизм компенсации дисбаланса токов, на котором построена четырехпроводная трехфазная электрическая сеть, не работает с несинусоидальными токами. Сила тока несинусоидального сигнала в нейтральном проводе оказывается равной амплитуде тока в линейном проводе, так помеха из одной фазы проникает в другую через нейтраль. Необходимо учитывать наличие помех в сети и стараться не «пускать» их оттуда (и «туда»!) [31].

ВЫЧИСЛЕНИЕ СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ.

Расчет среднего значения и оценку разброса этого параметра следует вести по стандартному алгоритму оценки измеряемой величины. Среднее значение величины H , полученной в n измерений

$$H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i$$

Для описания погрешности значения переменной используется стандартное среднеквадратичное отклонение σ . Однако в случае проведения многократных измерений используется величина стандартного отклонения s , которая связана со значением σ коэффициентом $1/\sqrt{n}$, поэтому

$$s_H^2 = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (H_i - H)^2$$

Также важно учесть и другие источники неопределенности, возникающие в ходе эксперимента. Так, сюда добавляется приборная погрешность σ_D , которая, если не указана в документации, определяется по паспортным данным прибора по формуле $\sigma_{\text{отсч}} = d/3$, где d – шаг округления. Сюда же добавляется неопределенность, связанная точностью калибровочного образца, если по нему проводилась настройка прибора. Обобщенная неопределенность будет являться корнем из суммы дисперсий всех таких неопределенностей

$$U_0 = \sqrt{s_H^2 + \sigma_D^2 + \sigma_C^2}$$

Если одна из величин σ превышает другую в три и более раз, то для дальнейших расчетов берут большую из них.

При использовании величины H для дальнейших расчетов косвенно измеряемых величин обработка результатов прямых измерений на этом заканчивается, если же это окончательный результат эксперимента, то ищут погрешность, соответствующую доверительному интервалу вероятности p . В научных статьях, как правило, приводят доверительный интервал $\pm\sigma$, соответствующий $p=0,68$ [32].

Таким образом, итоговый результат будет записан как $H \pm U_p$ с доверительной вероятностью $p=0,68$.

Если преобладают случайные погрешности и число измерений невелико (менее 5), то погрешность определяют с помощью коэффициентов Стьюдента. Если приборная погрешность превышает остальные, то необходимо указать характер погрешности. Например, $H=10 \pm 1$ нм (погрешность – предельная приборная) [32].

Литература

1. фон Нейман И. Математические основы квантовой механики / пер. с нем. М. К. Поливанова и Б. М. Степанова; под ред. акад. Н. Н. Боголюбова. – М.: Наука, 1964. – 367 с.
2. Блум. К. Теория матрицы плотности и ее приложения / под ред. проф. Д.Н. Зубарева; пер. с англ. М.Ю. Новикова, Ю.Г. Рудого.— М.: Мир, 1983. — 247с.
3. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных (пер. с англ.). М.: Радио и связь, 1997. — 232 с., фрагмент доступен <http://statanalys.ru/montgomeri-d-planirovanie-eksperimenta.html>, свободный.
4. Measuring instrument статьи [Measuring instrument / Сайт интернет-энциклопедии «Википедия». Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Measuring_instrument, свободный.
5. Парфенов П.С., Литвин А.П., Ушакова Е.В., Баранов А.В. Техника физического эксперимента. Лабораторный практикум - Санкт-Петербург: СПб: Университет ИТМО, 2015, 2015. - 88 с. Режим доступа: <http://books.ifmo.ru/file/pdf/1844.pdf>, свободный.
6. Демтрёдер, В. Современная лазерная спектроскопия: [учебное пособие] / В. Демтрёдер ; пер. с англ. М.В. Рябининой, Л.А. Мельникова, В.Л. Деброва под ред. Л.А. Мельникова. – Долгопрудный: Издательский Дом "Интеллект", 2014. – 1071 с.
7. Greenfield J. Detectors / Сайт The Chemistry LibreTexts library. Режим доступа: http://chem.libretexts.org/Core/Analytical_Chemistry/Instrumental_Analysis/Spectrometer/Detectors/Detectors, свободный.
8. Noise-equivalent power [Электронный ресурс] / Википедия – Электрон. дан. – 2005. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Noise-equivalent_power, свободный. – Загл. с экрана.
9. Operating Instructions Acton Research Corporation. SpectraPro-2500i [Электронный ресурс] / Center for Detectors – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: http://ridl.cfd.rit.edu/products/manuals/Princeton_Acton/SP-2500i.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
10. Спектрометры на основе дифракционных решеток или призм [Электронный ресурс] / Лазерный Портал – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: http://www.laserportal.ru/content_769, свободный. – Загл. с экрана.
11. Datasheets/Gratings [Электронный ресурс] / Princeton Instruments – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: <http://www.princetoninstruments.com/products/spec/actonseries/dsheet.aspx>, свободный. – Загл. с экрана.

12. Grating Physics. Tutorial [Электронный ресурс] / Сайт Newport Corporation – Электрон. дан. – 2015. – Режим доступа: <http://www.newport.com/Grating-Physics/383720/1033/content.aspx>, свободный. – Загл. с экрана.
13. Хорвиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Пер. с англ. – Изд. 2-е. – М.: Издательство БИНОМ. – 2014. – 704 с.
14. Low Level Optical Detection using Lock-in Amplifier Techniques. Application Note (AN 1003) / PerkinElmer Inc. 2000. Режим доступа: <http://www.chem.ucla.edu/~craigim/pdfmanuals/appnotes/an1003>, свободный
15. Лапшин Д.А. Синхронное детектирование / Сайт Института спектроскопии РАН. Режим доступа: <http://www.isan.troitsk.ru/dls/lapshin/LOCK.HTM>, свободный
16. Parfenov P.S., Litvin A.P., Ushakova E.V., Fedorov A.V., Baranov A.V., Berwick K. Note: Near infrared spectral and transient measurements of PbS quantum dots luminescence // Review of Scientific Instruments. – 2013. – Vol. 84. – N 11. – P. 116104-3.
17. The fastest stopwatch in the world / Сайт The Max Planck Society. 2004. Режим доступа: <https://www.mpg.de/495195/pressRelease200402241>, свободный
18. Jiménez-Banzo A., Ragàs X., Kapustab P., Nonell S. Time-resolved methods in biophysics. 7. Photon counting vs. analog time-resolved singlet oxygen phosphorescence detection / Photochemical & Photobiological Sciences. 2008, №7, 1003-1010. Режим доступа: <http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2008/pp/b804333g>, свободный
19. Antonie J.W.G. Visser and Olaf J. Rolinski. Basic Photophysics / Сайт Photobiology. 2017. Режим доступа: <http://photobiology.info/Visser-Rolinski.html>, свободный.
20. Белинский, А.В. Квантовые измерения [Электронный ресурс]: учебное пособие. — Электрон. дан. — М.: "Лаборатория знаний" (ранее "БИНОМ. Лаборатория знаний"), 2015. — 185 с. — Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=66337, свободный — Загл. с экрана.
21. The bh TCSPC Handbook. 6th Edition. 2015. 768 p. Режим доступа: <http://www.becker-hickl.de/handbookphp.htm>, по запросу.
22. 16 Channel TCSPC / FLIM Detectors. User Handbook January 2016. 63 p. Режим доступа: <http://www.becker-hickl.com/pdf/pml16c27.pdf>, свободный.
23. PicoScope 3000 Series (A API). Programmer's Guide. PC Oscilloscopes and MSOs. 2015 Режим доступа: <https://www.picotech.com/download/manuals/PicoScope3000SeriesAApiProgrammersGuide.pdf>, свободный

24. А. Н. Наумов Решение обратной коэффициентной задачи для уравнений фильтрации. Москва, 2006
25. Interpolation. Сайт Wikipedia, the free encyclopedia. Режим доступа: <https://en.wikipedia.org/wiki/Interpolation>, свободный.
26. Баранов А.В., Литвин А.П., Парфенов П.С., Ушакова Е.В. Техника физического эксперимента в системах с пониженной размерностью. Часть 2 - Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2011. - 40 с. Режим доступа: <http://books.ifmo.ru/file/pdf/850.pdf>, свободный.
27. Nova. Программное обеспечение для СЗМ. Справочное руководство. – Москва: ЗАО «Нанотехнология-МТД». 2010. 493 с.
28. Фурье-фильтрация изображений. [Электронный ресурс] / Сайт программы обработки АСМ изображений Callisto. – Электрон. дан. – 2007. – Режим доступа: http://callistosoft.narod.ru/Resources/Fourier_Filtering.pdf, свободный.
29. Souradeep Chakraborty. What is difference between line to line voltage and line to neutral voltage? Режим доступа: <https://www.quora.com/What-is-difference-between-line-to-line-voltage-and-line-to-neutral-voltage>, свободный.
30. Дубовицкий Г. П. Трехфазные электрические цепи. Режим доступа: <http://model.exponenta.ru/electro/0042.htm>, свободный.
31. Капустин В., Лопухин А. Компьютеры и трехфазная электрическая сеть. «Современные технологии автоматизации». 2/1997. Режим доступа: <http://www.ecoteco.ru/id1130/>, свободный.
32. Светозаров В.В. Основы статистической обработки результатов измерений. Учебное пособие. – М.: Изд. МИФИ, 2005, – 40 с.

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА ОПТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ И СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Кафедра основана в 2002 году под названием «Оптическая физика и современное естествознание» в составе факультета «Фотоники и оптоинформатики». Первым заведующим кафедрой был избран доктор физ.-мат. наук М.Н. Либенсон, возглавлявший лабораторию «Фотофизика поверхности» в Государственном оптическом институте (ГОИ) им. С.И. Вавилова. С 2006 г. ею руководил доктор физ.-мат. наук, профессор А.В. Федоров, с 2017 г. кафедрой руководит к.ф.-м.н А.В. Иванов.

Образовательные программы бакалавриата и магистратуры кафедры ОФиСЕ сориентированы на актуальные потребности предприятий и организации высокотехнологичных направлений экономики в специалистах, а также учитывают новейшие достижения и тенденции развития нанотехнологий, фотоники и оптоинформатики.

В настоящее время на кафедре преподают профессора А.В. Баранов, Т.А. Вартамян, Е.А. Коншина, В.Г. Маслов, А.О. Орлова, Е.Ю. Перлин, А.В. Федоров; доценты Л.П. Амосова, Г.Н. Виноградова, В.Л. Комолов, М.Ю. Леонов, П.С. Парфенов, Е.В. Ушакова

Авторы данного учебного пособия – доцент кафедры кандидат техн. наук Парфенов Петр Сергеевич и кандидат физ.-мат. наук Литвин Александр Петрович – специалисты в области экспериментальных исследований и диагностики наноструктур различными методами оптической микроскопии и спектроскопии, а также магистрант кафедры Онищук Дмитрий Анатольевич.

Петр Сергеевич Парфенов
Александр Петрович Литвин
Дмитрий Анатольевич Онищук

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

Учебное пособие для профиля «Оптика наноструктур»

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49