

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

Кафедра радиотехнических устройств

Ю. М. ЩЕРБАК

Устройства оптической обработки сигналов

ЧАСТЬ 1

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

для студентов специальности "Радиотехника" в 2-х частях

МИНСК 1996

Щербак Ю.М. Устройства оптической обработки сигналов. Ч.1. Лабораторный практикум в 2-х частях. Мн.: БГУИР, 1996. - 40 с.

Практикум предназначен для подготовки и проведения лабораторных занятий по курсу "Устройства оптической обработки сигналов студентами дневного обучения специальности "Радиотехника" и содержит описание лабораторных работ и методику их проведения. Изложены краткие теоретические сведения об изучаемых устройствах и явлениях, принципы построения оптических схем устройств обработки сигналов, что даёт возможность студентам использовать практикум для самостоятельной работы при изучении данного курса.

Ил. 9 , список лит. - 6 назв.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Подготовка к работам и оформление отчёта

Для эффективного использования лабораторного времени каждой лабораторной работе Должна предшествовать самостоятельная подготовка. Во время этой подготовки студент обязан:

- изучить соответствующие разделы курса, методические указания к лабораторной работе и правила безопасности при работе с электроприборами и лазерами;
- уяснить принципы работы исследуемых устройств, изучить их структурные схемы и используемые оптические и оптоэлектронные элементы.

Предварительная работа включает также оформление отчёта по предыдущей лабораторной работе и подготовку к её защите.

Отчёт, составляемый индивидуально и подписываемый с указанием даты каждым студентом, должен содержать:

- структурную Схему лабораторной установки с указанием используемой контрольно-измерительной аппаратуры;
- оптические схемы исследуемых устройств с указанием геометрических параметров распространяющихся в них лазерных лучей;
- результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований, сведенные в таблицы и оформленные в виде графиков, диаграмм, рисунков;
- результаты расчётов и Соответствие их эксперименту;
- выводы и замечания по результатам исследований с приведением соответствующих доказательств.

Схемы вычерчиваются аккуратно от руки с учётом требованием государственных стандартов. Графики могут вычерчиваться на миллиметровой бумаге. Минимальный размер графика - не менее 9 X 12 см.

Правила безопасности при выполнении лабораторных работ. Общие положения

1. Не приступать к работе, не ознакомившись с инструкцией по технике безопасности для студентов, выполняющих работы на лазерных установках, и с настоящей инструкцией.

2. Внимательно осмотреть приборы и оборудование на рабочем месте и при обнаружении каких-либо неисправностей сообщить об этом руководителю.
3. Не включать и не выключать радиоизмерительные приборы без разрешения руководителя.
4. В случае неисправности приборов или макетов, при отсутствии напряжения в сети необходимо сообщить об этом руководителю.

Правила электробезопасности

1. Радиоизмерительные приборы и блоки питания лазеров питаются напряжением 220 В, частотой 50 Гц, опасным для жизни.
2. Перед включением установки необходимо убедиться в наличии заземления у всех приборов;
3. Не прикасаться к корпусам двух приборов одновременно.

Правила безопасности при работе с лазерами

1. Лабораторные установки укомплектованы лазерами II класса, прямое и зеркально отражённое излучение которых опасно для глаз.
2. Запрещается Включать и выключать блоки питания лазеров. Их включение и выключение производится руководителем.
3. Запрещается смотреть навстречу прямому или отражённому лазерному лучу.
4. Сообщить руководителю об окончании выполнения работы. Привести в порядок рабочее место.

Учебно-исследовательская работа студентов

Целью учебно-исследовательской работы студентов (УИРС) является развитие у студентов навыков самостоятельной научно-исследовательской работы. УИРС проводятся по теме каждого лабораторного занятия. Однако задания по УИРС имеют в целом нестандартный характер и могут выходить за пределы инструкции к лабораторной работе. Учебно-исследовательская работа проводится во время лабораторного практикума. Ориентировочные темы заданий по УИРС приводятся в конце описания каждой лабораторной работа.

В пределах настоящего лабораторного практикума организация УИРС осуществляется следующим образом:

- получение задания; изучение обязательной и поиск дополнительной литературы;
- теоретический анализ;
- составление плана эксперимента и обсуждение;
- обработка результатов исследования;
- формулировка выводов;
- оформление и защита отчёта по работе.

Лабораторная работа 1.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы—выяснение условий формирования интерференционной картины, исследование основных интерференционных схем и их практическое применение.

1.1. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис.1.1) позволяет исследовать интерференцию лазерного излучения в расходящихся и параллельных пучках. Он содержит гелий-неоновый лазер ($\lambda=0,6328\text{мкм}$), коллиматор, фотоприёмник (диафрагмированный фотодиод), осциллограф, делители светового пучка. Коллиматор состоит из двух конфокальных положительных линз и представляет собой обратный телескоп (трубу Кеплера с коэффициентом увеличения около 0.2). Он служит для расширения лазерного пучка. Изменяя расстояние между линзами в коллиматоре, можно делать пучок слабо сходящимся, расходящимся или параллельным (сколлимированным). Лазер и оптические элементы закреплены в юстировочных механизмах и размещены на оптической скамье.

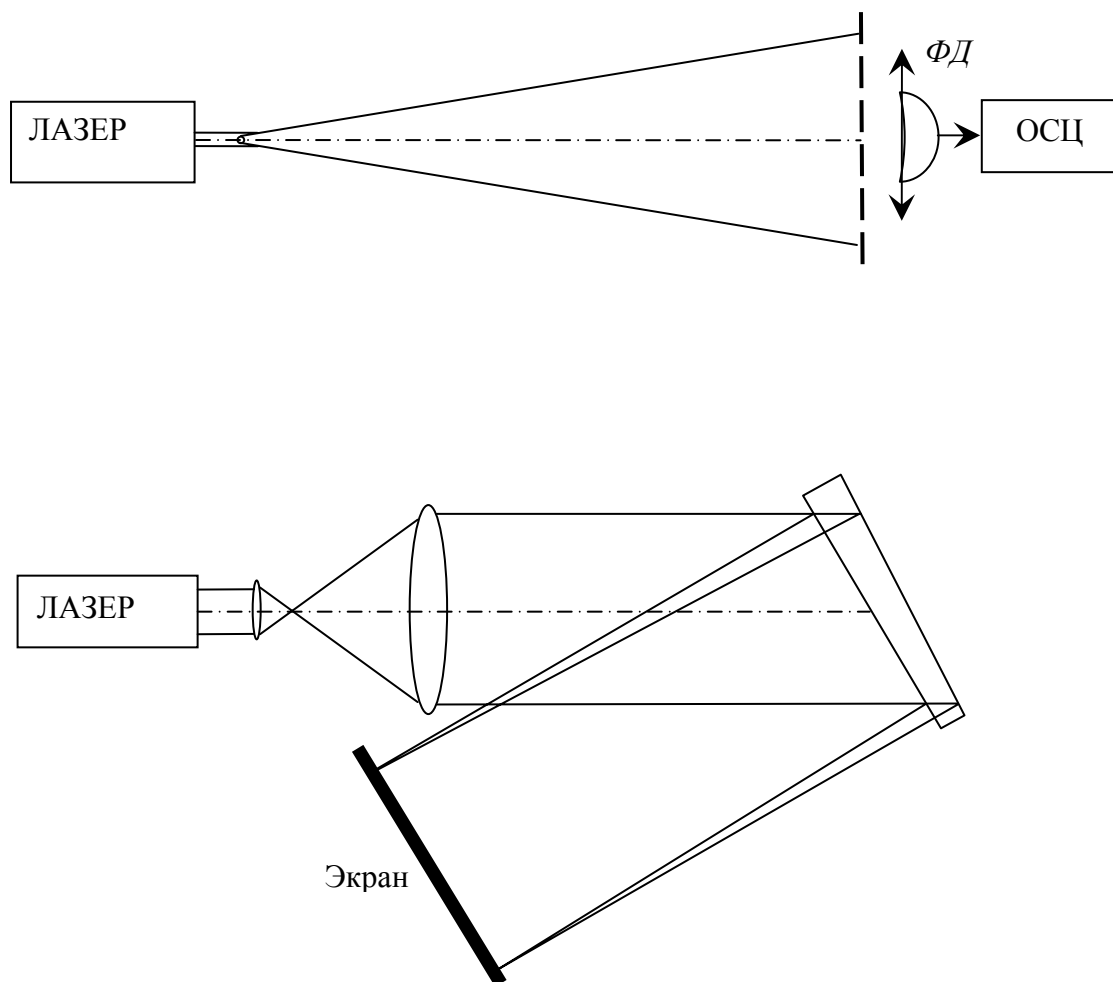


Рисунок 1.1 - Схема лабораторной установки

1.2. Порядок выполнения работы.

1.2.1. Исследование интерференции в расходящихся пучках.

1. Включить блок питания лазера (включает руководитель) и осциллограф.
2. Снять с оптической скамьи рейтеры с закрепленными на них линзами, составляющими коллиматор. Установить на оптической скамье на минимальном расстоянии от лазера рейтер с закрепленным на нем держателем с тонкой проволоочкой.
3. Вращая винт рейтера, перемещать проволоочку перпендикулярно лучу, пока она не окажется на пути луча. Проволочка

здесь выполняет роль делителя пучка, причем величина d (диаметр проволоочки) определяется по формуле:

$$d = a\lambda / n\Delta x$$

где: d —диаметр проволоки; λ —длина волны; n —коэффициент преломления окружающей среды; Δx —период интерференционной картины; a —расстояние между проволоочкой и экраном.

4. Перемещая фотодиод по вертикали, установить его на пути интерферирующих лучей. Перемещая фотодиод винтом рейтера вдоль интерференционной картины, снять зависимость фототока от перемещения x фотодиода. Построить график. Из графика определить Δx интерференционной картины.

5. Измерить расстояние от проволоочки до фотодиода. Вычислить диаметр проволоочки.

В промышленных условиях, используя вместо перемещающегося фотодиода неподвижную линейку фотодиодов или телекамеру, рассмотренный метод используют для бесконтактного автоматического измерения размеров микрообъектов, например, диаметра волоконных световодов в процессе их изготовления.

1.2.2. Исследование интерференции в параллельных лучах.

1. Съюстировать оптическую схему. Для этого:

а) снять все рейтеры с оптическими элементами с оптической скамьи, кроме лазера и рейтера с экраном. Вращая юстировочные винты рейтеров и держателей, в которых закреплен лазер, добиться параллельности лазерного луча направляющим оптической скамьи. В этом случае световое пятно от луча не должно перемещаться по экрану при перемещении по направляющим.

б) последовательно устанавливая рейтеры с оптическими элементами на направляющих и, вращая юстировочные винты, аналогичным образом добиться параллельности прошедшего через элемент лазерного луча направляющим оптической скамьи.

2. Установить рейтеры с линзами на оптической скамье. Перемещая их по направляющим, добиться, чтобы диаметр лазерного луча на выходе второй линзы не изменялся с расстоянием от линзы (т.е. чтобы лазерный пучок был сколлимированным).

3. Установить рейтер с эталонной (плоскопараллельной) пластиной на пути лазерного луча. Направить отраженный луч на экран. На экране виден результат интерференции лучей, отраженных от двух плоскостей эталона.

Перемещая линзы по направляющим, добиться максимального периода интерференционной картины. Тем самым получаем практически плоский волновой фронт в данном направлении.

4. Заменить эталонную пластину на измеряемую. С помощью линейки измерить период Δx интерференционной картины. Выражение для угла между плоскостями пластины:

$$\alpha = \lambda / \Delta x$$

где: λ —длина волны; Δx —период интерференционной картины. По данной формуле вычислить угол между плоскостями.

1.3. Темы для УИРС.

1. Исследование длины когерентности излучения лазера.
2. Исследование контраста интерференционной картины.
3. Исследование формы интерференционных полос.
4. Исследование основных оптических схем интерферометров.

1.4. Контрольные вопросы

1. Каковы условия наблюдения интерференционной картины?
2. Что такое разность хода лучей?
3. От чего зависит форма интерференционных полос?
4. От чего зависит контраст интерференционной картины?
5. Какую величину называют длиной когерентности?
6. Какова связь между длиной когерентности и шириной спектральной линии излучения?
7. Какой вывод можно сделать о длине когерентности излучения лазера, используемого в данной работе?

Лабораторная работа 2.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

2.1. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис.2.1) предназначена для исследования оптического преобразования Фурье. Она содержит гелий-неоновый лазер ($\lambda=0,6328$ мкм). коллиматор (расширитель) лазерного луча,

транспарант, моделирующий входную функцию, короткофокусную линзу, фотоприёмник (фотодиод), осциллограф.

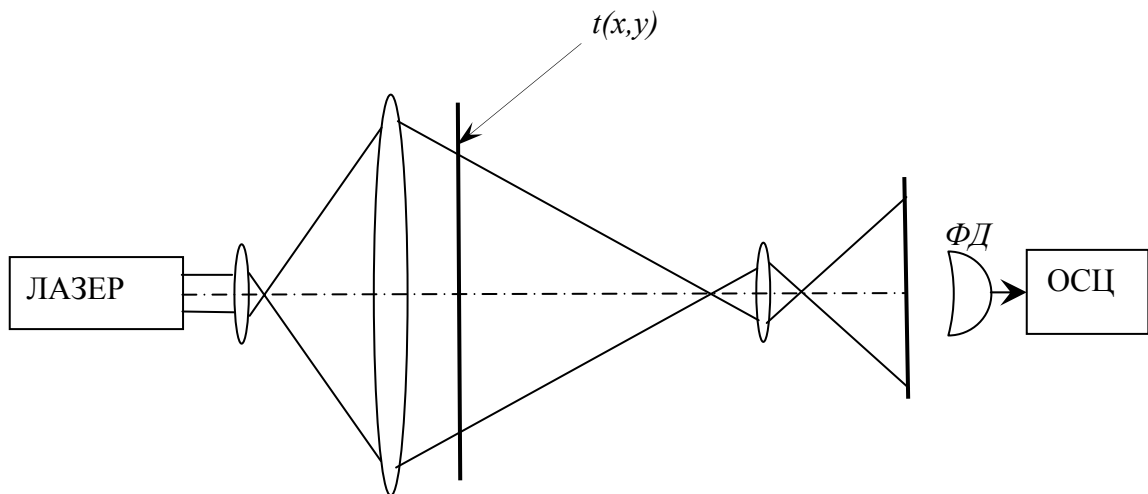


Рисунок 2.1 – Оптическая схема лабораторной установки

Оптическая схема лабораторной установки отличается от классических схем. Коллиматор формирует слабосходящийся пучок, играя роль длиннофокусной Фурье-линзы. Сформированный Фурье-образ входного сигнала, падающий на короткофокусную линзу, можно считать параллельным пучком. Пройдя заднюю фокальную плоскость линзы, он преобразуется в расходящийся пучок, причём угол расходимости определяется размером Фурье-образа и фокусным расстоянием линзы. Следовательно, изображение Фурье-образа в плоскости фотоприёмника определяется углом расходимости и расстоянием от задней фокальной плоскости линзы до плоскости фотоприёмника.

Электрический сигнал с фотоприёмника, измеряемый осциллографом, пропорционален интенсивности света в изображении Фурье-образа. Сканируя изображение фотоприёмником, получаем данные о спектре Винера исследуемого сигнала.

2.2. Порядок выполнения работы

1. Включить блок питания лазера (включает руководитель) и осциллограф.

2. С помощью юстировочных винтов добиться параллельности лазерного луча направляющим на всех участках оптической схемы.
3. Установить транспарант на пути лазерного луча непосредственно за коллиматором, добиться чёткой дифракционной картины на экране.
4. Определить ход луча в оптической схеме. Для этого с помощью листа миллиметровой бумаги или линейки измерить сечение луча в 2-х -3-х точках каждого участка оптической схемы.
5. Измерить фокусные расстояния эквивалентной длиннофокусной линзы, созданной коллиматором, и короткофокусной линзы.
6. Измерить расстояния между элементами оптической схемы.
7. Пользуясь результатами измерений по пп.3—5, начертить оптическую схему лабораторной установки с изображением хода луча и указанием размеров.
8. Убрать экран и установить фотодиод. Перемещая фотодиод по вертикали и по горизонтали, совместить его с центром дифракционной картины. Перемещая фотодиод винтом рейтера перпендикулярно оптической оси, снять зависимость сигнала с фотодиода от его перемещения. Построить график.
9. Пользуясь формулами (2.44) или (2.46) в зависимости от вида входной функции, оценить размер главного максимума спектра Винера исследуемого сигнала.
10. Пользуясь результатами оценки по п. 9 и измеренными значениями параметров оптической схемы, оценить размер главного максимума спектра Винера в плоскости фотодиода.
11. Пользуясь результатами измерений по п. 8, выбрать наиболее близкую к измеренной «модельную» функцию. Произвести расчёт спектра Винера «модельной» функции. Произвести соответствующую нормировку и сопоставить расчётные и измеренные значения на одном графике. Дать объяснение имеющимся расхождениям.

2.3. Темы для УИРС

1. Исследование дифракции Френеля.
2. Исследование преобразования Фурье комплексных сигналов.
3. Исследование оптической свёртки и корреляции.

2.4. Контрольные вопросы

- 1.Какие существуют зоны дифракции?
- 2.Каковы условия получения дифракции Фраунгофера?
- 3.Какова роль положительной линзы в выполнении оптического преобразования Фурье?
- 4.Чем определяется время выполнения оптического преобразования Фурье?
- 5.Какова предельная производительность оптического Фурье-процессора?
- 6.Каковы свойства оптического преобразования Фурье?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юу Ф.Т.С. Введение в теорию дифракции, обработку информации и голографию - М.: Сов. радио, 1979.
2. Акаев А.А., Майоров С. А., Оптические методы обработки информации. -М.: Высш. школа, 1988.
3. Престон К. Когерентные оптические вычислительные машины. - М.: Мир. 1974.
4. Парыгин В.Н. Балакший В.И., Оптическая обработка информации.- М.: МГУ, 1987.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра радиотехнических устройств

Ю. М. ЩЕРБАК, А. И. КОНОЙКО,

М. П. ФЕДОРИНЧИК

УСТРОЙСТВА ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Ч А С Т Ь 2

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

для студентов специальности

"Радиотехника"

В 2-х частях

МИНСК 1997

Щербак Ю. М., Конойко А. И., Федоринчик М. П. Устройства оптической обработки сигналов. Часть 2. Лабораторный практикум в 2-х частях. - Мн.: БГУИР, 1997. - 17 с.

Практикум предназначен для подготовки и проведения лабораторных занятий по курсу «Устройства оптической обработки сигналов» студентами дневного обучения специальности "Радиотехника" и содержит описание лабораторных работ и методику их проведения. Изложены краткие теоретические сведения об изучаемых устройствах и явлениях, принципы построения оптических схем устройств обработки сигналов, что дает возможность студентам использовать практикум для самостоятельной работы при изучении данного курса.

Ил. 3. список лит. - 5 назв.

Ю.М.Щербак, А.И. Конойко,
М.П.Федоринчик 1997

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Подготовка к работам и оформление отчета

Для эффективного использования лабораторного времени каждой лабораторной работе должна предшествовать самостоятельная подготовка. Во время этой подготовки студент обязан:

- изучить соответствующие разделы курса, методические указания к лабораторной работе и правила безопасности при работе с электроприборами и лазерами;
- уяснить принципы работы исследуемых устройств, изучить их структурные схемы и используемые оптические и оптоэлектронные элементы.

Предварительная работа включает также оформление отчета по предыдущей лабораторной работе и подготовку к ее защите.

Отчет, составляемый индивидуально и подписываемый с указанием даты студентом, должен содержать:

- структурную схему лабораторной установки с указанием используемой контрольно-измерительной аппаратуры;
- оптические схемы исследуемых устройств с указанием геометрических параметров распространяющихся в них лазерных лучей;
- результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований, сведенные в таблицы и оформленные в виде графиков, диаграмм, рисунков;
- результаты расчетов и соответствие их эксперименту;
- выводы и замечания по результатам исследований с приведением соответствующих доказательств;

Схемы вычерчиваются аккуратно от руки с учетом требований государственных стандартов. Графики могут вычерчиваться на миллиметровой бумаге. Минимальный размер графика - не менее 8 x 12 см.

Правила безопасности при выполнении лабораторных работ

Общие положения

1. Не приступать к работе, не ознакомившись с инструкцией по технике безопасности для студентов, выполняющих работы на лазерных установках, и с настоящей инструкцией.

2. Внимательно осмотреть приборы и оборудование на рабочем месте и при обнаружении каких-либо неисправностей сообщить об этом руководителю.

3. Не включать и не выключать радиоизмерительные приборы без разрешения руководителя.

4. В случае неисправности приборов или макетов, при отсутствии напряжения в сети необходимо сообщить об этом руководителю.

Правила электробезопасности

1. Радиоизмерительные приборы и блоки питания лазеров питаются напряжением 220 В, частотой 50 Гц, опасным для жизни.

2. Перед включением установки необходимо убедиться в наличии заземления у всех приборов.

3. Не прикасаться к корпусам двух приборов одновременно.

Правила безопасности при работе с лазерами

1. Лабораторные работы укомплектованы лазерами II класса, прямое и зеркально отраженное излучение которых опасно для глаз.

2. Запрещается включать и выключать блоки питания лазеров. Их включение и выключение производится руководителем.

3. Запрещается смотреть навстречу прямому или отраженному лазерному лучу.
4. Сообщить руководителю об окончании выполнения работы. Привести в порядок рабочее место.

Учебно-исследовательская работа студентов

Целью учебно-исследовательской работы студентов (УИРС) является развитие у студентов навыков самостоятельной научно-исследовательской работы. УИРС проводятся по каждой теме лабораторного задания. Однако задания по УИРС имеют в целом нестандартный характер и могут выходить за пределы инструкций к лабораторной работе. Учебно-исследовательская работа проводится во время лабораторного практикума. Ориентировочные темы заданий по УИРС приводятся в конце описаний каждой лабораторной работы.

В пределах нашего лабораторного практикума организация УИРС осуществляется следующим образом:

- получение задания;
- изучение обязательной и поиск дополнительной литературы;
- теоретический анализ;
- составление плана эксперимента и обсуждение;
- обработка результатов исследования;
- формулировка, выводов;
- оформление и защита отчета по лабораторной работе.

Лабораторная работа 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Цель работы - изучение основных принципов когерентной оптической фильтрации изображений.

1.1 Краткие теоретические сведения

Для оптической обработки информации наиболее важным и полезным является тот факт, что с помощью положительной линзы можно получить двумерное преобразование Фурье. Поскольку оптическое преобразование двумерное, то оно имеет более высокую информационную емкость, чем преобразование, выполняемое с помощью электронных систем. Это обстоятельство и позволило применить оптическое преобразование для решения широкого круга задач.

Следует отметить, что фурье-образ входного оптического сигнала существует в виде физически реального пространственного распределения комплексных амплитуд света, то есть фурье-образы двумерных оптических сигналов реализуются в виде реальных физических сигналов с помощью простейшей оптической системы. Следовательно, над ними можно производить различные математические операции методами пространственной фильтрации.

На рис. 1 показана классическая схема оптической фильтрации. Она состоит из следующих компонентов: источника монохроматического света S коллиматора $L1$, двух расположенных последовательно простейших систем преобразования Фурье, основными элементами которых являются линзы $L2$ и $L3$, устройства ввода информации, пространственного операционного фильтра.

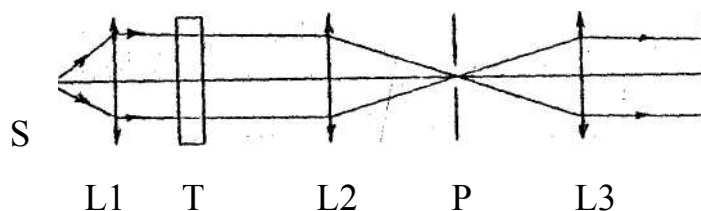


Рисунок 1 - Классическая схема оптической фильтрации

Устройством ввода информации служит транспарант T , который является носителем обрабатываемого действительного изображения, характеризуемого

комплексной амплитудной передаточной функцией $f(x,y)$. Транспарант помещается в плоскость P . Он освещается когерентным плоскопараллельным световым пучком, излучаемым точечным источником монохроматического света S и сформированным при помощи коллиматора $L1$. Первая положительная линза $L2$ осуществляет двумерное фурье-преобразование комплексной амплитудной передаточной функции $f(x,y)$ в плоскости P , описываемое выражением

$$F(f_x, f_y) = 1/\lambda F \iint_S f(x,y) \exp[-i2\pi(xf_x + yf_y)] dx dy. \quad (1.1)$$

Если транспарант находится от линзы $L2$ на расстоянии, равном ее фокусному расстоянию F , то преобразование Фурье записанного на транспаранте изображения лежит в задней фокальной плоскости линзы $L2$. Помещая в фокальной плоскости линзы $L2$, различные маски или транспаранты с заданным распределением прозрачности, можно определенным способом влиять на полученный пространственный спектр изображения, т.е. осуществлять фильтрацию изображения. Подобно электрическим фильтрам, которые пропускают колебания одних частот и не пропускают колебания других, оптический фильтр осуществляет фильтрацию пространственных частот, пропуская их или ослабляя.

Определим пространственно-частотные переменные для двух измерений f_x , f_y как $f_x = x/\lambda F$, $f_y = y/\lambda F$, где λ - длина волны светового излучения, а F - фокусное расстояние линзы. Первая часть оптического фильтра представляет собой анализатор спектра.

Вторая линза $L3$ производит последующее Фурье-преобразование:

$$r(u,v) = (1/\lambda F) \iint_S F(f_x, f_y) \exp[i2\pi(f_x u + f_y v)] df_x df_y. \quad (1.2)$$

Это выражение дает выходное изображение $r(u,v)$, зависящее от пропускания на входе $f(x,y)$.

Фильтрация осуществляется путем помещения в частотную плоскость

Р пространственного операционного фильтра, обладающего светопропусканием, соответствующим функции $H(f_x, f_y)$. Фильтр может быть носителем как комплексной, так и действительной функции (фазовый или амплитудный транспарант).

Отфильтрованная входная функция $g(u, v)$ может быть описана следующим образом

$$g(u, v) = (1/\Lambda F) \iint_S F(f_x, f_y) H(f_x, f_y) \exp[i2\pi(f_x u + f_y v)] df_x df_y. \quad (1.3)$$

Таким образом, возникает модифицированное распределение изображения, являющееся отфильтрованным изображением.

Одним из примеров обработки изображений является использование подавляющих фильтров. Существует однозначное соответствие между положением и частотой в плоскости фильтра. При помещении непрозрачного элемента в частотную плоскость подавляется определенная частотная составляющая и не участвует в формировании изображения. Если в частотную плоскость на оптической оси поместить дырочную диафрагму, то будут подавлены высокие пространственные частоты, т.е. изображение утратит мелкие детали. Таким способом можно улучшить качество зашумленных изображений. Если, наоборот, на оптической оси в частотной плоскости поместить непрозрачный элемент, то будут заблокированы низкие пространственные частоты. Подобный способ используется в микроскопии для создания темного фона путем удаления постоянной составляющей.

Наибольшее применение среди оптических систем, в которых используется фильтрация изображений, нашли оптические корреляторы с частотной плоскостью.

В качестве такого коррелятора может служить оптическая система пространственной фильтрации, представленная на рис. 1. Если на вход такой системы подать входной сигнал $f(x, y)$, а в фурье-плоскости сформировать фильтр с передаточной функцией $H(f_c, f_n) = V(f_c, f_n)$, то на выходе получится сигнал, представляющий собой кросскорреляцию сигналов v и V . Если $v = V$, то

получают функцию автокорреляции. Такой операционный фильтр называют согласованным фильтром, а соответствующую оптическую схему - схемой согласованной фильтрации.

Согласованная фильтрация обычно используется при распознавании образов в заданном изображении: отдельных букв, символов, рисунков, специальной информации. Для этого записывают фильтр, согласованный с образом информации, подлежащий опознаванию, после чего осуществляют его взаимную корреляцию с заданным изображением. Если в изображении содержится интересующий образ, то в результате автокорреляции в выходной плоскости системы образуется яркое световое пятно, указывающее на наличие опознаваемого образа и его местонахождение в изображении. В случае повторения в изображении интересующего образа число ярких световых пятен будет соответствующим. Таким путем распознают отпечатки пальцев, интересующие слова на странице текста, специальные объекты на карте местности и т. п.

С помощью пространственной фильтрации легко осуществлять операцию преобразования кодов.

Если требуется преобразовать входной сигнал $f(x,y)$ в заданный выходной сигнал $s(x,y)$, то для этой цели необходим пространственный фильтр с передаточной функцией:

$$H(f_x, f_y) = s(f_x, f_y) / f(f_x, f_y). \quad (1.4)$$

Методами оптической пространственной фильтрации можно производить такие важные математические операции, как суммирование, вычитание, дифференцирование, интегрирование и др. Фильтры для осуществления таких операций синтезируются при помощи ЭВМ.

1.2. Описание лабораторного макета

Лабораторный макет (рис.2) позволяет исследовать оптическую фильтрацию изображений, формируемых пропускающими транспарантами.

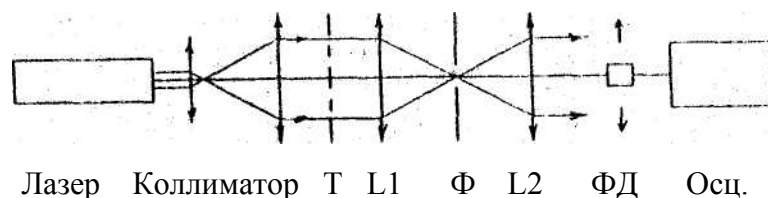


Рисунок 2 – Схема лабораторного макета

Макет содержит гелий-неоновый лазер ($\lambda = 0,6328$ мкм), расширитель луча (коллиматор), транспарант (Т), формирующий изображение, подлежащее фильтрации, линзу L1, осуществляющую преобразование Фурье, оптический фильтр (Ф), линзу L2, осуществляющую обратное преобразование Фурье, фотоприемник (фотодиод - ФД), подключенный к осциллографу. Лазер и оптические элементы закреплены в юстировочных механизмах и размещены на оптической скамье.

1.3. Порядок выполнения работы

1.3.1. Включить блок питания лазера и осциллограф.

1.3.2. Перемещая фотоприемник винтом рейтера перпендикулярно изображению, снять зависимость фототока от перемещения (х) фотоприемника. Построить распределение освещенности в исходном изображении вдоль координаты (х).

1.3.3. Установить оптический фильтр нижних частот в фокусе линзы L1. В соответствии с п. 1.3.2 построить распределение освещенности в обратном изображении.

1.3.4. Установить оптический фильтр верхних частот в фокусе линзы L1 .В соответствии с п.п. 1.3.2, 1.3.3 построить распределение освещенности в обратном изображении.

1.4. Контрольные вопросы

1. В чем заключается сходство и отличие действия оптических фильтров от электрических?

2. Что собой представляет оптический фильтр нижних частот, верхних частот?

Лабораторная работа 4. ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТО-ОПТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТОРА СПЕКТРА РАДИОСИГНАЛОВ

Цель работы - изучить принципы построения и функционирования акустооптических анализаторов спектра радиосигналов.

2.1. Краткие теоретические сведения

В основе работы акусто-оптических устройств обработки радиосигналов, в том числе анализаторов спектра, лежит явление дифракции света на акустических волнах, которые вследствие эффекта фотоупругости вызывают во времени и пространстве периодические изменения показателя преломления в материале светозвукопровода. Проходящий через акустическое поле свет дифрагирует на

неоднородностях показателя преломления, как на фазовой дифракционной решетке.

Характер дифракции существенно зависит от соотношения между длиной волны света λ , длиной акустической волны и шириной акустического пучка L . При выполнении условия $Q \ll 1$, где $Q = \lambda L / n \Lambda^2$ - параметр акустооптического взаимодействия, фазовая решетка может рассматриваться, как плоская. В этом случае дифракция происходит при любом угле падения света на акустический пучок. Дифракционная картина содержит значительное число максимумов с симметричным относительно нулевого порядка распределением интенсивности света. Такой режим акусто-оптического взаимодействия носит название дифракции Рамана-Ната.

Существенно иной характер имеет дифракция при $Q \gg 1$. Фазовая решетка в этом случае является принципиально трехмерной. Дифракционная картина возникает лишь при определенном угле падения света (угле Брэгга) и содержит, как правило, лишь один дифракционный максимум. Этот режим акусто-оптического взаимодействия называется дифракцией Брэгга.

Рассмотрим подробнее задачу о распространении света в изотропной среде, в которой по оси x бежит плоская акустическая волна с частотой Ω и волновым числом K . Упругая волна сопровождается изменением показателя преломления:

$$n(x,t) = n_0 + \Delta n \sin(\Omega t - Kx), \quad (2.1)$$

где n – показатель преломления невозмущенной среды, Δn - изменения показателя преломления под действием акустической волны.

Пусть на область возмущения, заключенную между плоскостями $z = 0$ и $z = L$, падает под углом Θ_0 плоская световая волна:

$$E = E_0 \exp[(wt - k_x x \sin \Theta_0 - k_z z \cos \Theta_0)]. \quad (2.2)$$

где E_0 - ее амплитуда, w - частота, $k = 2\pi/\lambda$ - волновое число.

Проходя через область возмущения, световая волна распадается на сумму плоских волн, которые дают соответствующие дифракционные максимумы:

$$E = E_0 \sum_{p=-\infty}^{p=\infty} c_p \exp[i(w_p t - k_p x \sin\Theta_p - k_p z \cos\Theta_p)]. \quad (2.3)$$

Углы дифракции Θ_p удовлетворяют формуле дифракционной решетки с периодом $\Lambda = 2\pi/K$:

$$k_p \sin\Theta_p = k_0 \sin\Theta_0 + pK. \quad (2.4)$$

Но в отличие от обычной фазовой решетки в данном примере частота дифрагированных волн отличается от частоты падающего света:

$$\omega_p = \omega_0 + p\Omega \quad (2.5)$$

Сдвиг частоты на $p\Omega$ обусловлен эффектом Допплера вследствие того, что дифракция происходит на движущейся решетке.

Так как $\Omega < \omega_0$, то можно пренебречь изменением длины волны света в процессе дифракции и считать для изотропной среды $k_p = k_0$. При этом следует иметь в виду, что при смещении волн разных дифракционных порядков (что широко используется в устройствах обработки сигналов) доплеровским сдвигом частоты пренебрегать нельзя, поскольку он приводит к модуляции интенсивности света на разностных частотах.

В акусто-оптических устройствах используются, как правило, максимумы +1-го и -1-го порядков дифракции, при этом угол отклонения лучей относительно падающего (нулевого порядка) в соответствии с (2.4) $\Theta = \lambda/\Lambda$. Учитывая, что $\lambda = v/f$, получаем

$$\Theta = \lambda f/v. \quad (2.6)$$

Важной характеристикой является дифракционная эффективность, характеризующая долю падающего света, отклоненного в дифракционный порядок $\eta = I_d / I_0$.

В режиме дифракции Рамана-Ната дифракционная эффективность задается функциями Бесселя p -го порядка:

$$\eta_0 = J_p^2 (qL). \quad (2.7)$$

где q - параметр, пропорциональный мощности акустической волны и задающий величину Δn в (2.1).

В соответствии с (2.7) максимальная доля света, приходящаяся на какой-либо порядок дифракции в режиме Рамана-Ната, не превышает 33.4% от падающего света.

В режиме Брэгга дифракционная эффективность равна

$$\eta = \sin^2 (qL/2). \quad (2.8)$$

Согласно (2.8) максимальная дифракционная эффективность в идеальном случае равна 100%, т.е. вся энергия падающего света перекачивается в дифракционный порядок. На практике максимальная дифракционная эффективность снижается из-за расходимости световых и звуковых пучков, затухания ультразвука, отклонения от режима дифракции Брэгга и прочее. Однако при необходимости несложно получить эффективность дифракции 80-90%.

В акусто-оптических устройствах в принципе может использоваться как раман-натовский, так и брэгговский режим дифракции. Но поскольку дифракция Рамана-Ната имеет место на сравнительно низких частотах (до нескольких десятков мегагерц), то создать широкополосные и быстродействующие устройства в этом случае не представляется возможным. Кроме того, раман-натовский режим дает большие световые потери и меньший динамический диапазон. Недостатком брэгговской дифракции является ее угловая селективность, которая вследствие зависимости угла Брэгга от частоты

ультразвука ограничивает рабочий диапазон частот Δf . Поэтому наилучшие характеристики устройств достигаются в промежуточном режиме дифракции, когда диапазон Δf достаточно широк, но паразитные дифракционные максимумы практически отсутствуют.

К настоящему времени предложено и исследовано большое количество акусто-оптических устройств, отличающихся назначением, принципом действия и конструкцией. Но несмотря на все их разнообразие они имеют много общего, поскольку основу этих устройств составляет одна или несколько акусто-оптических ячеек. Акусто-оптическая ячейка - это светозвукопровод из прозрачного кристаллического или стеклообразного материала (или кювета с жидкостью), в котором с помощью пьезопреобразователя возбуждается упругая волна. Проходящий через ячейку свет дифрагирует в акустическом поле. При этом в дифрагированный пучок переносится информация, содержащаяся как в падающей световой волне, так и в электрическом сигнале, подаваемом на преобразователь.

Принцип работы акусто-оптического анализатора спектра радиосигнала поясняется с помощью рис.3. Анализируемые сигналы усиливаются широкополосным усилителем и подаются на ультразвуковой преобразователь акусто-оптической ячейки. Излучаемый лазером световой пучок расширяется с помощью коллиматора до диаметра D и падает на акусто-оптическую ячейку под углом Θ . Распространяющиеся в акусто-оптической ячейке ультразвуковые волны с частотами в диапазоне f вызывают периодические изменения показателя преломления среды, в результате чего происходит дифракция света. Лучи дифрагированного света первого порядка отклоняются в соответствии с (2.6) в диапазоне углов

$$\Delta\Theta = \lambda\Delta f/v. \quad (2.9)$$

Дифрагированные лучи собираются линзой $L1$, а затем с помощью короткофокусной линзы $L2$ производится увеличение их углового отклонения и осуществляется их фокусировка.

Как следует из (2.8) и (2.9), угол отклонения дифрагированных лучей пропорционален частоте анализируемых сигналов. Следовательно, если поместить в фокальной плоскости системы линз L1-L2 линейку фотоприемников, электрический отклик на их выходах будет пропорционален амплитуде спектральных составляющих анализируемого сигнала.

Рассмотрим основные характеристики акустооптического анализатора спектра радиосигналов.

2.1.1. Разрешающая способность по частоте

Разрешающая способность δf акусто-оптического анализатора спектра характеризует его способность различить два сигнала с близкими частотами и определяется дифракционной расходимостью светового пучка, проходящего через ячейку. Угловая расходимость светового пучка круглого сечения диаметром D равна

$$\delta\Theta = 2,44 / D. \quad (2.10)$$

Сопоставляя (2.6) и (2.10), получим

$$\delta f = 2,44 \, v / D. \quad (2.11)$$

Отношение D/v равно времени t прохождения акустического сигнала через апертуру акустооптической ячейки и характеризует быстродействие обработки сигнала акустооптическим устройством. Следовательно

$$\delta f = 2,44 / t. \quad (2.12)$$

Из (2.12) видно, что частотное разрешение зависит от скорости распространения акустической волны. Поэтому для получения высокого разрешения применяют материалы с относительно невысокой скоростью

распространения звука. Например, при использовании кристаллов парателурита (TeO) с возбуждением медленной сдвиговой волны ($v=660$ м/с) получено максимально достижимое в настоящее время разрешение, которое составляет около 40 кГц.

2.1.2. Диапазон анализируемых частот

Рабочий диапазон частот акусто-оптической ячейки в основном представляется полосой ультразвукового преобразователя и полосой акусто-оптического взаимодействия. Полоса частот ультразвукового преобразователя зависит от коэффициента электромеханической связи применяемого пьезоэлектрического материала и отношения акустических импедансов преобразователя и акусто-оптической среды. Конструкция и метод крепления преобразователя к световоду непосредственно влияют на эффективность возбуждения звуковой волны и на полосу рабочих частот. В области частот ниже 1 ГГц наиболее широко применяются пластины монокристаллов LiNbO_3 . Особую важность имеет метод крепления преобразователя. На частотах порядка сотен мегагерц используется диффузная сварка с помощью напыленных слоев индия. После сварки пластины пьезоэлектрика со звуководом ее отшлифовывают до толщины, соответствующей половине длины звуковой волны в пьезоэлектрике на центральной частоте акусто-оптической ячейки. Толщину можно рассчитать с помощью частотной постоянной. Для ниобата лития повернутого на 163° Y-среза, применяемого для возбуждения сдвиговых волн, частотная постоянная равна 2280 МГц мкм.

На частоте выше 1 ГГц толщина преобразователя становится очень малой (порядка долей микрона). В силу технологических трудностей на этих частотах применяют напыление тонкой пленки пьезоэлектрического материала.

Обычно стремятся получить полосу акусто-оптической ячейки величиной в октаву, т.е. $f_v = 2f_n$. Полоса акусто-оптического взаимодействия определяется по уменьшению на 3 дБ интенсивности дифрагированного света при изменении

частоты акустической волны и фиксированном угле падения света. Можно показать, что полоса акусто-оптического взаимодействия дается выражением

$$\Delta f = 1,8 \, n v^2 / \lambda f_0 L. \quad (2.13)$$

где f_0 - центральная частота, для которой выполнено условие Брэгга.

Из выражений (2.11) и (2.13) следует, что одновременное получение высокого разрешения и широкой полосы анализа затруднительно. Поэтому при создании спектр-анализаторов практически достижимо либо высокое разрешение (до 40 кГц), либо большая полоса анализа (от 500 до 1000 МГц) при невысоком разрешении (1000 кГц).

В первом случае обычно используются материалы с относительно низкой скоростью распространения звука. Например, при использовании ячейки на базе кристалла TeO_2 , в котором возбуждается медленная сдвиговая волна, распространяющаяся вдоль его оси $[100]$ с $V=616$ м/с, возможно осуществление анализа спектра с разрешением 37 кГц в полосе анализа 160 МГц.

При использовании того же кристалла, в котором возбуждается быстрая сдвиговая волна распространяющаяся вдоль его оси $[001]$ с $V=4200$ м/с, полоса анализа спектра может составить 2000 МГц при разрешении 250 кГц. Отсюда следует целесообразность создания анализатора спектра с двумя трактами, дополняющими друг друга по разрешению и полосе анализа.

2.2. Описание лабораторного макета

Лабораторный макет (рис.3) позволяет изучить схему и принцип работы акусто-оптического анализатора спектра радиосигналов. Он содержит гелий-неоновый лазер ($\lambda = 0,6328$ мкм), коллиматор, акусто-оптическую ячейку (АОЯ), линзу L, фотоприемник на фотодиоде (ФД), осциллограф (Осц.), усилитель мощности (УМ), генератор импульсов (ГИ), генератор радиочастоты (ГРЧ). Лазер и оптические элементы закреплены в юстировочных механизмах и размещены на

оптической скамье. В качестве источника анализируемого сигнала используется высокочастотный генератор (ГРЧ), модулируемый генератором импульсов.

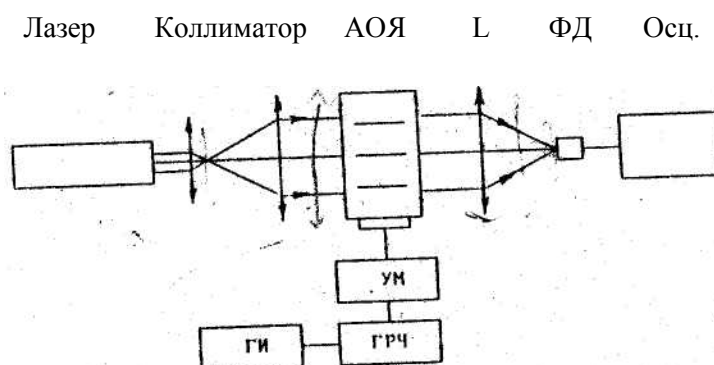


Рисунок 3 – Схема лабораторной установки

2.3. Порядок проведения работы.

2.3.1. Исследование рабочего диапазона частот анализатора спектра

1. Включить блоки питания лазера и усилителя мощности, ВЧ генератор и осциллограф.

2. С помощью линзы L сфокусировать дифрагированный луч на фотодиоде.

3. Изменяя частоту ВЧ генератора, снять зависимость сигнала с фотодиода от частоты. Построить график. Найти диапазон частот, в котором сигнал с фотодиода изменяется не более, чем на 3 дБ.

2.3.2. Исследование разрешающей способности по частоте

1. Убрать линзу L.

2. Установить фотодиод в фокальной плоскости линзы L.

3. Изменяя частоту ВЧ генератора, совместить дифрагированный луч с фотодиодом.

4. Плавное изменение частоты ВЧ генератора, снять зависимость сигнала с фотодиода от частоты ВЧ генератора. Построить график.

2.3.3. Исследование спектров радиосигналов

1. Установить на ВЧ генераторе режим внешней импульсной модуляции. Включить генератор импульсов и подать сигнал с его выхода на вход модуляции ВЧ генератора.

2. Перемещая фотодиод, снять зависимость сигнала с фотодиода от величины перемещения. Построить график.

2.4. Контрольные вопросы

1. Какие существуют режимы дифракции света на ультразвуке?
2. Чем различается дифракция света на акустических волнах и на дифракционной решетке?
3. Какие материалы используются в качестве светозвукопровода и ультразвукового преобразователя акусто-оптической ячейки?
4. Каковы основные характеристики акусто-оптического анализатора спектра радиосигналов?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свет В. Д. Оптические методы обработки сигналов. - М.: Энергия, 1971.
2. Кондратенков Г. С. Обработка информации когерентными оптическими системами. - М.: Сов. Радио, 1972.
3. Оптическая обработка радиосигналов в реальном времени / Под ред. СВ. Куликова. - М.: Радио и связь, 1989.
4. Верецагин И. К., Косяченко Л. А., Кокин С. М. Введение в оптоэлектронику. - М.: Высш. школа, 1991.
5. Акаев А.А., Майоров С. А. Оптические методы обработки информации. - М.: Высш. школа, 1988.

