А. В. Володько, С. М. Фёдоров, И. С. Бобылкин, Э. Э. Каграманов

ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА В РАДИОТЕХНИКЕ

Лабораторный практикум



Воронеж 2021

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

А. В. Володько, С. М. Фёдоров, И. С. Бобылкин, Э. Э. Каграманов

ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА В РАДИОТЕХНИКЕ

Лабораторный практикум

Воронеж 2021

Рецензенты:

кафедра основ радиотехники и электроники Воронежского института ФСИН России (начальник кафедры канд. техн. наук, доцент Р. Н. Андреев); кафедра информационной безопасности и систем связи Международного института компьютерных технологий (г. Воронеж) (зав. кафедрой канд. техн. наук, доцент О. С. Хорпяков)

Володько, А. В.

Оптические устройства в радиотехнике: лабораторный практикум. [Электронный ресурс]. – Электрон. Текстовые и граф. Данные (Мб) / А. В. Володько, О-60 С. М. Фёдоров, И. С. Бобылкин, Э. Э. Каграманов – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2021 – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): цв. – Систем. требования: ПК 500 и выше; 256 мб ОЗУ; Windows XP; SVGA с разрешением 1024х768; Adobe Acrobat; CDROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана

ISBN

Лабораторный практикум предназначен для изучения оптический устройств в радиотехнике. В нем рассматриваются перспективы исследуемых средств связи, сопутствующие параметры, основные понятия, принципы работы, разновидности и методы использования оптических системах передачи информации, приведены примеры использование существующих линий оптической связи и проведен их сравнительный анализ, а также описание лабораторных занятий с использованием специального оптического оборудования: система аналоговой оптический приемопередачи информации «ЛУЧ», система цифровой оптический приемопередачи информации «ЛУЧ», различные виды оптических резонаторов.

Издание предназначено для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» (специальность «Радиоэлектронные системы передачи информации») по дисциплине «Основы лазерных систем передачи информации».

Ил. 46. Табл. 6. Библиогр.: 35 назв.

УДК 681.7:621.396.6(075.8) ББК 22.324:22.34:32.84я7

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

> © Володько А. В., Фёдоров С. М., Бобылкин И. С., Каграманов Э. Э., 2021 © ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2021

ISBN

Современное общество все больше и больше нуждается в высокоскоростных системах связи в сфере передачи и получения информации. С каждым годом объем трафика в теле и интернет-коммуникациях значительно возрастает. В таких условиях кабельные линии работающие по средством передачи электрического сигнала не способны обеспечить достаточную пропускную способность. Помимо этого, они имеют ряд таких проблем, как: подверженность влиянию электромагнитных помех, эффект переходного затухания, необходимость заземления и т.д.

Решением проблемы является использование оптических методов передачи использованием оптоволоконных информации с технологий связи И современных оптоэлектроники. изобретения достижений С момента полупроводниковых лазеров исследования позволили создать оптические методы передачи информации, которые позволяют организовать передачу данных с помощью светового луча этих лазеров на очень большие расстояния. Эта технология связи с помощью оптического волокна теперь активно используется в теле и интернет-коммуникациях. Оптические линии связи обладают хорошей помехозащищенностью, высокой пропускной способностью, химической устойчивостью, низким показателем задержки сигнала И долговечностью. Таким образом, актуальность исследования оптических линий связи продиктована огромными преимуществами в сравнение с электрическими аналогами.

Целью представленного лабораторного практикума является предоставление студенту сведений об оптическом способе приемопередачи информации в оптоволоконных линиях связи и свободном пространстве, характеристиках и параметрах линий связи, перспективе развития, видах модуляции и мультиплексирования.

Лабораторный практикум содержит 2 части. Первая часть является совокупностью теоретических сведений. Вторая часть является лабораторным практикумом, состоящим из 4 лабораторных работ: исследование оптической аналоговой линии связи, исследование оптической цифровой линии связи и исследование параметров открытых оптических резонаторов.

3

1. ИСТОРИЧЕСКАЯ ПЕРСПЕКТИВА ОПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ В РАДИОТЕХНИКЕ

Использование света в целях коммуникации восходит к древности если оптическая связь интерпретируется в широком смысле, подразумевая любую схему связи, которая использует свет. Большинство цивилизаций использовали зеркала, огненные маяки или дымовые сигналы для передачи одного фрагмента информации (например, победы в войне). Утверждается, что греки построили в 1084 году до нашей эры линии огненных маяков протяженностью 500 км для передачи новостей о падении Трои [1]. Основным ограничением такой схемы является то, что информационное содержание по своей сути ограничено и должно быть согласовано заранее. На протяжении истории делались попытки информации. Для увеличить количество передаваемой этой цели североамериканские индейцы изменяли цвет дымового сигнала. Аналогичным образом, внутри маяков использовались ставни для включения и выключения сигнала маяка через определенные промежутки времени. Эта идея не слишком далека от наших современных схем, в которых информация кодируется в свете, излучаемом лазером, путем его модуляции с высокой скоростью [2].

Несмотря на такие схемы, расстояние, а также скорость передачи информации с использованием семафорных устройств были весьма ограничены даже в восемнадцатом веке. Большой прогресс произошел в 1792 году, когда Клод Шапп предложил идею передачи механически закодированных сообщений на большие расстояния с помощью промежуточных ретрансляционных станций (на расстоянии 10-15 км) [3]. Шаппе назвал свое изобретение оптическим телеграфом и разработал схему кодирования, показанную на рис. 1. Для представления всего алфавита используются разные положения двух игл. Это позволило передавать целые предложения на большие расстояния. Первый такой оптический телеграф был введен в эксплуатацию в июле 1794 года между Парижем и Лиллем (два французских города на расстоянии около 200 км). К 1830 году сеть распространилась по всей Европе [4]. Роль света в таких системах состояла в видимости кодированных сигналов, чтобы они могли быть перехвачены ретрансляционными станциями. Оптомеханические системы связи левятналцатого века были естественно медленными. В современной терминологии эффективная скорость передачи данных таких систем была менее 1 бит/с.



Рис. 1. Система кодирования Клода Шаппе

электрического телеграфа 1830-x Появление В годах заменило электричеством. света С этого момента использование настала эра электрических коммуникаций [5]. Благодаря разработке и внедрению новых систем кодирования информации скорость передачи увеличилась до нескольких Использование ретрансляторов облегчило осуществление связи на бит/с. дальних расстояниях. В 1866 году была организована первая трансатлантическая телеграфная линия связи. В телеграфии использовалась цифровая схема с двумя электрическими импульсами разной длительности (точки и тире кода Морзе). Изобретение телефона в 1876 году принесло значительные изменения, так как электрические сигналы передавались в аналоговой форме через постоянно меняющийся электрический ток [6]. Аналоговые электрические методы доминировали в системах связи вплоть до перехода на оптические схемы 100 лет спустя.

Развитие всемирной телефонной сети в течение двадцатого века привело ко многим достижениям в системах электросвязи. Использование коаксиальных кабелей проводов значительно увеличило пропускную вместо витых способность системы. Первой линией коаксиального кабеля, введенной в эксплуатацию в 1940 году, была система с частотой 3 МГц, способная передавать 300 голосовых каналов (или один телевизионный канал). Но пропускная способность коаксиальных линий была ограничена. На частотах выше 10 МГц начинали возникать потери. Это послужило толчком к созданию микроволновой связи, в основе которой лежит технология передачи информации с помощью электромагнитных волн в диапазоне 1-10 ГГц. Первая микроволновая система, работающая на несущей частоте 4 ГГц, была введена в эксплуатацию в 1948 году. Как коаксиальная, так и микроволновая системы могут работать со скоростью 100 Мбит/с. Самая совершенная коаксиальная система была введена в эксплуатацию в 1975 году и работала со скоростью передачи данных 274 Мбит/с. Серьезным недостатком высокоскоростных коаксиальных систем было их малое расстояние между повторителями (1 км), что требовало чрезмерной регенерации сигналов и делало такие системы дорогими в эксплуатации. В большинстве случаев микроволновые системы связи могли функционировать при больших дистанциях между повторителями. Но при этом скорость передачи данных также была около 100 Мбит/с.

Все предыдущие схемы теперь классифицируются под общим заголовком телекоммуникационных систем. Телекоммуникационная система передает информацию из одной точки в другую, как на несколько километров, так и на расстояние между океанами. Возможно, но не обязательно задействовать оптику. Оптический телеграф Клода Шаппе можно назвать первой оптической телекоммуникационной системой, которая распространилась по всей Европе за 40-летний период с 1800 по 1840 год. Однако вскоре ее затмили электрические телекоммуникационные системы на основе телеграфа и телефонных линий. К 1950 году ученые снова стали искать оптику, чтобы предлагать решения для повышения пропускной способности телекоммуникационных систем. Однако в 1950-х годах ни когерентного оптического источника, ни подходящей среды передачи не было. Изобретение лазера и его демонстрация в 1960 году решили первую проблему. Затем внимание было сосредоточено на поиске путей использования лазерного света для оптической связи. Многие идеи были выдвинуты в 1960-х годах [7], наиболее примечательной из которых была идея удержания света с использованием последовательности газовых линз [8].

Оптические волокна были доступны В течение 1960-x годов И использовались для изготовления гастроскопов и других устройств, для которых требовалась только короткая длина волокна [9]. Однако никто серьезно не относился к их использованию для оптической связи. Основной трудностью являлось то, что оптические волокна, доступные в 1960-х годах, имели такие большие потери, что только 10% света, попадающего на один конец, выходил из другого конца волокна, длина которого составляла всего несколько метров. Большинство инженеров игнорировали их для телекоммуникационных приложений, где свет должен был транспортироваться как минимум на несколько километров. В 1966 году было высказано предположение, что потери оптических волокон могут быть значительно сокращены путем удаления примесей из кварцевого стекла, используемого для их изготовления, и что такие волокна с низкими потерями могут быть лучшим выбором для оптической связи [10]. Действительно, Чарльз Као был удостоен половины благородной премии в 2009 году за новаторские достижения в области передачи света в волокнах для оптической связи [11]. Использование стеклянных волокон для оптической связи было революционной идеей, поскольку волокна способны направлять свет таким же образом, как и удержание электронов внутри медных проводов. В результате их можно использовать так же, как обычно используют электрические провода.

Однако, прежде чем оптические волокна можно было использовать для оптической связи, их потери пришлось снизить до приемлемого уровня. Эту задачу принял Corning, американская компания, расположенная недалеко от Рочестера, штат Нью-Йорк. Прорыв произошел в 1970 году, когда трое ученых Corning опубликовали статью, в которой указывалось, что им удалось снизить потери волокна до уровня ниже 20 дБ/км в области длин волн около 630 нм [12]. Два года спустя та же команда Corning произвела волокно с потерями всего 4 дБ/км, заменив титан германием в качестве легирующей примеси внутри кремнеземной сердцевины волокна. Вскоре после этого многие промышленные лаборатории начали борьбу за дальнейшее снижение потерь волокна. Гонка была выиграна в 1979 году японской группой, которая смогла снизить потери оптического волокна до почти 0,2 дБ/км в области длин волн инфракрасного излучения около 1,55 мкм [13]. Эта величина была близка к фундаментальному пределу, установленному явлением рэлеевского рассеяния. Даже современные волокна демонстрируют значения потерь, аналогичные тем, о которых впервые было сообщено в 1979 году.

В дополнение к оптическим волокнам с низкими потерями для перехода от микроволн к оптическим волнам также требовался компактный и эффективный лазер, выход которого мог бы модулироваться для наложения информации, которая должна была передаваться по таким волокнам. Лучшим типом лазера для этой цели был полупроводниковый лазер. К счастью, когда Corning анонсировала свое волокно с низкими потерями в 1970 году, полупроводниковые лазеры GaAs, работающие непрерывно при комнатной температуре, были продемонстрированы двумя группами, работающими в России [14] и в Bell Laboratories [15]. Одновременное наличие компактных оптических источников и оптических волокон с низкими потерями привело к всемирным усилиям по разработке волоконно-оптических систем связи [16].

Системы первого поколения были спроектированы для работы на скорости спектра, 45 Мбит/с В ближней инфракрасной области поскольку полупроводниковые лазеры GaAs используются для излучения света на длинах волн около 850 нм. Так, как потери волокна на этой длине волны были близки к 3 дБ/км, оптический сигнал необходимо было регенерировать каждые 10 км или около того, используя так называемые повторители. Это может звучать как серьезное ограничение, но это было лучше, чем преобладающая технология коаксиального кабеля, которая требовала регенерации каждый километр или около того. Обширные лабораторные разработки вскоре привели к нескольким успешным полевым испытаниям. АТ & Т отправила свои первые тестовые сигналы 1 апреля 1977 года в чикагском районе Луп. Три недели спустя компания General Telephone and Electronics отправила прямой телефонный трафик со скоростью 6 Мбит/с в Лонг-Бич, штат Калифорния. За ним последовало Британское почтовое отделение, которое начало отправлять телефонный трафик в реальном времени по оптоволоконному кабелю возле Мартлшам Хит, Великобритания. За ЭТИМИ испытаниями последовало

дальнейшее развитие, и коммерческие системы начали устанавливаться в 1980 году. Наступила новая эра волоконно-оптических систем связи. Хотя это и не осознавалось в то время, оно было готово произвести революцию в том, как люди жили и взаимодействовали. Это стало очевидным только после появления Интернета в течение десятилетия 1990-х годов.

Обычно показателем качества в системе связи используется произведение скорости передачи данных в битах (В) на расстояние между ретрансляторами (L), после которого оптический сигнал должен быть восстановлен для поддержания его точности [2]. На рис. 2 показано, как коэффициент BL увеличился в 1018 раз за счет технологических достижений за последние 180 лет. Аббревиатура WDM на этом рисунке обозначает мультиплексирование с разделением по длине волны - метод, используемый после 1992 года для передачи нескольких каналов на разных длинах волн через одно и то же волокно. Его использование настолько расширило возможности волоконно-оптических систем связи, что к 1996 году была реализована передача данных со скоростью 1 Тбит/с. Аббревиатура SDM расшифровывается как мультиплексирование с пространственным разделением - метод, используемый после 2010 года для дальнейшего повышения пропускной способности оптоволоконных сетей в ответ на продолжающийся рост трафика данных в Интернете (с появлением потоковой передачи видео такими компаниями, как YouTube и Netflix) и фундаментальные ограничения пропускной способности одномодовых оптоволоконных кабелей. Две особенности на рис. З заслуживают внимания. Во-первых, прямая линия на этом экспоненциальный рисунке указывает на рост из-за использования логарифмической шкалы для данных, нанесенных на ось Υ. Во-вторых, внезапное изменение наклона линии около 1977 года указывает на то, что использование оптических волокон ускорило экспоненциальный рост ознаменовало начало новой эры оптической связи.



Рис. 2. Увеличение коэффициента BL в период 1840-2015

2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОБ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

2.1. Оптические передатчики и приемники

Прежде чем описывать технологии, используемые для продвижения современного уровня техники оптических систем связи, полезно взглянуть на функциональную схему типовой системы связи на рис. 3. Она состоит из оптического передатчика и оптического приемника, подключенного к двум концам канала связи, который может быть коаксиальным кабелем (или просто воздушным) для систем электросвязи, но принимает форму оптического волокна для всех волоконно-оптических систем связи.



Рис. 3. функциональная схема типовой системы связи

Роль оптических передатчиков состоит в том, чтобы преобразовать информацию, имеющуюся в электрической форме, в оптическую и передать ее через канал связи. На рис. 4 продемонстрирована типичная функциональная схема оптического передатчика, состоящего из оптического источника, модулятора данных и электронных схем, используемых для их получения. Полупроводниковые лазеры обычно используются в качестве оптических источников, хотя светодиоды также могут использоваться для некоторых менее требовательных задач. В обоих случаях выходной сигнал источника имеет форму электромагнитной волны постоянной амплитуды. Роль модулятора заключается в наложении электрических данных на эту несущую волну путем изменения ее амплитуды, фазы или их обоих. В менее требовательных задачах ток, вводимый в сам полупроводниковый лазер, модулируется напрямую, что устраняет необходимость в дорогостоящем модуляторе.



Рис. 4. Функциональная схема оптического передатчика

Роль оптических приемников заключается в восстановлении исходных электрических данных из оптического сигнала, полученного на выходном конце канала связи. На рис. 5 показана функциональная схема оптического приемника.



Рис. 5. Функциональная схема оптического приемника

Оптический приемник состоит из фотоприемника и демодулятора, а также электронных схем, используемых для их получения. Полупроводниковые фотодиоды используются в качестве детекторов из-за их компактных размеров и низкой стоимости. Конструкция демодулятора зависит от схемы модуляции, используемой в передатчике. Многие системы оптической связи используют двоичную схему, называемую модуляцией интенсивности С прямым обнаружением. Демодуляция в этом случае выполняется схемой принятия решения, которая идентифицирует входящие биты как 1 или 0, в зависимости от амплитуды электрического сигнала. Все оптические приемники допускают некоторые ошибки из-за ухудшения качества любого оптического сигнала во время его передачи и обнаружения, при этом основным источником шума является дробовой. Производительность цифровой системы световых волн характеризуется частотой ошибок по битам. Обычно его определяют как среднюю вероятность неправильной идентификации. Коды с исправлением ошибок иногда используются для улучшения необработанного коэффициента ошибок по битам в оптической системе связи.

2.2. Оптические волокна и кабели

Большинство людей знают, слушая радио или смотря телевизор, что электромагнитные волны могут передаваться по воздуху. Однако для систем оптической связи требуются электромагнитные волны, частоты которых лежат в видимой или ближней инфракрасной области. Хотя такие волны могут распространяться по воздуху на короткие расстояния в хороших погодных условиях, этот подход не подходит для создания оптических сетей связи, охватывающих весь мир. Оптические волокна решают эту проблему и пропускают свет на большие расстояния независимо от погодных условий, ограничивая оптическую волну вблизи микроскопической цилиндрической стеклянной сердцевины с помощью явления, известного как полное внутреннее отражение.

На рис. 6 показана структура оптического волокна, предназначенного для поддержки одной пространственной моды путем уменьшения диаметра его сердечника до уровня ниже 10 мкм.



Рис. 6. Внутренняя структура одномодового волокна

В случае многомодового волокна с градиентным индексом диаметр сердечника обычно составляет 50 мкм. Сердцевина изготовлена из кварцевого стекла и легирована германием, чтобы немного увеличить свой показатель преломления (примерно на 0,5%) по сравнению с окружающей оболочкой, также изготовленной из кварцевого стекла. Буферный слой наносится поверх облицовки перед тем, как надеть пластиковую оболочку. Наружный диаметр всей конструкции настолько мал, что волокно практически невидно. Прежде чем его можно будет использовать для передачи информации, в кабель помещается одно или несколько оптических волокон, диаметр которых может варьироваться от 1 до 20 мм, в зависимости от предполагаемого применения.

Что происходит с оптическим сигналом, передаваемым через оптическое волокно? В идеале, сигнал не должен быть изменен волокном вообще. На практике он становится слабее из-за неизбежных потерь и искажается из-за таких явлений, как хроматическая дисперсия и нелинейность Керра [2]. Потери были ограничивающим фактором до 1970 года, когда впервые было произведено волокно с управляемыми потерями [12]. В течение десятилетия 1970-х годов потери еще более сократились, и к 1979 году они были снижены до уровня всего 0,2 дБ/км на длинах волн около 1,55 мкм. Рис. 7 показывает зависимость потерь мощности сигнала от длины волны, измеренных для кварцевого волокна [13]. Многочисленные пики на экспериментальной кривой обусловлены наличием остаточных паров воды. Пунктирная линия, обозначенная рэлеевским рассеянием, указывает на то, что, помимо водяных паров, большую часть потерь можно отнести к фундаментальному явлению рэлеевского рассеяния, которое отвечает за синий цвет нашего неба. Действительно, хотя пики воды в современных волокнах почти исчезли, их потери не сильно изменились, поскольку они все еще ограничены рассеянием Рэлея.



Рис. 7. Зависимость потерь мощности от длины волны, измеренная в 1979 году для кварцевого волокна с низкими потерями

2.3. Оптическая передача данных в свободном пространстве

Оптическая передача данных в свободном пространстве – это способ реализации оптической связи в окружающей среде (вакуум, атмосфера, космос). Для связи используются электромагнитные волны инфракрасного диапазона.

Основой беспроводной оптической системы является технология организации высокоскоростных каналов связи с помощью инфракрасного излучения. Оно делает возможным организацию передачи информации между приемниками без использования оптического волокна.

Данная технология основана на модуляции электрического сигнала в оптический и его передачи в инфракрасном спектре через окружающее пространство. Передача осуществляется с помощью полупроводникового лазерного диода высокой мощности. Сигнал поступает на передающее устройство, в котором производится исправление ошибок с помощью помехоустойчивого кодирования. Далее происходит модуляция лазерным излучателем и фокусировка оптической системой в коллимированный луч, направленный в сторону приемника.

На приемнике, с помощью оптической системы, сигнал фокусируется на высокочувствительный фотодиод, который преобразует оптический сигнал в электрическую форму. Необходимо отметить, что чем выше частота (до 1,5 ГГц), тем больше объём передаваемой информации. Следующим шагом является демодуляция сигнала и преобразование его в определённую форму выходного интерфейса.

Для большинства существующих систем длина волны находится в диапазоне 700-950 нм или 1550 нм. Этот параметр зависит от используемого лазерного диода.

Главным принципом атмосферной оптоволоконной линии связи является следующее заключение: чем больше продолжительность простоя по причине погодных явлений, тем больше дистанция приемо-передатчиков канала связи.

Часто в комплект АОЛС добавляется радиоканал для организации резервной линии связи.

Применяется данная технология может в следующих случаях:

- 1. Организация связи между строениями различного назначения;
- 2. Соединение узла связи и базовой станции;
- 3. Связь объектов в условиях отсутствия возможности реализации кабельной системы;
- 4. Необходимость создание временного, быстроразвертываемого соединения;
- 5. Создание защищенного канала, не являющегося источником радиопомех и защищенного от них.

2.4. Форматы модуляции

Первым шагом в разработке любой оптической системы связи является определение того, как электрические двоичные данные будут преобразованы в оптический поток битов. Как упоминалось ранее, для этой цели используется электрооптический модулятор. В простейшем методе используются оптические импульсы. Наличие импульса во временном интервале бита соответствует 1, а его отсутствие указывает на 0 бит. Это называется включением/выключением, поскольку оптический сигнал либо «выключен», либо «включен» в зависимости от того, передается ли бит 0 или 1.

Есть еще два формата результирующего оптического битового потока. Они показаны на рис. 8 и известны как форматы с возвратом к нулю (BH) и без возврата к нулю (БВН).



Рис. 8. Цифровой битовый поток 010110, кодируется с использованием форматов возврата к нулю (ВН) и форматов без возврата к нулю (БВН)

В формате ВН каждый оптический импульс, представляющий бит 1, короче, чем битовый интервал, и его амплитуда возвращается к нулю, прежде чем длительность бита истечет. В формате БВН оптический импульс остается включенным во всем битовом интервале, и его амплитуда не падает до нуля между двумя или более последовательными единичными битами. В результате временная ширина импульсов изменяется в зависимости от битовой комбинации, тогда как она остается неизменной в случае формата ВН. Преимущество формата БВН заключается в том, что полоса пропускания, связанная с битовым потоком, уменьшается примерно в 2 раза просто потому, что переходы включениявыключения происходят реже. По этой причине в системах электросвязи используется формат БВН ввиду их ограниченной полосы пропускания. Пропускная способность оптических систем связи достаточно велика, поэтому формат ВН можно использовать без особых проблем. Однако изначально использовался формат БВН. Переход на формат ВН был осуществлен только после 1999 года, когда выяснилось, что его использование помогает в разработке мощных световых систем. В настоящее время формат ВН используется исключительно для систем WDM, отдельные каналы которых предназначены для работы на скоростях, превышающих 10 Гбит/с.

2.5. Мультиплексирование каналов

Дo появления Интернета передачи информации чаще всего для телефоны. электрический использовались Когда аналоговый сигнал, человеческий представляющий голос, оцифровывается, результирующий цифровой сигнал содержит 64 000 битов в течение каждой длительности в одну секунду. Скорость передачи такого оптического потока битов составляет 64 кбит/с. Так, как волоконно-оптические системы связи способны передавать данные со скоростью до 40 Гбит/с, было бы огромной тратой полосы если бы один телефонный звонок пропускания, был отправлен по оптоволоконному кабелю. Чтобы полностью использовать пропускную

14

способность системы, необходимо передавать множество голосовых каналов одновременно через мультиплексирование. Это может быть выполнено посредством мультиплексирования с временным разделением (TDM) или WDM. В случае TDM биты, связанные с различными каналами, чередуются во временной области, чтобы сформировать составной поток битов. Например, битовый интервал составляет около 15 мкс для одного речевого канала, работающего со скоростью 64 кбит/с. Пять таких каналов могут быть мультиплексированы через TDM, если потоки битов последовательных каналов задерживаются на 3 мкс. На рис. 9 схематически показан результирующий поток битов с комбинированной скоростью передачи 320 кбит/с.



Рис. 9. Мультиплексирование с разделением по времени пяти цифровых речевых каналов, работающих со скоростью 64 кбит/с

В случае WDM каналы разнесены в частотной области. Каждый канал переносится своей собственной несущей волной. Несущие частоты разнесены больше, чем ширина полосы канала, поэтому спектры канала не перекрываются, как видно на рис. 10. WDM подходит как для аналоговых, так и для цифровых сигналов и используется для трансляции радио- и телевизионных каналов. TDM легко реализуется для цифровых сигналов и обычно используется для телекоммуникационных сетей.



Рис. 10. Мультиплексирование с разделением по длине волны трех аналоговых или цифровых сигналов

Концепция TDM была использована для формирования цифровых иерархий. В Северной Америке И Японии первый уровень соответствует мультиплексированию 24 голосовых каналов с совместной скоростью передачи данных 1,544 Мбит/с. В то время в Европе 30 каналов мультиплексируются, из чего следует совместная скорость передачи данных 2,048 Мбит/с. Скорость передачи мультиплексированного сигнала немного больше, чем простое произведение 64 кбит/с на количество каналов из-за дополнительных битов управления, которые добавляются для разделения каналов на стороне приемника. Иерархия второго уровня получается путем мультиплексирования четырех каналов DS-1. Это приводит к скорости передачи данных 6,312 Мбит/с (иерархия DS-2) для Северной Америки и 8,448 Мбит/с для Европы. Эта процедура продолжается для получения иерархий более высокого уровня.

Отсутствие международного стандарта в телекоммуникационной отрасли в 1980-х годах привело к появлению нового стандарта, сначала названного синхронной оптической сетью (SONET), а затем названного синхронной цифровой иерархией (SDH). Он определяет синхронную структуру кадра для передачи цифровых сигналов TDM. Базовый блок SONET имеет скорость Мбит/с. данных 51,84 Соответствующий оптический передачи сигнал называется ОС-1, где ОС обозначает оптическую несущую. Базовый блок SDH имеет скорость передачи данных 155,52 Мбит/с и называется STM-1, где STM обозначает синхронный транспортный модуль. Полезной особенностью SONET и SDH является то, что более высокие уровни имеют скорость передачи, которая является точным кратным базовой скорости передачи. В табл. 1 приведено соответствие между скоростями битов SONET и SDH для нескольких уровней.

SONET	SDH	Мб/с	Канал
OC-1		51,84	672
OC-3	STM-1	155,52	2016
OC-12	STM-4	622,08	8064
OC-48	STM-16	2488,32	32,256
OC-192	STM-64	9953,28	129,024
OC-768	STM-256	39813,12	516,096

Скорости SONET / SDH

Таблица 1

К 2002 году стали доступны коммерческие системы STM-256 (OC-768), работающие на скорости около 40 Гбит/с. Один такой оптический канал передает более полумиллиона телефонных разговоров по одному оптическому волокну. Если метод WDM используется для передачи 100 каналов на разных длинах волн, одно волокно может одновременно передавать более 50 миллионов телефонных разговоров.

Создание такой системы, как волновое мультиплексирование дало возможность увеличить скорость передачи информации по одной линии в

несколько раз. К 2003 году с помощью технологии спектрального уплотнения получилось достигнуть скорости передачи информации в 10,92 Тбит/с. Это 273 оптических канала по 40 Гбит/с.

В 2009 году исследовательская лаборатория Белла с помощью технологии мультиплексирования 155 каналов по 100 Гбит/с каждый, смогла осуществить передачу информации со скоростью 15,5 Тбит/с на дистанцию 7000 км.

В 2013 году исследователи из компании Bell провели испытания технологии шумоподавления. Она позволила осуществить передачу 400 Гб/сек по оптоволоконной линии на 12 800 км без использования повторителей сигнала.

3. ЭВОЛЮЦИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Как упоминалось ранее, начальная разработка волоконно-оптических систем связи началась примерно в 1975 году. Огромный прогресс, достигнутый за 40-летний период с 1975 по 2015 год, можно сгруппировать в несколько отдельных поколений. На рис. 11 показано увеличение коэффициента BL за период 1975–2000 г., которое было определено количественно в различных лабораторных экспериментах [17].



Рис. 11. Увеличение коэффициента BL за период 1975–2000 г.

Прямая линия соответствует удвоению коэффициента BL каждый год. Первые четыре поколения световых систем указаны на рисунке 11. В каждом поколении коэффициент BL сначала увеличивается, но затем начинает насыщаться по мере развития технологии. Каждое новое поколение вносит фундаментальные изменения, которые помогают еще больше повысить производительность системы.

3.1. Первые три поколения

Первое поколение оптических систем связи применялось в оптических передатчиках GaAs на полупроводниковых лазерах, работающих на длине волны

около 850 нм. Оптический поток битов передавался через многомодовые волокна с градиентным индексом до достижения оптического приемника, где он преобразовывался обратно В электрический домен с использованием кремниевого фотоприемника. После нескольких полевых испытаний в течение периода 1977–1979 гг., такие системы стали коммерчески доступными в 1980 г. Они работали со скоростью передачи данных 45 Мбит/с и допускали разнос ретранслятора до 10 км. Большое расстояние между повторителями по сравнению с расстоянием между коаксиальными системами в 1 км было важной мотивацией для разработчиков систем связи, поскольку оно уменьшало затраты на установку и обслуживание, связанные с каждым повторителем. Важно подчеркнуть, что даже системы первого поколения передавали почти 700 телефонных вызовов одновременно по одному оптоволокну с использованием TDM.

Разработчикам было системы очевидно, что расстояние между повторителями может быть значительно увеличено при работе системы в инфракрасной области около 1,3 мкм, где потери в волокне были ниже 1 дБ/км (рис. 7). Кроме того, оптические волокна демонстрируют минимальную дисперсию в этой области длин волн. Эта реализация привела к всемирным усилиям по разработке новых полупроводниковых лазеров и детекторов, основанных на материале InP и работающих около 1,3 мкм. Второе поколение волоконно-оптических систем связи стало доступно в начале 1980-х годов, но их скорость передачи данных изначально была ограничена до 100 Мбит/с из-за дисперсии в многомодовых волокнах. Это ограничение было преодолено с помощью одномодовых волокон. В таких волокнах диаметр сердечника уменьшен до 10 мкм (рисунок 6), так что волокно поддерживает одну Лабораторный пространственную моду. эксперимент В 1981 голу продемонстрировал пропускную способность 2 Гбит/с на 44 км одномодового Вскоре последовало повсеместное внедрение этих систем волокна. В коммерческом секторе. К 1987 году системы второго поколения работали со скоростью передачи информации до 1,7 Гбит/с, а листанция межли ретрансляторными станциями была примерно 50 км.

Дистанция между повторителями для системы второго поколения ограничивалось потерями в волоконной линии на рабочей длине волны 1,3 мкм. На рис. 7 представлено, что потери кварцевых волоконных линий принимают наименьшее значение на длинах волн около 1,55 мкм. Однако внедрение систем оптической связи третьего поколения, работающих на 1,55 мкм, было значительно задержано из-за относительно большой дисперсии одномодовых волокон в этой области спектра. Обычные полупроводниковые лазеры InGaAsP не могли использоваться из-за распространения импульса, возникающего в результате одновременного колебания нескольких продольных мод. Эту проблему дисперсии можно решить либо с помощью волокон со смещенной дисперсией, рассчитанных на минимальную дисперсию около 1,55 мкм, либо путем создания лазеров таким образом, чтобы ИХ спектр содержал доминирующую одиночную продольную моду. Оба подхода были применены в течение 1980-х годов. К 1985 году лабораторные эксперименты показали возможность передачи информации со скоростью до 4 Гбит/с на расстояния, превышающие 100 км. Системы оптической связи третьего поколения, работающие на скорости 2,5 Гбит/с, стали коммерчески доступными в 1990 году, и вскоре их скорость была увеличена до 10 Гбит/с. Наилучшие характеристики были достигнуты при использовании волокон со смещенной дисперсией в сочетании с лазерами, колеблющимися в одном продольном режиме.

Относительно большое расстояние между повторителями систем третьего поколения 1,55 мкм значительно уменьшило необходимость регенерации сигнала. Однако экономическое давление потребовало дальнейшего увеличения его дистанции почти до 100 км. Не было сразу очевидно, как поступить, поскольку потери кварцевого волокна на длине волны 1,55 мкм были ограничены до 0,2 дБ/км фундаментальным процессом рэлеевского рассеяния. Одним из решений было создание более чувствительных оптических приемников, которые могли бы надежно работать при пониженных уровнях мощности. Многие ученые поняли, что расстояние между повторителями можно увеличить, используя схему гетеродинного детектирования (аналогичную той, которая используется для радио- и микроволн), поскольку для ее использования потребуется меньше энергии на оптическом приемнике. Такие системы назывались когерентными системами световых волн и находились в процессе разработки во всем мире в течение 1980-х годов. Однако развертывание таких систем было отложено с появлением в 1989 году волоконных усилителей, в которых использовались полупроводниковые лазеры, и они были способны повысить мощность сигнала в несколько сотен раз.

3.2. Четвертое поколение

К 1990 году внимание разработчиков систем переключилось на использование трех новых идей:

1. Периодическое оптическое усиление для управления потерями в волокне;

2. Периодическая компенсация дисперсии для управления дисперсией волокна;

3. WDM для повышения пропускной способности системы.

Как показано на рис. 12, в методе WDM используются несколько лазеров на нескольких разных длинах волн, так что несколько потоков данных передаются одновременно по одному и тому же оптическому волокну. Основная идея WDM не была новой, поскольку этот метод уже использовался на радио- и микроволновых частотах (например, телевизионной промышленностью). Однако его применение на оптических длинах волн потребовало разработки большого количества новых устройств в течение нескольких лет. Например, оптические мультиплексоры и демультиплексоры, которые могут объединять и разделять отдельные каналы на двух концах оптоволоконного канала, были критическими компонентами для появления систем WDM.



Рис. 12. Схема системы связи WDM

Четвертое поколение систем оптической связи использовало оптические усилители для увеличения расстояния между повторителями в сочетании с технологией WDM для увеличения пропускной способности системы. Как показано на рис. 11 с появлением технологии WDM в 1992 году началась революция, которая привела к удвоению пропускной способности системы каждые 8 месяцев или около того и привела к тому, что к 1996 году системы со световыми волнами работали со скоростью передачи данных 1 Тбит/с. В большинстве систем WDM потери волокна периодически компенсируются с помощью волоконно-оптических усилителей на эрбии, расположенных на расстоянии 60-80 км друг от друга. Такие системы WDM, работающие на скоростях до 80 Гбит/с, были коммерчески доступны к концу 1995 года. Исследователи во всем мире раздвигали предел технологии WDM. К 1996 году три исследовательские группы сообщили, что в ходе сессии по оптиковолоконной связи, которая состоялась после крайнего срока, они смогли использовать системы WDM с общей пропускной способностью более 1 Тбит/с. Это увеличило производительность системы в 400 раз за 6 лет.

Акцент большинства систем WDM заключается в передаче как можно большего количества оптических каналов по одному волокну путем добавления все большего числа лазеров, работающих на разных длинах волн. Разнос частот между двумя соседними каналами выбирается настолько малым, насколько это возможно, но он должен быть больше, чем ширина полосы каждого канала. При скорости передачи 40 Гбит/с разнос каналов 50 ГГц является наименьшим, который можно использовать. Агентство по стандартизации МСЭ назначило набор фиксированных частот для коммерческих систем WDM, использующих этот разнос каналов 50 ГГц. Все эти частоты лежат в области длин волн около 1550 нм, где потери в волокнах наименьшие. Диапазон длин волн 1530–1570 нм называется полосой С (С обозначает обычную), и большинство коммерческих

систем WDM предназначены для работы в этой полосе. Однако полосы S и L, лежащие на коротко- и длинноволновой стороне полосы C, соответственно, также используются при необходимости. Этот подход привел в 2001 году к эксперименту со скоростью 11 Тбит/с, в котором 273 канала, каждый из которых работал на скорости 40 Гбит/с, были переданы на расстояние 117 км [18]. Учитывая, что системы первого поколения имели пропускную способность 45 Мбит/с в 1980 году, примечательно, что использование WDM увеличило пропускную способность системы более чем в 200 000 раз за период в 21 год.

3.3. Пятое поколение

Несмотря на два серьезных экономических спада, с 2000 года был достигнут значительный прогресс в разработке современных систем оптической связи, что привело к появлению пятого и шестого поколений таких систем. В центре внимания систем пятого поколения было сделать системы WDM более эффективными в спектральном плане. Это было достигнуто путем возрождения схемы когерентного обнаружения, которая была изучена в конце 1980-х годов, но заброшена вскоре после того, как стали доступны оптоволоконные оптические усилители. Когерентные приемники, способные обнаруживать как амплитуду, так и фазу оптического сигнала с помощью гетеродинной схемы, были разработаны вскоре после 2000 года. Их коммерческая доступность в конце десятилетия позволила разработчикам систем использовать расширенные форматы модуляции, в которых информация кодируется с использованием обоих амплитуда и фаза оптического носителя.

Основную концепцию можно понять из рис. 13, показывающий четыре формата модуляции с использованием так называемой диаграммы созвездия, которая отображает действительные и мнимые части сложного электрического поля вдоль осей х и у соответственно.



Рис. 13 - Диаграммы созвездий для (a) ASK, (b) PSK, (c) QPSK и (d) многоуровневых форматов QPSK [15]

Первая конфигурация представляет собой стандартный двоичный формат, называемый амплитудно-сдвиговым ключом (ASK), в котором амплитуда или напряженность электрического поля принимает два значения, отмеченных кружками и представляющих 0 и 1 бит цифрового сигнала. Вторая конфигурация представляет собой другой двоичный формат, называемый фазовой

манипуляцией (PSK), в котором амплитуда остается постоянной, но фаза электрического поля принимает два значения, например 0 и π , которые представляют биты 0 и 1 цифрового сигнала. На рис. 13 показан третья часть (с) - четвертичный формат PSK (или QPSK), в котором оптическая фаза принимает четыре возможных значения. Этот случай позволяет уменьшить ширину полосы сигнала, поскольку два бита могут передаваться в течение каждого временного а эффективная скорость передачи битов уменьшается вдвое. интервала. Заимствуя терминологию микроволновой связи, уменьшенная скорость передачи в битах называется скоростью передачи символов (или скоростью передачи). Последний пример в. На рис. 13 показано, как концепция символа может быть расширена до многоуровневого положения сигнала, так, что каждый символ несет 4 бита или более. Дополнительный коэффициент может быть получен, если один передает два ортогонально поляризованных символа одновременно в течение каждого временного интервала символа. Этот метод называется мультиплексированием с разделением по поляризации.

Концепция спектральной эффективности, определяемая как число битов, передаваемых за 1 с в пределах полосы пропускания 1 Гц, весьма полезна для понимания влияния когерентного обнаружения в сочетании с форматами фазовокодированной модуляции. Спектральная эффективность WDM систем четвертого поколения, которые использовали ASK в качестве формата модуляции, была ограничена значением ниже 0,8 бит/с/ Гц, поскольку по полосе пропускания 50 ГГц каждого канала WDM можно было передавать не более 40 миллиардов бит/с. Это значение для систем пятого поколения может легко превысить при использовании поляризационного мультиплексирования в с форматом QPSK. На рис. 14 показано, как спектральная сочетании эффективность систем оптической связи развивалась с 1990 года, когда ее значение составляло около 0,05 бит/с/Гц.



Рис. 14. Эволюция спектральной эффективности после 1990 года посредством лабораторных демонстраций

Значения около 2 бит/с/Гц были реализованы к 2005 году, и к 2010 году они приблизились к 10 бит/с/Гц [19].

Доступность когерентных приемников и увеличенные скорости вычислений привели к другому прогрессу после того, как стало понятно, что можно использовать цифровую обработку сигналов для улучшения отношения сигнал/шум (SNR) оптического сигнала, поступающего в приемник. Поскольку когерентный приемник обнаруживает как амплитуду, так и фазу оптического сигнала вместе с его состоянием поляризации, по сути, имеется цифровое представление электрического поля, связанного с оптическим сигналом. В результате для обработки этого цифрового сигнала могут быть разработаны специальные электронные микросхемы, которые могут компенсировать ухудшение, вызванное такими неизбежными факторами, как дисперсия волокна. Можно также реализовать коды с исправлением ошибок и использовать микросхемы кодера и декодера для улучшения частоты ошибок по битам на стороне приемника. Новый рекорд был установлен в 2011 году, когда была реализована передача со скоростью 64 Тбит/с на 320 км одномодового волокна с использованием 640 каналов WDM, которые охватывали полосы С и L с разносом каналов 12,5 ГГц [20]. Каждый канал содержал два поляризованных мультиплексированных сигнала 107 Гбит/с, закодированных в формате модуляции, известном как квадратурная амплитудная модуляция. Такие методы обычно применяются в современных системах оптической связи.

4. ШЕСТОЕ ПОКОЛЕНИЕ

Пропускная способность систем WDM приблизилась к 10 Тбит/с, указывая на то, что 10 триллионов битов можно передавать каждую секунду по одному куску оптического волокна, поддерживающего одну оптическую моду внутри его крошечного ядра (диаметр около 10 мкм), ученые начали думать о предельной пропускной способности одномодового волокна. Концепция пропускной способности канала С была впервые введена Шенноном в статье 1948 года [21], в которой он показал, что SNR устанавливает фундаментальный предел для любого линейного канала связи с конечной шириной полосы пропускания W через удивительно простое соотношение:

$$C = W \log_2(1 + SNR), \tag{1}$$

где *W* – ширина полосы пропускания, мкм;

SNR – отношение сигнал-шум, дБ.

Спектральная эффективность определяется как (2):

$$SE = \frac{c}{W},\tag{2}$$

где *W* – ширина полосы пропускания, мкм;

С – пропускная способность канала, дБ.

Таким образом, ограничивается только SNR принимаемого сигнала и, в принципе, может быть увеличена на неопределенный срок, посылая все более мощные сигналы по каналу. К сожалению, этот вывод не выполняется для оптических волокон, которые по своей природе являются нелинейными и влияют на поток битов, распространяющийся через них нелинейным образом [2].

4.1. Предел пропускной способности одномодовых волокон

В течение десятилетия 2000 г. значительное внимание уделялось оценке предельной пропускной способности одномодовых волокон при наличии различных нелинейных эффектов. В работе, опубликованной в 2010 г. Essiambre et al, смогли разработать общий формализм для его расчета [22]. На рис. 15 показано, как нелинейные эффекты уменьшают спектральную эффективность от ее значения, предсказанного отношением Шеннона, когда запускаются большие мощности сигнала для обеспечения высокого SNR в приемнике. Как и следовало ожидать, спектральная эффективность зависит от расстояния передачи, и она становится хуже с увеличением этого расстояния. Однако самой примечательной особенностью на рис. 15 является то, что при любом расстоянии передачи информации, спектральная эффективность максимальна при оптимальном значении SNR, которое изменяется с расстоянием. Например, спектральная эффективность линии связи длиной 1000 км ограничена 8 бит/с/Гц для одиночной поляризации, независимо от используемого формата модуляции. Это резко контрастирует с предсказанием Шеннона и отражает фундаментальное ограничение, накладываемое нелинейными эффектами.



Рис. 15. Спектральная эффективность как функция SNR, рассчитанная численно, включая нелинейные эффекты на расстояниях передачи в диапазоне от 500 до 8000 км

Можно использовать результаты, показанные на рисунке 16, чтобы оценить предельную пропускную способность одномодового волокна. Полезная ширина полосы кремнеземных волокон в окне с низкими потерями с центром около 1550 нм составляет около 100 нм. Это значение соответствует ширине полосы канала 12,5 ТГц. Используя это значение и максимальную спектральную эффективность около 16 бит/с/Гц (при условии мультиплексирования с разделением по поляризации), максимальная пропускная способность одномодового волокна оценивается в 200 Тбит/с. Это огромное количество, и до недавнего времени считалось, что оно достаточно велико, чтобы разработчики систем не беспокоились об исчерпании своих возможностей. Тем не менее, с момента появления Интернета в начале 1990-х годов объем трафика данных по оптоволоконным сетям постоянно увеличивался, удваиваясь каждые 18 месяцев. В последние годы рост даже ускорился благодаря новым видам деятельности, таким как потоковое видео. Одним из способов удовлетворения спроса будет развертывание все большего количества оптоволоконных кабелей. Тем не менее, этот подход приведет к тому, что все большая часть общей электроэнергии будет расходоваться на поддержку оптических транспортных сетей. Предполагается, что к 2025 году потребность в энергии современных телекоммуникационных систем будет занимать очень большую долю общего энергетического бюджета США, если не будет найден способ проектирования энергоэффективных оптических сетей.

4.2. Мультиплексирование с пространственным разделением

В одном из предложенных решений используется мультиплексирование с пространственным разделением (SDM) для увеличения параметра пропускной способности оптоволоконных систем связи при сниженных энергозатратах на передаваемый бит [23-26]. Основная идея заключается в использовании многомодовых волокон, чтобы несколько битовых потоков WDM могли передаваться по разным режимам одного и того же волокна. Энергетическое преимущество достигается за счет интеграции функциональности ключевых оптических компонентов в меньшее количество устройств. Например, если для усиления всех пространственно- мультиплексированных битовых потоков используется один многомодовый оптический усилитель, вероятно. потребляемая мощность будет ниже по сравнению с использованием отдельных усилителей. По этой причине методика SDM привлекает все большее внимание с 2010 года, и несколько экспериментов по установлению рекордов уже были проведены. Большинство из них используют многоядерные волокна, в которых несколько сердечников имеют одинаковую оболочку. Каждое ядро обычно предназначено для поддержки одного режима, но это не является обязательным требованием. На рис. 16 схематично показана основная идея SDM на примере случая трехжильного волокна.



Рис. 16. Схематическая иллюстрация основной идеи, лежащей в основе метода SDM

Как и в случае технологии WDM, реализация SDM требует не только новых типов волокон, но также многих других активных и пассивных оптических мультиплексоры/демультиплексоры компонентов, таких как модовые И волоконные усилители, которые могут усиливать сигналы BO всех режимах/ядрах одновременно. С 2010 года был достигнут большой прогресс в реализации таких устройств, и многие лабораторные демонстрации показали потенциал SDM для повышения пропускной способности системы [23-26]. На рис. 17 показано, как развивалась пропускная способность систем оптической связи за период с 1980 по 2015 год и охватила все шесть поколений. Одноволновые системы, использующие TDM в электрической области, начинали с пропускной способности ниже 100 Мбит / с в 1980-х годах и работали со скоростью 10 Гбит/с примерно в 1990 году. Появление WDM в начале 1990 года привело к значительному скачку в системе пропускной способности и последующее внедрение когерентного обнаружения с цифровой обработкой сигналов позволили достичь пропускной способности 64 Тбит/с к 2010 году [20]. Дальнейшее увеличение пропускной способности системы потребовало принятия SDM. В эксперименте 2012 года SDM использовался для демонстрации передачи данных со скоростью 1000 Тбит/с (или 1 Пбит/с) с использованием 12ядерного волокна [24]. Каждое оптоволоконное ядро несло 222 канала WDM, и каждая длина волны передавала поток битов 380 Гбит/с по многоядерному волокну длиной 52 км со спектральной эффективностью 7,6 бит/с/Гц.



Рис. 17. Увеличение производительности систем оптической связи (в логарифмическом масштабе), осуществленное с 1980 по 2015 год с использованием трех различных методов мультиплексирования

Простейший случай SDM соответствует многоядерному волокну, ядра которого находятся достаточно далеко друг от друга, поэтому они испытывают слабую связь. В этой ситуации сигналы WDM в каждом ядре передаются независимо, и ситуация аналогична использованию отдельных волокон. В большинстве экспериментов высокой Действительно, c пропускной способностью эта конфигурация использовалась через многоядерные волокна с 7, 12 или 19 сердечниками. Во второй категории экспериментов используются одножильные волокна, поддерживающие несколько пространственных мод [23]. В этом случае моды становятся неизменно связанными, как линейными, так и нелинейными, поскольку все каналы совместно используют один и тот же физический путь. Ухудшения, вызванные линейной связью, удаляются на стороне приемника посредством цифровой обработки сигналов. В эксперименте 2015 года волокно, поддерживающее 15 пространственных мод, использовалось для передачи 30 - мультиплексированных каналов поляризации на 23 км [27].

5. ВСЕМИРНАЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СЕТЬ СВЯЗИ

Появление Интернета в начале 1990-х годов привело к необходимости создания всемирной сети, способной прозрачно соединять все компьютеры (включая мобильные телефоны). Такая сеть требовала развертывания подводных кабелей на основе оптоволокна во всех океанах. Первый такой кабель был проложен в 1988 году через Атлантический океан (ТАТ-8), но он был разработан для работы на скорости всего 280 Мбит/с с использованием технологии второго поколения. Эта же технология использовалась для первого прозрачного волоконно-оптического кабеля (ТРС-3), который начал функционировать в 1989 году. К 1990 году были разработаны световые системы третьего поколения.

Подводная система ТАТ-9 использовала эту технологию в 1991 году. Она была спроектирована для работы около 1,55 мкм со скоростью 560 Мбит/с с интервалом повторителя около 80 км. Увеличение трафика через Атлантический океан привело к развертыванию кабелей ТАТ-10 и ТАТ-11 к 1993 году по той же технологии. Подводный кабель должен быть прочным, чтобы он мог противостоять укусам крупных морских животных. На рис. 18 показана, в качестве примера, внутренняя структура подводного кабеля, содержащего несколько волокон для передачи двунаправленного трафика. Оптические волокна погружены в водостойкое желе, которое окружено множеством стальных стержней для обеспечения прочности. Стальные стержни хранятся внутри медной трубки, которая сама покрыта изоляционным полиэтиленом. Как шкала на правой стороне на рис. 18 показано, что внешний диаметр всего кабеля все еще составляет всего 1,7 см.



Рис. 18. Внутренняя структура подводного кабеля, содержащего несколько волокон: 1 - изоляционный полиэтилен; 2 - медные трубки; 3 - стальные стержни; 4 - оптические волокна в водостойком желе

После 1990 года во многих лабораторных экспериментах было исследовано, можно ли использовать технологию усилителя для подводных кабелей, чтобы сигнал сохранял свою оптическую форму по всей длине кабеля, что позволило избежать использования дорогих встроенных регенераторов. Еще в 1991 году в эксперименте использовалась конфигурация рециркуляционного контура для демонстрации возможности передачи данных таким образом на скорости более 14 300 км со скоростью 5 Гбит/с. Этот эксперимент показал, что для межконтинентальной связи возможна полностью оптическая подводная система передачи. В кабеле ТАТ-12, установленном в 1995 году, вместо встроенных регенераторов использовались оптические усилители, и они работали со скоростью 5,3 Гбит/с с разносом усилителей около 50 км. Фактическая скорость передачи данных была немного больше, чем скорость передачи данных 5 Гбит/с из-за издержек, связанных с прямым исправлением ошибок, которые были необходимы для работы системы. Конструкция таких световых систем становится довольно сложной из-за кумулятивных эффектов дисперсии волокна и нелинейности, которые необходимо контролировать на больших расстояниях.

Использование технологии WDM после 1996 года в сочетании с оптическими усилителями, управлением дисперсией и исправлением ошибок произвело революцию в разработке подводных волоконно-оптических систем. В 1998 году подводный кабель, известный как AC-1, был проложен через Атлантический океан с пропускной способностью 80 Гбит/с с использованием технологии WDM. Система идентичного типа (ПК – 1) пересекла Тихий океан. Использование плотного WDM в сочетании с несколькими парами волокон на кабель привело к системам с большой пропускной способностью. После 2000 года несколько подводных систем с пропускной способностью более 1 Тбит/с были введены в эксплуатацию. Список и перечень этих систем представлен в табл. 2. На рис. 19 продемонстрирована международная подводная кабельная сеть волоконно-оптических систем связи, разработанная кафедрой глобальных исследований и географии университета Хофстра.

Таблица 2

Имя системы	Год	Тб/с	Длина	WBM	Волоконные
				каналы	пары
VSNL	2001	2,56	13000	64	4
трансатлантический					
FLAG	2001	4,8	28000	60	8
Apollo	2003	3,2	13000	80	4
SEA-ME-WE 4	2005	1,28	18800	64	2
Шлюз Азия-	2009	2,88	20000	96	3
Америка					
Индия-ME-WE	2009	3,84	13000	96	4
Африканское	2012	5,12	13000	128	4
побережье – Европа					
Западно-	2012	5,12	14,500	128	4
Африканская					
кабельная система					
Арктическое	2015	8	18000	50	4
волокно					

Высокопроизводительные подводные волоконно-оптические системы



Рис. 19. Международная подводная кабельная сеть волоконно-оптических систем связи около 2015 год [24]

Система трансатлантических подводных лодок VSNL, установленная в 2001 году, имела общую пропускную способность 2,56 Тбит/с и имела общую протяженность 13 000 км. Подводная система, известная как Индия-МЕ-WE и установленная в 2009 году, способна работать в двух направлениях со скоростью 3,84 Тбит/с по четырем оптоволоконным парам. К 2012 году подводные системы с общей пропускной способностью 5 Тбит/с для трафика в каждом направлении начали функционировать. Предлагаемая система, известная как Арктическое волокно, будет способна передавать трафик со скоростью до 8 Тбит/с, передавая 50 каналов (каждый работает на скорости 40 Гбит/с) по четырем оптоволоконным парам. По оценкам, во всем мире уже развернуто более 400 миллионов километров оптического волокна, что в три раза больше расстояния до Солнца.

6. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

6.1. Лабораторная работа №1. Исследование оптической аналоговой линии связи «ЛУЧ»

Цель работы: ознакомиться с видами модуляции оптического сигнала в аналоговых оптических линиях связи. Изучить структуру аналогового оптического приемопередатчика. Освоить методику установления связи с помощью аналоговой системы связи ЛУЧ.

1. Краткие теоретические сведения

Для методов модуляции, используемых в аналоговых оптических линиях связи (АОЛС), характерно непрерывное изменение значений одного из параметров линии связи. Например: при модуляции интенсивности изменяется мощность излучения, при позиционно-импульсной модуляции изменяется положение оптического импульса, при широтно-импульсной модуляции изменяется длительность и т.д.

На рис. 1.1 представлена структурная схема АОЛС. Информационный электрический сигнал на входе S(t) поступает в устройство модуляции М. Далее модулированный сигнал поступает на излучатель (обычно им выступает лазерный диод), который передает его в среду передачи (оптические волокна, атмосферу или иное соответствующее требованиям пространство). Через среду передачи сигнал поступает на фотоприемник (фотодиод), который преобразует оптический сигнал с мощностью P(t) в электрический. Далее сигнал поступает на демодулятор (ДМ), где возвращается в исходный информационный сигнал $S^*(t)$.

Главными особенностями аналоговой передачи в сравнение цифровым форматом являются требования по обеспечению большого значения отношения сигнал-шум на выходе оптического приемного устройства и высокого значения линейности по всей линии. Если не соблюдать эти требования, становятся возможными взаимные помехи от частотных составляющих передаваемого аналогового сигнала.



Рис. 1.1. Структурная схема АОЛС

Исходя из позиции схематической реализации линии связи, оптическая технология намного проще, чем цифровая. Аналоговые методы модуляции

можно эффективно применять, в том числе, для передачи нескольких широкополосных сигналов (к примеру, нескольких ТВ программ) по одной линии оптического волокна. Аналоговые оптические линии связи могут применяется в системах контроля, для передачи сигналов телеметрии, систем управления т.д. На их базе формируются многофункциональные ОЛС и системы кабельного ТВ.

Проведем исследование методов модуляции, которые характерные для этих систем, и составим сравнительный анализ на помехоустойчивость оптического сигнала.

В случае большой глубины модуляции современных лазерных диодов появляются довольно высокие нелинейные искажения, которые негативно влияют на качественные показатели распространения сигнала. По этой причине основным источником излучения в исследуемой системе служит светодиод. В передачи случае одновременной нескольких сигналов телевидения И радиовещания по одному каналу связи появляется возможность сократить негативное влияние нелинейных искажение с помощью размещения несущих частот ТВ и радиовещательных каналов на оси частот в положение, в случае которого имеющие наибольший показатель искажений нелинейности второго и третьего порядков не попадают в диапазон частот передаваемых сигналов.

Модуляция интенсивности (МИ) является самом простым типом модуляции оптического сигнала – в этом случае интенсивность оптического сигнала изменяется пропорционально амплитуде информационного сигнала. Такой вид модуляции прост в реализации, однако обладает самой низкой помехозащищенностью.

Частотная модуляция (ЧМ) поднесущей с дальнейшей модуляцией мощности излучения оптического сигнала реализует увеличение значения отношения сигнал-шум в сравнение с модуляцией интенсивности. В случае ЧМ снижаются требования к размеру модуляционной характеристики, также можно увеличить глубину модуляции и как следствие, максимальную дистанцию передачи. Но для этого типа модуляции требуется большая полоса пропускания, а также технически более сложная аппаратура для приемопередачи сигнала.

В импульсном режиме, относительно режима непрерывной генерации, допускается значение величины глубины модуляции используемого лазерного диода выше. Исходя из сказанного увеличивается практический интерес задействования помехоустойчивых аналоговых импульсных методов модуляции, которыми являются: широтно-импульсная (ШИМ), позиционно-импульсная (ПИМ) (фазоимпульсная (ФИМ)), частотно-импульсная (ЧИМ), интервальноимпульсная (ИИМ) и ряд других.

Использование широтно-импульсной модуляции в аналоговых ОСП является нецелесообразным. Причиной является неэффективное использование выходной мощности используемого источника излучения и низкая помехоустойчивость относительно частотно-импульсной и интервально-импульсной модуляций.

В случае частотно-импульсной, позиционно-импульсной и интервальноимпульсной модуляций для передачи сигнала используются относительно короткие импульсы с одинаковым значением длительности. Благодаря этому появляется возможность более эффективно использовать выходную мощность оптического излучателя.

При позиционно-импульсной модуляции данные об отсчетных значениях передаваемого аналогового сигнала S(t) заключены во временных интервалах между тактовыми точками и сигнальными импульсами. Следовательно, этому виду модуляции требуется проведение синхронизации приемной и передающей аппаратуры. Это возможно обеспечить с помощью передачи специального синхросигнала или осуществить синхронизацию приемного оборудования по информационному ПИМ сигналу. Данные действия являются причиной усложнения принимающей части системы.

случае частотно-импульсной модуляции частота импульсной В последовательности изменяется по определенному закону, соответствующему передаваемому аналоговому сигналу S(t). Главная особенность частотноимпульсной модуляции заключается В отсутствии необходимости осуществления синхронизации приемопередающего оборудования. Из этого что ее реализация наименее сложна. В сравнение значения следует, помехоустойчивости аналоговых ОЛС с ЧИМ и значения помехоустойчивости ОЛС с ПИМ показывает, что использование частотно-импульсной модуляции может обеспечить наиболее высокую помехозащищенность относительно позиционно-импульсной модуляции. Но необходимо учитывать, что при многоканальной передаче сигналов с временным разделением каналов позиционно-импульсная модуляция имеет значимое преимущество, так как характеризуется частотно-независимым фазовым сдвигом.

Когда осуществляется двустороннее ограничение частотномодулированного колебания появляется прямоугольная частотно-импульсная модуляция (ПЧИМ). На рис. 1.2, а представлены ЧМ сигнал и соответствующие ему ПЧИМ (рис. 1.2, б) и ЧИМ (рис. 1.2, в) сигналы. Необходимо указать, что в случае передачи ТВ сигналов на относительно малые дистанции, наиболее целесообразным вариантом является задействование частотной, прямоугольной частотно-импульсной и частотно-импульсной модуляций. Для увеличения помехоустойчивости аналоговых ОЛС при ЧИМ и ПЧИМ целесообразно увеличивать параметр $m = \Delta f_m / f_0$, где Δf_m — отклонение параметра частоты от нормы и f₀— средняя частота следования импульсов в случае позиционноимпульсной модуляции. Но в случае, когда значение т слишком велико, в диапазон полосы пропускания полезного сигнала попадают нижние по частоте паразитные составляющие.



Рис. 1.2. Сигналы: а - частотной модуляцией; б - прямоугольной частотноимпульсной модуляцией; в - частотно-импульсной модуляцией

В системах оптической связи, где используется интервально-импульсная модуляция, данные об аналоговом сигнале находятся во временных интервалах между передаваемыми импульсами. На рис. 1.3 изображены временные диаграммы сигналов в аналоговой ОЛС с ИИМ. Как видно из рисунка, сначала производится преобразование некоторого сигнала (рис. 1.3, а) в пилообразные импульсы (рис. 1.3, б), которые модулированы по характеристикам длительности и амплитуды. На основе этой последовательности формируются передаваемые импульсы (рис. 1.3, в). При интервально-импульсной модуляции средняя частота стробирования исследуемого аналогового сигнала S(t) на передаче выше, чем в случае позиционно-импульсной модуляции. Необходимость проведения синхронизации приемопередающей аппаратуры в данном случае отсутствует.



Рис. 1.3. Временные диаграммы сигналов в оптической системе с ИИМ

Ширина полосы пропускания, которая занята оптическим сигналом в аналоговой ОЛС с использование широтно-импульсной, позиционно-импульсной и частотно импульсной модуляциями, приблизительно равна тому же значению, как и при использовании импульсно-кодовой модуляции (ИКМ).

Существует возможность уменьшить ширину полосы частот с помощью использования метода интервально-широтной импульсной модуляции (ИШИМ). В этом случае при осуществлении передачи, аналоговый сигнал (рис. 1.4, а) преобразуется в интервально-импульсный модулированный сигнал (рис. 1.4, б). Он поступает на вход счетного триггера. На выходе этого триггера синтезируется интервально-широтный импульсный модулированный сигнал, представленный на рис. 1.4, в. У этого сигнала модулируемыми характеристиками служат такие параметры, как интервал между соседними импульсами и ширина самих стороне принимающего оборудования импульсов. Ha ИШИМ сигнал преобразуется в ИИМ сигнал, после чего происходит процедура демодуляции. Применение прямоугольной частотно-импульсной и интервально-широтной импульсной модуляций имеет целесообразность в аналоговых ОЛС С использование светоизлучающего диода в качестве источника оптического излучения.



Рис. 1.4. Формирование ИШИМ сигнала

2. Описание лабораторной установки

Мобильное устройство осуществления оптической связи «ЛУЧ», он же оптический телефон, предназначен для реализации скрытной симплексной передачи голосовой информации в условиях прямой видимости участников сеанса связи на дистанции до 300 метров. Устройство реализует высокий показатель скрытности передачи информации с помощью использования высоконаправленного невидимого оптического излучателя в инфракрасном диапазоне. ИК излучение аппарата сфокусировано в узкий пучок (расходимость
порядка 30), что одновременно обеспечивает устойчивую связь «с рук» и снижает вероятность перехвата сообщения.

Структурная схема оптического приёмопередатчика приведена на рис. 1.5.



Рис. 1.5. Структурная схема оптического телефона «ЛУЧ»

В состав аппарата «ЛУЧ» входят два канала:

- 1. Передающий (ПРД);
- 2. Приемный (ПРМ).

В комплект исследуемого ПРД канала входят следующие компоненты:

- 1. Микрофон 17;
- 2. Микрофонный усилитель 18;
- 3. Электронный ключ на входе 19; и на выходе 20; блока ФАПЧ 21;
- 4. Усилитель-формирователь передаваемой поднесущей частоты (22);
- 5. Мощный ключевой каскад 23;
- 6. Инфракрасный излучающий светодиод 24;
- 7. Передающая оптическая линзовая антенна 25;
- 8. Пучок передаваемого модулированного ИК излучения 26.

Комплект исследуемого ПРМ канала составляют:

- 1. Приемная линзовая антенна 28;
- 2. Приемник, перехватывающий приходящий модулированный ИК пучок 7:
- 27;
- 3. Оптический инфракрасный фильтр 29;
- 4. Фотодиод 30;

5. Радиочастотный фильтр - 31 в виде цепи параллельных связанных контуров;

- 6. Усилитель принимаемой поднесущей частоты 32;
- 7. Электронный ключ на входе 33; и на выходе 34; блока ФАП 21;
- 8. Усилитель звуковой частоты 35;

9. Громкоговоритель - 36.

Оптический телефон построен по трансиверной (приемопередающей) схеме с использованием частотной модуляции поднесущей частоты, для чего используется синхронный детектор с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ), являющимся общим блоком передающего (модулирующего) и приемного (демодулирующего) каналов связи. В его состав входит генератор, управляемый напряжением (ГУН), фазовый дискриминатор (ФД) и фильтр низкой частоты (ФНЧ).

Работа устройства «ЛУЧ» в режиме «передача» реализуется при помощи блоков ПРД. Микрофон улавливает звуковые колебания, синтезированные источником звукового излучения, и конвертирует их в электрический сигнал, который поступает на микрофонный усилитель и проходит процедуру усиления. В режиме «передача» электронные ключи 19 и 20 являются замкнутыми, а ключи 34 и 33 – разомкнуты. С выхода микрофонного усилителя сигнал поступает на блок генератора, управляемого напряжением (ГУН), который входит в состав системы ФАПЧ. В нем происходит генерация поднесущей и производится ее частотная модуляция по некоторому закону звукового сигнала. С выхода генератора, управляемого напряжением, сигнал, похожий по своей форме на меандр, через электронный ключ 20 поступает на вход усилителя-формирователя поднесущей частоты. Далее он поступает на управляющий вход мощного ключевого каскада, в котором элементом нагрузки является излучающий ИК светодиод. Оптическая передающая антенна, которой является короткофокусная линза, формирует оптическое излучение светодиода в инфракрасный пучок.

В режиме «прием» работа оптического телефона осуществляется с помощью блоков ПРМ. Направленное инфракрасное оптическое излучение попадает на приемную оптическую антенну, которой является короткофокусная линза. Зa приемным антенным устройством установлен светофильтр инфракрасного диапазона. Приемный фотодиод находится вне плоскости, перпендикулярной оптической оси приемной линзы. Результатом является то, что принимаемое излучение инфракрасного диапазона засвечивает всю его рабочую поверхность, даже при том условии невысокой точности наведения передатчика. Вследствие этого некоторый принимаемый оптический сигнал преобразуется в электрическую форму. В качестве нагрузки приемного фотодиода является радиочастотный фильтр поднесущей частоты. К его выходу подключается усилитель поднесущей частоты. В режиме «прием» электронные ключи 33 и 34 замкнуты, а ключи 19 и 20 –разомкнуты. С выхода усилителя поднесущей частоты, проходя через электронный ключ 33 сигнал поступает на вход детектора с фазовой автоподстройкой частоты, который выполняет роль синхронного детектора частотной модуляции. В дальнейшем демодулированный сигнал звуковой частоты, через фильтр НЧ и электронный ключ 34 поступает на вход усилителя низкой частоты. В качестве нагрузки УНЧ служит громкоговоритель.

Внешний вид прибора и органы управления на рис. 1.6.



Рис. 1.6. Внешний вид приемопередатчик

На верхней панели оптического телефона располагается:

1) Ручка включения/выключения устройства и регулировки громкости в режиме приема - 1;

2) Ручка включения/выключения шумоподавителя и регулировки порога шумоподавителя - 2;

3) Тумблер 3 включения/выключения светового маркера;

4) Кнопка переключения режимов «прием»/«передача» - 4.

На передней панели размещены:

1) Приемная 5 и передающая 6 линзовые антенны;

2) Световой маркер 7 и входное окно прицела 8 визирной трубки.

На задней панели размещены:

- 1) Выходное окно 9 визирной трубки;
- 2) Микрофон 10;
- 3) Громкоговоритель 11;
- 4) Световой индикатор режима «прием» 12;

5) Световой индикатор режима «передача» - 13;

6) Световой индикатор остаточного заряда батарей питания - 14.

На боковых стенках расположены узлы крепления 15 ремня для переноса приемопередатчика.

3. Ход выполнения работы

1. Включить приёмопередатчик, повернув ручку регулятора громкости (ручка 1) по часовой стрелке до щелчка. Затем установить ручку 1 в среднее положение, так чтобы из громкоговорителя был слышен шум.

2. Подвинуть аппарат «ЛУЧ» задней панелью к лицу и сквозь прицел зрительно найти абонента. В первом эксперименте расстояние между абонентами должно составлять 10м.

3. Нажать кнопку 1 «прием/передача». При этом на задней панели должен загореться индикатор «передача», а на передней панели световой маркер. Ровным голосом передать сообщение. По окончании передачи отпустить кнопку 1, приёмопередатчик переходит в режим приема.

4. Удерживая абонента в центре трубки-прицела убедиться, что он перешел в режим в режим передачи сообщения (на это указывает загорание светового на передней панели приемопередатчика абонента). Из маркера громкоговорителя будет звучать передаваемое сообщение. Вращая ручку 1 желаемый уровень громкости приема. Оценить установить качество полученного сообщения - результат занести в отчет.

5. В последующих экспериментах увеличивать расстояние между абонентами и повторять пункты 3 и 4. Установить предельно возможное расстояние между приемной и передающей сторонами.

6. Проверить наличие связи при отражении луча от различных поверхностей (например, от участков стены с различным покрытием).

4. Контрольные вопросы

1. В чем преимущества и недостатки систем аналоговой оптической связи?

2. Из каких блоков состоит типичная система атмосферной оптической связи?

3. В чем сущность модуляции интенсивности, частотной модуляции оптического сигнала?

4. Как формируется сигнал с ЧИМ, с ПЧИМ?

5. В чем преимущество сигналов с ИИМ? Как они формируются?

6. Что представляет собой сигнал с ИШИМ? Как он формируется?

7. Какие основные блоки принимают участие в работе линии ЛУЧ в режиме «передача»? Поясните их назначение.

8. Какие основные блоки принимают участие в работе линии ЛУЧ в режиме «прием»? Поясните их назначение.

9. Поясните назначение внешних органов управления приемопередатчика ЛУЧ.

10. Чем ограничивается расстояние между передатчиком и приемником?

6.2. Лабораторная работа №2. Исследование цифровой оптической системы связи «ЛУЧ-2»

Цель работы: ознакомиться с особенностями распространения оптического излучения в атмосферном канале связи. Изучить основы работы с оптическими линиями связи.

1. Краткие теоретические сведения

Наилучший методом решения проблемы последнего участка («последней мили») заключается в использование беспроводных линий передачи данных. Стандарт беспроводной сети IEEE 802.11 включает в себя СВЧ или ИК (оптический) диапазоны излучений для достижения этих целей.

Реализованная на базе атмосферной оптической линии связи (АОЛС) мультисервисная сеть, имеющая функцию сопряжения с общей телефонной, даст возможность создать IP-телефонию высокого качества и сделать возможным доступ к компьютерным сетям при довольно большой области покрытия.

Системы атмосферной оптической линии связи могут эксплуатироваться не только на последнем участке каналов связи, но также и в качестве вставок в ВОЛС на отдельных труднопроходимых зонах.

Наилучшая длинна канала связи можно определить исходя из показателей качества связи, которые учитываются в форме необходимого минимального количества сигнальных фотонов на входе чувствительного элемента фотоприемника. С помощью задания предельного уровня с учётом определенной вероятности срабатывания ложной тревоги, производится выбор нужного количества фотонов.

При исследовании правил обнаружения, которые являются оптимальными по различным категориям, определено что отличия между ними заключаются в разном выборе порога. Принимающее устройство реализует процедуру детектирования модулированного сигнала и, в случае цифровой формы сигналов, выносит решение о типе принимаемого сигнала («1» или «0»). Выбор порогового значения в данном случае определяется двумя факторами:

1. Заданным значением вероятности неверного распознавания сигнала (ошибки первого и/или второго рода);

2. Шумовыми характеристиками как самого приемника, так и принимаемого сигнала

Мощность шумов фона является суммой шумов, обусловленных рассеянием атмосферы и солнечным световым излучением, а также шумов, связанных с переотражением от объекта приемника.

Переход 1→0 для больших значений отношений сигнал/шум происходит в точке, где S_{вх}≈0,5Sc. Тогда полная битовая ошибка приема равна:

$$\Delta = \frac{\Delta_1 + \Delta_0}{2},\tag{2.1}$$

где Δ_1 и Δ_0 – вероятности битовой ошибки при приеме «1» и «0» соответственно.

Метеоусловия, дым, пыль и иные виды загрязнений воздуха могу значительно влиять на распространение лазерного излучения. Кроме того, необходимо отметить, что в атмосферном пространстве присутствуют турбулентные явления. Они являются причиной временных флуктуаций показателя преломления среды, колебаниям углового положения пучка и искажениям принимаемого сигнала.

Главным показателем качества функционирования атмосферной оптической линии связи является надежность ее работы. Она определяется допустимым ослаблением мощности сигнала между передающим И принимающим устройством, от состояния атмосферного канала связи в точке монтажа и функционирования. Чем выше запас мощности, тем меньше атмосферные явления влияют на качество работы линии связи.

На принимающем устройстве мощность можно оценить соотношением:

$$P = \frac{P_{\text{пер}} D_{\text{прд}} D_{\text{прм}} \tau_a a}{(4\pi R)^2} \lambda_0^2, \qquad (2.2)$$

где S_{ПРМ} – диаметр принимающей антенны;

Р_{ПЕР} и Р_{ПРМ} – мощности на приемном и передающем устройстве;

λ₀ – рабочая длинна волны;

τа – коэффициент передачи атмосферы;

R – дистанция канала связи;

α – произведение коэффициентов пропускания передающего и приемного устройств, который можно рассчитать по формуле:

$$\alpha = \mathbf{K}_{\Pi P \square}^{\mathbf{O} \Pi \mathsf{T}} \mathbf{K}_{\Pi P \mathsf{M}}^{\mathbf{O} \Pi \mathsf{T}}, \tag{2.3}$$

где К^{опт}_{ПРД} и К^{опт}_{ПРМ} – это коэффициенты пропускания оптики, передающего и приемного устройств соответственно.

На основании экспоненциального закона Бугера, можно определить ослабление лазерного излучения в атмосферном пространстве, в котором коэффициент пропускания атмосферы вычисляется по формуле:

$$\tau_a = \frac{I}{I_0} = \exp\left[-\int_0^R a_a dz\right],\tag{2.4}$$

где I и I_0 – излучаемая и принимаемая интенсивности оптического сигнала соответственно;

α_a – линейное значение ослабления среды, определяемое как сумма коэффициентов поглощения и рассеяния (коэффициент экстинкции);

R – расстояние среды, в которой происходит распространение излучение. Для однородной линии определяется как:

$$\tau_a = \exp\{-a_a R\}.\tag{2.5}$$

Следовательно, получается выражение:

$$\tau_a = \tau_b \tau_s, \tag{2.6}$$

где тb и тs – это коэффициенты пропускания атмосферы, в которые включаются только поглощение и только рассеяние соответственно.

Эффект поглощения в атмосфере обуславливает нахождение в ней молекул водяного пара, двуокиси углерода и озона. Коэффициент т_b рассчитывается, исходя из эффективного показателя уровня осаждённых водных паров.

Коэффициент рассеяния определяется путем нахождения значения поглощения за счет дифракционного и рэлеевского рассеяния.

Значение ослабления α_{RR} при рэлеевском рассеянии можно определить с помощью формулы:

$$a_{RR} = 0,827NA_p^3\lambda_0^{-4}, \tag{2.7}$$

где N – количество частиц в одной единице объема исследуемой среды вдоль некоторой оптической линии;

А_Р – эффективная площадь поперечного сечения рассеивающей частицы.

Дифракционное рассеяние во много раз превышает рэлеевское в больше количестве случаев. Дифракционное рассеяние можно описать при помощи эмпирического соотношения:

$$a_b = \frac{3.91}{S_M} \left[\frac{\lambda_0}{0.55} \right]^{-0.585 S_M^{\frac{1}{3}}},$$
(2.8)

где λ_0 – рабочая длина волны излучения в мкм;

S_M – показатель метеорологической дальности видимости (МДВ) в км.

Значение α_d , а, следовательно, и τ_a сильно зависят от SM.

При помощи показателя МДВ, как основного для канала связи, появляется возможность осуществить прогнозирование надёжности атмосферной линии. На метеорологических станциях, аэропортах и т.п. ведется круглогодичная статистика МДВ.

Коэффициент рассеяния можно определить, как:

$$\tau_S = exp\{-(a_{RR} + a_d)R\}.$$
(2.9)

Распространяемое в атмосфере излучение испытывает не только энергетические потери, но и флуктуации амплитуды и фазы, которые появляются в результате случайного пространственно-временного распределения некоторого показателя преломления воздуха. Это явление возникает в результате турбулентного движения в атмосфере, которое несет за собой изменение температуры среды и показателя преломления воздуха. Взвешенные частицы в атмосфере могу ослаблять оптические сигналы в каналах связи, так, как поглощают энергию луча и рассеивают, а также, могут сами являться источниками электромагнитного излучения.

Турбулентная среда представляется как совокупность небольших относительно однородных объемов воздуха, различие которых заключается в показателе преломления. Чаще всего диаметр пучка d небольшой в сравнение с величиной неоднородности одного объема l_0 , который называют также внутренним масштабом турбулентности. Таким образом справедливо, что $d/l_0 <<1$.

Существует специальная величина, называемая структурной константой флуктуации коэффициента преломления Cn(r). В ней учитываются такие параметры, как степень турбулентности атмосферы и ее связь с оптическими свойствами атмосферы. Так, как в большем количестве случаев для некоторого передаваемого оптического пучка $d/l_0 <<1$, то можно принимать, что структурная константа не изменяется в границах поперечного сечения пучка. В этом случае принимаются следующие значения Cn=8·10-9 для слабой турбулентности, Cn=4·10-8 для средней турбулентности и Cn=5·10-7 для сильной турбулентности.

Флуктуации амплитуды в зависимости от расстояния определяются по формуле:

$$\left\{ ln\frac{A}{A'} \right\}^2 = 0,56Cn^2 \left[\frac{2\pi}{\lambda_0} \right]^{\frac{7}{6}} R^{\frac{11}{6}}.$$
 (2.10)

При проведении исследования воздействия турбулентной атмосферы на фазу принимаемого сигнала обычно рассматривают временную характеристику распространения сигнала от передающего устройства до некоторой точки апертуры принимающей аппаратуры. В том случае, если происходит случайное образования и распада неоднородностей в атмосфере и движения неоднородностей поперек линии связи временная характеристика меняется. Структурная функция фазы принимаемого излучения записывается в виде:

$$D(r) = 2,91r^{5/3}(\frac{2\pi}{\lambda})^2 C_n^2 R, \ L_0 > r > (\lambda R)^{1/2};$$
(2.11)

$$D(r) = 1,46r^{5/3}(\frac{2\pi}{\lambda})^2 C_n^2 R, \ (\lambda R)^{\frac{1}{2}} > r > L_0,$$
(2.12)

где L₀, l₀ – внешний и внутренний масштаб турбулентности соответственно.

В случае воздействии явления атмосферной турбулентности пучок при d/l₀<<1 может менять траекторию как целое на угол δ_θ:

$$\delta_{\theta} = \frac{\sigma_{\theta}}{\sqrt{2}},\tag{2.13}$$

где σ_{θ} - дисперсия флуктуации.

Кроме изменения таких параметров, как амплитуда, фаза и изменение траектории в зависимости от первоначальной линии распространения, под воздействием явления турбулентности атмосферы так же могут быть изменены ортогональные компоненты вектора напряженности поля, такие как: горизонтальные и вертикальные. Из этого следует, что может изменяться угол поляризации. В случае процедуры модуляции по поляризации возникшие случайные отклонения являются весьма негативными эффектами.

Среднеквадратическое значение отклонения поляризационного угла равно:

$$\sqrt{[\bar{\Delta}\bar{\Pi}]^2} = 2\pi \cdot 10^{-12} \exp\left(-\frac{H_0}{1600}\right) \frac{R}{L_0},\tag{2.14}$$

где H₀ – высота поднятия приемной антенны в метрах;

L₀ – внешний масштаб турбулентности (наибольшее значение неоднородностей).

Наличие турбулентности атмосферы приводит к замираниям сигнала на приеме. Самый легкий метод устранения замираний, которые вызваны влиянием неоднородностей атмосферы, заключается в изменение размеров оптической приемной антенны в сторону ее увеличения или же задействование оптической антенной решетки. В этом случае происходит усреднение флуктуаций излучения, которое принимают элементы, и как следствие выравнивание получаемого сигнала. Второй метод заключается в некогерентном суммирование в одном канале излучения нескольких лазеров.

2. Описание лабораторной установки

Цифровой оптический модем «ЛУЧ-2» (далее модем) предназначен для осуществления двусторонней дуплексной связи типа «точка-точка» двух удаленных компьютеров в условиях прямой видимости по открытому атмосферному каналу связи. С точки зрения программного обеспечения модемное соединение полностью эмулирует соединение компьютеров нульмодемным кабелем через последовательный СОМ-порт (RS 232, протокол обмена Xon/Xoff). Структурная схема связи, приведена на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Структурная схема линии связи с применением оптических модемов «ЛУЧ»

Сетка скоростей обмена информацией в зависимости от расстояния между модемами приведена в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Сетка скоростей обмена информацией в зависимости от расстояния между модемами

Расстояние между модемами	Скорость передачи
(M)	(Кбит/с)
70	150
100	56
120	38
150	19,2
>150	9,6-2,4

Внешний вид прибора и органы управления приведены на рис. 2.2.





На задней панели размещены:

- 1. Разъем СОМ-порт 1;
- 2. Выходное окно визирной трубки 2;
- 3. Ручка регулировки силы тока питания передающего светодиода 3;

4. Ручка включения/выключения модема - 4;

5. Блок контрольных ламп - 5;

6. Разъем для подключения питания - 6.

На верхней панели (рис. 2.2) расположены:

1. Кнопка контроль принудительной 1 - 7;

2. Миллиамперметр - 8.

На передней панели размещены:

- 1. Приемная 10 и передающая 9 линзовые антенны;
- 2. Световой маркер 11;
- 3. Входное окно прицела визирной трубки 2.

В модеме используется стандарт ИК-связи IrDa 1.0. Модем обеспечивает высокую скрытность передачи за счет применения высоконаправленного невидимого инфракрасного оптического излучения (ИК) спектрального диапазона (λ ≅880 нм). Архитектура построения и принцип работы внутренних блоков модема «ЛУЧ-2» аналогична работе блоков оптического телефона «ЛУЧ».

3. Домашнее задание

1. Ознакомиться с особенностями распространения оптического излучения в атмосферном канале связи.

2. Для используемого в лабораторной работе оборудования построить зависимость принимаемой мощности излучения от расстояния. В расчете принять D_{прд}=D_{прм}=5см; P_{пер}=20мВт; S_м=10км; τb=0.7; α=0.9. Считать, что влияние рэлеевского рассеяния пренебрежимо мало.

3. В соответствии с номером варианта (по указанию преподавателя) произвести расчет зависимостей по исходным данным табл. 2.2.

Таблица 2.2

	Варианты и данные	
N⁰	Расчет	Исходные данные
варианта		
1	Зависимость флуктуаций амплитуды от	Считать турбулентность
	расстояния	слабой
2	Зависимость среднеквадратического	Принять Н0=10км;
	отклонения поляризационного угла от	L0=1м
	расстояния	
3	Зависимость структурной функции	Принять R=1км;
	фазы от r	10=20см; слабая
		турбулентность

4. Ход выполнения работы

1. Установить модемы на рабочее место;

2. Соединить СОМ-порт компьютера с СОМ-портом модема;

3. Подключить питание модема;

4. Включить модем поворотом ручки (рис. 2.2. - 4) по часовой стрелке до щелчка;

5. Нажав кнопку 7, отрегулировать мощность выходного излучения. Мощность считать оптимальной, когда на приемном модеме погаснет световой маркер 11. При этом необходимо следить за током питания светодиода, используя миллиамперметр 8. Ток не должен превышать уровень 100 мА.

6. Запустить программу Hyper Terminal;

7. Создать и настроить новое подключение. Для этого: в окне «Описание подключения» ввести название соединения (цифровая, символьная, символьно - цифровая информация) и нажать кнопку «ОК» (рис. 2.3).

Описание подключени	ия (?×
Новое подключение	e	
Введите название подклю	чения и выберите для него	значок:
Название:		
I		
Значок:		
		 ✓
	ОК Отме	на

Рис. 2.3. Описание подключения

8. В окне «Подключение» для пункта «Подключаться через» установить «СОМ2» и нажать кнопку «ОК» (рис. 2.4).

Подключение	?×
111	
Введите сведения о т	елефонном номере:
Страна или регион:	Россия (7) 🗸 🗸
Код города:	4732
Номер телефона:	
Подключаться через:	СОМ2
	ОК Отмена

Рис. 2.4. Подключение

9. В окне «Свойства: СОМ2» в пункте «Скорость» установить значение «11520», а в пункте «Управление потоком» «Xon/Xoff» (старт-стопный режим работы) и нажать кнопку «ОК» (рис. 2.5).

	?
115200	~
8	~
Нет	~
1	~
Аппаратное	~
Восстановить умолчан	ния
К Отмена При	имени
	115200 8 8 1 1 1 Аппаратное 1 Восстановить умолчая К Отмена При

Рис. 2.5. Свойства СОМ2

10. После выполнения необходимых настроек между ПК через окно «Hyper Terminal» может передаваться различного рода информация, при этом на экран компьютера выводится окно с указаниями названия отправляемого/принимаемого файла, скорости передачи, времени передачи и т.д. Осуществить передачу файла в оба направления (по указанию преподавателя).

5. Контрольные вопросы

1. Чем определяется выбор порога в системе атмосферной оптической связи?

2. Каковы причины ослабления лазерного излучения в атмосфере?

3. Что является причиной флуктуаций амплитуды, фазы и угла поляризации оптического сигнала при его распространении в атмосферном канале связи?

4. Что такое внутренний и внешний масштаб турбулентности?

5. Из чего слагается коэффициент экстинкции?

6. Какими способами возможна борьба с замираниями в атмосферных оптических линиях связи?

6.3. Лабораторная работа № 3. Исследование параметров открытых оптических резонаторов

Цель работы: знакомство с геометро-оптическим и волновым описанием поведения оптических колебаний в открытых резонаторах. Исследование вакуумированных математического моделирования поля В оптических резонаторах. Изучение воздействия некоторых сред, заполняющих открытый характеристику спектра его собственных резонатор, на колебаний. Компьютерный анализ амплитудно-фазовых распределений оптических полей собственных колебаний устойчивых и неустойчивых открытых резонаторов. Компьютерный анализ спектров собственных колебаний устойчивых открытых резонаторов.

1. Домашнее задание

Повторить изученный материал высшей математики, относящийся к теме теории специальных функций. Задействовать составленные конспекты лекций по математическому анализу, электродинамике и распространению радиоволн, комплексам атмосферной оптической связи, а также другие необходимые источники литературы.

2. Основные теоретические сведения

2.1. Назначение оптического резонатора в лазере

Лазерный излучатель — это устройство, которое генерирует когерентное электромагнитное излучение оптического диапазона автоматически (с помощью энергии внешнего источника). По этой причине в структурную схему лазера должен входить резонатор (колебательный контур), задачей которого является определение частоты выходящего из лазера оптического пучка, его направление, поперечную структуру, форму главного и боковых лепестков диаграммы направленности. Требования, предъявляемые к оптическому резонатору сопоставимы с требованиями к простому резонансному контуру. Это требование частотной избирательности за счет высокого коэффициента добротности на одной или нескольких оптических частотах и низкого коэффициента добротности на остальных частота, даже если они расположены близко к рабочим.

Существует ли возможность реализовать резонатор для света с таким высоким требованием к добротности?

Принцип построение СВЧ резонатора не работает в оптическом диапазоне частот. В поддиапазоне миллиметровых волн, примыкающем к оптическому со стороны более низких частот, данная задача решалась следующим образом. Эффективные колебательные устройства создавались в виде объемного резонатора (полого металлического объема). Если опираться на принцип электродинамического подобия, можно посчитать, что существует возможность использовать этот опыт и в оптическом диапазоне? К сожалению, это оказалось невозможно. Габаритные размеры объемного резонатора (параллелепипеда с габаритами $a \times b \times c$) должны быть соизмеримы с значением длины волны основного колебания: а, b, с ~0, $5\lambda \div \lambda$. Это необходимо для исключения поддержания СВЧ колебаний единовременно на нескольких частотах. В оптическом диапазоне, где длина волны характеризуется несколькими микрометрами или десятыми их десятыми частями, реализовать подобный резонатор невозможно по двум причинам:

1. Технологическая причина;

2. Физическая причина, то есть имеет принципиальный характер.

Проблема заключается в том, что добротность объемного резонатора можно охарактеризовать, как отношение объема, в котором происходит процесс накопления энергии СВЧ колебаний, к объему, в котором она уходит в тепловую энергию:

$$Q = \frac{V_{3a\pi}}{V_{\text{потерь}}} \sim \frac{a^3}{6 \cdot a^2 \cdot \Delta_{\text{ск}}}.$$
(3.1)

В случае нормального скин-эффекте толщина скин-слоя, на глубину которого СВЧ поле проникает в металлические стенки резонатора, $\Delta_{c\kappa} ~(f)^{-1/2}$, тогда как $a~(f)^{-1}$. По этой причине $Q~(f)^{-1/2}$, и, так, как оптические частоты выше частот СВЧ на четыре и более порядка, значение добротность одночастотного оптического резонатора упадет минимум в 100 раз.

Тогда, исполнив резонатор в реальных габаритных размерах (a, b, c - в диапазоне десяти до нескольких десятков миллиметров), необходимо будет согласиться с тем, что он является многомодовым. Единовременно будет существовать большое число типов колебаний. В случае, если габаритные размеры во много раз превышают длину волны, то в каждой единице объема резонатора в единичной полосе частот будет поддерживаться столько же типов колебаний, сколько в свободном пространстве:

$$n = \frac{8\pi f^2}{c^3}.$$
 (3.2)

Количество колебаний в резонаторе, который имеет объем V в полосе Δf составляет:

$$N = \frac{8\pi f^2}{c^3} V \cdot \Delta f. \tag{3.3}$$

В этом случае, частотный разнос двух соседних типов колебаний составит:

$$\frac{\Delta f}{N} = \frac{c^3}{8\pi f^2 \cdot V} \sim (f)^{-2}.$$
 (3.4)

Таким образом, в резонаторе с теми же габаритами, что и для СВЧ диапазона, частотный спектр собственных типов оптических колебаний сгущается минимум в 108 раз. Это можно увидеть на следующем графике (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Иллюстрация сгущения спектра в замкнутом оптическом резонаторе

Единовременно со сгущением спектра, значение добротности резонатора на каждом более высоком типе колебаний снижается, то есть происходит увеличение полосы существования в резонаторе этого типа колебаний:

$$Q = \frac{f}{\Delta f_{\text{pa3}}}; \tag{3.5}$$

$$\Delta f_{\text{pa3}} = \frac{f}{Q}.\tag{3.6}$$

В большом резонаторе значение стороны *а* уже не зависит от частоты. По этой причине при нормальном скин-эффекте получается:

$$Q \sim (f)^{-1/2};$$
 (3.7)

$$\Delta f_{\text{pa3}} \sim (f)^{-1/2}.$$
 (3.8)

На рис. 3.2 представлен вид АЧХ резонатора на оптических частотах.



Из этого следует, что применение закрытого металлического резонатора невозможно использовать в качестве колебательного контура в оптическом диапазоне. Если размеры резонатора сопоставимы с длиной волны, то в результате будет очень низкий коэффициент добротности. Энергия, которая накапливается в нем, слишком мала и не имеет практического применения. Его технологическая реализация невозможна из-за малых габаритных размеров. Если размеры резонатора превышают длину оптической волны, то спектр собственных типов колебаний становится настолько густым, что с учетом снижения добротности колебаний их резонансные полосы перекрываются, сливаясь в сплошной континуум частот. Избирательность по частоте закрытого резонатора пропадает, резонатор перестает быть резонатором.

Таким образом появляется проблема: как в полости с большими размерами разредить спектр собственных колебаний, чтобы восстановить избирательность на частотах оптического диапазона и вернуть полости резонансные свойства?

По предложению академика А. М. Прохорова можно удалить четыре боковые стенки, оставив две (габаритами равными а×b) параллельные одна другой и разнесенные на расстояние с. Схема подобного резонатора представлена на рис. 3.3.



Рис. 3.3. Геометрия открытого резонатора с прямоугольными зеркалами

2.2. Исследование добротности закрытого резонатора

Исходя из выражения (3.1), для вакуумированного резонатора расчет производится по формуле:

$$Q = \frac{a\sqrt{\omega\mu_a\sigma}}{6\sqrt{2}} = \frac{a}{6}\sqrt{\pi f_{pes}\mu_a\sigma},$$
(3.9)

где а - длинна ребра кубического резонатора, м;

 f_{pe3} - резонансная частота поля в резонаторе, Гц;

 μ_a - абсолютная магнитная проницаемость материала корпуса, Гн/м;

 σ - проводимость материала корпуса, См/м.

Значение ширины резонансной кривой собственных типов колебаний закрытого резонатора, представленных на рис. 3.4, вычисляется исходя из выражений (3.5-3.6) по формуле:

$$\Delta f_{pes} = \frac{6}{a} \sqrt{\frac{f_{pes}}{\pi \mu_a \sigma}} \ (\Gamma \eta). \tag{3.10}$$



Рис. 3.4. График ширины резонансной кривой собственных типов колебаний закрытого резонатора

Количество колебаний в единичной полосе в закрытом резонаторе единичного объема рядом с частотой f, при условии, что $a >> \lambda$, рассчитывается по формуле:

$$N_f = \frac{8\pi f^2}{c^3}, (\Gamma u^{-1} \cdot m^{-3}).$$
(3.11)

На рис. 3.5 представлено количество колебаний в закрытом резонаторе в СВЧ и оптическом диапазонах при ширине полосы частот в 1 Гц.



Рис. 3.5. Количество колебаний в закрытом резонаторе СВЧ и оптического диапазонов

Спектральная плотность получаемых типов колебаний в закрытом резонаторе, удовлетворяющем условию $a >> \lambda$, исходя из формулы (3.4) вычисляется как:

$$S_f = \frac{N}{\Delta f} = \frac{8\pi f^2 a^3}{c^3}, (\Gamma \mu^{-1}),$$
(3.12)

где *с* - скорость света, равная 299792468 м/с;

 Δf – произвольная полоса частот, в которую входят N типов колебаний закрытого резонатора, Гц.

Интервал частот (межмодовое расстояние) между соседними типами колебаний закрытого резонатора, графически представлен на рис. 3.6. Вычисляется по формуле:

$$\Delta f_{cocedh.3akp.} = \frac{\Delta f}{N} = \frac{c^3}{8\pi f^2 a^3}, (\Gamma u) \Delta f_{coced.3akp.}^{OBT.} \ll \Delta f_{coced.3akp.}^{CBY}$$
(3.13)



Рис. 3.6. Графическое представление интервала частот между соседними типами колебаний в СВЧ и оптическом диапазонах

Межмодовое расстояние двух продольных типов колебаний расположенных рядом с друг другом открытого резонатора графически представлено на рис. 3.7. Вычисляется по формуле:

$$\Delta f_{cocedh.omkp.} = \frac{c}{2 \cdot L}, (\Gamma u), \qquad (3.14)$$

где *L* - расстояние между отражающими стенками (зеркалами), измеренное по оптической оси, м (*L* заменило размер *c* закрытого резонатора, $\Delta f_{cocedh.omkp.}^{onm.} = \Delta f_{cocedh.sakp.}^{CBY}$).



Рис. 3.7. Межмодовое расстояние соседних продольных типов колебаний в СВЧ и оптическом диапазонах

Значение добротности открытого резонатора из общего энергетического определения вычисляется по формуле:

$$Q = 2\pi \frac{{}_{\text{энергия,запасенная в резонаторе}}{{}_{\text{энергия,теряемая в резонаторе за период}}.$$
 (3.15)

Исходя из полученного выражения можно вывести частную форму записи:

$$Q = 2\pi \frac{a^2 L}{a^2 \lambda T} = 2\pi \frac{L}{\lambda} \cdot \frac{1}{T},$$
(3.16)

где $\lambda = \frac{c}{f}$ - длина волны колебаний в резонаторе, м;

Т - коэффициент пропускания выходного зеркала.

Выражение (3.16) является справедливым для резонатора, который заполнен средой без потерь. Зеркальная система состоит из двух зеркал. Первое зеркало является идеальным, то есть его коэффициент отражения R = 1. Второе зеркало имеет коэффициент пропускания T = 1 - R. Из этого следует выражение:

$$Q = 2\pi \frac{L}{\lambda} \cdot \frac{1}{1-R}.$$
(3.17)

Угловой сектор, в который входят типы колебаний с высоким показателем добротности, поток энергии которых распространяется под малыми углами к оси резонатора, определяется следующим образом.

Если считать колебания, которые перемещаются наклонно к оси резонатора высокодобротными и их добротность уменьшается не более, чем в 2 раза относительно колебаний, которые передвигаются вдоль оси, то в их число будут входить колебания, которые отражаются от зеркал 1/T раз, прежде чем покинут резонатор. В этом случае плоских угол, в пределах которого будут заключены траектории подобных колебаний, вычисляется согласно формуле:

$$\theta = \frac{a}{L} \cdot T = \frac{a}{L} \cdot (1 - R). \tag{3.18}$$

Телесный угол, который соответствует плоскому углу, можно вычислить по формуле:

$$\Omega = \pi \theta^2 = \pi \cdot \left[\frac{a}{L} \cdot (1-R)\right]^2.$$
(3.19)

Оценку эффективности разрежения спектра колебаний при изменении резонатора с закрытого на открытый можно дать с помощью доли, которую составляют колебания с высоким показателем добротности открытого резонатора в полном числе колебаний закрытого резонатора. Исходя из сказанного, можно сделать вывод что эта доля определяется отношением $\Omega/(4\pi)$ и спектр открытого резонатора разрежается в *F* раз, что можно вычислить по формуле:

$$F = \frac{4\pi}{\Omega} = \left[\frac{2 \cdot L}{a \cdot (1-R)}\right]^2. \tag{3.20}$$

Количество типов колебаний с высоким показателем добротности в полосе частот Δf около частоты f для открытого резонатора объемом $V = a^2 L$ с учетом выражения (3.11) рассчитывается по формуле:

$$N_{om\kappa p} = 2\pi \frac{a^4}{\lambda^3 L} \cdot \frac{\Delta f}{f} \cdot (1-R)^2.$$
(3.21)

Количество зон Френеля, укладывающихся на зеркалах открытого резонатора, можно рассчитать следующим способом.

Если произвести замену квадратных зеркал со стороной *a* на круглые зеркала диаметром *a*, то числом Френеля называют величину, рассчитываемую по формуле:

$$n_{\Phi p} = \left(\frac{a^2}{4 \cdot \lambda \cdot L}\right). \tag{3.22}$$

Условие частичного разрешения соседних типов колебаний открытого резонатора состоит в том, что разрешение двух соседних типов колебаний возможно при неперекрытии их резонансных кривых на оси частот. Таким образом выдоится условие:

$$\frac{\Delta f}{N_{omkp.}} >> \Delta f_{pes.}.$$
(3.23)

Если учесть выражения (3.5, 3.6, 3.17, 3.21), то вышесказанное условие (3.23) приводится к новому виду:

$$\left(\frac{\lambda \cdot L}{a^2}\right)^2 > (1-R)^3. \tag{3.24}$$

Приведенное выражение (3.24) является справедливым при применении к квадратным зеркалам. Но в случае, когда в резонаторе используются круглые зеркала с диаметром то, будет справедливо условие:

$$\frac{4}{\pi} \cdot \left(\frac{\lambda \cdot L}{a^2}\right)^2 > (1 - R)^3. \tag{3.25}$$

Если учитывать формулу (3.22), то условие будет иметь вид:

$$4 \cdot \pi \cdot n_{\Phi p}^2 \cdot (1 - R)^3 < 1. \tag{3.26}$$

В случае, когда погонное затухание колебания, траектория распространения которого пролегает вдоль оси резонатора, обозначается, как $\alpha(m^{-1})$, то изменение плотности потока мощности излучения внутри резонатора $I(Bm \cdot m^{-2})$ будет подчинятся экспоненциальному закону, приведенному в выражение:

$$\frac{dI}{dz} = -\alpha \cdot I. \tag{3.27}$$

Безразмерная величина $\alpha \cdot L = A$ определяет полные потери излучения на один проход резонатора, включающие в общем случае потери во внутрирезонаторной среде, в зеркале (на тепло и на прохождение сквозь него), на выход из резонатора через боковую поверхность (дифракционные потери).

Тогда для плотности энергии $\rho = I/c$ (Дж · м⁻³) уравнение (3.27) с учетом того, что $c = \frac{dz}{dt}$, принимает вид:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{A \cdot c}{L} \cdot \rho. \tag{3.28}$$

Решение данного уравнения будет иметь вид:

$$\rho(t) = \rho_0 \cdot exp\left[-\frac{A \cdot c}{L} \cdot t\right]. \tag{3.29}$$

Вышесказанное является свидетельством экспоненциального затухания с течением времени значения энергии ρ_0 собственного колебания, которая была запасена в начальный момент.

Время жизни фотона в моде определяется величиной:

$$\frac{A \cdot c}{L} = \tau_{\rho \phi \phi}(c). \tag{3.30}$$

Этот коэффициент называется эффективным временем жизни фотона в моде. Чем больше коэффициент затухания энергии моды, тем меньшее время проводит фотон в резонаторе перед тем, как конвертировать собственную энергию в тепловую форму или покинуть объем резонатора через боковую поверхность. Свидетельством является выражение:

$$\tau_{\varphi\phi\phi} = \frac{1}{\alpha \cdot c}.\tag{3.31}$$

Становится очевидным тот факт, что между эффективным временем жизни фотона $\tau_{эф\phi}$ и добротностью *Q* резонатора существуют связь. Использую выражение (3.15) получается формула:

$$Q = 2\pi \frac{\rho_0}{\rho_0 - \rho(T)},\tag{3.32}$$

где Т - период исследуемого типа колебания.

Поскольку существует условие $\tau_{\phi\phi\phi} >> T$, из выражения (3.32), то следовательно добротность резонатора высчитывается по формуле:

$$Q = 2\pi \frac{1}{1 - exp\left(\frac{-T}{\tau_{i}\phi\phi}\right)} = 2\pi \frac{\tau_{i\phi\phi}}{T}.$$
(3.33)

Каждый вид потерь имеет свою характеристику эффективного времени жизни фотона. Из этого следует выражение:

$$\tau_{y\phi\phi}^{-1} = \sum_{i} \tau_{y\phi\phi}^{-1}_{i}.$$
 (3.34)

Главным отличием дифракционных потерь от иных видов потерь в среде, заполняющей резонатор, и в зеркалах, является тот факт, что их невозможно устранить. Приблизительную оценку величины дифракционных потерь можно исследовать следующим образом. Предполагается, что освещение одного из зеркал производится равномерно по всей поверхности. Пучок света, траектория движения которого направлена в сторону противолежащего зеркала, увеличивает свой радиус за счет явления дифракции на значение $\sqrt{\lambda \cdot L}$. Так, как существует условие $\sqrt{\lambda \cdot L} \ll a/2$, то относительную доля дифракционных потерь можно еремона.

$$A_{\partial u \phi p.} = \left(\frac{n n o \psi a \partial b \partial u \phi p a \kappa \psi u o h h o ro \kappa o n b \psi a}{n n o \psi a \partial b } \right)^2 = \left(4 \cdot \frac{\sqrt{\lambda \cdot L}}{a}\right)^2 = \frac{4}{n_{\phi p}}.$$
(3.35)

В реальных условиях распределение амплитуды оптического поля по поверхности зеркал резонатора имеет сильно неоднородный характер. К примеру, для низшего типа колебаний, максимум находится в центре зеркала и плавное уменьшение до нуля к его краю. Таким образом реальные потери из-за явления дифракции на кромке зеркал являются значительно меньшими, чем значение, которое определяется по формуле (3.35). Реальные потери могут быть рассчитаны с помощью приближенной функции:

$$A_{\partial u\phi p.} = 10 \cdot exp(-10 \cdot n_{\phi p}). \tag{3.36}$$

Существует критерий устойчивости, согласно которому открытые резонаторы можно разделить на 3 группы:

- 1. Устойчивые;
- 2. Неустойчивые;
- 3. Пограничные.

Движение оптического излучения собственного колебания в устойчивых резонаторах описывается следующим образом. Оптическое поле со скоростью света передвигается по траектории от зеркала к зеркалу под малым углом к оси резонатора и медленно смещается в поперечном направлении. Но достигнув каустической поверхности, происходит отражение падающего излучения назад к оси резонатора. Из этого следует, что в устойчивом резонаторе поток оптической мощности движется по замкнутой траектории и повторяет ее большое количество раз до окончательного затухания. В случае неустойчивого резонатора поток мощности, при поперечном смещении в момент достижения открытой боковой поверхности, не отражается к оси резонатора. Он покидает его. Таким образом следует вывод, что его траектория является незамкнутой. Резонаторы пограничного типа теряют свою устойчивость при малейшем нарушении их геометрии.

Условие устойчивости открытого резонатора определяется следующим неравенством:

$$0 \le g_1 \cdot g_2 \le 1;$$
 (3.37)

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1}; \tag{3.38}$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{R_2},\tag{3.39}$$

где *R*₁, *R*₂ - радиусы кривизны зеркал.

Границы области устойчивости, представленные на рисунке 3.8, можно описать с помощью системы уравнений:



Рис. 3.8. График границ устойчивости открытого резонатора

3. Техника безопасности

При проведение вычислительных операций и экспериментов с помощью компьютера, необходимо удерживать глаза на расстоянии не менее 600-700 мм от экрана согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.

4. Лабораторные задания

1. Используя (25), произвести расчёт Q(f) закрытого металлического резонатора в диапазоне СВЧ ($f = 3 \cdot 10^9 \dots 3 \cdot 10^{11}$ Гц) и в оптическом диапазоне ($f = 3 \cdot 10^{13} \dots 3 \cdot 10^{15}$ Гц), для трех значений σ : $\sigma_1 = 5.08 \cdot 10^7 \frac{C_M}{M}$ (медь), $\sigma_2 =$

3.54 · 10⁷ $\frac{C_{M}}{M}$ (алюминий) и $\sigma_{3} = 6.14 \cdot 10^{7} \frac{C_{M}}{M}$ (серебро). Построить график зависимости $Q_{1}(f), Q_{2}(f), Q_{3}(f)$. Использовать $\mu_{a} = \mu_{0} = 4\pi \cdot 10^{-7} \Gamma$ н/м.

2. Используя (26), произвести расчёт и построить график зависимости $\Delta f_{pes}(f)$.

3. Используя (27) произвести расчёт и построить график зависимости $N_f(f)$, внося изменения f от $3 \cdot 10^9$ Гц до $3 \cdot 10^{15}$ Гц.

4. Используя (28), произвести расчёт и построить график зависимости $S_f(f)$, внося изменения f от $3 \cdot 10^9$ Гц до $3 \cdot 10^{15}$ Гц. Размер a принять равным: $a_1 = 1$ см, $a_2 = 10$ см.

5. Используя (29 произвести расчёт и построить график зависимости $\Delta f_{\text{соседн. закр.}}(f)$.

6. Используя (30), произвести расчёт и построить график зависимости $\Delta f_{\text{соседн.закр.}}(L)$, внося изменения L в диапазоне от 100 мкм (в полупроводниковом лазере) до 10 м (в лазере на углекислом газе).

7. Используя (33), произвести расчет Q для различных типов лазеров. Полупроводниковый лазер: L = 100 мкм, $\lambda = 0.9$ мкм; $R_1 = 0.5$; $R_2 = 0.75$. Гелий-неоновый лазер: L = 0.1...1 м, $\lambda = 0.63$ мкм; $R_1 = 0.9$; $R_2 = 0.95$, $R_3 = 0.98$. Лазер на неодиме: L = 0.05...1 м, $\lambda = 1.06$ мкм; $R_1 = 0.85$; $R_2 = 0.9$, $R_3 = 0.95$.

8. Используя (35), произвести расчёт зависимости $\Omega\left(\frac{a}{L}\right)$ для предоставленных значений $R: R_1 = 0.75; R_2 = 0.9, R_3 = 0.98$. Отношение $\left(\frac{a}{L}\right)$ меняется в диапазоне от 50 до 5 · 10⁵.

9. Используя (36), произвести расчёт и построить график зависимости $F\left(\frac{a}{L}\right)$.

10. Используя (38), произвести расчёт и построить график зависимости $n_{\Phi p} \left(\frac{a}{L}\right)$ для следующих типов лазеров: полупроводниковый: $a_1 = 1 \times 4$ мкм²; $a_2 = 1 \times 10$ мкм²; $a_3 = 1 \times 50$ мкм²; L = 50...100 мкм; $\lambda = 0.9$ мкм; рубиновый лазер: $a_1 = 3$ мм; $a_2 = 9$ мм; $a_3 = 12$ мм; L = 0.05...0.4 м; $\lambda = 0.69$ мкм; гелий-неоновый лазер: $a_1 = 5$ мм; $a_2 = 15$ мм; $a_3 = 50$ мм; L = 0.1...1 м и $L = 4 \cdot 10^4$ м; $\lambda = 0.63$ мкм; углекислотный лазер: $a_1 = 20$ мм; $a_2 = 50$ мм; $a_3 = 80$ мм; L = 0.1...10 м; $\lambda = 10.6$ мкм; дисковый углекислотный лазер: a = 100 мм; L = 5 мм; $\lambda = 10.6$ мкм.

11. Используя (32, 41), для лазеров и их характеристик, исследовать выполнение условия разрешения при $R_1 = 0.5$; $R_2 = 0.8$, $R_3 = 0.95$.

12. Используя (47), произвести расчёты $\tau_{э\phi\phi}$ для резонаторов с затуханием при значениях $\alpha_1 = 0.001$; $\alpha_2 = 0.01$, $\alpha_3 = 0.1$.

13. Используя (52), произвести расчёты $A_{\text{дифр}}$ для лазеров и их характеристик.

14. Используя (53-55), исследовать устойчивость представленных открытых резонаторов: *L* =1 м=const

a) $R_1 = R_2 = \infty$; b) $R_1 = R_2 = 10 \text{ m}$; b) $R_1 = R_2 = 1 \text{ m}$; c) $R_1 = R_2 = 0.75 \text{ m}$; c) $R_1 = R_2 = 0.75 \text{ m}$; c) $R_1 = R_2 = 0.5 \text{ m}$; c) $R_1 = R_2 = 0.25 \text{ m}$; c) $R_1 = R_2 = -10 \text{ m}$; c) $R_1 = R_2 = -1 \text{ m}$; c) $R_1 = 0.5 \text{ m}$; $R_2 = -0.5 \text{ m}$.

Составить диаграмму $g_2(g_1)$ и точками отметить все представленные варианты резонаторов. Построить схемы данных резонаторов с указанием на них размещение центров кривизны и их фокусов.

5. Контрольные вопросы

1. Какие типы резонаторов обычно используются в СВЧ диапазоне?

2. От чего зависит добротность полого металлического резонатора?

3. Какие характеристики закрытого резонатора ухудшаются при уменьшении его добротности?

4. Почему закрытый металлический резонатор малых размеров ($a \approx \lambda$) не может быть использован в оптическом диапазоне?

5. Почему закрытый металлический резонатор больших размеров ($a >> \lambda$) не может быть использован в оптическом диапазоне?

6. Почему в открытом резонаторе спектр собственных колебаний значительно разрежен по сравнению с закрытым резонатором?

7. Перечислить основные параметры открытых резонаторов. Пояснить их физический смысл.

8. Как изменяется с ростом частоты добротность закрытого металлического резонатора фиксированных размеров? При этих же условиях изменяется ли ширина резонансной кривой собственных типов колебаний?

9. Как изменяется частотный «зазор» между соседними колебаниями закрытого резонатора?

10. Какой интервал частот разделяет два соседних продольных типа колебаний открытого резонатора? Изменяется ли он с возрастанием частоты?

11. Какие виды потерь определяют добротность открытого резонатора?

12. Почему дифракционные потери неустранимы принципиально? Как можно уменьшить эти потери?

13. Пояснить сущность понятия «зоны Френеля».

14. От чего зависит число зон Френеля, укладывающихся на поверхности зеркала открытого резонатора?

15. Что определяет продолжительность «жизни фотона» в открытом резонаторе?

16. Дать общее определение устойчивых и неустойчивых открытых резонаторов.

17. Привести математическую запись критерия устойчивости открытого резонатора.

6.4. Лабораторная работа № 4. Расчет параметров ВОЛС

Цель работы – рассчитать все параметры ВОЛС по известным параметрам волокна, источника излучения и приемника. К параметрам ВОЛС относятся: полный коэффициент поглощения, полная дисперсия, максимальная длина участка регенерации, число участков регенерации, и др.

1. Расчет дисперсионных параметров

Для успешного прохождения света по оптическому волокну он должен войти в волокно и отражаться от оболочки с углами, большими критического. Из-за того, что в результате преломления направление распространения световых лучей меняется, для успешного прохождения луча по оптическому волокну накладываются ограничения на угол, под которым луч может поступить в сердечник. Любой луч, падающий на оболочку под углом меньше критического, проникнет в оболочку и будет потерян. Это показано на рис. 4.1.

Поскольку волокно цилиндрическое, входящие лучи образуют конус. Лучи, входящие в сердечник изнутри конуса, будут падать на оболочку под углом больше критического, поэтому смогут благополучно распространяться вдоль волокна. Этот конус называют "конусом приема" (рис. 4.2).



Рис. 4.1. Луч света, проникающий в сердечник волокна



Рис. 4.2. Конус приема оптического

Половина (θ_1) от угла при вершине конуса приема называется "углом приема". Его величина зависит, от показателей преломления сердечника, оболочки и воздуха (причем у воздуха показатель преломления 1) или любого другого материала источника света. Луч света, входящий в сердечник под углом, большим θ_1 будет рассеиваться в оболочке. Луч света, входящий под углом ровно θ_1 , будет падать на границу сердечника и оболочки под (критическим) углом θ_C и будет двигаться параллельно этой границе.

Для указания собирательной способности волокна используется специальная мера. Она называется "числовая апертура" (numerical aperture). Числовая апертура представляет собой синус угла приема.

Числовая апертура характеризует эффективность ввода света в волокно от диффузионного источника с диаграммой направленности $I(\theta) = \cos \theta$:

NA = sin(
$$\theta_1$$
) = $\sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \cdot sin(\theta_2)$. (4.1)

Оптические волокна классифицируются в соответствии с числом лучей света, которые волокно способно проводить одновременно. Это называется рабочей модой волокна. Следовательно, мода — это просто луч света. Чем выше рабочая мода волокна, тем больше лучей света могут проходить через сердечник. Волокно может содержать несколько тысяч лучей одновременно или же лишь один луч.

Важно для начала рассмотреть природу и свойства модовой передачи. У волокна с большое апертурой и/или диаметром будет большое число мод (лучей света), распространяющихся на протяжении этого волокна. Ненаправленный источник света (то есть такой, который одинаково излучает лучи во всех направлениях) вроде светодиода в одном импульсе излучает несколько тысяч световых лучей. Поскольку источник света вводит в сердечник пучок света с больше, углом, каждая мода света, распространяющаяся вдоль волокна с отличающимся углом, пройдет различное расстояние. Следовательно, время прохождения волокна от начала до конца будет для различных лучей разным. Световой передатчик вводит в волокно все моды одновременно, сигнал в начале волокна выглядит в виде короткого острого импульса. К тому времени, когда сигнал достигнет конца волокна, он растянется и будет выглядеть как удлиненный импульс. Это явление называется "модовой дисперсией" (рис. 4.3).



Рис. 4.3. Эффект дисперсии импульса вследствие многомодового распространения

Количество мод, которые могут распространяться в ВОЛС:

$$M = \frac{\theta_1 \cdot d \cdot N A^2}{2 \cdot \lambda},\tag{4.2}$$

где *d* - диаметр сердечника волокна в метрах;

λ - длина волны в метрах;

NA - числовая апертура.

Количество групп мод определяется как:

$$Q = \sqrt{M}.\tag{4.3}$$

Под межмодовой дисперсией (нс/км) понимается задержка во времени прохода разных мод на единицу длины линии, так как каждая мода распространяется под своим углом:

$$\frac{\Delta T_{MO,\overline{l}}}{l} = \frac{n_1 \cdot \Delta \cdot 10^6}{c} \cdot L \quad \text{MKC/KM}, \tag{4.4}$$

где с - скорость света.

 Δ определяется как:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1};$$
(4.5)

L- длинна световода в км. с- скорость света в м/с.

Материальная дисперсия – это дисперсия, обусловленная зависимостью показателя преломления от длины волны: волны различной длины, движутся с различными скоростями по BC, даже в одной и той же моде.

Она определяется дисперсией материала волокна:

$$\frac{\Delta T_{MAT}}{l} = \frac{\Delta \lambda \cdot 10^6}{\lambda \cdot c} |Y_m|, \text{ MKC/KM}, \qquad (4.6)$$

где $\Delta\lambda$ - ширина спектральной линии в метрах;

 λ - длинна волны в метрах. с- скорость света в м/с.

Полная дисперсия приближенно вычисляется как среднеквадратическая величина:

$$\frac{\Delta T}{l} \approx \sqrt{\left(\frac{\Delta T_{MOH}}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{MAT}}{l}\right)^2} \text{ MKC/KM.}$$
(4.7)

Так как преобладает межмодовая дисперсия, то информационная емкость ВОЛС (МГц*км):

$$\Delta f l = \frac{1}{2\Delta T/l} \quad \mathrm{M}\Gamma\mathrm{II}\cdot\mathrm{K}\mathrm{M},\tag{4.8}$$

где $\Delta T/l$ - полная дисперсия в мкс/км.

Длина участка регенерации, ограничиваемая дисперсией (считаем, что 1МГц ≈ 1Мбит/с):

$$l_{\Delta T} = \frac{\Delta f l}{B} \quad \text{KM},\tag{4.9}$$

где В - скорость передачи информации (т.к. мы приравниваем 1МГц ≈ 1Мбит/с]), то измеряем в данной формуле в [МГц];

 Δfl - информационная емкость в [МГц·км].

2. Расчет параметров ввода-вывода

Площадь поперечного среза световода:

$$S_{cepd} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \, \, \mathbf{M}^2,\tag{4.10}$$

где d - диаметр сердцевины в метрах.

Светоизлучающий диод (СИД) в простейшем случае представляет полупроводниковый диод с p-n - гомопереходом. Излучаемый им свет является следствием излучательной рекомбинации электронов и дырок в активном p-nслое полупроводникового материала. Генерируемое СИД излучение некогерентно, т.к. его фотоны рождаются спонтанно. Три преимущества по сравнению с полупроводниковым лазером привлекают к СИД внимание разработчиков ВОЛС: низкая стоимость, значительный ресурс работы и ненужность термостабилизации. Конструкция СИД бывает двух типов: с торцевым выводом излучения и с излучающей поверхностью (рис. 4.4 – СИД в поперечном разрезе).



Рис. 4.4. СИД в поперечном разрезе

Диаграмма направленности СИД первого типа обычно имеет угловую ширину порядка 30°, тогда как для СИД второго типа – много больше (порядка 120°). Поэтому в оптическое волокно СИД с излучающей поверхностью вводит очень малую часть мощности выходного излучения – около 1 %. В этом отношении диод с торцевым выводом имеет преимущества.

Полупроводниковый лазер — твердотельный лазер, в котором в качестве рабочего вещества используется полупроводник. В таком лазере, в отличие от лазеров других типов (в том числе и других твердотельных), используются излучательные переходы не между локализованными уровнями энергии атомов, молекул и ионов, а между разрешёнными энергетическими зонами или подзвонами кристалла. В полупроводниковом лазере накачка осуществляется:

- 1. Непосредственно электрическим током (прямая накачка);
- 2. Электронным пучком;
- 3. Электромагнитным излучением.

Под именем полупроводниковых часто встречается гибридный лазер, мощного состоящий светодиода накачки И наклеенного него ИЗ на твердотельного активного элемента. Плюс таких лазеров в TOM, что светодиодную структуру накачки можно сделать довольно протяженной и, соответственно, мощной. Механические деформации нагрева ОТ меньше сказываются на «Полупроводниковые» лазеры активном элементе. с мощностями единицы-десятки ватт делают в основном именно по такой технологии. Визуально отличить гибридный лазер от полупроводникового довольно сложно.

Поскольку в полупроводниковом лазере возбуждаются и излучают коллективно атомы, составляющие кристаллическую решётку, сам лазер может обладать очень малыми размерами.

Другими особенностями полупроводниковых лазеров являются высокий КПД, малая инерционность, простота конструкции.

Типичным представителем полупроводниковых лазеров является лазерный диод — лазер, в котором рабочей областью является полупроводниковый p-n переход. В таком лазере излучение происходит за счет рекомбинации электронов и дырок.

Параметры источника определяются как:

$$NA_{u_{3,1}} = \sin \phi_{0,5u_{3,1}}; \tag{4.11}$$

$$R_{u_{3,7}} = \frac{\lambda \cdot 10^3}{4 \cdot \phi_{0,5 u_{3,7}}} \, [\text{M}], \qquad (4.12)$$

где λ - длинна волны в метрах, $\phi_{0,5_{U3Л}}$ в градусах;

*S*_{изл} определяется как:

$$S_{u_{3,1}} = \pi \cdot R_{u_{3,1}}^2 . \ [m^2]. \tag{4.13}$$

Часть вводимой в световод мощности рассчитывается как:

$$P_{u_{3,1}} = P_{\Sigma} \cdot NA_{u_{3,1}}, \tag{4.14}$$

где P_{Σ} - мощность излучения в мкВт.

Оптический сигнал может быть детектирован самым обычным полупроводниковым диодом. Если частота (или длина волны) принимаемого модулированного света отвечает требованиям $\omega \approx W_{3A\Pi P}/\hbar$ и $\lambda = 1.239/W_{3A\Pi P}$, в этом случае фотоприемник строится по схеме, приведенной на рис. 4.5.



Рис. 4.5. Схема фотоприёмника

Несмотря на простоту и дешевизну, p-n-фотодиоды не нашли применения в ВОЛС по причине следующих присущих им недостатков. Во-первых, обедненная зона, формирующаяся в ходе пространственного разделения зарядов электрондырочной пары, весьма узка, составляет малую часть освещаемой поверхности диода, поэтому коэффициент использования светового потока невелик. Вовторых, поскольку значительная часть электрон-дырочных пар генерируется в объеме диода вне узкой обедненной зоны, где электрическое поле слабое, заряды медленно дрейфуют в эту зону, и ток во внешней цепи фотодетектора появляется с заметным опозданием относительно времени облучения диода оптическими импульсами, что отрицательно сказывается на быстродействии ВОЛС.

p-i-n-диоде оба недостатка устраняются путем искусственного В формирования в ходе технологического процесса выращивания диодной структуры обедненной зоны (i) между р- и п-областями. Объем обедненной зоны составляет значительную часть объема диода, хотя ее размер должен быть оптимизирован, поскольку, исходя из соображений повышения эффективности преобразования поглощаемых фотонов в пары «электрон-дырка», обедненную зону следует расширять, но слишком большой ее размер увеличивает время перемещения электронов и дырок к краям зоны, что снижает быстродействие. Структура p-i-n-диода и распределение силы поля поперек него изображены на рис. 4.6.



Рис. 4.6. Структура p-i-n-диода и распределение силы поля поперек него

Что касается физики процессов, то в p-i-n-диоде они те же самые, что в p-nдиоде. Пары «электрон-дырка» при поглощении фотона генерируются в активной p^+ -области. Толщина активного слоя небольшая (тонкий обедненный слой вблизи p-n-перехода), и возникшие электроны мигрируют сквозь i-зону в направлении к n^+ -области. Этому способствует обратное смещение, подведенное к контактам диода. Реальная структура кремниевого p-i-n диода показана на рис. 4.7. В такой структуре обычно используется тонкий слаболегированный n^- - слой, так что граница обедненного слоя проникает в сильнолегированную подложку.



Рис. 4.7. Реальная структура кремниевого p-i-n диода

От p-i-n-фотодиода лавинный фотодиод отличается присутствием внутреннего усиления тока. Величина обратного напряжения смещения в лавинном фотодиоде ($U_{CM} \sim 100...500$ В) значительно превосходит ту, которая типична для p-i-n-фотодиода (5...30В).

Внутреннее усиление фототока в ЛФД происходит вследствие рождения носителей зарядов при ударной ионизации в сильном поле области умножения. Вторичные порождают третичные и так далее: развивается лавина. Поэтому, если в p-i-n-диоде даже в идеале один поглощенный фотон приводит к появлению только одного фотоэлектрона, т. е. соотношение фотоэлектрон/фотон не превышает единицы, то в ЛФД оно увеличивается в десятки, сотни раз: фотоэлектрон/фотон ≈50...1000.

Типичная структура лавинного фотодиода сквозного действия представлена на рис. 4.8.



Рис. 4.8. Структура лавинного фотодиода: 1 – отрицательный кольцевой электрод; 2 – просветляющее покрытие; 3 – обедненная зона – область генерации носителей заряда дырками; 4 – узкая зона сильного поля, максимального поглощения фотонов и лавинообразного поглощения

Параметры приемника:

$$NA_{np} = \sin\phi_{0,5np}; \tag{4.15}$$

$$R_{np} = \frac{\lambda}{4 \cdot \phi_{0,5np}};\tag{4.16}$$

$$S_{np} = \pi \cdot R_{np}^2. \tag{4.17}$$

Часть мощности, падающей на фотодетектор из световода:

$$P_{np} = P_{\Sigma} \cdot NA_{np}. \tag{4.18}$$

3. Расчет коэффициент ослабления

Ослабление — величина, выражающая в логарифмическом виде понижение мощности сигнала (радио- или оптического). Ослабление равно логарифму отношений исходной мощности к уменьшенной, основание логарифма зависит от выбранной единицы. Ослабление является величиной обратной коэффициенту усиления, обобщающим понятием для обоих величин служит коэффициент передачи:

$$\alpha_{nor} \approx \frac{8,69 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot tg\delta}{\lambda} [Дб/км],$$
(4.19)
где λ - длинна волны в метрах.

В качестве материала сердцевины используется стекло, эмпирический коэффициент рассеяния которого равен $K_p = 1,5[M\kappa M^4 \cdot \partial E/\kappa M]$, тогда:

$$\alpha_{pac} \approx \frac{K_p}{\lambda^4},\tag{4.20}$$

где λ - длина волны в мкм

Полный коэффициент ослабления рассчитывается по формуле:

$$\alpha = \alpha_{no2} + \alpha_{pac} + \alpha_{\partial on}. \tag{4.21}$$

4. Расчет энергетического потенциала ВОЛС

Спектральный энергетический потенциал [Мбит/с]:

$$A_{cn} = \frac{P_{\Sigma}}{P_{npMuH}},\tag{4.22}$$

где P_{Σ} - мощность излучения в Вт,

 $P_{\text{прмин}}$ - спектральная пороговая чувствительность в $\left[\frac{B_T}{M\delta um/c}\right]$.

Спектральная чувствительность отношение фототока, обусловленного потоком излучения, лежащего в достаточно узком интервале длин волн около заданной длины волны, к энергии этого потока.

Интегральный энергетический потенциал:

$$A_{uhm} = \frac{A_{cn}}{B}.$$
(4.23)

Перейдем к децибелам:

$$A_{\partial \mathcal{F}} = 10 \, lg \, A_{u \mu m}. \tag{4.24}$$

5. Расчет длины участка регенерации и их количества

Длина участка регенерации, ограниченная поглощением:

$$l_{\alpha} = \frac{A_{\partial E}}{\alpha} \quad \text{KM.} \tag{4.25}$$

Сравниваем длину участка, ограниченную поглощением l_{α} и длину участка, ограниченную дисперсией, и выбираем наименьшее — это и будет максимальная длина участка регенерации.

Количество участков регенерации:

$$N_{pez} = \frac{l}{l_{pez}}.$$
(4.26)

6. Лабораторные задания

Задание:

- 1. Рассчитать дисперсионные параметры;
- 2. Рассчитать параметры ввода вывода;
- 3. Рассчитать коэффициент ослабления;
- 4. Рассчитать энергетический потенциал;
- 5. Рассчитать длину участка регенерации и их количества.

Выполнить все задания лабораторной работы, необходимые данные для расчётов взять из табл. 4.1 в соответствии с вариантом задания.

Таблица 4.1

n			~		v	~
Запание и	ΠΠΠ	выполнения	π_{2}	natoi	пнои	nanotli
Jaganne 2	цлл	DDITIOJITICITI	11400	paro	phon	paooibi

	1	2	3	4
1. Параметры волокна				
Диаметр сердцевины (d)	50 мкм	55 мкм	60 мкм	70 мкм
Коэффициент преломления сердцевины (n ₁)	Градиентное	Градиентное	Градиентное	Градиентное
Коэффициент преломления оболочки (n ₂)	1,43	1,23	1,68	1,35
Тангенс потерь сердцевины (gб)	1,425	1,215	1,69	1,34
Дополнительный коэффициент поглощения (адоп)	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10-10
Коэффициент материальной дисперсии (Ym)	1,1 Дб/км	1,3 Дб/км	0,9 Дб/км	0,8 Дб/км
Длина световода (L)	40 км	30 км	50 км	60 км
2. Параметры источника излучения			·	·
Длина волны (λ)	0,95 мкм	0,8 мкм	0,85 мкм	0,9 мкм
Ширина спектральной линии (Δλ)	2,5 нм	1,8 нм	2,1 нм	2 нм

Окончание табл. 4.1

Мощность излучения	180 мкВт	155 мкВт	165 мкВт	190 мкВт
(\mathbf{P}_{Σ})				
Скорость передачи	100 Мбит/С	70 Мбит/С	150 Мбит/С	90 Мбит/С
информации (В)				
Расходимость (2ф0,5u)	55 град.	45 град.	60 град.	50 град.
3. Параметры				
приемной части				
Спектральная	0,7	0,8	0,75	0,8 нВт/Мбит/С
пороговая	нВт/Мбит/С	нВт/Мбит/С	нВт/Мбит/С	
чувствительность				
(Рпр.мин.)				
Расходимость (2ф0,5u)	80 град.	70 град.	75 град.	65 град.
Длина линии (1)	40 км	30 км	50 км	60 км

6.1. Расчет дисперсионных параметров

Задание:

- 1. По формуле (4.1) рассчитать числовую апертуру;
- 2. Используя табл. 6 выразить θ_1 ;
- 3. Рассчитать по формуле (4.2) количество мод;
- 4. Рассчитать по формуле (4.3) количество групп мод;
- 5. По формуле (4.4) вычислить межмодовую дисперсию;
- 6. По формуле (4.5) вычислить материальную дисперсию;
- 7. Определить полную дисперсию по формуле (4.6);
- 8. С помощью формулы (4.7) найти информационную ёмкость ВОЛС;
- 9. По формуле (4.8) вычислить длину участка регенерации, ограниченную дисперсией;

10. Сделать вывод.

6.2. Расчет параметров ввода-вывода

Задание:

1) Рассчитать по формуле (4.10) площадь поперечного среза световода;

2) Определить по формулам (4.11), (4.12) и (4.13) параметры источника;

3) С помощью формулы (4.14) рассчитать часть вводимой в световод мощности;

4) Определить по формулам (4.15), (4.16) и (4.17) параметры приёмника;

5) С помощью формуле (4.18) рассчитать часть мощности, падающей на фотодетектор из световода;

6) Сделать вывод.

Данные взять из таблицы 4.2.

пеобходимые для выполнен	ия лаобраторной работы данные
$Sin\theta_1$	Θ_1
0.119	6.8344
0.164	9.4391
0.184	10.6028
0.192	11.0695
0.707	45
0.766	50
0.819	55

Необходимые для выполнения лабораторной работы данные

6.3. Расчет коэффициента ослабления

Задание:

- 1) По формуле (4.19) рассчитать коэффициент поглощения;
- 2) По формуле (4.20) рассчитать коэффициент рассеяния;
- 3) По формуле (4.21) вычислить полный коэффициент поглощения;

4) Сделать вывод.

6.4. Расчет энергетического потенциала ВОЛС

Задание:

- 1) По формуле (4.22) вычислить спектральный энергетический потенциал;
- 2) По формуле (4.23) вычислить интегральный энергетический потенциал;
- 3) Перейти к децибелам, используя формулу (4.24);
- 4) Сделать вывод.

6.5. Расчет длины участка регенерации, ограниченную поглощением

Задание:

1) По формуле (4.25) рассчитать длина участка регенерации, ограниченную поглощением;

2) С помощью формулы (4.26) найти количество участков регенерации;

3) Сделать вывод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение требований к скорости передачи данных привело к появлению оптических технологий. Современное развитие цифровых устройств имеет высокие темпы роста и соответственно создается необходимость в постоянном увеличение пропускной способности каналов приёма-передачи информации.

В данном лабораторном практикуме были описаны исторические перспективы, принципы работы, структура и задачи оптических технологий передачи информации. Также приведены лабораторные задания для закрепления материала и приобретения навыков практического применения теоретических сведений.

На данный момент оптические технологии занимают важное место в передачи информации. Всемирная оптоволоконная сеть является главным глобальным каналом, связывающим сеть Internet. Нельзя не отметить, что сейчас актуально подключение ВОЛС к обычным цифровым устройствам простых пользователей (персональные компьютеры, телевизоры). Все это получило развитие благодаря характеристикам оптических методов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Huurdeman A.A. The worldwide history of telecommunications. - New Jersy: Wiley & Sons, 2003.

2. Agrawal G.P. Fiber-optic communication systems. – 4th edn. – New Jersy. – Wiley & Sons. 2010.

3. Chappe L. Histoire de la télégraphie. - Paris: NDDC, 1824.

4. Holzman G.J., Pehrson B. The early history of data networks. - New Jersy: Wiley & Sons, 2003.

5. Jones A. Historical sketch of the electrical telegraph. - New-York: Putnam, 1852.

6. Патент США №174,465. Improvement in telegraphy. Bell A.G.

7. Pratt W.K. Laser communication systems. - New Jersy: Wiley & Sons, 1969.

8. Miller S.E. Communication by laser // Sci Am. - 1966. - №214.

9. Hecht J. City of light: the story of fiber optics. - New York: Oxford University Press, 1999.

10. Kao K.C., Hockham G.A. Dielectric-fiber surface waveguides for optical frequencies // Proc IEE. - 1966. - №113.

11. The Nobel Prize in Physics 2009 // The Nobel Prize URL: https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2009/summary/ (дата обращения: 05.06.2020).

12. Kapron F.P., Keck D.B., Maurer R.D. Radiation losses in glass optical waveguides // Appl Phys Lett. - 1970. - №17.

13. Miya T., Terunuma Y., Hosaka T., Miyoshita T. Ultimate low-loss single-mode fiber at 1.55 mm // Electron Lett. - 1979. - №15.

14. Alferov Z. Double heterostructure lasers: early days and future perspectives // IEEE J Sel Top Quant Electron. - 2000. - №6.

15. Hayashi I., Panish M.B., Foy P.W., Sumski S Junction lasers which operate continuously at room temperature // Appl Phys Lett. - 1970. - №17.

16. Willner A.E. Several historical articles in this millennium issue cover the development of lasers and optical fibers // IEEE J Sel Top Quant Electron. - 2000. - №6.

17. Kogelnik H. High-capacity optical communications: personal recollections // IEEE J Sel Top Quant Electron. - 2000. - №6.

18. Fukuchi K., Kasamatsu T., Morie M., Ohhira R., Ito T., Sekiya K, Ogasahara D., Ono T. 10.92-Tb/s (273 _ 40-Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeatered transmission experiment // Proceedings of the Optical Fiber Communication (OFC) conference. Baltimor. 2000.

19. Essiambre R.J., Tkach R.W. Capacity trends and limits of optical communication networks // Proc IEEE. - 2012. - №100.

20. Zhou X. 64-Tb/s, 8 b/s/Hz, PDM-36QAM transmission over 320 km using both preand post-transmission digital signal processing // J Lightwave Techno. - 2012. - №29.

21. Shannon C.E. A mathematical theory of communication // Bell Syst Tech J. - 1948. - №27.

22. Essiambre R.J., Kramer G., Winzer P.J., Foschini G.J., Goebel B. Capacity limits of optical fiber networks // Lightwave Technol. - 2010. - №28.

23. Ryf R. Mode-division multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent 6 x 6 MIMO processing // Lightwave Technol. - 2012. - №30.

24. Takara H. 1.01-Pb/s crosstalk-managed transmission with 91.4-b/s/Hz aggregated spectral efficiency // los-Angeles. 2012.

25. Richardson D.J., Fini J.M., Nelson L.E. Space-division multiplexing in optical fibres // Nat Photon. - 2012. - №6.

26. Li G., Bai N., Zhao N., Xia C. Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication // Adv Opt Commun. - 2014. - №6.

27. Fontaine N.K. 30_30 MIMO Transmission over 15 Spatial Modes. // Proceedings of the Optical Fiber Communication (OFC) conference. Dallas. 2015

28. Free-Space Optics / Bouchet O., Sizun H., Boisrobert C. , Fornel F., Favennec P-N. и др. - London: ISTE, 2006.

29. Звелто О. Принципы лазеров : учеб. пособие / О. Звелто. - М.: Мир. 1990, - 560 с.

30. Карлов Н. В. Лекции по квантовой электронике : учеб. пособие / Н. В. Карлов. - М.: Наука, 1983. - 320 с.

31. Пратт В. К. Лазерные системы связи : учеб. пособие / В. К. Пратт. - М.: Связь, 1972. - 323с.

32. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере : учеб. пособие / В. И. Татарский. - М.: Наука, 1967. - 548с.

33. Убайдуллаев Р. Р. Волоконно-оптические сети : учеб. пособие / Р. Р. Убайдуллаев. – М.: Эко-Трендз Ко, 1998. - 332с.

34. Шереметьев А. Г. Статистическая теория лазерной связи : учеб. пособие / А. Г. Шереметьев. - М.: Связь, 1971. - 264с.

35. Шереметьев А. Г. Лазерная связь : учеб. пособие / А. Г. Шереметьев, Р. Г. Толпарев. - М.: Связь, 1974. - 384с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	
1. Историческая перспектива оптических устройств в радиотехнике	
2. Основные понятия об оптической связи	9
2.1. Оптические передатчики и приемники	9
2.2. Оптические волокна и кабели	
2.3. Оптическая передача данных в свободном пространстве	
2.4. Форматы модуляции	
2.5. Мультиплексирование каналов	
3. Эволюция оптической связи	
3.1. Первые три поколения	
3.2. Четвертое поколение	
3.3. Пятое поколение	
4. Шестое поколение	
4.1. Предел пропускной способности одномодовых волокон	
4.2. Мультиплексирование с пространственным разделением	
5. Всемирная волоконно-оптическая сеть связи	
6. Лабораторный практикум	
6.1. Лабораторная работа №1	
6.2. Лабораторная работа №2	
6.3. Лабораторная работа №3	
6.6. Лабораторная работа №4	
Заключение	
Библиографический список	

Учебное издание

Володько Александр Владиславович Фёдоров Сергей Михайлович Бобылкин Игорь Сергеевич Каграманов Эдуард Эдуардович

ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА В РАДИОТЕХНИКЕ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Компьютерная верстка Э.Э. Каграманов

Подписано к изданию _____.2021

Объем данных Мб.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14