



*Томский межвузовский центр
дистанционного образования*

В.И. Ефанов

ВВЕДЕНИЕ В СПЕЦИАЛЬНОСТЬ

Физика и техника оптической связи

Учебное пособие

2006

Рецензент: заведующий кафедрой СВЧиКР Шарангович С.Н.

Корректор: Воронина М.А.

Ефанов В.И.

Введение в специальность. Физика и техника оптической связи: Учебное пособие. — Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2006. — 166 с.

Излагается история развития волоконно-оптической связи, включая квантовую электронику и лазерную технику. Приведены преимущества оптических линий связи перед другими средствами связи. Дается описание принципов построения оптического волокна и кабелей на его основе. Рассматриваются приемопередающие оптические модули, их назначение и основные характеристики. Характеризуется современное состояние и перспективы развития.

Кратко изложены история ТУСУРа и этапы развития кафедры СВЧиКР.

Приведены нормативные требования к высшему образованию в соответствии с Государственным образовательным стандартом Российской Федерации (ГОС РФ) по направлению «Телекоммуникации».

Излагаются права и обязанности студентов. Приведены элементы рейтинговой системы оценки успеваемости студентов ТУСУРа.

Пособие предназначено для студентов специальности «Физика и техника оптической связи» (210401) РТФ ТУСУР и может быть использовано студентами других специальностей.

© Ефанов В.И., 2006

© Томский межвузовский центр
дистанционного образования, 2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Список сокращений	7
Глава 1. История развития систем связи.....	9
1.1 Радиосвязь — основные этапы истории.....	9
1.2 Спектр электромагнитных волн	14
1.3 Этапы развития лазерной техники.....	19
1.4 История развития оптической связи.....	28
Глава 2. Основные понятия телекоммуникаций	38
2.1 Информация, сообщения, сигналы	38
2.1.1 Основные единицы измерения в телекоммуникации	46
2.2 Виды и технологии систем связи.....	54
2.3 Стандартизация и метрология в телекоммуникации	60
2.4 Электрические кабели связи.....	66
Глава 3. Основы теории волоконно-оптической связи.....	74
3.1 Оптическое волокно и его характеристики.....	74
3.1.1 Основные законы волоконной оптики	74
3.1.2 Конструкция ОВ	77
3.1.3 Методы изготовления ОВ.....	80
3.1.4 Классификация и характеристики ОВ	83
3.2 Классификация и конструкция волоконно-оптических кабелей.....	93
3.2.1 Классификация оптических кабелей	94
3.2.2 Основные компоненты волоконно-оптического кабеля.....	95
3.3 Пассивные компоненты ВОЛС	99
3.3.1 Оптические соединители	99
3.3.2 Оптические разветвители	102
3.4 Приёмники и передатчики — активные компоненты ВОСП.....	105
3.4.1 Оптический передатчик	105
3.4.2 Оптический приемник.....	109
3.4.3 Оптические усилители и повторители	112
3.5 Измерение параметров волоконно-оптических систем	115

3.6 Строительство, монтаж и техническая эксплуатация ВОЛС	119
Глава 4. Настоящее и будущее волоконной оптики	122
4.1 Развитие волоконно-оптических систем передачи.....	122
4.2 Проблемы увеличения пропускной способности ВОСП...	125
4.3 ОВ в СКС.....	127
4.4 Волоконно-оптические датчики.....	129
4.5 Технологии, использующие оптическое волокно	131
Глава 5. Этапы становления и развития нашего университета	133
5.1 Краткая история становления и развития ВУЗа	133
5.2 Радиотехнический факультет (РТФ).....	143
5.3 Кафедра Сверхвысокочастотной и Квантовой Радиотехники (СВЧ и КР).....	145
Заключение.....	150
Литература.....	154
Приложение 1. Структура ТУСУРа.....	156

ПРЕДИСЛОВИЕ

В последние два десятилетия прошедшего и наступившего века можно смело назвать началом информационно-технологической эпохи. Ярким проявлением этого является невиданный по скорости и результатам прогресс в создании новых методов и средств телекоммуникаций. Бурное развитие технологий производства систем и средств связи с практически неограниченной пропускной способностью и дальностью передачи, их массовое использование привели к формированию глобального информационного общества.

Телекоммуникации сегодня — одна из самых быстроразвивающихся наукоемких и высокотехнологичных отраслей мировой экономики.

Развитие телекоммуникаций с применением оптических систем является одним из главных направлений процесса информатизации всех сфер производства и общества в целом. Необходимость в специалистах, способных квалифицированно заниматься разработкой, проектированием, строительством и технической эксплуатацией в области ВОЛС постоянно растет. В их подготовке значительна роль ТУСУРа, в котором благодаря научному предвидению первого зав. кафедрой СВЧ и КР профессора Е.С. Коваленко, при активной помощи автора данного пособия, была открыта специальность 0717 — «Физика и техника оптической связи».

«Введение в специальность» — первая спецдисциплина. Она устанавливает связь между начальным этапом обучения в вузе, когда за большим объемом и глубиной базовых циклов дисциплин подчас не видна связь со специальностью и спецдисциплинами, а также с конечной целью обучения — получением знаний, необходимых специалисту для успешного трудоустройства и успешной профессиональной деятельности.

Дисциплина «Введение в специальность» призвана ознакомить студентов с выбранной ими специальностью, её особенностями, а также увязать учебные задачи, стоящие перед студентами первого и второго курса, с учебными задачами специальной подготовки на старших курсах. К задачам курса относится также

знакомство первокурсников с историей развития телекоммуникаций и местом ВОЛС в современной сфере электросвязи.

В учебном пособии последовательно рассмотрены вопросы истории развития квантовой электроники, лазерной техники и волоконной оптики. Даны основы теории распространения сигналов по оптическим волокнам. Достаточно большое внимание уделено основным понятиям телекоммуникации, теории сигналов и систем связи. Рассмотрено современное состояние и перспективы развития ВОЛС, а также области применения волоконно-оптических устройств в различных технических устройствах.

Организация изложения материала основана на многолетнем опыте преподавания этой дисциплины автором пособия и общения с выпускниками специальности 0717 («Физика и техника оптической связи»).

В пособии отражены особенности организации учебного процесса и контроля успеваемости студентов. Рассмотрена роль лекций, практических и лабораторных занятий, а также самостоятельной работы студентов в учебном процессе. Изложены вопросы подготовки к экзаменам и зачетам, текущей и итоговой аттестации студентов, а также рейтинговая система оценки успеваемости.

Отдельная глава посвящена истории нашего университета, факультета и профилирующей кафедры СВЧиКР.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- FEXT** — дальние перекрестные помехи — Far-End Crosstalk
NEXT — ближние перекрестные помехи — Near-End Crosstalk
WDM — мультиплексирование с разделением по длине
 волны (МРДВ) — Wavelength Division Multiplexing
АТС — автоматическая телефонная станция
АЦП — аналого-цифровой преобразователь
ВОЛС — волоконно-оптическая линия связи (FOL)
ВОСП — волоконно-оптическая система передачи
ВСС РФ — взаимоувязанная сеть связи РФ
ИК — инфракрасное излучение
ИКМ — импульсно-кодовая модуляция (ИКМ)
КТЧ — канал тональной частоты (voice channel)
ЛВС — локальная вычислительная сеть (LAN)
ЛД — лазерный диод (LD)
ЛФД — лавинный фотодиод (APD)
ЛОУ — линейный оптический усилитель (LA)
МОВ — многомодовое оптическое волокно (MMF)
МСЭ — Международный союз электросвязи (ITU)
ОВ — оптическое волокно (OF, F)
ОК — оптический кабель
ОКГ — оптический квантовый генератор
ООВ — одномодовое оптическое волокно (SMF)
ОР — оптический разъём
ОП — окно прозрачности
ОУ — оптический усилитель (OA)
ОЦК — основной цифровой канал
ПВО — полное внутреннее отражение
ПМД — поляризационно модовая дисперсия (PMD)
ПОМ — передающий оптический модуль
ПРОМ — приёмный оптический модуль
ППП — профилированный показатель преломления
ПЦИ — плезиохронная цифровая иерархия (PDH)
ПЦК — первичный цифровой канал (DS1)
СВЧ — сверхвысокие частоты
СКС — структурированная кабельная система
С/Ш — сигнал/шум

СИД — светоизлучающий диод (LED)

СПД — система передачи данных

СЦИ — синхронная цифровая иерархия

ТФОП — телефонная сеть общего пользования

ФД — фотодиод (PD)

ЦСП — цифровая система передачи

Глава 1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ СВЯЗИ

1.1 Радиосвязь — основные этапы истории

В данной главе будет рассмотрена история развития направления «Телекоммуникации». История состоит в изучении прошлого в целях создания настоящего и прогнозирования и планирования будущего. История науки и техники является частью человеческой цивилизации. Опыт поколений показывает, что для полной ориентации в настоящем и тем более для предвидения будущего, в целях преобразования мира, необходимо знать прошлое.

Современный этап научно-технического прогресса связан с революционными изменениями в передаче, обработке, преобразовании, защите и использовании информации, которые оказывают существенное влияние на все стороны жизни общества. Все это стало возможным благодаря успехам в развитии таких наук, как радиоэлектроника и теория связи.

Радиоэлектроника образовалась в результате синтеза радиотехники (радио — от лат. *radio* — испускаю лучи) и электроники. Современная *радиоэлектроника* — это собирательное название ряда областей науки и техники, основными из которых являются: радиотехника, радиофизика и электроника [6].

Главная задача радиотехники состоит в передаче информации на расстояние с помощью электромагнитных колебаний. Науку, занимающуюся изучением *физических основ* генерации, усиления, излучением и приемом электромагнитных колебаний радиочастотного и оптического диапазонов, называют *радиофизикой*. В более широком смысле современная *радиотехника* — область науки и техники, связанная с генерацией, усилением, преобразованием, обработкой, хранением, излучением и приемом электромагнитных колебаний радиочастотного диапазона, используемых для передачи информации на расстояние. Как следует из сказанного, радиотехника и радиоэлектроника очень тесно связаны и часто эти термины заменяют друг друга.

В начале XIX в. была создана наука об электромагнитных явлениях, которая и стала фундаментом для радиоэлектроники и теории связи. У истоков радиотехники лежит величайшее открытие электромагнитного поля, связанное с тремя выдающимися

учеными: Майклом Фарадеем (1791–1867), установившим закон электромагнитной индукции; Джеймсом Клерком Максвеллом (1831–1879), создателем классической электродинамики; Генрихом Герцем (1857–1894), впервые экспериментально получившим электромагнитные волны [3, 4].

В 1831 г. английский ученый М. Фарадей открыл закон электромагнитной индукции. Это позволило в 1873 г. другому английскому физика, Дж. К. Максвеллу, разработать теорию электромагнитного поля и описать законы распространения радиоволн. Максвелл доказал, что свет имеет электромагнитную природу, что электромагнитные волны любых частот распространяются в пространстве со скоростью света. Эти доказательства были оформлены Максвеллом строго математически в виде уравнений, которые получили название «уравнения Максвелла». Эта теория была экспериментально подтверждена Г. Герцем (1887) в Германии, доказавшим существование излучения электромагнитных волн и показавшим их распространение, отражение, преломление, интерференцию и поляризацию.

Изобретение радио осуществлено в России 7 мая 1895 года. Александр Степанович Попов (1859–1906) на заседании Русского Физико-химического общества в Петербурге продемонстрировал изобретенный им грозоотметчик — первый в мире радиоприемник. В 1896 году А.С. Попов осуществил телеграфирование без проводов на расстояние 250 м, передав с помощью азбуки Морзе первую в мире радиограмму «Генрих Герц». В том же году А.С. Попов установил радиосвязь между кораблем «Россия» и берегом на расстоянии 5 км. В 1899 г. он осуществил радиосвязь на расстоянии 52 км, обеспечившую работы по спасению броненосца «Генерал-адмирал Апраксин», севшего на камни. Было передано 440 радиограмм. В 1900 г. на IV Всемирном электротехническом конгрессе в Париже А.С. Попову за изобретение радио были присуждены почетный диплом и золотая медаль.

За рубежом наиболее широко известен итальянец Гульельмо Маркони (1874–1937), применивший электромагнитные волны и много сделавший для развития радио. В 1901 г. Маркони осуществил радиосвязь через Атлантический океан (за рубежом изобретателем радио считают Г. Маркони, поскольку он запатентовал грозоотметчик почти такой же конструкции, как и грозоот-

метчик А.С. Попова, который свое изобретение не запатентовал). Маркони первым построил радиопередатчики и радиоприемники современного типа. Сотни пассажиров трагически затонувшего лайнера «Титаник» были спасены благодаря аппаратам Маркони.

В странах Западной Европы и США была развернута активная деятельность по использованию радиосвязи в коммерческих целях. Огромное значение радиосвязи для военных флотов и для морского транспорта, а также гуманистическая роль радиосвязи (при спасании людей с кораблей, потерпевших крушение) стимулировали её развитие во всём мире.

Существенный вклад в направлении усиления слабых сигналов антенн внес американский инженер Ли де Форест, который изобрел в 1906 году трехэлектродную усилительную лампу — триод. В России большой вклад по разработке усилительных и генераторных радиоламп внес Бонч-Бруевич, который в последствии возглавил Нижегородскую радиолaborаторию, ставшую кузницей кадров радиоспециалистов. В 1922 году в Москве начала работать первая в мире Центральная вещательная радиостанция им. Коминтерна, мощностью 12 кВт, что в несколько раз превышало мощность радиостанций в Германии и Франции. В 1933 году мощность этой радиостанции повышается до 500 кВт, это была самая мощная радиостанция в мире.

В первых опытах передачи сигналов при помощи радиоволн, осуществленных А. С. Поповым в 1895–1899 гг., использовались радиоволны с длиной волны от 200 до 500 м. До 1920 г. в радиосвязи применялись преимущественно волны длиной от сотен метров до десятков километров. В 1922 г. радиолюбителями было открыто свойство коротких волн (100–10 м) распространяться на огромные расстояния благодаря преломлению в верхних слоях атмосферы и отражению от них при малых мощностях передатчика. В 1930-е гг. были освоены метровые, а в 1940-е — дециметровые и сантиметровые волны, распространяющиеся в основном прямолинейно, не огибая земной поверхности (т.е. в пределах прямой видимости), что ограничивает прямую связь на этих волнах расстоянием в 40–50 км.

Во всех передатчиках до 1936 года использовалась амплитудная модуляция (АМ), а в последствии началось внедрение в

практику радиосвязи частотной модуляции (ЧМ), которая имеет главное преимущество — высокую помехоустойчивость.

Передача на значительные расстояния достигается применением многократной ретрансляции в линиях радиорелейной связи (переизлучение сантиметровых волн осуществляется с помощью цепочки ретрансляторов) или с помощью спутниковой связи (ретранслятор находится на борту искусственного спутника Земли). Позволяя вести на больших расстояниях одновременно десятки тысяч телефонных разговоров и передавать десятки телевизионных программ, радиорелейная и спутниковая связь по своим возможностям являются несравненно более эффективными, чем обычная дальняя радиосвязь на коротких волнах.

Как мы видим, с развитием технологий происходит постепенный переход вверх по частотному диапазону. Почему же требуются электромагнитные волны все большей частоты? Ответ на этот вопрос довольно прост [3].

Во-первых, чем выше частота электромагнитных колебаний, тем шире может быть рабочая полоса частот. Например, средневолновый радиовещательный диапазон лежит в пределах 0,3–3 МГц, его ширина составляет 2,7 МГц. Естественно, телевидение с шириной рабочей полосы в 6 мегагерц передать не удастся. В то же время для этого подходит СВЧ-диапазон, поскольку рабочая полоса намного шире и в ней легко расположить десятки каналов телевидения.

Вторая причина повышения рабочего диапазона заключается в следующем. Угол расходимости пучка радиоволн пропорционален длине волны и обратно пропорционален размеру передающей антенны. Для получения более узкого луча при одном и том же размере антенны нужно уменьшать длину волны колебания.

Итак, развитие радиотехники это постоянное освоение все более высоких частот электромагнитных волн и применение сигналов с широким спектром.

В настоящее время организационно-технические мероприятия и средства для установления радиосвязи и обеспечения ее систематического функционирования образуют службы радиосвязи, различаемые по назначению, дальности действия, структуре и другим признакам. В частности, существуют службы: наземной и космической радиосвязи (к космической радиосвязи отно-

сят все виды радиосвязи с использованием одного или нескольких спутников или иных космических объектов); фиксированной (между определенными пунктами) и подвижной (между подвижной и стационарной радиостанциями или между подвижными радиостанциями); радиовещания и телевидения. Для производственных и специальных служебных надобностей имеются ведомственные службы радиосвязи в некоторых министерствах и организациях (например, в гражданской авиации, на железнодорожном, морском и речном транспорте, в службах пожарной охраны, милиции, медицинской службе городов), а также внутрипроизводственная связь на промышленных предприятиях, в некоторых учреждениях и т.д. Большое значение имеет радиосвязь в вооруженных силах. Более подробно история развития радиосвязи изложена в [2].

Развитие радиотехники непосредственно связано с созданием элементной базы, в частности, с разработкой электронных приборов для систем передачи информации на расстояние с помощью электромагнитных колебаний. Дальнейшее развитие радиотехники непрерывно ставило задачи по созданию и внедрению новых электронных элементов и узлов, что привело к появлению самостоятельной отрасли науки — электроники.

Электроника — наука о взаимодействии электронов с электромагнитными полями и о методах создания электронных и полупроводниковых приборов и устройств. В начале 50-х годов XX века были созданы первые полупроводниковые приборы — транзисторы, а в 1960-х годах первые интегральные микросхемы, что позволило резко снизить массу и габариты радиотехнической аппаратуры, при одновременном повышении ее надежности и значительном уменьшении энергопотребления. При этом электроника четко разделилась на энергетическую (силовую) электронику и микроэлектронику.

Микроэлектроника — раздел электроники, связанный с созданием интегральных микросхем. Мерило прогресса в микроэлектронике — число элементов, размещающихся на одной микросхеме. Современные большие аналоговые интегральные схемы и цифровые микропроцессоры на одном кристалле заменяют подчас целые блоки и устройства радиоэлектронной аппаратуры предшествующего поколения.

Квантовая электроника — это современная область физики, изучающая взаимодействие электромагнитного излучения с электронами, входящими в состав атомов молекул твердых тел и создающая на основе этих исследований научные методы для разработки квантовых устройств различного назначения.

На основе квантовой электроники как науки быстро формируется *лазерная техника*. В понятие лазерной техники входят научные рекомендации и технические решения, при выполнении которых создаются разнообразные приборы квантовой электроники. Эти приборы генерируют электромагнитное излучение, усиливают и формируют его, а также преобразуют спектр лазерного излучения.

Лазерная техника — это совокупность научно обоснованных методик расчета, технических решений и средств, позволяющих оптимальным образом создавать схемы и конструкции квантовых приборов, основанных на использовании лазерного излучения. Указанная область науки и техники молода, многогранна и, безусловно, перспективна.

1.2 Спектр электромагнитных волн

Диапазон частот. Диапазон частот, излучаемых электромагнитными волнами, огромен. Он определяется всеми возможными частотами колебаний заряженных частиц. Такие колебания возникают при переменном токе в линиях электропередачи, антеннах радио- и телевизионных станций, мобильных телефонах, радарах, лазерах, лампах накаливания и люминесцентных лампах, радиоактивных элементах, рентгеновских аппаратах. Диапазон частот электромагнитных волн, фиксируемых в настоящее время, простирается от 0 до $3 \cdot 10^{22}$ Гц. Этот диапазон соответствует *спектру* (от лат. *spectrum* — видение, образ) *электромагнитных волн* с длиной волны λ , изменяющейся от 10^{-14} м до бесконечности. Длина волны $\lambda = c/\nu$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света, а ν — частота. На рис. 1.1 представлен рассматриваемый спектр электромагнитных волн [18].

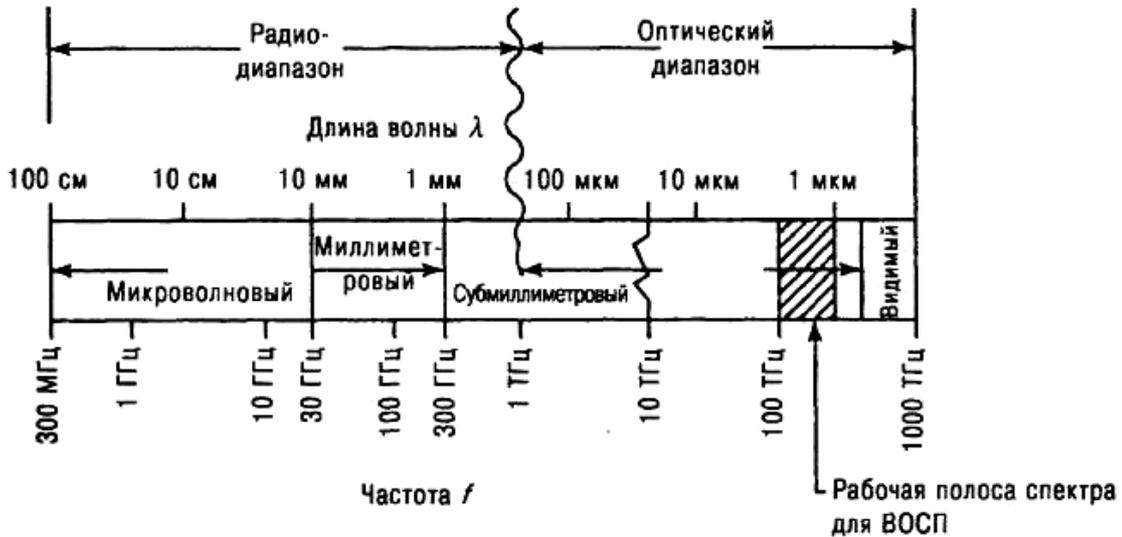


Рис. 1.1 — Спектр электромагнитного излучения

Радиоволны различных частот по-разному распространяются в пределах Земли и в космическом пространстве и в связи с этим находят различное применение в радиосвязи и в научных исследованиях. С учётом особенностей распространения, генерации весь диапазон радиоволн принято делить по длине волны (или частоте) условно на двенадцать диапазонов. Деление радиоволн на диапазоны в радиосвязи установлено международным регламентом радиосвязи. Каждый диапазон соответствует полосе частот от $0,3 \cdot 10^N$ до $3 \cdot 10^N$, где N — номер диапазона. В заданном диапазоне частот N можно расположить лишь конечное число не мешающих друг другу радиостанций. Это число, называемое *канальной емкостью*, определяется как:

$$m = \frac{3 \cdot 10^N - 0,3 \cdot 10^N}{\Delta f},$$

где Δf — полоса частот радиосигнала.

Пусть ширина полосы частот аналогового телевизионного сигнала (TV) равна 8 МГц, с учетом защитных промежутков примем $\Delta f \approx 10$ МГц, тогда в метровом диапазоне ($N = 8$) число TV каналов будет 27. При тех же условиях в дециметровом диапазоне число каналов возрастет до 270. Это и является одной из главных причин стремления осваивать все более высокие частоты. Примеры деления наиболее используемых диапазонов и области их использования приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 — Деление радиоволн на диапазоны

<i>N</i>	Обозначение	Полоса частот	Длина волны, м	Название диапазона		Область применения
4	ОНЧ — Очень низкие частоты	3...30 кГц	$10^5 \dots 10^4$	Мериаметровый		Связь по всему миру и на большие расстояния. Радионавигация. Подводная связь
5	НЧ — Низкие частоты	30...300 кГц	$10^4 \dots 10^3$	Километровый		Связь на большие расстояния, станции эталонных частот и времени, длинноволновое вещание
6	СЧ — Средние частоты	300...3000 кГц	$10^3 \dots 10^2$	Гектаметровый		Средневолновое местное и региональное вещание. Судовая связь
7	ВЧ — Высокие частоты	3...30 МГц	100...10	Декаметровый		Связь на большие расстояния и коротковолновое вещание
8	ОВЧ — Очень высокие частоты	30...300 МГц	10...1	Метровый		Связь в пределах прямой видимости. Мобильная связь. Телевизионное и FM вещание. РРЛ
9	УВЧ — Ультравысокие частоты	300...3000 МГц	1...0,1	Дециметровый	УКВ	Связь в пределах прямой видимости и мобильная связь. Телевизионное вещание. РРЛ
10	СВЧ — Сверхвысокие частоты	3...30 ГГц	0,1...0,01	Сантиметровый		РРЛ. Радиолокация. Спутниковые системы связи
11	КВЧ — Крайне высокие частоты	30...300 ГГц	0,01...0,001	Миллиметровый		Межспутниковая связь и микросотовая радиотелефонная связь

Охарактеризуем кратко границы диапазонов длин волн (частот) в спектре электромагнитных волн в порядке возрастания частоты излучения, а также укажем основные источники излучения в соответствующем диапазоне.

- **Волны звуковых частот** возникают в диапазоне частот от 0 до $2 \cdot 10^4$ Гц ($\lambda = 1,5 \cdot 10^4 \div \infty$ м). *Источником волн звуковых частот является переменный ток соответствующей частоты.* Учитывая, что интенсивность излучения электромагнитных волн пропорциональна четвертой степени частоты, излучением таких, сравнительно малых, частот можно пренебречь. Именно по этой причине часто можно пренебречь излучением линии передачи переменного тока с частотой 50 Гц.

- **Радиоволны** занимают диапазон частот $2 \cdot 10^4$ — 10^9 Гц ($\lambda = 0,3$ — $1,5 \cdot 10^4$ м). *Источником радиоволн, так же как и волн звуковых частот, является переменный ток.* Однако большая частота радиоволн по сравнению с волнами звуковых частот приводит к заметному излучению радиоволн в окружающее пространство. Это позволяет использовать их для передачи информации на значительное расстояние (радиовещание, телевидение (TV)), радиолокация, радионавигация, системы радиоуправления, радиорелейные линии связи (РРЛ), сотовые системы связи, системы профессиональной подвижной связи — транкинговые системы, системы подвижной спутниковой связи, системы беспроводной телефонной связи (радиоудлинители) и др.

- **Сверхвысокочастотное (СВЧ) излучение, или микроволновое излучение**, возникает в диапазоне частот 10^9 — $3 \cdot 10^{11}$ Гц ($\lambda = 1$ мм — $0,3$ м). *Источник СВЧ-излучения — изменение направления спина валентного электрона атома или скорости вращения молекул вещества.* Учитывая прозрачность атмосферы в этом диапазоне, СВЧ-излучение используют для космической связи. Кроме того, это излучение используют в бытовых микроволновых СВЧ-печах.

- **Инфракрасное (ИК) излучение** занимает частотный диапазон $3 \cdot 10^{11}$ — $3,85 \cdot 10^{14}$ Гц ($\lambda = 780$ нм — 1 мм). ИК-излучение было открыто в 1800 г. английским астрономом Уильямом Гершелем. Изучая повышение температуры термометра, нагреваемого видимым светом, Гершель обнаружил наибольшее нагревание

термометра вне области видимого света (за красной областью). Невидимое излучение, учитывая его место в спектре, было названо *инфракрасным*.

Источником инфракрасного излучения являются колебание и вращение молекул вещества, поэтому ИК электромагнитные волны излучают нагретые тела, молекулы которых движутся особенно интенсивно. Часто ИК-излучение называют *тепловым*. Около 50 % энергии Солнца излучается в инфракрасном диапазоне. Максимальная интенсивность излучения человеческого тела приходится на длину волны 10 мкм. Зависимость интенсивности ИК-излучения от температуры позволяет измерять температуру различных объектов, что используется в приборах ночного видения, а также при обнаружении инородных образований в медицине. Дистанционное управление телевизором и видеомagneитофоном осуществляется с помощью ИК-излучения.

Этот диапазон используется для передачи информации по оптическим кварцевым волокнам. Оценим, как и для радиоволн, ширину оптического диапазона.

Пусть оптический диапазон изменяется от $\lambda_1 = 1200$ нм до $\lambda_2 = 1620$ нм. Зная величину скорости света в вакууме $c = 2,997 \cdot 10^8$ м/с, (округленно $3 \cdot 10^8$ м/с) из формулы $f = c/\lambda$, для λ_1 и λ_2 получим соответственно $f_1 = 250$ ТГц и $f_2 = 185$ ТГц. Следовательно, интервал между частотами $\Delta F = f_1 - f_2 = 65$ ТГц. Для сравнения: весь диапазон частот от звукового диапазона до верхней частоты диапазона СВЧ составляет только 30 ГГц, а ультра СВЧ — 300 ГГц, т.е. в 2000–200 раз меньше оптического.

• **Видимый свет** — единственный диапазон электромагнитных волн, воспринимаемый человеческим глазом. Световые волны занимают достаточно узкий диапазон: **380–780 нм** ($\lambda = 3,85 \cdot 10^{14}$ — $7,89 \cdot 10^{14}$ Гц).

Источником видимого света являются валентные электроны в атомах и молекулах, изменяющие свое положение в пространстве, а также свободные заряды, движущиеся ускоренно. Эта часть спектра дает человеку максимальную информацию об окружающем мире. По своим физическим свойствам она аналогична другим диапазонам спектра, являясь лишь малой частью спектра электромагнитных волн. Максимум чувствительности

человеческого глаза приходится на длину волны $\lambda = 560$ нм. На эту длину волны приходится также максимум интенсивности излучения Солнца и одновременно максимум прозрачности атмосферы Земли.

Впервые искусственный источник света получил русский ученый А.Н. Лодыгин в 1872 году, пропуская электрический ток через угольный стержень, помещенный в замкнутый сосуд, из которого был откачан воздух, а в 1879 году американский изобретатель Т.А. Эдисон создал достаточно долговечную и удобную конструкцию лампы накаливания.

1.3 Этапы развития лазерной техники

В 1964 году на церемонии присуждения Нобелевской премии в Стокгольме академик А.М. Прохоров сказал: «Квантовая электроника возникла в конце 1954 и начале 1955 года, фундаментом квантовой электроники следует считать явление индуцированного излучения, предсказанное А. Эйнштейном в 1917 году» [9].

Сущность этого явления заключается в том, что возбужденные атомы под воздействием внешнего излучения переходят в состояние с меньшей энергией, излучая при этом электромагнитные волны. Однако только много лет спустя появилась мысль применить это явление практически. В авторском свидетельстве СССР от 18/VI. 51 г., выданном В.А. Фабриканту и его сотрудникам, записано: «Способ усиления электромагнитных излучений (ультрафиолетового, видимого, инфракрасного и радиодиапазона волн), отличающийся тем, что усиливаемое излучение пропускают через среду, в которой с помощью вспомогательного излучения или другим путем создают избыточную по сравнению с равновесной концентрацию атомов других частиц или их систем на верхних энергетических уровнях, соответствующих возбужденным состояниям». Эта формулировка практически охватывает все, что можно представить себе под термином «квантовое усиление».

Явление индуцированного излучения легло в основу современной квантовой электроники и лазерной техники. Несколько позднее (1953 г.) Вебером был предложен квантовый усилитель.

В 1954 г. Н.Г. Басов и А.М. Прохоров предложили устройство молекулярного газового генератора и усилителя сантиметрового диапазона с теоретическим обоснованием эксперимента. Независимо от них к идее такого же генератора пришли Д. Гордон, Х. Цайгер и Ч. Таунс, опубликовавшие в 1954 г. сообщение о действующем квантовом усилителе на пучке молекул аммиака. В 1956 г. Н. Бломберген теоретически разработал вопрос о парамагнитном твердотельном усилителе по схеме трех уровней, а в 1957 г. Г. Сквилл построил такой усилитель. Однако все квантовые устройства, разработанные к 1960 г., охватывали СВЧ-диапазон радиоволн и назывались мазерами.

Следующий этап развития квантовой электроники связан с перенесением ее принципов в оптический диапазон электромагнитных волн. В 1958 г. Ч. Таунс, А.Л. Шавлов и А.М. Прохоров показали возможность использования явлений вынужденного усиления в поле оптических излучений. Теоретические работы Чарльза Таунса совместно с Артуром Шавловым в Bell Laboratories способствовали популяризации идеи лазера в научных кругах и вызвали бурный всплеск экспериментальных исследований, направленных на создание работающего лазера.

О значении, которое придается этим исследованиям, можно судить по тем фактам, что в 1964 г. советские ученые Н.Г. Басов, и А.М. Прохоров и американский ученый Ч. Таунс удостоились Нобелевской премии по физике за фундаментальные труды в области квантовой электроники.

В 1960 году Теодор Мэймен в Hughes Laboratories создал первый в мире рубиновый лазер и получил патент. Это открытие дало толчок бурному развитию лазерной техники. Элементы лазера Маймана лежат в основе всех современных лазеров.

В конце 1960 г. Али Джаван построил первый газовый лазер, работающий на смеси неона и гелия, в котором инфракрасное когерентное излучение испускали атомы неона.

Первый молекулярный лазер был создан Р. Пателем в 1964 г. Этот лазер имел К.П.Д. Примерно 10 % и значительную мощность около 10 Вт. Разработке первого полупроводникового инжекционного лазера на арсениде галлия (Р. Холл, 1962 г.) предшествовали теоретические исследования полупроводниковых монокристаллов, выполненные Н.Г. Басовым, Б.М. Вулом, Ю.М. Попо-

вым (1958–1961 гг.). Именно такой тип лазера используется в волоконной оптике. Последующие два года были насыщены техническими усовершенствованиями и изобретениями, направленными главным образом на увеличение мощности, компактности, долговечности лазеров.

В 1970 г. (год разработки первых ОВ со светоослаблением менее 20 Дб/км) академик Ж.И. Алферов с сотрудниками впервые реализовали полупроводниковый лазер на основе двойной гетероструктуры AlAs–GaAs с непрерывной генерацией при комнатной температуре. За это научное открытие Жорес Алферов был удостоен Нобелевской премии.

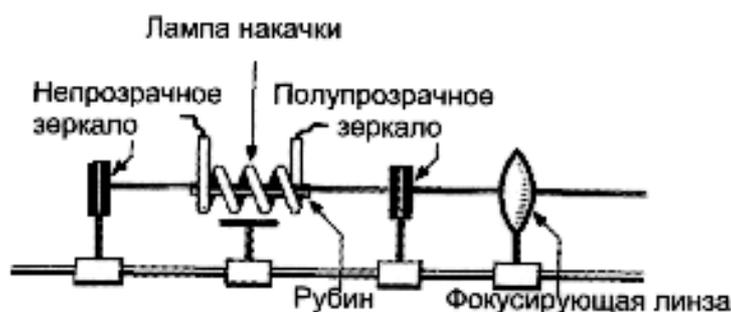


Рис. 1.2 — Структура лазера на рубине

Принцип действия лазера. Как уже было сказано, первый лазер, работающий на кристалле рубина в видимом диапазоне, был создан в 1960 г. американским ученым Т. Мейманом — сотрудником фирмы «Radio corporation of America». В нем он использовал кристалл рубина.

Слово «лазер» образовано начальными буквами английских слов *light amplification by stimulated emission of radiation* («усиление света с помощью вынужденного излучения»). В литературе встречается также название ОКГ — оптический квантовый генератор. Для того чтобы объяснить принцип действия лазера, необходимо дать определение понятиям *спонтанного* и *вынужденного* излучения.

В традиционных источниках света, таких как лампа накаливания, атомы получают энергию от электронов, создающих электрический ток. Перейдя в возбужденное состояние, электрон атома примерно через (10^{-8} – 10^{-7} с) без какого-либо внешнего воздействия (спонтанно) возвращается в основное состояние, излучая фотон. Атомы возбуждаются электронами и излучают фото-

ны независимо друг от друга, поэтому излучаемые ими фотоны *некогерентны* друг с другом. Рассмотрим теперь возможные процессы взаимодействия атома с фотоном. Пусть энергия фотона

$$h\nu = E_2 - E_1,$$

где E_1, E_2 — энергии основного и возбужденного состояний атома.

1. *Поглощение света.* Электрон атома, находящийся в основном состоянии с энергией E_1 , может поглотить фотон, перейдя в возбужденное состояние с энергией $E_2 > E_1$ (рис. 1.3, а). Интенсивность поглощенного излучения пропорциональна концентрации n_1 атомов, находящихся в основном состоянии.

2. *Спонтанное излучение.* В отсутствие внешних полей или столкновений с другими частицами электрон, находящийся в возбужденном состоянии, через время порядка 10^{-8} – 10^{-7} с самопроизвольно (спонтанно) возвращается в основное состояние (рис. 1.3, б).

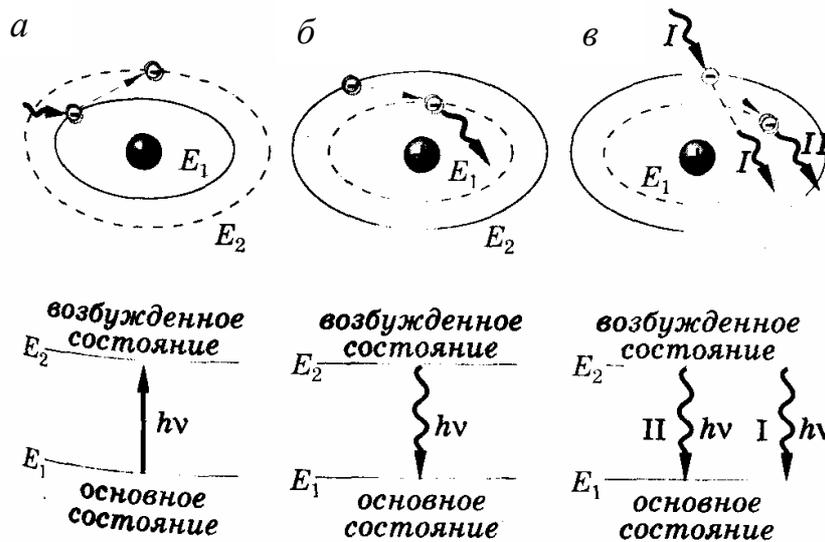


Рис. 1.3 — Процессы взаимодействия атома с фотоном:
 а — поглощение фотона; б — спонтанное излучение;
 в — вынужденное излучение

Спонтанное излучение — излучение, испускаемое при самопроизвольном переходе атома из одного состояния в другое.

Спонтанное излучение различных атомов происходит некогерентно, так как каждый атом начинает и заканчивает излучать независимо от других.

3. *Индукцированное излучение.* В 1917 г. Эйнштейн предсказал, что возбужденный атом может излучать под действием падающего на него света (рис. 1.3, в).

Индукцированное (вынужденное) излучение — излучение атома, возникающее при его переходе на более низкий энергетический уровень под действием внешнего электромагнитного излучения.

Интенсивность индуцированного излучения пропорциональна концентрации n_2 атомов, находящихся в возбужденном состоянии. При этом у световой волны, возникшей при индуцированном излучении, частота, фаза, поляризация и направление распространения оказываются такими же, как и у волны, падающей на атом. Это означает, что к первичному фотону I, падающему на атом от внешнего источника, добавляется идентичный фотон II индуцированного излучения (рис. 1.3, в). Тем самым увеличивается интенсивность внешнего излучения — возникает оптическое усиление.

Лазер — источник излучения, усиливаемого в результате индуцированного излучения. Усиление излучения, падающего на среду, возникает тогда, когда интенсивность индуцированного излучения превысит интенсивность поглощенного излучения. Это произойдет в случае *инверсной населенности*, если в возбужденном состоянии находится больше частиц, чем в основном $n_2 > n_1$.

В состоянии термодинамического равновесия, когда система занимает состояние с наименьшей энергией E_v , т.е. $n_1 > n_2$, усиления не происходит.

Инверсная населенность энергетических уровней — неравновесное состояние среды, при котором концентрация атомов в возбужденном состоянии больше, чем концентрация атомов в основном состоянии.

Спонтанные переходы являются фактором, препятствующим накоплению атомов в возбужденном состоянии. Этим можно пренебречь, если возбужденное состояние метастабильно.

Метастабильное состояние — возбужденное состояние электрона в атоме, в котором он может находиться достаточно долго (например, 10^{-3} с) по сравнению с обычным возбужденным состоянием (10^{-8} с).

Рассмотрим принцип действия рубинового лазера. Рубин представляет собой кристалл оксида алюминия Al_2O_3 , в котором часть атомов алюминия замещена ионами хрома Cr^{3+} .

Источником индуцированного излучения в рубине являются именно атомы хрома. Они могут находиться на одном из трех разрешенных энергетических уровней. На самом нижнем располагаются невозбужденные атомы. Переселение атомов на верхние уровни осуществляется путем облучения рубина мощным потоком света от импульсной лампы накачки (похожей на ту, которая применяется в фотовспышке, но гораздо мощнее). Поток света вторгается в глубь рубина. Но полезными в нем являются лишь зеленые лучи. Они возбуждают атомы хрома и забрасывают их сразу на третий уровень. Правда, там атомы хрома задерживаются недолго: через одну стомиллионную долю секунды они «спрыгивают» на второй уровень (рис. 1.4).

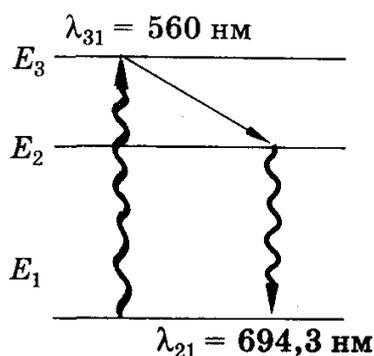


Рис. 1.4 — Оптические процессы в рубиновом лазере

Второй уровень — самый замечательный. На нем атомы могут находиться длительное время, не переходя в основное состояние. По обычным представлениям это время невелико — всего несколько тысячных долей секунды, но в «атомных» масштабах оно огромно и сродни человеческому долгожительству. Малая вероятность спонтанного перехода с этого уровня в основное состояние приводит к инверсной населенности: $n_2 > n_1$. Случайный фотон с энергией $h\nu = E_2 - E_1$ может вызвать лавину индуцированных когерентных фотонов (рис. 1.5, а).

Конечно, атомы хрома будут «скатываться» спонтанно, самопроизвольно и с третьего, и со второго уровней на первый, но

для этого им требуется значительно больше времени, чем перейти с третьего уровня на второй. Ясно, что число атомов, переходящих на второй уровень, будет во много раз больше числа атомов, возвращающихся «домой» на первый уровень. Цель световой накачки состоит как раз в том, чтобы перенаселить второй уровень. Это тот трамплин, прыжки с которого приводят к индуцированному излучению.

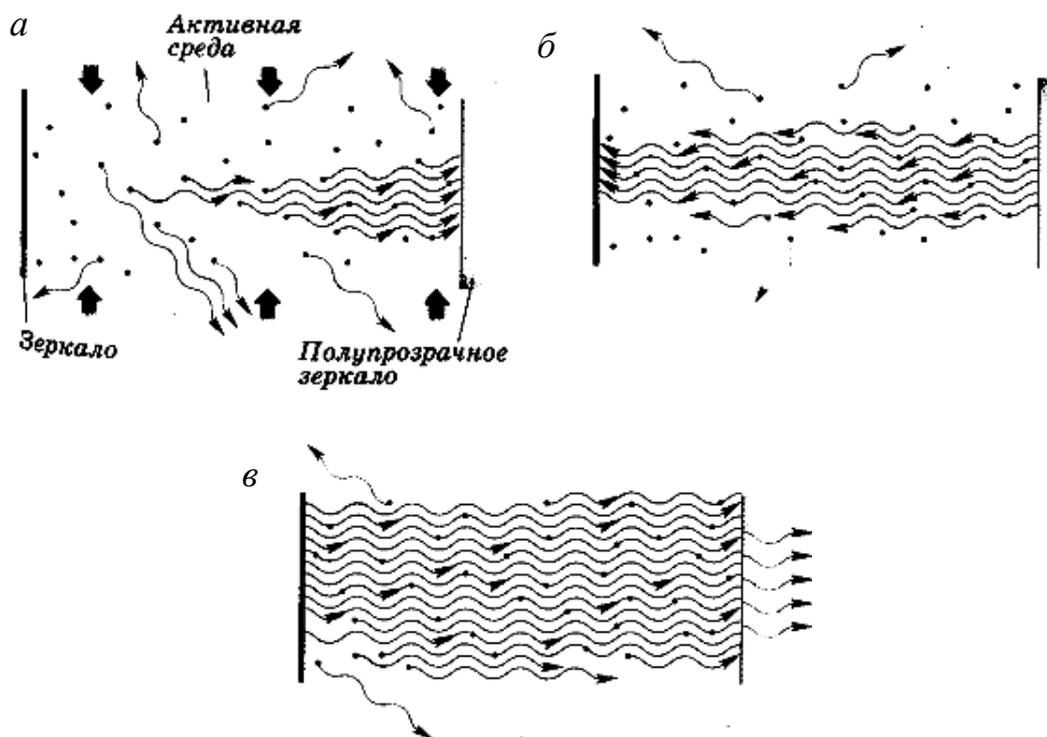


Рис. 1.5 — Оптическое усиление:
а — оптическая «накачка»; *б* — оптическое усиление;
в — генерация лазерного излучения

Индуцированное излучение, распространяющееся вдоль оси цилиндрического кристалла рубина, многократно отражается от его торцов и быстро усиливается (рис. 1.5, б).

Один из торцов рубинового стержня делают зеркальным, а другой — частично прозрачным (рис. 1.5, в). Через него выходит мощный импульс когерентного монохроматического излучения красного цвета с длиной волны 694,3 нм.

Типы лазеров. В настоящее время существует много различных типов и конструкций лазеров.

По режиму работы лазеры делят на генераторы непрерывного излучения (одномодовые, многомодовые и одночастотные) и лазеры импульсного излучения.

В качестве активных элементов для лазеров в настоящее время используют множество веществ. По активным веществам лазеры разделяются на четыре группы: *твердотельные лазеры* (на активированных стеклах, на ионных кристаллах, на флюоритах, активированных редкоземельными элементами), *газовые лазеры* (атомарные, молекулярные, газодинамические, ионные, на парах металлов, химические и т.д.), *жидкостные лазеры* (на растворе неорганических соединений, на растворе органических соединений), *полупроводниковые лазеры* (инжекционные, гетероструктурные, с распределенной обратной связью и т.д.).

Твердотельные лазеры используют в качестве активных сред кристаллические или аморфные вещества, содержащие небольшие примеси ионов редкоземельных элементов, металлов. Накачка активного вещества, необходимая для работы лазера, производится при помощи света, излучаемого импульсными или непрерывными лампами. Достоинством твердотельных лазеров является большая энергия излучения, к недостаткам следует отнести малую когерентность, большую расходимость излучения, значительные габариты и массу.

Жидкостные лазеры используют индуцированное излучение растворов органических и металлоорганических соединений, а также индуцированное комбинационное рассеяние света в жидкостях. Накачка осуществляется светом импульсных ламп. Энергетические параметры жидкостных лазеров близки к соответствующим параметрам твердотельных. Когда жидкостные лазеры работают в импульсном режиме, их выходная мощность может достигать сотен и более мегаватт. При непрерывном режиме типичные уровни выходной мощности составляют доли ватта. Спектр излучения лежит в видимом диапазоне излучения. Достоинствами жидкостных лазеров являются возможность перестройки частоты генерации и малая расходимость излучения; недостатками — малый КПД, малая монохроматичность излучения, нестабильности параметров излучения, большие габариты и масса.

Газовые лазеры имеют газообразные активные среды. Это может быть газ, состоящий из атомов, ионов, молекул или их

различных смесей. Газовые лазеры позволяют получать излучение от ультрафиолетовых до субмиллиметровых длин волн. Накачка обычно производится при помощи постоянного или переменного тока, проходящего через газ. Мощность излучения в непрерывном режиме генерации лежит в диапазоне от нескольких милливольт до сотен и более ватт. Некоторые из газовых лазеров работают также в импульсном режиме. Преимуществами газовых лазеров перед другими являются малая расходимость луча (примерно 10^{-3} рад), высокая монохроматичность, высокая степень пространственной и временной когерентности. Недостатком газовых лазеров является то, что их размеры довольно велики (обычно около 1 м). Минимальная длина составляет десятки сантиметров.

Полупроводниковые лазеры используют в качестве активных веществ полупроводники: арсенид галлия, фосфид галлия, сульфид цинка, арсенид индия и целый ряд других. Длины волн излучения этих лазеров перекрывают область от 0,33 до 8,5 мкм. Накачка осуществляется или пропусканием электрического тока через *p-n*-переход (инжекционные лазеры), или бомбардировкой *p-n*-перехода электронами (лазеры с электронным возбуждением). Инжекционные лазеры обычно работают в импульсном режиме. Это связано с большой чувствительностью полупроводников к тепловому нагреву. Достоинствами полупроводниковых лазеров являются: высокий КПД, малые габариты, составляющие доли миллиметра, возможность быстрой модуляции излучения путем изменения тока возбуждения. К недостаткам относятся: малая монохроматичность, большая расходимость излучения (единицы градусов), малая температурная стабильность, плохая когерентность, необходимость охлаждения.

Основные особенности лазерного излучения следующие:

- лазерное излучение обладает исключительной монохроматичностью и когерентностью;
- пучок света лазера имеет очень малый угол расходимости (около 10^{-5} рад);
- лазер имеет колоссальную плотность энергии и является наиболее мощным искусственным источником света.

Благодаря этим свойствам лазеры нашли применение в различных областях науки, техники и медицины. Очень перспективно применение лазерного излучения для космической связи, в оптических локаторах, измеряющих большие расстояния с точностью до миллиметров, для передачи телевизионных и компьютерных сигналов по оптическому волокну. Лазеры используются при считывании информации с компакт-дисков, со штрих-кодов товаров. С помощью луча лазеров малой интенсивности можно проводить хирургические операции, например «приваривать» отслоившуюся от глазного дна сетчатку, делать сосудистые операции. В обработке материалов при помощи лазера осуществляют сварку, резку, сверление очень маленьких отверстий с высокой точностью. Перспективно использование мощного лазерного излучения для осуществления управляемой термоядерной реакции.

Лазеры применяются также для топографической съемки, потому что луч лазера задает идеальную прямую линию. Направление тоннеля под проливом Ла-Манш задавалось лазерным лучом. С помощью лазерного излучения получают голографические трехмерные объемные изображения. В метрологии лазер применяется при измерении длины, скорости, давления.

Создание лазеров — результат использования фундаментальных физических законов в прикладных исследованиях. Оно привело к гигантскому прогрессу в различных областях техники и технологии. Создание лазера стало определяющим фактором и в развитии оптических систем передачи.

1.4 История развития оптической связи

С древнейших времен в качестве носителя информации человек использует в основном акустические волны — звук и электромагнитные волны — свет. Люди на расстоянии прямой видимости обменивались сообщениями с помощью условных знаков; вне зоны прямой видимости для охвата значительного пространства сообщения передавали с помощью звуков рога или боевой трубы. Для увеличения дальности и определенного уменьшения угла направленности передачи сообщений люди использовали свет: огни костров на вершинах гор, в дальнейшем — факелы и «костры тревог или побед» на высоких башнях. Моряки приме-

няли сигнальные лампы для передачи информации. Сохранились сведения о том, что в XII в. до нашей эры весть о падении Трои была передана в Грецию именно оптическим путем [10].

В начале 90-х годов XVIII века русский изобретатель И.П. Кулибин и француз К. Чапп (Клод Шапп) независимо друг от друга разработали оптический телеграф, предназначенный главным образом для передачи военных и правительственных сообщений. Оптический телеграф К. Чапп использовал в ходе войны Французской республики против Австрии, более 20 станций связали Париж с Лиллем (230 км). Сообщения передавалось из одного конца в другой за 15 минут. В России для военно-правительственных целей оптический телеграф связал Петербург со Шлиссельбургом (1824 г.), Кронштадтом, Царским Селом и Гатчиной. Самая длинная в мире (1200 км) линия оптического телеграфа была открыта в 1839 г. между Петербургом и Варшавой. В устройствах обоих изобретателей одинаковой была только конструкция семафора [10].

Английский физик Джон Тиндалл в 1870 году продемонстрировал возможность управления светом на основе внутренних отражений. На собрании Королевского общества было показано, что свет, распространяющийся в струе очищенной воды, может огибать любой угол. В эксперименте вода протекала над горизонтальным дном одного желоба и падала по параболической траектории в другой желоб. Свет попадал в струю воды через прозрачное окно на дне первого желоба. Когда Тиндалл направлял свет по касательной к струе, аудитория могла наблюдать зигзагообразное распространение света внутри изогнутой части струи. Аналогичное зигзагообразное распространение света происходит и в оптическом волокне.

Десятилетием позднее Александр Грэхем Белл, американский инженер, изобретатель телефона, запатентовал фотофон, в котором направленный свет использовался для передачи голоса. В этом устройстве с помощью системы линз и зеркал свет направлялся на плоское зеркало, закрепленное на рупоре. Под воздействием звука зеркало колебалось, что приводило к модуляции отраженного света. В приемном устройстве использовался детектор на основе селена, электрическое сопротивление которого меняется в зависимости от интенсивности падающего света. Моду-

лированный голосом солнечный свет, падающий на образец селена, изменял силу тока, протекающего через контур приемного устройства, и воспроизводил голос. Данное устройство (рис. 1.6) позволяло передавать речевой сигнал на расстояние более 200 м.

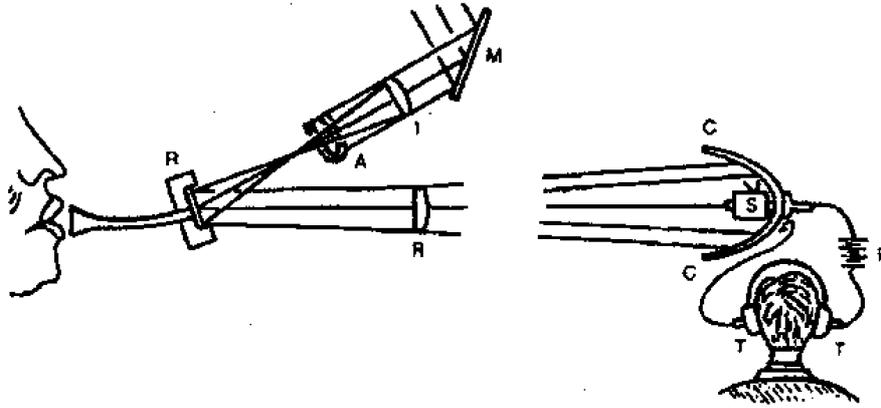


Рис. 1.6 — Фотофон Александра Белла

Изобретения И.П. Кулибина, К. Чаппа и А.Г. Белла основаны на прямолинейности распространения света, например, между ретрансляторами-станциями, проходящего через атмосферу. Все эти устройства относятся к **открытым линиям оптической связи**.

Возможность применения интенсивного слаборасходящегося лазерного луча для передачи информации пробудила интерес к оптическим методам передачи сигналов и стимулировала работы в этом направлении. В результате сразу же появились оптические системы передачи с открытым распространением сигналов, главное преимущество которых — огромная информационная емкость, обусловленная чрезвычайно высокой частотой оптической несущей (порядка 10^{14} Гц).

Надо сказать, что созданию надежных лазерных линий связи препятствует погода. Оказалось, что дождь, пыль, снег, туман, облачность и другие атмосферные явления резко ограничивают видимость, снижают качество передачи и могут вообще сорвать оптическую связь. Поскольку связь с помощью лазеров задумывалась сначала как беспроводная оптическая связь, в которой луч лазера пускается в открытом пространстве, то многие стали сомневаться, что оптические линии связи найдут широкое применение в условиях земной атмосферы.

Однако, практика показала, что открытые лазерные системы связи можно использовать на расстояние до 2–3 километров (рис. 1.7).

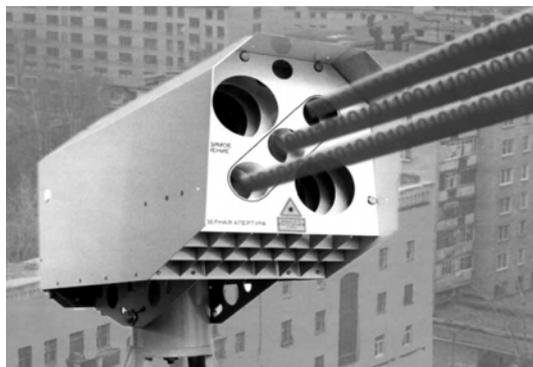


Рис. 1.7 — Лазерная линия связи

Открытые системы связи наиболее эффективны в космическом пространстве.

Недостатки открытых оптических систем передачи, прежде всего сильное ослабление и искажение сигналов в среде распространения (кроме космоса), вызвали необходимость использования направляющей системы — оптического волокна, в котором сигналы не подвержены действию внешних помех.

Использование света в качестве носителя информации позволяет передавать сверхогромные объемы информации со скоростью света в среде. Эти и другие достоинства оптической связи поставили перед человеком задачу создания закрытых от внешней среды устройств передачи света на большие расстояния, причем по сложноискривленному в пространстве тракту.

Впервые возможность создания световодов была высказана русским инженером В.Н. Чиколевым в 60-х годах XIX столетия. И уже в середине 70-х годов XIX столетия В.Н. Чиколев осветил с помощью световодов пороховые погреба крупнейшего по тем временам Охтинского порохового завода. Источником света служила угольная дуга — свеча Яблочкова. Световоды представляли собой полые металлические трубы, внутренняя поверхность которых была зеркальной.

В начале XX века были проведены теоретические и экспериментальные исследования диэлектрических волноводов, в том числе гибких стеклянных стержней.

Новый этап начался в 1951 г., когда Ван Хиил в Голландии, Брайен О'Бриен, работавший в Американской оптической компании, и Нариндер Капани с коллегами в Императорском научно-технологическом колледже в Лондоне независимо друг от друга начали изучать проблему передачи изображения по жгуту из регулярно уложенных стеклянных волокон. Работа этих исследователей ограничивалась только гибким волоконным эндоскопом. Основным достижением Ван Хиила является принципиальная разработка стеклянных волокон в оболочке из пластика. Капани разработал технологию укладки волокон, которая в видоизмененной форме используется в промышленности как стандартная. Он первый получил изображение без искажений с помощью жгута из регулярно уложенных стеклянных волокон диаметром 50 мкм без оболочки.

В 1956 г. Капани впервые предложил термин «волоконная оптика». По его определению, волоконная оптика — это оптика на основе активных или пассивных волокон, применяемая для передачи света (ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областей спектра) по заданному пути. В 1973 году доктор Капани основал компанию *Cartron*, специализирующуюся в области волоконно-оптических разветвителей и коммутаторов.

В 1961 г. Снитцер получил лазерные волокна из стекол с добавкой неодима и исследовал их использование в качестве усилителей света.

Первые в мире исследования возможности создания линий связи на основе оптических диэлектрических волноводов — волоконных световодов — были начаты в СССР в 1957 г. О.Ф. Косминским, В.Н. Кузмичевым (специалисты по технике связи) и А.Г. Власовым, А.М. Ермолаевым, Д.М. Круп и другими (специалисты по оптике). Уже в 1961 г. в первой статье, посвященной части результатов этих коллективных и комплексных исследований, показана широкополосность оптических волноводов [5].

В 1958 г. советские специалисты В.В. Варгин и Т.И. Вейнберг показали, что «светопоглощение» стекол обуславливается примесями красящих металлов, вносимыми шихтой, и продуктами разьедания огнеупоров; экспериментально показано, что светопоглощение идеально чистого стекла очень мало и лежит за пределами чувствительности измерительных приборов. В этой же

работе впервые показана возможность дальнейшего существенного уменьшения ослабления света в стеклах с использованием значительно более чистых исходных химических реактивов и коренного совершенствования технологии синтеза стекол.

К выводам советских ученых В.В. Варгина и Т.И. Вейнберга через восемь лет (1966 г.) пришли сотрудники английской лаборатории телекоммуникационных стандартов фирмы STL — Чарльз Као и Чарльз Хокхэм. Первыми из зарубежных специалистов по технике связи они опубликовали статью о том, что оптические волокна могут использоваться как среда передачи при достижении прозрачности, обеспечивающей затухание менее 20 дБ/км (децибел на километр). Был также указан ими путь создания пригодных для телекоммуникации волокон, связанный с уменьшением уровня примесей в стекле.

В 1970 году Роберт Маурер со своими коллегами из Corning Glass Work! получил первое волокно с затуханием менее 20 дБ/км. К 1972 году в лабораторных условиях был достигнут уровень в 4 дБ/км, что соответствовало критерию Као и Хокхэма. В настоящее время лучшие волокна имеют уровень потерь в 0,2 дБ/км.

В 1973 году Военно-морские силы США внедрили волоконно-оптическую линию на борту корабля Little Rock. В 1976 г. в рамках программы ALOFI военно-воздушные силы заменили кабельную оснастку самолета А-7 на волоконно-оптическую. При этом кабельная система из 302 медных кабелей, имевшая суммарную протяженность 1260 м и весившая 40 кг, была заменена 12 волокнами общей длиной 76 м и весом 1,7 кг. Военные были первыми и в деле внедрения волоконно-оптической линии. В 1977 году была запущена 2-км система со скоростью передачи информации 20 МГб/сек (мегабит в секунду), связавшая наземную спутниковую станцию с центром управления.

В 1977 году компании AT&T и GTE установили коммерческие телефонные системы на основе оптического волокна. Эти системы превосходили по своим характеристикам считавшиеся ранее незыблемыми стандарты производительности, что привело к их бурному распространению в конце 1970-х и начале 1980-х годов. В 1980-м AT&T объявила об амбициозном проекте волоконно-оптической системы, связывающей между собой Бостон и Ричмонд. Реализация проекта воочию продемонстрировала ско-

ростные качества новой технологии в серийных высокоскоростных системах, а не только в экспериментальных установках. После этого стало ясно, что в будущем ставку надо делать на волоконно-оптическую технологию, показавшую возможность широкого практического применения.

Несмотря на то, что компьютерная индустрия, технология компьютерных сетей и управление производством не столь быстро, как военные и телекоммуникационные компании, брали на вооружение волоконную оптику, тем не менее, и в этих областях также производились экспериментальные работы по исследованию и внедрению новой технологии. Наступление эры информации и возникшая в связи с этим потребность в более производительных телекоммуникационных системах только подхлестнули дальнейшее развитие волоконно-оптической технологии. Сегодня эта технология находит широкое применение и вне области телекоммуникаций. Например, компания IBM, лидер в производстве компьютеров, объявила в 1990 году о выпуске нового быстродействующего компьютера, использующего контроллер канала связи с дисковыми и ленточными внешними накопителями на основе волоконной оптики. Это стало первым применением волоконной оптики в серийном оборудовании.

В 1990 году Линн Моллинар, сотрудник Bellcore, продемонстрировал возможность передачи сигнала без регенерации со скоростью 2,5 Гб/сек на расстояние около 7500 км. Обычно волоконно-оптический сигнал необходимо усиливать и периодически восстанавливать его форму — примерно через каждые 25 км. При передаче волоконно-оптический сигнал теряет мощность и искажается. В системе Моллинара лазер работал в солитонном режиме и использовалось самоусиливающее волокно с добавками эрбия. Солитонные (в очень узком диапазоне спектра) импульсы не рассеиваются и сохраняют свою первоначальную форму по мере распространения по волокну.

В то же самое время японской компанией Nippon Telephone & Telegraph была достигнута скорость 20 Гб/сек, правда, на существенно более короткое расстояние. Ценность солитонной технологии заключается в принципиальной возможности прокладки по дну Тихого или Атлантического океана волоконно-оптической

телефонной системы, не требующей установки промежуточных усилителей.

Весь комплекс работ, выполненных под руководством академиков Ж.И. Алферова, М.Г. Басова, Ю.В. Гуляева, Г.Г. Девятых, В.А. Котельникова, А.М. Прохорова в институтах АН СССР при участии ряда отраслевых НИИ, привел к тому, что к настоящему времени ВОЛС из модных экзотических новинок стали рядовыми незаменимыми структурами в архитектуре многих тысяч информационных систем самого широкого и разнообразного назначения.

Оптическое волокно играет ту же роль, что и медный провод, используемый для передачи телефонных разговоров или компьютерных данных. Но в отличие от медного провода по волокну переносится свет, а не электрический сигнал. В связи с этим появляется множество преимуществ, что позволяет использовать оптическое волокно как несущую среду в различных областях техники — от телефонии до компьютеров и систем автоматизации.

Волоконно-оптическая система представляет собой линию, связывающую приемник и передатчик [16].

На рис. 1.8 представлены основные компоненты такой системы:

- Передатчик, который преобразует электрический сигнал в световой. Более точно данное преобразование выполняет источник, представляющий собой либо светоизлучающий, либо лазерный диод. Управляющее устройство преобразует входной сигнал в сигнал определенной формы, необходимой для управления источником.

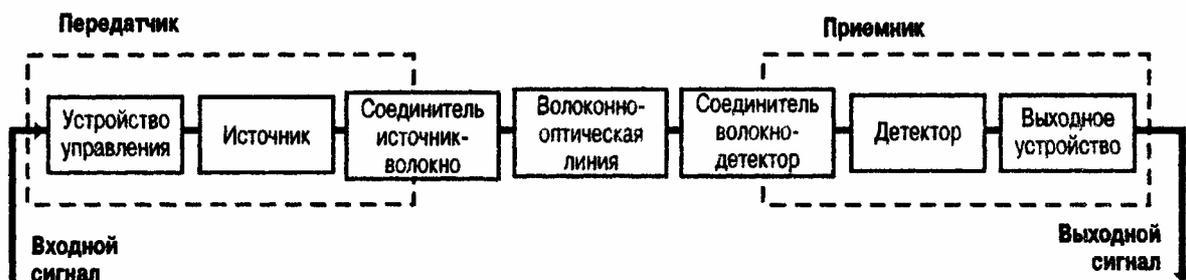


Рис. 1.8 — Основные элементы волоконно-оптической линии связи

- Волоконно-оптический кабель — среда, по которой распространяется световой сигнал. Кабель состоит из волокна и защитных оболочек.

- Приемник предназначен для приема светового сигнала и его обратного преобразования в электрический сигнал. Двумя основными частями приемника являются детектор, непосредственно выполняющий функцию преобразования сигналов, и выходное устройство, которое при необходимости усиливает сигнал и изменяет его форму.

- Соединители (коннекторы) предназначены для подключения волокон к источнику, детектору и для соединения волокон между собой.

Волоконная оптика влияет на жизнь каждого человека, порой практически незаметно. Приведем несколько примеров: трансляция голоса через всю страну; распространение телевизионного изображения в ваш дом по кабелю; управление производственным процессом в промышленности.

Волоконная оптика используется в различных областях, и на это имеются важные причины. Волоконно-оптические коммуникации имеют ряд преимуществ по сравнению с электронными системами, использующими передающие среды на металлической основе.

Среди достоинств оптических волокон можно указать следующие:

1. **Широкая полоса пропускания** — обусловлена чрезвычайно высокой частотой оптической несущей — около 10^{14} Гц, которая обеспечивает потенциальную возможность передачи по одному оптическому волокну потока информации в несколько Тбит/сек. *Большая полоса пропускания — одно из наиболее важных преимуществ оптического волокна над медной или любой другой средой передачи информации.*

2. **Малое затухание** светового сигнала в волокне. Выпускаемое в настоящее время отечественное и зарубежное оптическое волокно имеет затухание 0,2–0,3 дБ на длине волны 1,55 мкм в расчёте на один километр. Малое затухание и небольшая дисперсия позволяют строить участки линий без ретрансляции протяжённостью более 100 км. (*Понятие дБ см. раздел 2.*)

3. Высокая помехозащищённость. Поскольку волокно изготовлено из диэлектрического материала, то оно невосприимчиво к электромагнитным помехам со стороны окружающих медных кабельных систем и электрического оборудования, способного индуцировать электромагнитное излучение (линии электропередач, электродвигательные установки и т.д.). В многоволоконных оптических кабелях также не возникает проблемы перекрёстного влияния электромагнитного излучения, присущей многопарным медным кабелям.

4. Малый вес и объём. Волоконно-оптические кабели (ВОК) имеют меньший вес и объём по сравнению с медными кабелями в расчёте на одну и ту же пропускную способность. Например, 900 — парный телефонный кабель диаметром 7,5 см на металлической основе может быть заменён одним волокном с диаметром 1 мм.

5. Высокая защищённость от несанкционированного доступа. Поскольку ВОК практически не излучает в радиодиапазоне, то передаваемую по нему информацию трудно подслушать, не нарушая приёма-передачи. Системы мониторинга (непрерывного контроля) целостности оптической линии связи, используя свойства высокой чувствительности волокна, могут мгновенно отключить «взламываемый» канал связи и подать сигнал тревоги.

Таким образом, оптическое волокно (ОВ) используется: в магистральных, зонавых, городских кабелях связи; при строительстве локальных вычислительных сетей, как элемент структурированной кабельной системы (СКС). Широкое применение нашло ОВ при создании сетей кабельного телевидения. ОВ используется при создании периметральных систем защиты.

Глава 2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

В этой главе представлены основные характеристики сигналов и принципы их передачи, без понимания которых трудно оценить роль оптического волокна в процессе современной электронной передачи данных. Идеи, изложенные ниже, являются фундаментальными не только для применения оптического волокна, но и для любой электрической системы передачи данных. Цель главы — вводное изложение тех принципов этой теории, без которых невозможно обсуждение применения волоконной оптики.

2.1 Информация, сообщения, сигналы

Человеческое общество живет в информационном мире, который постоянно изменяется и пополняется. То, что человек видит, слышит, помнит, знает, переживает, — все это различные формы информации. Следовательно, в широком смысле информацию можно определить как совокупность знаний об окружающем нас мире. В таком понимании информация является важнейшим ресурсом научно-технического прогресса и социально-экономического развития общества и наряду с материей и энергией принадлежит к фундаментальным философским категориям естествознания.

Понятия «информация» (от лат. *informatio* — разъяснение, изложение) и «сообщение» в настоящее время неразрывно связаны между собой. Эти близкие по смыслу понятия сложны, и дать их точное определение через более простые нелегко.

Информация — это совокупность сведений или данных о каких-либо событиях, явлениях или предметах, то есть это совокупность знаний об окружающем нас мире.

Передача и хранение информации осуществляется с помощью различных знаков (символов), которые позволяют представить её в некоторой форме.

Сообщение — это совокупность знаков, отображающих ту или иную информацию. Передача сообщений (а, следовательно, и информации) на расстояние осуществляется с помощью какого-либо материального носителя, например, бумаги или маг-

нитной ленты или физического процесса, например, звуковых или электромагнитных волн, тока и т.д.

Сигнал — это физический процесс, отображающий (несущий) передаваемое сообщение. В качестве сигналов в настоящее время в основном используются электрические и оптические сигналы. В электронике сигналом может быть все — от компьютерных цифровых импульсов и до импульсов, модулированных радиоволнами УКВ-диапазона. Сигнал передаёт (развёртывает) сообщение во времени, то есть всегда является функцией времени. Сигналы формируются путём изменения тех или иных параметров физического носителя в соответствии с передаваемым сообщением.

Сообщения могут быть функциями времени, например речь при передаче телефонных разговоров, температура или давление при передаче телеметрических данных, спектакль при передаче по телевидению и т.п. В других случаях сообщение не является функцией времени (например, текст телеграммы, неподвижное изображение и т.д.).

Сигнал передаёт сообщение во времени. Следовательно, он всегда является функцией времени, даже если сообщение (например, неподвижное изображение) таковым не является.

Дискретный или дискретный по уровню (амплитуде) сигнал — это сигнал, принимающий по величине (амплитуде) только определённые дискретные значения.

Непрерывный или аналоговый сигнал — это сигнал, который может принимать любые уровни значений в некотором интервале величин.

Дискретный по времени сигнал — это сигнал, заданный только в определённые моменты времени.

Непрерывный по времени сигнал — это сигнал, заданный на всей оси времени.

Например, речь является сообщением непрерывным как по уровню, так и по времени, а датчик температуры, выдающий её значения через каждые 5 мин, служит источником сообщений, непрерывных по величине, но дискретных по времени.

На рис. 2.1 наглядно проиллюстрированы различные виды сигналов.

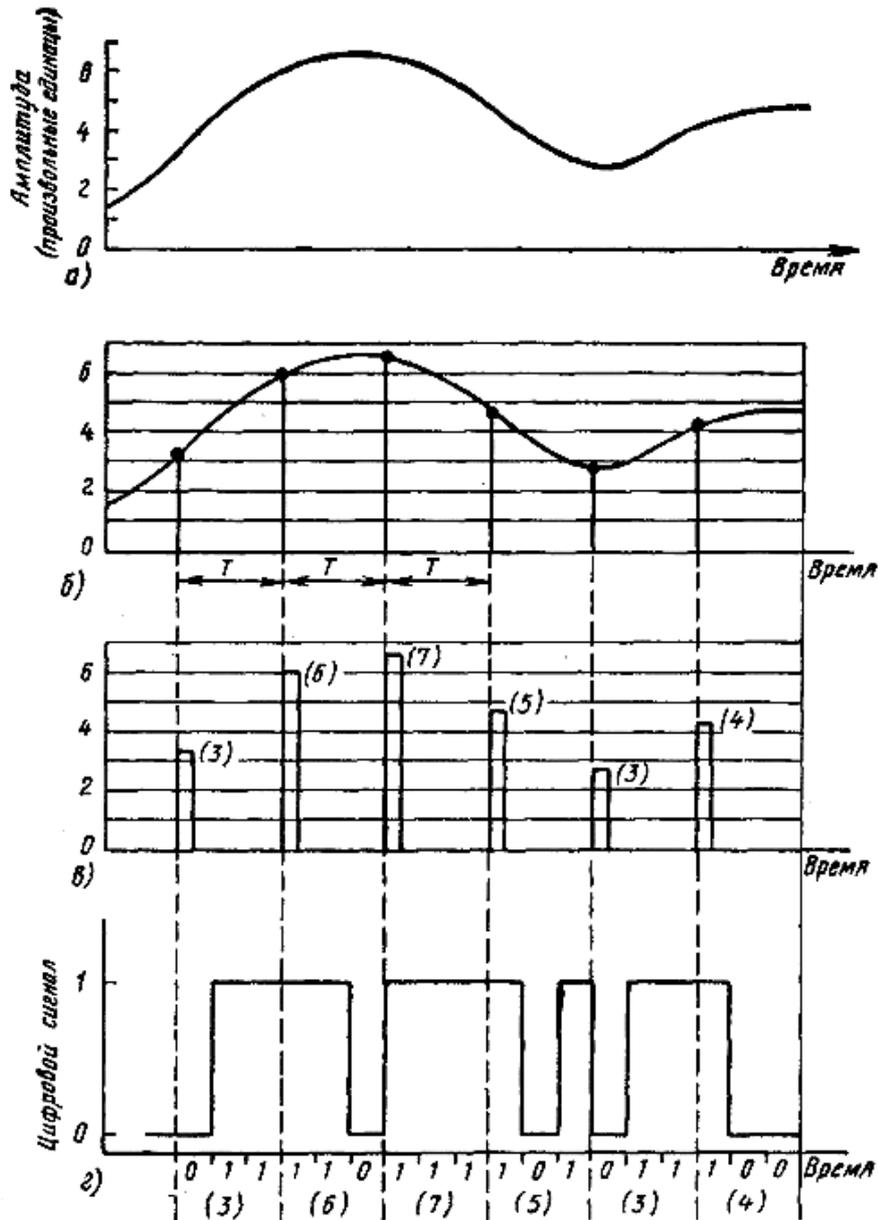


Рис. 2.1 — Виды сигналов:

a — непрерывный сигнал; *б* — дискретный по времени сигнал;
в — сигнал, квантованный по уровню; *г* — цифровой сигнал

Цифровой сигнал — это дискретный сигнал по уровню и времени, причём число дискретных значений уровней у него конечно. Так как в этом случае уровни дискретного сигнала можно пронумеровать числами с конечным числом разрядов, то такой дискретный сигнал и называется цифровым.

Полезный сигнал является объектом транспортировки (передачи), а техника связи — по существу техникой транспортирования сигналов по каналам связи. Поэтому целесообразно определить па-

раметры сигнала, которые являются основными с точки зрения его передачи. Такими параметрами являются *длительность сигнала* T_c , его *ширина спектра* F_c и *динамический диапазон* D_c .

- **Длительность сигнала (T)** — определяет интервал времени, в пределах которого сигнал существует, а так как любой сигнал рассматривается как временной процесс, то он имеет начало и конец. Длительность сигнала измеряется в секундах, миллисекундах ($1 \text{ мс} = 10^{-3} \text{ с}$), микросекундах ($1 \text{ мкс} = 10^{-6} \text{ с}$), наносекундах ($1 \text{ нс} = 10^{-9} \text{ с}$) и пикосекундах ($1 \text{ пс} = 10^{-12} \text{ с}$).

- **Ширина спектра сигнала (F)** — это диапазон частот, в пределах которого сосредоточена его основная энергия. Она определяет скорость изменения сигнала внутри интервала его существования. В технике связи спектр передаваемого сигнала часто сознательно сокращают для экономии средств на аппаратуру линии связи. Возможную величину сокращения спектра сигнала при этом определяют исходя из допустимого искажения сигнала в данной системе связи. Например, при телефонной связи требуется, чтобы речь была настолько разборчива, чтобы абоненты могли узнать друг друга по голосу. Для этого достаточно передать речевой сигнал в полосе частот 300–3400 Гц. Передача более широкого спектра речи в этом случае нецелесообразна, так как ведёт к техническим усложнениям и увеличению затрат на канал связи. Спектр модулированного сигнала обычно шире спектра передаваемого сообщения и зависит от вида модуляции.

- **Динамический диапазон (D)** — это отношение наибольшей мгновенной мощности сигнала к той наименьшей мощности, которую необходимо отличать от нуля при заданном качестве передачи.

$$D = 10 \lg(P_{MAX} / P_{MIN}), [\text{дБ}].$$

Динамический диапазон сигналов передачи программ *звукового вещания*: речь диктора — 25...35 дБ; музыкальные инструменты — 45...55 дБ; симфонический оркестр — до 65 дБ. Звук двигателей реактивного самолета на взлете — более 100 дБ.

С помощью приведённых выше параметров можно ввести общую и наглядную характеристику передаваемых по каналам связи сигналов — *объём сигнала*:

$$V_c = T_c \cdot F_c \cdot D_c.$$

Объём сигнала (V_c) даёт общее представление о возможностях данного множества сигналов как переносчиков сообщений. Чем больше объём сигнала, тем больше информации можно «вложить» в этот объём и тем труднее передать такой сигнал по каналу связи с требуемым качеством.

Необходимым условием неискаженной передачи по каналу сигналов с объемом V_c , очевидно, должно быть $V_c < V_k$. При соблюдении этого условия объём сигнала полностью «вписывается» в объём канала.

Преобразование дискретного сообщения в сигнал обычно осуществляется в виде двух операций — *кодирования* и *модуляции*.

Кодирование — это процесс записи информации на языке несущей среды. Колебания, не являясь информационным сигналом, на определенной частоте могут переноситься из одной точки пространства в другую, но не передавать никаких данных до тех пор, пока информация не будет каким-либо способом в них закодирована. Перенесение информации на несущую среду предполагает модифицирование несущей среды и называется модуляцией.

Модуляция — это процесс изменения параметров носителя информации.

Для передачи информации используют специальные электрические сигналы (*электромагнитные колебания*), которыми являются хорошо излучающиеся и распространяющиеся как в свободном пространстве, так и в направляющих системах высокочастотные гармонические электромагнитные колебания (*несущие колебания*). Сами несущие колебания не содержат информации (можно сказать, что *передают с нулевой скоростью*), а только ее переносят. Передаваемая по каналам связи информация закладывается в один или ряд параметров несущего колебания.

Общий принцип модуляции состоит в изменении одного или нескольких параметров *несущего* колебания (*электромагнитного колебания*) $f(t, \alpha, \beta, \dots)$ в соответствии с передаваемым сообщением. Так, если в качестве переносчика выбрано гармоническое колебание $f(t) = U \cos(\omega_0 t + \varphi)$, то можно образовать три вида модуляции: *амплитудную* (АМ), *частотную* (ЧМ) и *фазовую* (ФМ).

Применение радиоимпульсов позволяет получить ещё два вида модуляции: по частоте и по фазе высокочастотного заполнения.

При дискретной (цифровой) модуляции закодированное сообщение a , представляющее собой последовательность кодовых символов $\{b_i\}$, преобразуется в последовательность элементов (посылок) сигнала $\{u(t)\}$ путём воздействия кодовых символов на электромагнитное колебание $f(t)$.

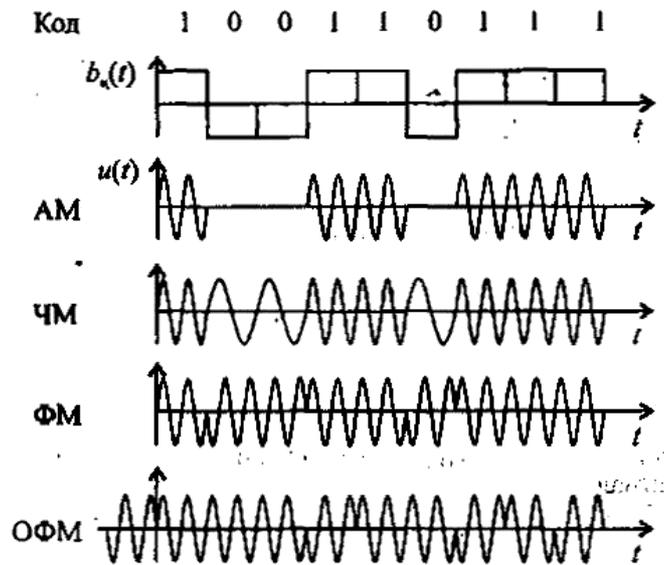


Рис. 2.2 — Формы сигналов при двоичном коде для различных видов дискретной модуляции

1. *Амплитудная модуляция (АМ)*. Амплитуда несущей волны варьируется в соответствии с амплитудой информационного сигнала.

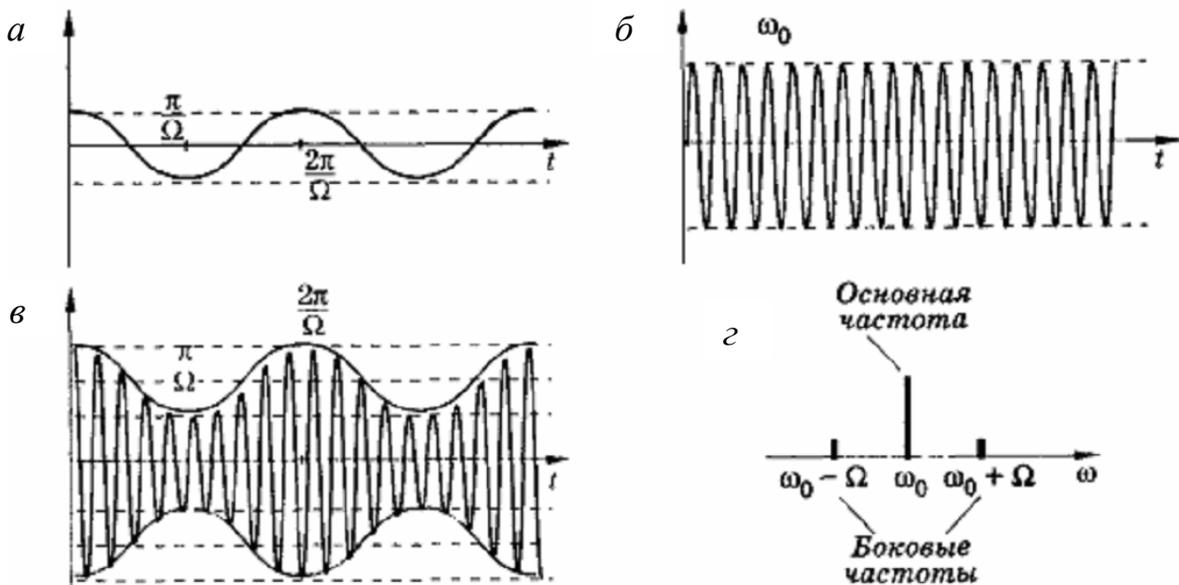


Рис. 2.3 — Амплитудно-модулированный сигнал: a — звуковой сигнал передатчика; b — высокочастотный сигнал передатчика; c — закон колебаний передаваемого сигнала; z — спектрограмма

2. *Частотная модуляция (ЧМ)*. В данном случае модулируется частота несущей волны в зависимости от изменения амплитуды передаваемого сигнала. Таким образом, сигнал модулирует частоту несущей, а не ее амплитуду. В коротковолновом радиодиапазоне применяется именно этот способ модуляции.

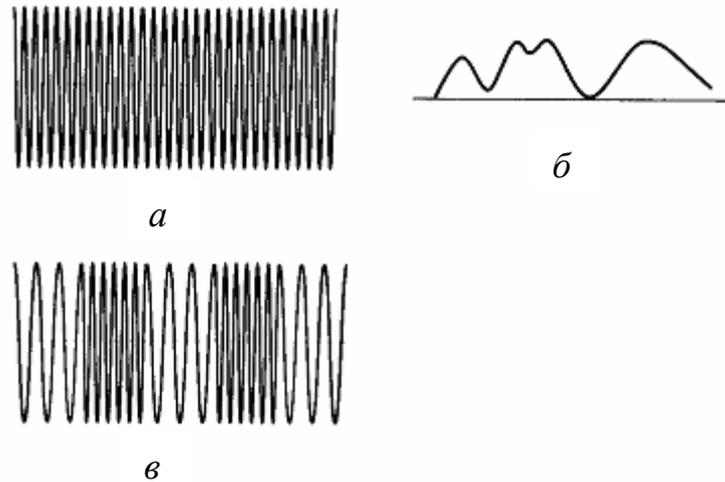


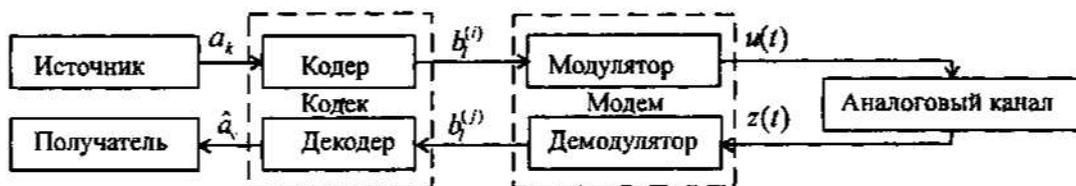
Рис. 2.4 — Частотная модуляция:

а — немодулированный высокочастотный несущий сигнал;
б — передаваемый звуковой сигнал; *в* — радиосигнал

3. *Импульсная модуляция (ИМ)*. Технология импульсной модуляции основана на переводе аналогового сигнала (такого, например, как голос) в цифровые импульсы. Голос может быть представлен серией чисел. При этом величина каждого числа находится в строгом соответствии с амплитудой голоса. Ниже ИМ будет рассмотрена более подробно.

С помощью кодирования и модуляции источник сообщений согласуется с каналом.

В современных системах передачи дискретных сообщений принято различать две группы относительно самостоятельных устройств: *кодеки* и *модемы*. Кодеком называются устройства, преобразующие сообщение в код (кодер) и код в сообщение (декодер), а модемом — устройства, преобразующие код в сигнал (модулятор) и сигнал в код (демодулятор).



Структурная схема системы передачи дискретных сообщений

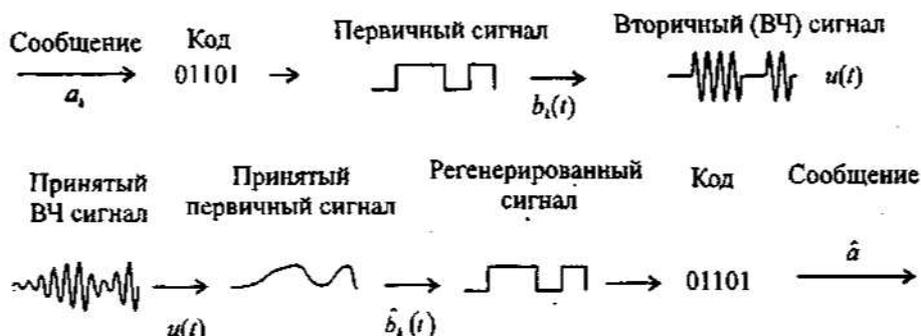


Рис. 2.5 — Процесс преобразования дискретного сообщения в сигнал и сигнала в дискретное сообщение

Канальные устройства (полосовые усилители передатчика и приёмника, корректоры и т.п.) вместе с линией связи образуют непрерывный канал, а последний вместе с модемом — дискретный канал.

Преобразование сообщения в сигнал должно быть обратимым. В этом случае по выходному сигналу можно восстановить входной первичный сигнал, т.е. получить всю информацию, содержащуюся в переданном сообщении. В противном случае часть информации будет потеряна при передаче.

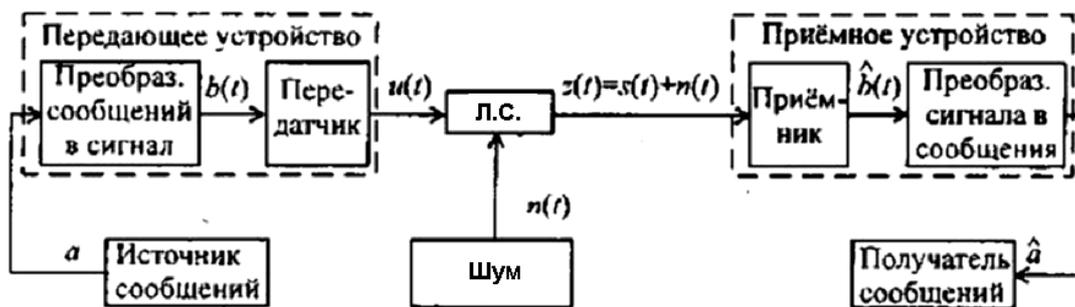


Рис. 2.6 — Структурная схема простейшей одноканальной системы связи

Линии связи. Информативность телекоммуникационной системы определяется типом используемой в ней линии связи (ЛС).

Линией связи называется *физическая среда* и совокупность аппаратных средств, используемых для передачи сигналов от передатчика к приёмнику.

Различают два типа ЛС: линии связи в свободном пространстве — *радиолинии (РЛ), радиорелейные, сотовые, спутниковые, лазерные;* и *линии связи по направляющим системам.* Достоинства РЛ — большие расстояния установления связи, в том числе с подвижными объектами, а также возможность передачи информации неограниченному числу слушателей и зрителей. Недостаток радиолиний — зависимость качества связи от состояния среды передачи, воздействие электромагнитных помех (ЭМП), сложность обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) радиосредств. И главный — невысокая информативность, обусловленная малой скоростью передачи в силу узкополосности систем передачи.

Достоинством направляющих линий связи является, в первую очередь, их высокая скорость передачи больших объемов информации в сочетании с высоким качеством передачи сигналов, защищенность от влияния ЭМП, простота приемо-передающих устройств. Однако направляющие системы — кабельные линии связи — являются наиболее дорогостоящим элементом телекоммуникационных систем.

Различают два основных типа направляющих систем — кабельных линий связи — электрические и волоконно-оптические линии связи (ВОЛС). В литературе встречается также термин оптоволоконные ЛС.

В кабельных ЛС направляющие системы образуются системными проводниками и диэлектриками, а в ВОЛС они представляют собой диэлектрические волноводы.

2.1.1 Основные единицы измерения в телекоммуникации

Диапазон измеряемых величин. В телекоммуникациях используется большое число различных физических величин, характеризующих, например, сигнал. Это частота, длина волны, напряжение, мощность и др.

Таблица 2.1

Наименование	Обозначение	Множитель
Пико	п	10^{-12}
Нано	Н	10^{-9}
Микро	мк	10^{-6}
Милли	м	10^{-3}
Кило	к	10^3
Мега	М	10^6
Гига	Г	10^9
Тера	Т	10^{12}

Особенность этих физических величин состоит в их большом диапазоне значений; так, длина электромагнитной волны может меняться от сотен километров до сотен нанометров (оптический диапазон), мощность — от мегаватт до нановатт, а частота — от единиц герц до терагерц. В таблице даны значения приставок единиц измерения, которые надо хорошо усвоить. Это поможет вам в сравнении физических величин, умении оценивать физическую реализуемость результатов расчетов и экспериментов.

Понятие децибел. Очень важной величиной, которая используется как в волоконной оптике, так и в электронике для выражения усиления или затухания в системе в целом или в ее компонентах, является *децибел (дБ)*. Эту величину ввел Александр Грэхем Белл. Единица стала называться «бел». Одна десятичная бела называется децибел (дБ). Он ввел ее для измерения силы звука.

Человеческое ухо воспринимает силу звука логарифмически. Так, уровень в 100 ватт по сравнению с уровнем в 10 ватт для человеческого уха слышится громче в два раза (но не в 10 раз). Возрастание силы звука на один децибел является примерно наименьшим приростом, которое способно различить человеческое ухо.

Эта единица измерения используется в настоящее время в качестве основы для измерений *относительных уровней* мощностей, напряжений и других физических величин. Транзистор, например, может усиливать сигнал, увеличивая амплитуду его напряжения, тока или мощности. Это увеличение называется *усилением*. Аналогично, затухание — это уменьшение напряжения, то-

ка или мощности *при распространении сигнала по линии связи*. Основные уравнения, определяющие децибел, следующие:

$$dB_U = 20 \log_{10} \left(\frac{U_1}{U_2} \right); \quad dB_I = 20 \log_{10} \left(\frac{I_1}{I_2} \right); \quad dB_P = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right),$$

где U — напряжение, I — ток и P — мощность. Децибел, таким образом, характеризует отношение двух напряжений, токов или мощностей. Необходимо отметить, что в случае напряжения и тока отношение логарифмов умножается на 20, а в случае мощности — на 10.

Разобраться в децибелах поможет одно общее правило. При измерении мощности потери в 3 дБ означают уменьшение мощности на 50 %, т.е. если была мощность 1 мВт, то будет 0,5 мВт. Аналогично увеличение на 3 дБ означает удвоение мощности: 1 мВт превращается в 2 мВт. Для напряжения или тока удвоение или уменьшение вдвое будет происходить при изменении на 6 дБ, поскольку, как видно из приведенных выше уравнений, для тока и напряжения коэффициент равен не 10, а 20. При прокладке кабелей практически всегда приходится иметь дело с мощностью.

В случае мощности правило децибел выглядит так:

Увеличение:

20 дБ = 100-кратное возрастание мощности;

10 дБ = 10-кратное возрастание мощности;

3 дБ = двукратное возрастание мощности.

Уменьшение:

−3 дБ = двукратная потеря мощности;

−6 дБ = 75 %-ная потеря мощности (остается 25 %);

−10 дБ = 90 %-ная потеря мощности (остается 10 %);

−20 дБ = 99 %-ная потеря мощности (остается 1 %);

−30 дБ = 99,9 %-ная потеря мощности (остается 0,1 %);

−40 дБ = 99,99 %-ная потеря мощности (остается 0,01 %).

При всего лишь −20 дБ теряется 99 % мощности. Если исходный сигнал имеет мощность 1 мВт, то при −20 дБ остается только 0,01 мВт (10 микроватт). Мощность падает на два порядка — в 100 раз.

В волоконной оптике, как правило, имеют дело с затуханием оптической мощности. По мере перемещения по волокну свет те-

ряет свою мощность. Эти потери выражаются в децибелах. Затухание, выраженное в децибелах, имеет отрицательную величину.

Иногда в соотношении, используемом для определения затухания или усиления, используется постоянное значение P_{in} . В волоконной оптике обычно используется величина в 1 милливатт (мВт).

$$dB_P = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{1 \text{ мВт}} \right);$$

дБм (dBm) означает «децибел, соотнесенный к милливатту». Единицы дБм часто используются инженерами и техниками.

10 мВт = +10 дБм	10 мкВт = -20 дБм
5 мВт = +7 дБм	1 мкВт = -30 дБм
1 мВт = 0 дБм	100 нВт = -40 дБм
500 мкВт = -3 дБм	10 нВт = -50 дБм
100 мкВт = -10 дБм	1 нВт = -60 дБм
50 мкВт = -13 дБм	100 пВт = -70 дБм

Рис. 2.6 — Соотношение мощности и единиц дБм

Объем и скорость передачи информации. Объем информации измеряется в битах.

Бит — это минимальное количество информации, составляющее выбор одного из двух возможных вариантов. Когда создается возможность дать ответ на любой вопрос «да» или «нет», то это и есть один бит информации, т.е. в этом случае меньше бита информации не бывает.

Бит — это абстрактное понятие, которое обеспечивает количественное измерение информации, доступное компьютерным системам.

Математически нам проще всего «битовую информацию» описывать числовыми методами, а именно двоичными числами, которые состоят из цифр «0» и «1».

Сколько передается «ноликов» или «единичек» — столько передается битов информации.

Для кодирования разнообразных вариаций в какой-либо области знаний (например, даже обычного текста, не говоря уже о

звуковой или цветовой информации) одного бита информации мало. Для кодирования разнообразных вариаций требуется увеличение разрядности двоичного числа (его удлинении). Двоичные числа формируются с фиксированной разрядностью, такая совокупность разрядов получила название «байт».

Байт — последовательность из восьми бит, рассматриваемая как одно целое.

Современные объемы характеризуются объемами в килобайтах, мегабайтах, гигабайтах.

Рассмотрим книгу объемом 100 000 слов, содержащую, например, 250 страниц, причем допустим, что каждое слово состоит в среднем из пяти букв. При использовании для преобразования текста в цифровую форму каждая буква кодируется восемью двоичными цифрами. Таким образом, один байт может принимать $2^8 = 256$ различных значений, причем, учитываются все строчные и прописные буквы, цифры, промежутки между словами и знаки препинания. Тогда общий объем содержащейся в книге информации составит 4 Мбит.

Производимые в настоящее время оптические носители информации позволяют хранить 210, 650, 700 Мбайт.

Производимые современной промышленностью устройства хранения данных (жесткий диск) могут достигать объема 500Гбайт и их объемы с каждым годом возрастают.

Пропускная способность канала

Под пропускной способностью канала понимают максимально достижимую скорость передачи полезной информации в бит/с. В качестве ограничений обычно выступают протяженность канала, тип среды, мощность передатчика, чувствительность приемника, занимаемая полоса частот, характеристики помех и шумов, допустимая доля ошибок.

Если раньше сети работали обычно со скоростью 10 Мбит/с, то сейчас сети поддерживают 100 и 1000 Мбит/с. Причем Internet трафик, в настоящее время, в телекоммуникационных сетях общего пользования превышает голосовой трафик.

Понятие скорости передачи

Скорость передачи — это количество бит в единицу времени (В) [*бит/с*].

Различные услуги электросвязи требуют различных скоростей передачи. Например, факсимильная передача одной страницы текста формата А4 (210x297 мм), в зависимости от степени обработки сигналов, требует от 200 кбит/с до 2 Мбит/с. Аналоговая передача видеосигнала требует в реальном масштабе времени до 6 МГц, а цифровая передача — 130–600 Мбит/с. Современные скорости локальных вычислительных сетей составляют от 10 Мбит/с до 1 Гбит/с. Требования к скоростям речевого и видеосигнала могут существенно различаться в зависимости от вида обработки.

Звуковой канал. Для обеспечения разборчивости речи требуется полоса частот около 3 кГц, лежащая в диапазоне от 300 Гц до 3,4 кГц для обычной стандартной телефонной сети. На практике по *цифровому телефонному каналу* эта полоса частот передается со скоростью 64 кбит/с. При этом аналоговый сигнал дискретизируется с интервалом 125 мкс (частота дискретизации $f_s = 8$ кГц), а каждый отсчет кодируется 8-битовым словом.

Связь между скоростью передачи и расчетной частотой зависит от используемого метода кодирования сигналов. Например, для кодирования без возврата к нулю — аналогично обычным цифровым данным (высокий уровень означает 1, а низкий 0), расчетная частота для линии связи в 100 МГц равна скорости передачи данных 100 Мбит/с.

Шум. *Шумом* называется любое возмущение электрического или оптического характера, отличное от полезного сигнала. Сигнал несет полезную информацию, а *шум* является чем-то дополнительным и бесполезным. Любой канал связи подвержен воздействию шумов. Слишком слабый сигнал невозможно различить на фоне шума, для этого необходимо либо уменьшить уровень шума, либо усилить сигнал. В процессе усиления в приемном устройстве усиливается не только сигнал, но и шум. Некоторые виды шума можно отфильтровать с помощью электронных фильтров. Удобно иметь уровень сигнала более высокий по сравнению с уровнем шума, а еще лучше иметь сильный сигнал и слабый шум.

Примером шумов может служить так называемая **перекрестная помеха**. Когда во время телефонного звонка происходит коммутация двух различных телефонных линий, в результате чего вы можете у себя в трубке слышать то, что говорят другие люди. Это **искусственный шум**. В отличие от искусственных, многие типы естественных шумов устранить нельзя, поскольку они появляются в результате природных явлений. Вам, наверное, знакомо характерное потрескивание в радиоприемнике, которое вызвано разрядами молнии в атмосфере Земли. Это пример **атмосферных шумов (atmospheric noise)**. Кроме эффектов, связанных с природными процессами, протекающими в атмосфере и на поверхности Земли, существуют внешние шумы, которые называются **космическими**. Эти шумы заметны лишь на частотах до 1 ГГц.

Электрический шум можно определить как нежелательную энергию, которая сопровождает сигнал в электронной системе — внутренние шумы. В любой точке системы, кроме сигнала, всегда присутствуют шумы. Это явление — неотъемлемое свойство электронной цепи.

Тепловой шум. Вследствие теплового возбуждения атомов проводника или резистора в веществе возникают свободные электроны. Возникающий при этом шум носит название *теплового шума*, так как его энергия возрастает с увеличением температуры.

$$N = kT\Delta F,$$

где k — постоянная Больцмана, равная $1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К;

T — абсолютная температура, выраженная в градусах по шкале Кельвина, К;

ΔF — рассматриваемая ширина полосы частот, например полоса пропускания измерительного прибора или системы.

Можно предположить, что присутствие шумов в системе приводит к нарушению её работоспособности. Однако на самом деле большинство систем функционирует вполне нормально, если уровень шумов не превышает заданного уровня.

Отношение сигнал/шум

В большинстве случаев абсолютный уровень мощности шума редко является тем параметром, по которому пользователь

может оценить качество системы. Как правило, для этой цели удобней пользоваться отношением мощностей сигнала и шума. Отношение *сигнал/шум* (S/N) — общепринятый способ выражения качества сигнала в системе. Это отношение выражается обычно в дБ средней энергии сигнала к средней энергии шумов различной природы.

$$S/N = 10 \log \left(\frac{S}{N} \right) [dB],$$

где S — мощность сигнала в Вт, N — мощность шума в Вт.

Часто реальные системы работают в очень большом динамическом диапазоне, который простирается на два или три порядка величин; при этом приходится иметь дело как с очень малыми, так и с очень большими значениями отношения сигнал/шум.

Итак, очевидно, что именно отношение мощностей сигнала и шума, а не их абсолютные значения, является определяющим параметром качества системы.

Типичные значения приемлемого отношения сигнал/шум составляют около 16 дБ — для передачи речи с низким качеством и до 30 дБ — для коммерческих телефонных систем, наконец, 50–60 дБ для высококачественного радиовещания музыкальных программ.

Пример. Пусть входное сопротивление усилителя ТВ приемника равно 500 Ом, сигнал на выходе равен 1 мВ. Полоса частот сигнала — 10 МГц, температура сопротивления нагрузки — 27 °С. Тогда мощность сигнала на нагрузке

$$S = \frac{U^2}{R_1} = \frac{1^2}{500} = 0,002 \text{ Вт};$$

эквивалентная мощность шума:

$$N = kT_s \Delta F = 1,38 \times 10^{-23} \times 300 \times 10^6 = 4,14 \times 10^{-14} \text{ Вт},$$

а отношение сигнал/шум на нагрузке:

$$\frac{S}{N} \text{ дБ} = 10 \log_{10} \left(\frac{0,002 \text{ Вт}}{4,14 \times 10^{-14} \text{ Вт}} \right) = 48 \text{ дБ}.$$

Еще одним преимуществом выражения отношения С/Ш в децибелах является то, что общее отношение сигнал/шум при соединении нескольких отдельных электрических цепей определя-

ется как сумма отдельных отношений С/Ш всех цепей, а не их произведение.

Скорость передачи реального канала связи зависит не только от полосы пропускания, но и от отношения сигнал/шум.

Теоретическую *максимальную скорость передачи* для реального канала связи можно вычислить, используя *теорему Шеннона*:

$$C = \Delta F \log_2 (1 + S/N) \text{ [бит/с]},$$

где C — скорость передачи данных в бит/с; ΔF — полоса пропускания канала в герцах; S — мощность сигнала в ваттах; T — мощность шума в ваттах.

Из этой формулы можно видеть, что увеличение полосы пропускания или увеличение отношения сигнала к шуму позволяет увеличить скорость передачи данных и что сравнительно небольшое увеличение полосы пропускания эквивалентно гораздо большему увеличению отношения сигнала к шуму.

Для цифровых систем существует аналог отношения сигнал — шум, который называется **отношение бит/ошибка (BER)**.

$$BER = (\text{Число ошибочных битов}) / (\text{Всего битов}).$$

Данный параметр является отношением объема неправильно принятой информации к общему объему переданной информации, выраженной в битах. Отношение 10^{-9} означает, что при передаче одного миллиарда бит информации была допущена одна ошибка. Подобно S/N требования к величине отношения бит/ошибка зависят от области применения и многих других факторов. Лучшее S/N подразумевает лучшее отношение BER .

2.2 Виды и технологии систем связи

В историческом плане различные виды электросвязи длительный период времени развивались независимо друг от друга. Все виды электросвязи имеют дело с различными по характеру и параметрам электрическими сигналами, поэтому каждый вид в своем развитии ориентировался на создание своих каналов, систем и даже своей сети. Структура сети выбиралась в соответствии с особенностями распределения потоков сообщений, характерных для конкретного вида электросвязи. В результате сформировалось несколько независимых сетей. Средства связи, из которых

создавались сети, оказались разрозненными. Уже в начале 1960-х гг. стало ясно, что перспективным направлением развития электросвязи должно стать объединение сетей. В первую очередь требовалось объединить однородные сети внутри каждого вида электросвязи, а затем изолированные сети отдельных видов электросвязи.

Необходимость передачи электрических сигналов в совпадающих направлениях позволила поставить вопрос об объединении отдельных систем передачи в совпадающих направлениях в единую систему передачи. *Система передачи* — это совокупность технических средств, позволяющая образовать независимые электрические каналы, по которым передаются сигналы электросвязи.

Наконец, одна из важнейших предпосылок, ведущих к слиянию сетей, — сходство функций, выполняемых различными системами коммутации и заключающихся в организации путей передачи сообщений для их доставки от отправителя к получателю.

Все это и вызвало необходимость построения и развития различных сетей электросвязи с учетом перспективы слияния их в единую сеть связи.

Учитывая эти обстоятельства, в конце 1960-х гг. было принято решение о создании в стране Единой автоматизированной сети связи (ЕАСС), которая бы объединила все сети электросвязи независимо от их ведомственной принадлежности.

Создание ЕАСС базировалось на объединении разрозненных и многочисленных мелких сетей в общегосударственные сети каждого вида электросвязи, а затем в единую сеть с целью совместного использования определенных технических средств, и в первую очередь систем передачи и коммутации.

Однако в конце XX века ход развития технического прогресса, в частности, широкое внедрение в сеть связи страны современных телекоммуникационных технологий, а также исторические изменения политической и экономической структуры России, предопределили создание новой концепции построения сети связи.

Взаимоувязанная сеть связи Российской Федерации (ВСС РФ) является частью инфраструктуры страны и представляет собой совокупность сетей, служб и оборудования связи, располо-

женных и функционирующих на территории страны. Она предназначена для удовлетворения потребностей населения, органов государственной власти и управления, обороны, безопасности, правопорядка, а также пользователей всех категорий в услугах электросвязи.

Все сети связи, входящие в единую сеть электросвязи (ЕСЭ) РФ, можно классифицировать по нескольким признакам (рис. 2.7):

- по категориям;
- по функциональному признаку;
- по способам организации каналов;
- по типу абонентских терминалов;
- по территориальному делению.

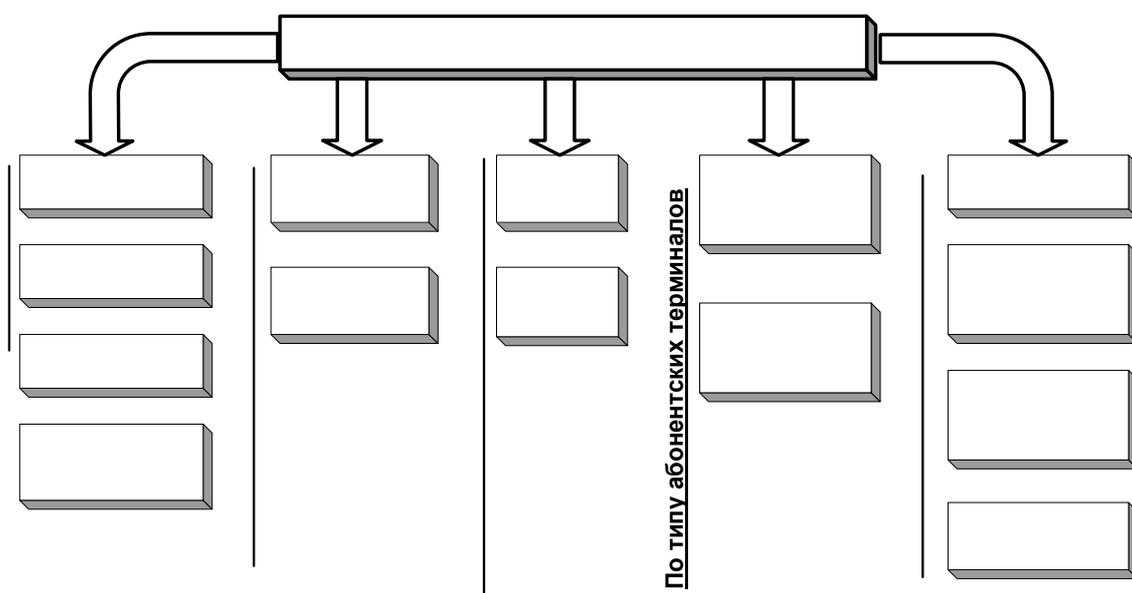


Рис. 2.7 — Классификация сетей связи РФ

В техническом плане функционирование ВСС РФ базируется на принципах и структурах, в соответствии с которыми вся сеть связи страны подразделяется на две взаимосвязанные составляющие: первичную сеть и вторичную сеть.

Первичная сеть — это совокупность всех каналов без подразделения их по назначению и видам связи. В состав ее входят линии и каналы образующая аппаратура.

Вторичная сеть состоит из каналов одного назначения (телефонных, телеграфных, вещания, передачи данных).

Категориям

Сети общего пользования

Выделенные сети

По признаку

Транспортные сети

Способы организации каналов

Первичные сети

Вторичные сети

Сети связи, входящие

и др.), образуемых на базе первичной сети. Вторичная сеть включает коммутационные узлы, оконечные пункты и каналы, выделенные на первичной сети.

Помимо принятого деления сетей ЕСЭ на первичные и вторичные возможно другое двухуровневое деление, по функциональному назначению: на транспортную сеть и сеть доступа.

Транспортная сеть связи состоит из междугородной и зональных (региональных) сетей связи. Сеть доступа (абонентская сеть или сеть абонентского доступа) является местной сетью. Транспортная сеть предназначена для передачи высокоскоростных (широкополосных) потоков сообщения и их накопления.

Сеть доступа состоит из абонентских линий (на металлических или оптических кабелях или радиоканалах) с подключенными к ним абонентскими оконечными устройствами местных станций коммутаций, соединяющих их линии передачи и линии передачи к узлам транспортной сети.

Сеть управления электросвязью — специальная сеть, обеспечивающая управление сетями электросвязи и их услугами путем организации взаимосвязи с компонентами различных сетей электросвязи на основе единых интерфейсов и протоколов, стандартизированных Международным Союзом Электросвязи.

Сеть управления электросвязью обеспечивает единое управление цифровыми сетями, входящими в ВСС РФ.

По *территориальному признаку* и назначению первичные и вторичные сети подразделяются на магистральную (междугородную — для вторичных сетей), внутризональные (зональные) и местные сети, а также международные сети.

Магистральные сети связи — технологически сопряженные междугородные сети электросвязи, образуемые между центром Российской Федерации и центрами субъектов Федерации, а также центрами субъектов Федерации между собой.

Зональные (региональные) сети связи — технологически сопряженные сети электросвязи, образуемые в пределах территории одного или нескольких субъектов Федерации.

Местные сети связи — технологически сопряженные сети электросвязи, образуемые в пределах административной или определенной по иному принципу территорий, не относящиеся к

региональным сетям связи. Местные сети подразделяются на городские и сельские.

Магистральные, внутризоновые и часть местных цифровых наложенных первичных сетей являются основой транспортной цифровой сети связи России. Местные и первичные сети на участке «местный узел — оконечное устройство» в соответствии с новой терминологией являются сетью доступа (рис. 2.8).

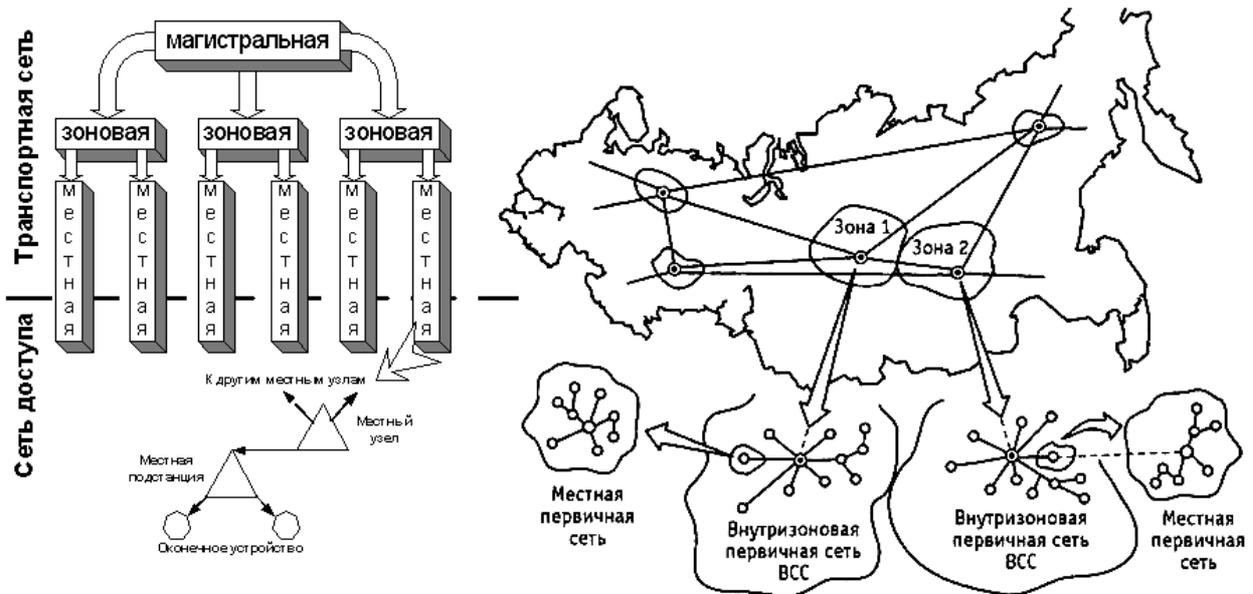


Рис. 2.8 — Принцип построения первичной сети ЕСЭ

Структура первичной сети учитывает административное разделение территории страны. Вся территория России поделена на зоны, совпадающие, как правило, с территорией областей, краев, а иногда — республик.

Каждый канал ЕСЭ обеспечивает передачу сигналов электросвязи.

Служба электросвязи представляет собой организационно-техническую структуру на базе сети связи (или совокупности сетей связи), обеспечивающую обслуживание связью пользователей с целью удовлетворения их потребностей в определенном наборе услуг электросвязи. Различают три вида служб электросвязи: службы речевого обмена, службы документальной электросвязи и службы мультимедиа.

Классификация служб электросвязи представлена на рисунке 2.9.

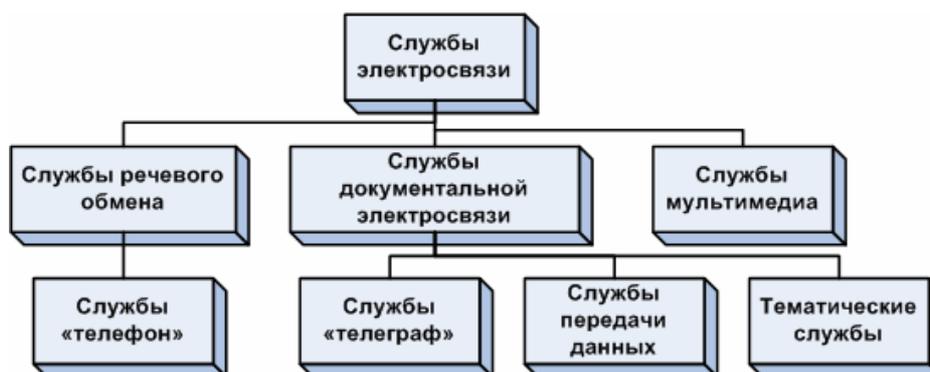


Рис. 2.9 — Службы электросвязи

Традиционные сети связи (телефонные сети общего пользования — ТфОП, сети передачи данных — СПД) характеризуются узкой специализацией. Для каждого вида связи существует отдельная сеть, которая требует технического обслуживания, при этом свободные ресурсы одной сети не могут использоваться другой сетью. Мультисервисная сеть позволяет отказаться от многочисленных наложенных вторичных сетей, обеспечить внедрение новых услуг с различным требованием к объему передаваемой информации и качеству её передачи.

Мультисервисная сеть образует единую информационно-телекоммуникационную структуру, которая поддерживает все виды трафика (данные, голос, видео) и предоставляет все виды услуг (традиционные и новые, базовые и дополнительные) в любой точке, в любое время, в любом наборе и объеме.

К базовым услугам мультисервисной сети относятся традиционные услуги передачи и доступа:

- передача традиционного телефонного трафика;
- передача трафика данных Интернет;
- передача трафика данных корпоративной сети;
- передача трафика мобильных сетей;
- доступ в сеть Интернет;
- доступ к сетям передачи данных.

К дополнительным услугам относятся следующие:

- передача голосового трафика IP-телефонии;
- передача видеотрафика для организации видеоконференций;
- организация виртуальной частной сети;

– услуги по обеспечению гарантированного уровня обслуживания.

Потребность создания мультисервисных сетей диктуется сформировавшимся рынком телекоммуникационных услуг.

2.3 Стандартизация и метрология в телекоммуникации

Стандартизация занимает важное место в телекоммуникационной индустрии. Наличие стандарта на тот или иной вид продукции или услуг существенно облегчает отношения производителя и потребителя, способствует повышению качества товара, снижению его стоимости и внедрению новых технологий.

Оборудование различных производителей, выполненное по единым стандартам, позволяет организовать связь, в том числе и международную. Разработкой общих правил, направленных на совместное использование оборудования, и занимаются органы стандартизации.

По диапазону охвата различают стандарты международные, национальные и фирменные. Стандарты различного уровня разрабатывают организации, объединяющие интересы как производителей, так и потребителей. В процессе подготовки стандарта обеспечивается всестороннее его обсуждение и учет мнений всех заинтересованных сторон.

Из международных организаций стандартизации наибольшее значение в области связи имеют следующие.

Международная организация по стандартизации (International Organization for Standardization — *ISO*) разрабатывает стандарты в различных областях деятельности, в том числе и в области телекоммуникаций. Например, широко известны стандарты качества серии ISO 9000. В области телекоммуникаций одним из широко используемых стандартов ISO является семиуровневая модель взаимодействия открытых систем. Членами ISO на добровольной основе являются национальные организации стандартизации.

Международный союз электросвязи (International Telecommunication Union — *ITU*) является специализированным органом ООН. Членами ITU (также на добровольной основе) являются государства — участники союза. Подготовительные работы по формированию стандартов ведутся в следующих секторах ITU:

– *сектор радиосвязи ITU* (ITU Radio communication Sector — *ITU-R*) вырабатывает стандарты в области радиосвязи в мировом масштабе;



– *сектор стандартизации телекоммуникаций ITU* (Telecommunication Standardization Sector of ITU — *ITU-T*) подготавливает международные стандарты в области телекоммуникаций;

– в состав ITU входил также *сектор развития электросвязи* (Telecommunication Development Sector of ITU — *ITU-D*).

Деятельность ITU охватывает практически все направления работ в области связи. Результаты работы ITU (стандарты) издаются в виде Рекомендаций (Recommendation), объединенных в серии. Рекомендации не являются обязательными для применения, но фактически они широко используются на практике. На Рекомендации ITU часто ссылаются в технических условиях, прилагаемых к поставляемому оборудованию. Рекомендации ITU также широко используются в документах других организаций стандартизации.

В Европе вопросами стандартизации в области связи занимаются следующие организации:

Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций (European Telecommunications Standards Institute — *ETSI*) определяет техническую политику в области связи для стран — членов Европейского сообщества;

Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (Conference of European Post and Telecommunications *CEPT*) разрабатывает стандарты Европейского уровня в области связи.

Значительную роль в развитие средств связи вносит неправительственная организация — *институт инженеров по электротехнике и электронике* (Institute of Electrical and Electronic Engineers — *IEEE*).

Из национальных организаций, внесших наиболее существенный вклад в развитие средств связи и занимающихся проблемами стандартизации в этой области, следует отметить такие организации:

Американский институт национальных стандартов (American National Standards Institute — *ANSI*) разрабатывает стандарты

для использования в США, затем многие из этих стандартов утверждаются международными организациями стандартизации;

Ассоциация телекоммуникационной промышленности (Telecommunication Industrial Association — TIA) является одной из групп ANSI по телекоммуникациям;

Ассоциация электронной промышленности (Electric Industrial Association — EIA) также одна из групп ANSI.

В Российской Федерации национальные стандарты во всех областях деятельности разрабатывает Государственный Комитет по стандартизации, метрологии и сертификации (Госкомстандарт). Работы, связанные с подготовкой стандартов в области связи и контроль их исполнения, осуществляют подразделения министерства связи: департаменты и соответствующие комиссии.

В настоящее время отрасль «Связь» развивается по пути интеграции в мировое информационное пространство, что требует решения ряда вопросов стандартизации и, в частности, разработки комплекса нормативных документов. С этой целью определена [35] структура проведения работ по стандартизации, назначены головная и базовые организации, установлены задачи и направления их деятельности, выполнена разработка и введены нормативные документы, определяющие основные положения отраслевой стандартизации, а также установлен порядок разработки нормативных документов отрасли, соответствующий государственной системе стандартизации.

Основными организациями в РФ по стандартизации в отрасли «Связь» являются:

- ЦНИИС, осуществляющий проведение научных исследований и разработок в области развития ВСС РФ, ее технических средств и методов технической эксплуатации и метрологического обеспечения в целях обеспечения народного хозяйства, обороны и населения страны всеми видами устойчивой электрической связи.

- Научно-исследовательский институт радио (НИИР), осуществляющий проведение исследований и разработок в области развития систем радиосвязи, включая бортовую и наземную аппаратуру, а также проблемы электромагнитной совместимости радиосредств и эффективного использования радиочастотного спектра.

- Ленинградский отраслевой научно-исследовательский институт связи (ЛОНИИС), осуществляющий проведение исследований и разработок в области развития местных сетей телефонной связи.

- Ленинградский отраслевой научно-исследовательский институт радио (ЛОНИИР), осуществляющий проведение исследований и разработок по проблемам промышленных радиопомех и внешней помехозащищенности оборудования систем связи.

- Самарский отраслевой научно-исследовательский институт радио (СОНИИР), осуществляющий проведение исследований и разработок в области развития систем и аппаратуры КВ-радиосвязи, РВ- и ТВ-ретрансляторов, в том числе экологических аспектов электромагнитных излучений.

- Специальное строительное конструкторско-технологическое бюро (ССКТБ), осуществляющее проведение разработок в области установок и оборудования для прокладки и обслуживания кабельных линий связи.

- Государственный институт по изысканию и проектированию сооружений связи (Гипросвязь), осуществляющий проведение работ в области проектирования сетей и объектов проводной электросвязи.

Здесь ЦНИИС является Головной организацией, а остальные относятся к базовым организациям стандартизации.

Метрология в телекоммуникациях. Соблюдение стандартов невозможно без контроля соответствия в телекоммуникациях и связи. Как известно, диагностирование и контроль в сочетании с измерением, анализом и тестированием служат более глубокому пониманию физических процессов, протекающих при передаче информации, и нацелены на поддержание используемых для этой цели устройств в хорошем состоянии.

Метрология — это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности, а также существующих стандартах.

Одними из фундаментальных научных понятий в настоящее время являются *физическая величина* (ФВ) и *информация*. При этом первое представляет собой общее в качественном отноше-

нии, но индивидуальное в количественном отношении свойство физических объектов — физических систем, их состояний и происходящих в них процессов. Второе же понятие определяет воспринимаемые специальным устройством сведения об окружающем мире и протекающих в нем процессах в виде *сигналов* той или иной физической природы и формы. Следовательно, если ФВ отражает свойство физического объекта или явления, то сигнал опосредствованно отражает это свойство. При этом как ФВ, так и сигнал определяются вспомогательными характеристиками, т.е. их *параметрами*.

Таким образом, сигнал также является ФВ с изменяющимися одним или несколькими параметрами, которые, как и собственно ФВ, могут контролироваться или измеряться с гарантированной точностью. Учитывая, что в электросвязи передача информации осуществляется посредством сигналов, распространяемых в той или иной физической среде, контролю подлежат как ФВ, определяющие среду распространения сигналов, так и сигналы, имеющие соответствующую форму представления.

Понятие *измерение* в общем случае подразумевает нахождение значения ФВ опытным путем с помощью специальных технических средств, хранящих в явном или неявном виде единицу этой величины. При этом средство измерений, предназначенное для воспроизведения и/или хранения ФВ одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах, носит название *меры*. Здесь размер ФВ количественно определяет физическую величину, а значение ФВ является оценкой ее размера в виде некоторого числа принятых для нее единиц. Следует различать *истинное* и *действительное* значения ФВ, первое из которых идеальным образом отражает в качественном и количественном отношениях соответствующее свойство объекта, а второе находится экспериментальным путем и настолько близко к истинному значению, что для поставленной измерительной задачи может его заменить. Значение же величины, полученной путем ее измерения, носит название *результат измерения*, который в той или иной степени соответствует действительному (истинному) значению ФВ. Поэтому основной характеристикой измерения является *точность*, определяемая таким понятием, как *погрешность измерения*, которая представляет собой

отклонение результата измерения от действительного (истинного) значения измеряемой величины.

Поэтому устройства, реализующие установление указанных свойств физических величин и их параметров, назовем *средствами измерений*.

Контроль на базе измерений настолько глубоко проник во все области человеческой деятельности и стал настолько обширным, что его дальнейшее развитие стало невозможно без соответствующего общегосударственного обеспечения единства, заданного уровня точности и достоверности измерений, а также планирования их развития и применения. В связи с этим понятие «метрологическое обеспечение» охватывает установление требуемой точности измерений и обеспечение народного хозяйства страны средствами измерений — обеспечение единства измерений. В общем случае *метрологическое обеспечение* — это установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений. Здесь *единство измерений* подразумевает такое состояние измерений, при котором их результаты выражаются в узаконенных единицах и погрешности измерений известны с заданной точностью. Однако выполнение только единства измерений недостаточно, так как необходимо, чтобы эта погрешность не превышала установленных научно обоснованных *норм точности*. Поэтому для решения вопросов обеспечения единства и точности измерений в их совокупности существует метрологическая служба, состоящая из государственной и ведомственных служб.

В государственную метрологическую службу, возглавляемую Госстандартом, входят: главный центр государственной метрологической службы, Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии ВНИИМ, ВНИФТРИ и другие, главные центры государственных эталонов, главный центр стандартных образцов веществ и материалов, центр государственной службы справочных данных.

В организационном и методическом плане метрологическое обеспечение основывается на Законе «Об обеспечении единства измерений», который устанавливает правовые основы обеспечения единства измерений и регулирует отношения государствен-

ных органов управления с юридическими и физическими лицами по вопросам производства, эксплуатации, ремонта, а также импорта систем измерения.

2.4 Электрические кабели связи

Расширение сетей электросвязи базируется на *системах передачи*, которые по типу среды распространения сигналов делятся на проводные системы и радиосистемы. Достоинства и недостатки систем радиосвязи были рассмотрены выше.

Проводные каналы создаются с помощью *направляющих сред передачи* (НСП), к которым относятся электрические кабели связи и волоконно-оптические кабели (ОК).

В этом параграфе мы рассмотрим электрические кабели связи, являющиеся старейшими НСП, да и самой разветвленной кабельной сетью. Фактически сегодня длина проложенных для нужд связи по всему миру обычных медных кабелей значительно превосходит длину ОК.

При этом основное внимание уделим характеристикам электрических кабелей с тем, чтобы впоследствии можно было бы сравнить их с волоконно-оптическими кабелями.

Главными типами широко используемых кабелей являются:

- коаксиальные кабели;
- симметричные кабели — кабели с витой парой, которые могут быть экранированными или неэкранированными.

Каждый из этих типов кабелей подразделяется на более специализированные категории и имеет собственные конструкции и спецификации, стандарты, свои преимущества и недостатки. Типы кабелей различаются по цене, скорости передачи и рекомендуемому для передачи расстоянию. Например, витая пара в настоящее время является самой дешевой, но имеет наименьшую производительность. Коаксиальные кабели по большинству соотношений производительности и цены располагаются между кабелями с витой парой и ОК.

Коаксиальный кабель (КК) представляет собой два цилиндра с совмещенной осью, причем один цилиндр (сплошной внутренний проводник) концентрически расположен внутри другого по-

лого цилиндра (внешнего проводника). Проводники изолированы друг от друга диэлектрическим материалом (рис. 2.10, *а*)

Симметричный кабель (СК) состоит из двух совершенно одинаковых в электрическом и конструктивном отношении изолированных проводников. В зарубежных источниках его часто называют «витой парой» [13,14]. Различают неэкранированные (UTP) и экранированные (STP) симметричные кабели (рис. 2.10, *б*).

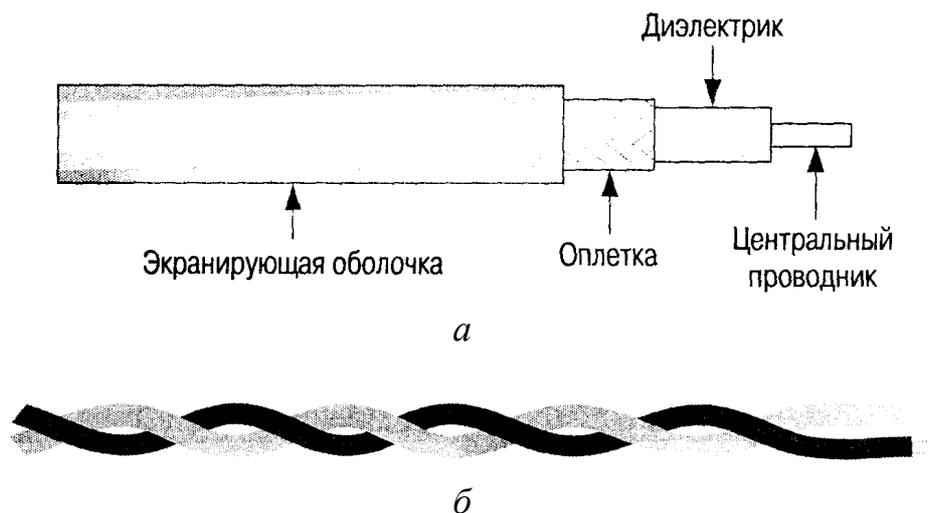


Рис. 2.10 — Вид коаксиального и симметричного кабелей:
а — основная конструкция коаксиального кабеля;
б — кабель «витая пара» (UTP)

Обычные кабели являются хорошим средством для передачи сигнала, но они не совершенны. Любые сигналы при перемещении через любую среду затухают. Это происходит из-за уменьшения амплитуды сигнала.

Когда по проводнику протекает синусоидальный ток вокруг движущихся в металле электронов, возникают электрическое и магнитное поля. Попробуем увеличить частоту синусоидального тока в проводнике. Сотни Герц...Килогерцы...Сотни Мегагерц. Мы обнаруживаем (естественно, с помощью приборов), что ток с ростом частоты все сильнее и сильнее вытесняется из толщи проводника к его поверхности. Электромагнитное поле вне проводника возрастает, и вот на очень высоких частотах ток полностью вытесняется из проводника.

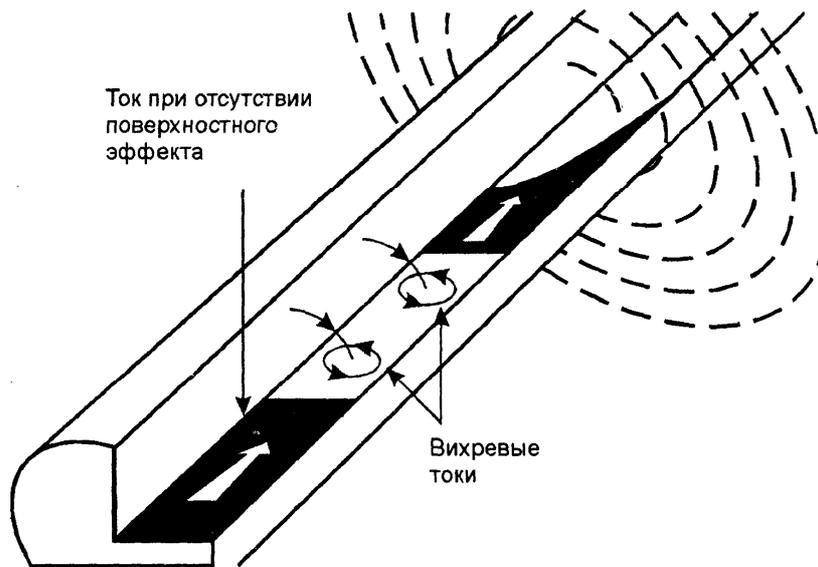


Рис 2.11 — Явление поверхностного эффекта

Проводник начинает излучать всю электромагнитную энергию в пространство, передача ее по проводу прекратилась, провод превратился в антенну!

Описанное явление вытеснения тока к внешней поверхности проводника получило у специалистов название *поверхностного эффекта*. Это и приводит к ослаблению сигналов при передаче. Кроме этого, с ростом частоты растут омические потери в проводниках и потери в диэлектрике. При этом форма электрического сигнала изменяется с расстоянием — сигнал искажается.

Коаксиальный кабель используется для передачи электрических сигналов в широкой полосе частот. Кабель в высшей степени стабилен в отношении своих электрических свойств на частотах ниже 4 ГГц. Это делает кабель популярным в радио- и СВЧ-системах, системах кабельного телевидения (CATV), а также в локальных компьютерных сетях (LAN). Телефонные компании также используют коаксиальный кабель для магистральных линий связи.

Коэффициент затухания коаксиального кабеля зависит от диаметра внешнего и внутреннего проводника и их отношения. Оптимальным соотношением D/d для меди является 3,6. Очень важной характеристикой, фактически определяющей широкополосность системы связи, является зависимость коэффициента затухания от частоты. С ростом частоты затухание увеличивается пропорционально корню из частоты:

$$\alpha = \alpha_0 \sqrt{f / f_0},$$

где α_0 — указанное в спецификации значение затухания для частоты f_0 .

Типичная характеристика затухания в полосе частот показана на рис. 2.12, а, в таблице 2.2 приведены значения погонного затухания для двух коаксиальных кабелей, широко используемых в системах кабельного телевидения.

Таблица 2.2

Наименование	d , мм	D , мм	α , дБ/100м на частотах, МГц					
			50	100	200	300	500	1000
РК 75-4-11	0,72	4,6	10	13	19	22	30	50
РК 75-9-12	1,2	9	4	5	9	10	15	20

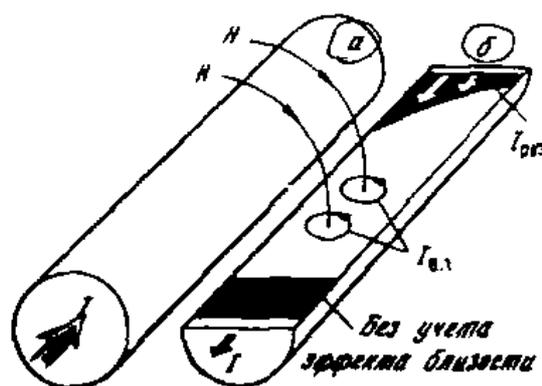


Рис. 2.12 — Эффект близости в симметричной цепи

Симметричный кабель. Электромагнитное поле симметричной цепи, в отличие от коаксиального кабеля, не имеющего внешнего поля, открытое и действует на значительном расстоянии.

Под действием переменного поля происходит перераспределение электромагнитной энергии по сечению проводников, при этом наблюдаются следующие явления: поверхностный эффект и эффект близости соседних проводников.

Эффект близости связан с взаимодействием внешних полей. Как видно из рис. 2.12, внешнее поле H проводника a , пересекая толщину проводника b , наводит в нем вихревые токи. На

поверхности проводника \bar{b} , обращенной к проводнику a , они совпадают по направлению с протекающим по нему основным током ($I + I_{e.T}$). На противоположной поверхности проводника \bar{b} они направлены навстречу основному току ($I - I_{e.T}$). Аналогичное перераспределение токов происходит в проводнике a .

При взаимодействии вихревых токов с основным плотность результирующего тока на обращенных друг к другу поверхностях проводников a и \bar{b} увеличивается, а на отдаленных — уменьшается. Это явление («сближение» токов в проводниках a и \bar{b}) носит название *эффекта близости*. Из-за неравномерного распределения плотности тока увеличивается активное сопротивление цепи переменному току.

Эффект близости также прямо пропорционален частоте, магнитной проницаемости, проводимости и диаметру проводника и, кроме того, зависит от расстояния между проводниками.

Симметричные кабели имеют диаметры проводников от 0,4 до 1,2 мм. Симметричные кабели с большими диаметрами сечений проводников имеют меньший коэффициент затухания. Такие кабели используются на магистральных, зонавых и городских линиях связи и могут содержать до нескольких сотен пар проводников.

С середины 1980-х годов компьютерная техника, а вместе с ней и техника локальных вычислительных сетей (LAN), начала быстрыми темпами внедряться во все сферы деятельности предприятий и организаций, что резко увеличило объем информации, передаваемой в пределах здания или комплекса зданий, компактно расположенных на одной территории. Возникла необходимость создания единой кабельной системы здания. Над разработкой единой кабельной системы работали Ассоциация Электронной Промышленности (TIA/EIA-569), Международная Организация по стандартизации (ISO) и Международная Электротехническая Комиссия (IEC). В период с 1991 по 1995 гг. были выпущены стандарты телекоммуникационной кабельной системы коммерческих зданий.

Структурированная кабельная система — это набор коммутационных элементов (кабелей, разъемов, коннекторов, кроссовых панелей и шкафов), а также методика их совместного использования, которая позволяет создавать регулярные, легко рас-

ширяемые структуры связей в вычислительных сетях. Кабели на основе витых пар с медными проводниками широко применяются в СКС для передачи электрических сигналов [19].

Международный стандарт ISO/IEC 11801 установил, что в СКС используются лишь симметричные электрические кабели и волоконно-оптические кабели, и определил электромагнитные характеристики СКС по ширине полосы пропускания. В зависимости от граничной частоты компоненты, из которых создается СКС (электрические кабели UTP, STP, разъемы), классифицируются по *категориям*.

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

Компоненты категорий 3 и 4 в перспективе уже не рассматриваются. Это не значит, что они не применяются при построении СКС. Просто они не позволяют создавать каналы классов 5, 6, 7.

Базовая конструкция кабеля UTP — это четырехжильный кабель, содержащий четыре отдельно изолированные витые пары, которые заключены во внешнюю оболочку. Каждый провод имеет диаметр 0,51 мм и цветную изолированную оболочку, что упрощает монтаж. Как правило, такие кабели используют в диапазоне частот до 100 МГц.

Максимальное затухание для любой пары, выраженное в дБ/100 м, измеренное при 20°C, в зависимости от категории, должно быть меньше или равно значениям, приведенным в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Частота, МГц	Затухание, дБ/100 м			
	Кат 3	Кат 4	Кат 5	Кат 6
1,0	2,6	2,2	2,0	2,9
10,0	9,7	6,9	6,5	6,0
16,0	13,1	8,9	8,2	7,7
20,0	—	10,0	9,3	8,8
31,25	—	—	11,7	10,8
62,5	—	—	17,0	15,7
100,0	—	—	22,0	20,2
200	—	—	—	29,8
250	—	—	—	33,3

Категория 7 имеет полосу частот до 600 МГц, при этом затухание $\alpha \approx 50,6$ дБ /на 100 м.

На рисунке 2.13 представлены зависимости затухания коаксиального кабеля и витой пары от частоты, видны достоинства коаксиала по сравнению с витой парой, однако его стоимость существенно выше.

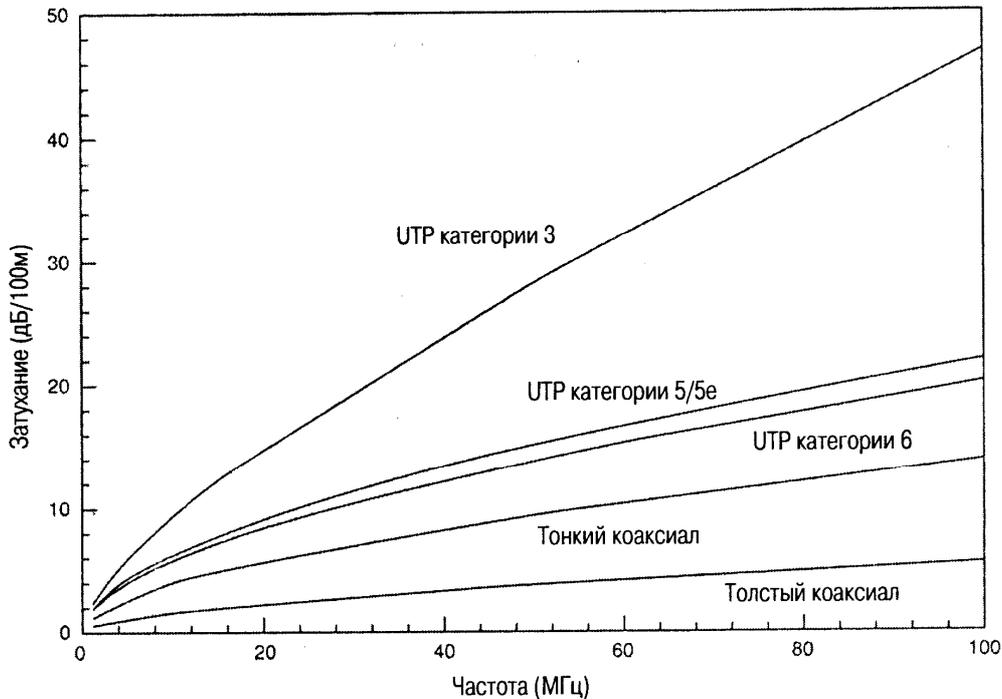


Рис. 2.13 — Затухание для коаксиального кабеля и неэкранированной витой пары

Любая передача содержит компоненты сигнала и шума. Качество сигнала снижается по нескольким причинам, в их числе затухание и наводки.

Перекрестные наводки — это особый вид помех. Перекрестные наводки представляют собой энергию, передаваемую из одного проводника в другой в одном кабеле или между двумя кабелями. Такие наводки часто встречаются в телефонных системах — в этом случае можно не только слышать собеседника, но посторонний разговор.

Перекрестные наводки есть соотношение мощности перекрестных наводок к мощности сигнала в децибелах. В городских телефонных кабелях собрано большое число пар проводов, десятки и более. Чем выше скорость передачи, тем выше уровень наводок в соседних парах. Виной тому, увеличивающееся на высоких частотах электромагнитное излучение. При большой скорости передачи влияние одной витой пары на другую может быть

столь велико, что когда по второй витой паре будут передаваться «свои» сигналы, их будет очень трудно отделить от «чужих». Вот эти то взаимные влияния между витыми парами и не дают возможности беспрерывно увеличивать скорость передачи импульсов по симметричным телефонным кабелям.

Перекрестные наводки могут измеряться на ближнем (NEXT, near-end crosstalk) или на дальнем (FEXT, far-end crosstalk) конце линии. В случае NEXT энергия в пассивной линии изменяется на том же конце, что источник сигнала, а в случае FEXT — на противоположном конце (рис. 2.14).

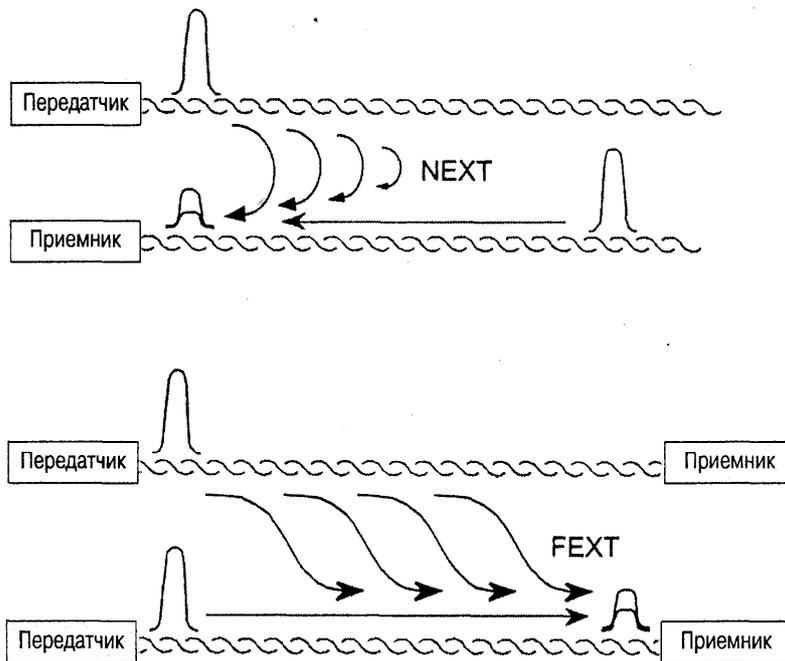


Рис. 2.14 — NEXT и FEXT

NEXT, перекрестные наводки на ближнем конце линии, представляют интерес при реализации любого приложения. Рассмотрим сигнал в активной линии. Он передается по кабелю, затухает и теряет энергию. На противоположном конце сигнал слабеет. Таким образом, наиболее сильные наводки будут на ближнем конце. Во-первых, пассивная линия получает здесь наибольшую энергию, а во-вторых, наводки еще не затухают, как на дальнем конце.

В настоящее время через витую пару можно передавать данные с очень высокой скоростью, некоторых локальных сетях вплоть до 1 Гбит/сек. Однако длина линии связи должна составлять не более сотни метров.

Глава 3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Вряд ли мир современных телекоммуникаций можно представить без волоконно-оптических систем. Их успешное применение для высокоскоростной передачи больших объемов данных на значительные расстояния стало возможным благодаря уникальным свойствам оптических волокон (ОВ). Именно они в основном определяют характеристики волоконно-оптических систем, поскольку служат передающей средой — ключевым элементом любой системы связи.

3.1 Оптическое волокно и его характеристики

3.1.1 Основные законы волоконной оптики

Свет представляет собой один из видов электромагнитной энергии, также как радиоволны, теле-, радио- и радиолокационные сигналы. Электромагнитные волны (рис. 3.1) представляют собой переменные магнитные и электрические поля, перпендикулярные друг другу и направлению распространения (рис. 3.1).

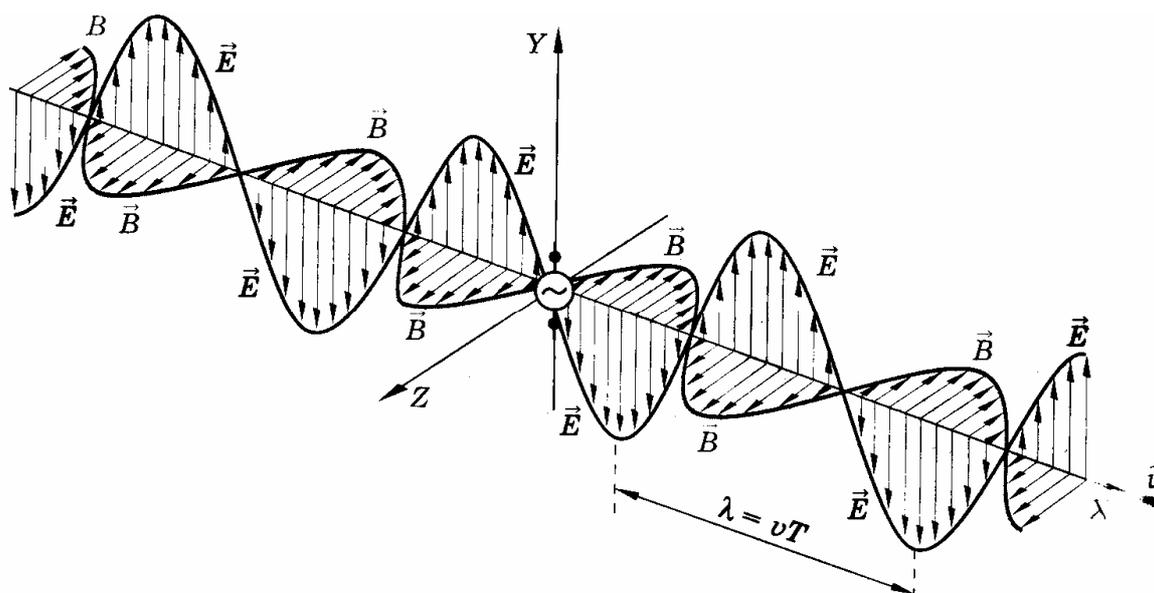


Рис. 3.1 — Электромагнитная волна

Главное отличие различных электромагнитных волн заключается в их частоте или длине волны. Частота определяется числом синусоидальных колебаний за секунду и выражается в герцах (Гц). *Длина волны* — это расстояние между идентичными точками двух последовательных волн (или расстояние, которое проходит волна за один цикл колебаний). Длина волны и частота взаимосвязаны. Длина волны (λ) равна скорости волны (ν), деленной на ее частоту (f):

$$\lambda = \frac{\nu}{f}.$$

Волны оптического диапазона можно разделить на три больших группы: инфракрасные, видимый свет с длинами волн от приблизительно 400 до 700 нм, и ультрафиолетовые. Длина волны, используемая в волоконной оптике, соответствует характеристикам передачи конкретного волокна. Большинство оптических волокон используют кварцевое стекло, которое наиболее прозрачно в ближней инфракрасной зоне, от 700 до 1600 нм. Пластиковые волокна лучше всего работают в видимой зоне.

Оценим ширину полосы оптического диапазона от $\lambda_1 = 750$ нм до $\lambda_2 = 860$ нм (приблизительно первое окно прозрачности — см. ниже). Зная скорость света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, получим соответственно $f_1 = 4 \cdot 10^{14}$ Гц = 400 ТГц и $f_2 \approx 350$ ТГц. Следовательно, частотный интервал $\Delta F = 50$ ТГц. Для сравнения: весь диапазон частот — от звукового диапазона до верхней частоты СВЧ диапазона составляет только 30 ТГц, то есть в 1600 раз меньше оптического. Число ТВ каналов, которое умещается в этом частотном интервале, составит $m = 5 \cdot 10^6$. Это говорит о колоссальной емкости оптического волокна.

Электромагнитная природа оптического (светового) излучения означает, что строгое исследование процесса распространения световых волн в ОВ может быть выполнено лишь на основе уравнений электродинамики (уравнений Максвелла). Это сложная задача даже при рассмотрении простейших ОВ. Поэтому в данном учебном пособии процесс распространения световых волн исследуется методами геометрической оптики, которые отличаются простотой и наглядностью.

Известно, что в геометрической оптике световые волны изображаются лучами, направленными по нормали к волновой поверхности. В оптически однородных средах лучи прямолинейны. При падении световой волны на плоскую границу раздела двух оптически прозрачных диэлектриков в общем случае появляются отраженная и преломленная (прошедшая) волны.

В соответствии с законами Снеллиуса угол падения φ связан с углами отражения $\varphi_{\text{отр}}$ и преломления $\varphi_{\text{пр}}$ (рис. 3.2, а) следующими соотношениями:

$$\varphi = \varphi_{\text{отр}}, \quad n_1 \sin \varphi = n_2 \sin \varphi_{\text{пр}}, \quad (3.1)$$

где n_1 и n_2 — показатели преломления смежных сред.

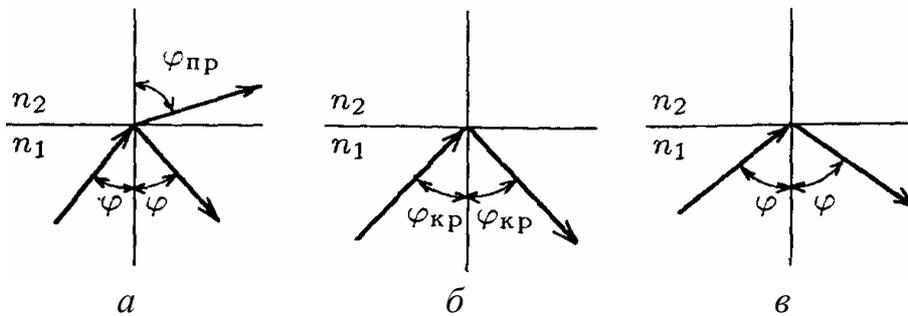


Рис. 3.2 — Пояснение волновых процессов на границе двух сред при $n_1 > n_2$

Если $n_1 > n_2$, т.е. световая волна падает из оптически более плотной среды на границу раздела с оптически менее плотной средой, то, согласно (3.1), всегда существует критический (предельный) угол падения $\varphi = \varphi_{\text{кр}}$, при котором $\varphi_{\text{пр}} = \pi/2$, т.е. преломленная волна распространяется вдоль границы раздела сред:

$$\sin \varphi_{\text{кр}} = n_2/n_1, \quad \varphi_{\text{кр}} = \arcsin(n_2/n_1).$$

Предельный режим показан на рисунке 3.2, б.

При всех углах падения $\varphi > \varphi_{\text{кр}}$ преломленная волна отсутствует, и свет полностью отражается от поверхности оптически менее плотной среды (рис. 3.2, в). Это явление называется полным внутренним отражением.

Таким образом, как фактически распространяется свет по ОВ, лучше всего объяснить, используя закономерности геометрической оптики и закон Снеллиуса. Упрощенно можно сказать, что когда свет переходит из среды с большим показателем преломле-

ния в среду с меньшим показателем преломления, преломленный луч отклоняется от нормального. Чем больше становится угол падения на границу раздела, тем больше отклоняется преломленный луч от нормального луча, до тех пор, пока преломленный луч не достигает угла в 90° , по отношению к нормальному, и начинает скользить по поверхности раздела.

3.1.2 Конструкция ОВ

Оптическое волокно состоит из внутренней *сердцевины* и окружающей ее *оболочки*. Любые дополнительные покрытия (оболочки) являются защитными.

На рисунке 3.3 показано оптическое волокно и составляющие его части.

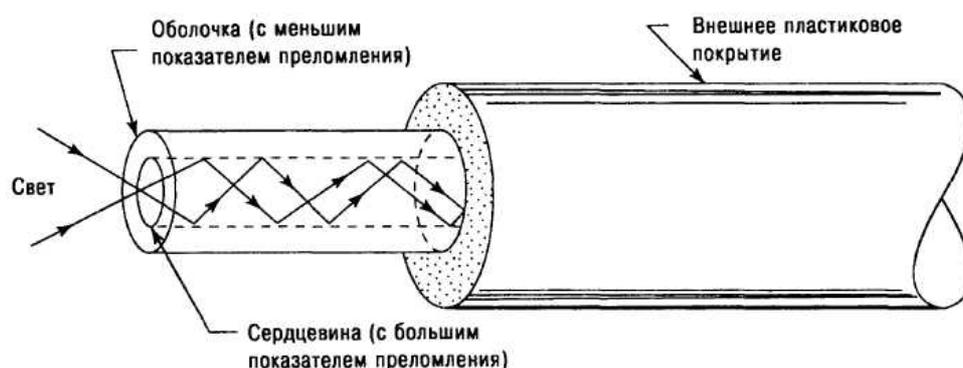


Рис. 3.3 — Основная конструкция оптического волокна

Сердцевина — светопередающая часть волокна, изготавливается либо из стекла, либо из пластика. Чем больше диаметр сердцевины, тем большее количество света может быть передано по волокну. То есть сердцевина оптического волокна является оптическим каналом, по которому распространяется световое излучение.

Оболочка — обеспечивает переотражение света в сердцевину волокна таким образом, чтобы световые волны распространялись только по сердцевине волокна, то есть обеспечивает канализацию светового излучения по сердцевине волокна.

Защитная оболочка — обеспечивает прочность волокна, поглощение ударов и дополнительную защиту волокна от воздействия окружающей среды. Такие буферные оболочки обычно бывают многослойными, изготавливаются из пластика и имеют тол-

щину от 250 до 900 мкм. Защитная оболочка, представляющая собой один или несколько слоев полимера, предохраняет сердцевину и оптическую оболочку от воздействий, которые могут повлиять на их оптические свойства.

Обычно показатель преломления сердцевины обозначают как n_1 , а показатель преломления оболочки обозначают как n_2 . ОВ спроектировано так, что $n_1 > n_2$. Кварцевое стекло (SiO_2) является основным материалом как для сердцевины, так и оболочки. Для подгонки нужных значений показателя преломления используются легирующие примеси. Показатель преломления оптической оболочки менее чем на 1 % меньше показателя преломления сердцевины. Производители волокна строго контролируют разность показателей для получения нужных характеристик волокна.

Размер волокна в общем случае определяется внешними диаметрами его сердцевины, оболочки и защитной оболочки. Геометрические размеры сердцевины, оболочки и защитной оболочки волокна записываются через наклонную черточку. Например, запись геометрических параметров волокна в виде 50/125/250 обозначает, что волокно имеет диаметр сердцевины — 50 мкм, диаметр оболочки — 125 мкм и диаметр защитной оболочки 250 мкм.

Заметим, что диаметр оптического волокна соизмерим с диаметром человеческого волоса, который составляет 150–200 мкм.

Окна прозрачности ОВ. Оптические волокна используют кварцевое стекло, которое имеет минимальное затухание в ближней инфракрасной зоне, от 700 до 1600 нм. Основная характеристика ОВ — это затухание, которое зависит от длины волны света. Существуют окна прозрачности (ОП) кварцевого ОВ, в которых свет распространяется вдоль волокна с малым затуханием (рис. 3.4).

На заре своего развития оптические волокна работали в трех окнах прозрачности [16].

Первое окно прозрачности использовалось в 1970-х годах в первых линиях связи на многомодовых волокнах. Тогда полупроводниковые источники излучения выпускались промышленностью только на длину волны 850 нм (GaAs). В настоящее время из-за большой величины потерь в волокнах этот диапазон используется в основном в локальных вычислительных сетях.

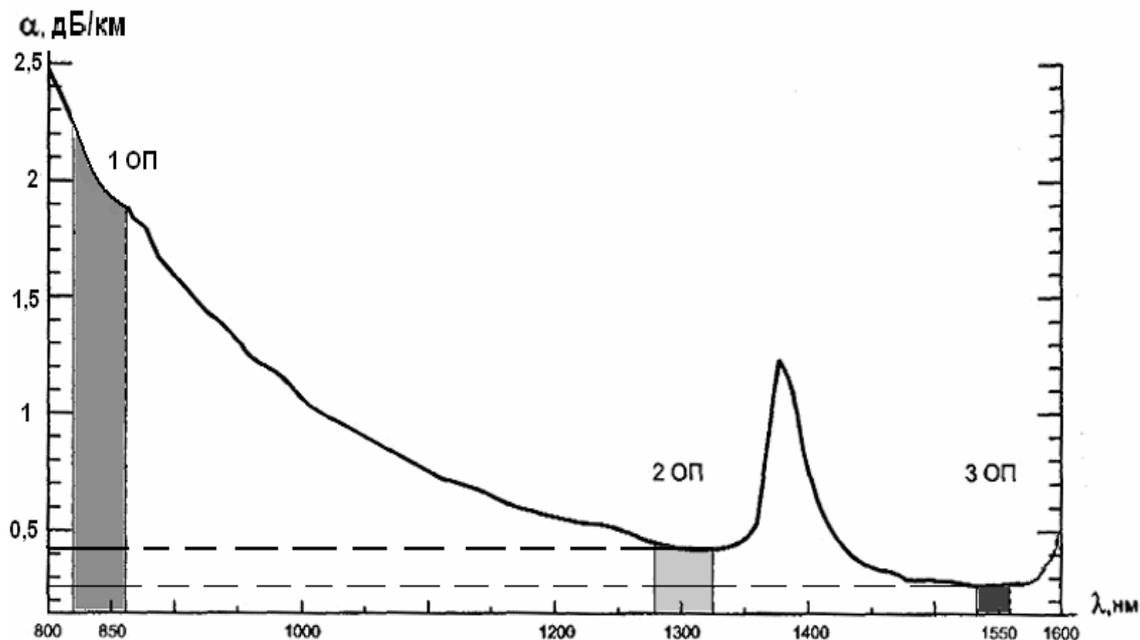


Рис. 3.4 — Спектральная зависимость коэффициента затухания ОВ

Второе окно прозрачности (O) стало использоваться в 1980-х годах в линиях дальней связи, после того как на базе тройных и четверных гетероструктур были разработаны источники излучения на длину волны 1310 нм. В это окно попадает и длина волны нулевой дисперсии SM волокон. В настоящее время второе окно прозрачности используется преимущественно в городских и зональных линиях.

Третье окно прозрачности (C) было освоено в начале 1990-х годов. В него попадает абсолютный минимум поглощения в кварцевом волокне. Так как SM волокна обладают в третьем окне прозрачности большой дисперсией, то было разработано DS волокно с длиной волны нулевой дисперсии, смещенной в это окно. Третье окно наиболее широко используется в магистральных линиях (Ростелекомом и другими крупными операторами связи).

В последнее время с совершенствованием технологий изготовления оптических волокон третье и прилегающие к нему четвертое и пятое окна прозрачности вызывают повышенный интерес.

Четвертое окно прозрачности (L) позволяет передвинуть длинноволновую границу DWDM систем на 1620 нм. Для работы одновременно в третьем и четвертом окнах прозрачности используются оптические усилители с увеличенной шириной полосы

частот и NZDS волокна с малым углом наклона дисперсионных кривых.

Пятое окно прозрачности (S) появилось после создания волокна All Wave. В этом волокне в результате тщательной очистки его от посторонних включений потери в «водяном» пике на длине волны 1390 нм были снижены до 0,31 дБ/км.

Международный союз электросвязи (ITU-T) утвердил новые спектральные диапазоны в интервале длин волн 1280...1675 нм (таблица 3.1).

Таблица 3.1 — Спектральные диапазоны для одномодовых волокон

Первый	780...860 нм	Первый
О-диапазон	1280...1360 нм	Основной (Original)
Е-диапазон	1360...1460 нм	Расширенный (Extended)
S-диапазон	1460...1530 нм	Коротковолновый (Short wavelength)
С-диапазон	1530...1565 нм	Стандартный (Conventional)
L-диапазон	1565...1625 нм	Длинноволновый (Long wavelength)
U-диапазон	1625...1675 нм	Сверхдлинный (Ultra-long wavelength)

Сравнивая величину коэффициента затухания ОВ с коэффициентом затухания электрических кабелей, рассмотренных выше, видим колоссальное преимущество ОВ.

3.1.3 Методы изготовления ОВ

Оптические волокна, используемые в ВОЛС, изготавливают главным образом из плавленого кварца (SiO_2). Достоинство его перед другими оптически прозрачными диэлектриками — минимальное затухание оптических сигналов [15].

Технологический процесс производства крайне сложен, разрабатывался на протяжении многих лет и происходит в два этапа: изготовление заготовки и вытягивание волокна.

Заготовка представляет собой стержень из кварцевого стекла, имеющий тот же профиль показателя преломления, что и получаемое из него ОВ. Диаметр стержня составляет 15...20 мм, а длина — от одного до нескольких метров. Из одной заготовки можно получить 50...200 км волокна с диаметром 125 мкм.

При изготовлении заготовок обычно используют метод парофазного осаждения. В основе метода лежит реакция окисления высокочистых газовых компонентов (например, SiCl_4 , GeCl_4), в результате которой образуются SiO_2 и GeO_2 . В зависимости от того, где образуются частицы стекла — на внешней поверхности несущего керамического стержня или на внутренней поверхности кварцевой исходной трубки — различают методы внешнего и внутреннего (осевого) парофазного осаждения.

Основные этапы производства заготовок методом *внешнего парофазного осаждения* представлены на рис. 3.5. В горелку наподобие бунзеновской вместе с горючим газом подают смесь хлоридов и чистого кислорода. В жарком пламени горелки (до 1600 °С) кремний и кислород воссоединяются и рождаются мелкие порошкообразные частицы высокочистого кварцевого стекла (SiO_2), а «отделившийся» в самостоятельный газ хлор улетучивается через вытяжной колпак. Поток частиц кварцевого стекла направляется на вращающийся и перемещающийся на расстояние 15 см относительно горелки керамический стержень малого диаметра. Изменением концентрации газовых добавок (GeCl_4 и др.) можно изменять показатель преломления от слоя к слою и получить необходимый профиль показателя преломления заготовки.

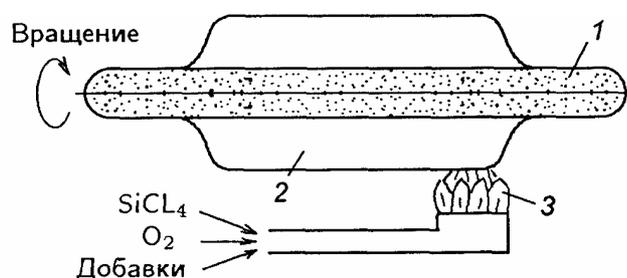


Рис. 3.5 — К пояснению процесса внешнего парофазного осаждения:
1 — стержень; 2 — осаждающий слой; 3 — горелка

За 1 мин на стержне осаждается 0,5–1,0 г стекла. После того как толщина слоя стекла достигает нужного размера, процесс останавливают и стеклянную заготовку снимают с затравочного стержня. Получается стеклянная трубка, а нужна сплошная цилиндрическая заготовка. Как быть? Что делать дальше?

Следующая стадия процесса состоит в нагревании трубчатой заготовки пламенем приблизительно до 1900 °С. За счет сил поверхностного натяжения, возникающих в размягченной трубке, происходит схлопывание (есть такой специальный термин) трубчатого цилиндра в сплошной. Полученную стеклянную заготовку вытягивают в тонкое оптическое волокно.

Метод внешнего парофазного осаждения отличается высокой производительностью и получил наибольшее распространение на практике. Однако его существенным недостатком является повышенное содержание ионов OH^- в заготовке, что приводит к возрастанию потерь в ОВ. ОВ, практически не содержащие побочных примесей, получают из заготовок, образованных методом внутреннего парофазного осаждения (рис. 3.6).

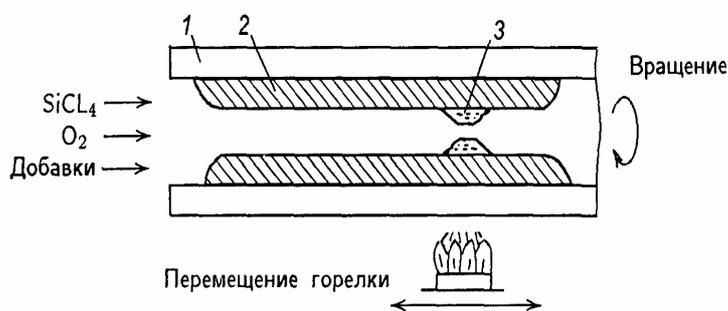


Рис. 3.6 — К пояснению процесса внутреннего парофазного осаждения:

- 1 — трубка; 2 — осаждающий слой;
3 — продукты реакции

В кварцевую трубку, из которой в дальнейшем образуется оболочка ОВ, вводится смесь необходимых газов (SiCl_4 , O_2 и добавки). Газовая горелка, находящаяся снаружи, нагревает трубку до температуры, необходимой для окисления в газовой фазе. Трубка вращается, а горелка перемещается относительно трубки. Реакция окисления происходит внутри трубки, что вызывает осаждение частиц стекла на ее внутренней поверхности.

После того как толщина слоя достигает требуемого размера, процесс парофазного осаждения прекращается. Затем трубчатая заготовка разогревается в печи до размягчения и под действием сил поверхностного натяжения превращается в сплошной стержень.

Осаждение стекла на внутренней поверхности трубки практически исключает загрязнение извне. Кроме того, реакция окисления происходит в отсутствие водородосодержащих компонентов (например, горючего газа), благодаря чему концентрация ионов OH^- очень мала. Однако внутреннее осаждение существенно замедляет процесс изготовления заготовки и ограничивает ее длину.

3.1.4 Классификация и характеристики ОВ

Оптические волокна могут быть классифицированы по двум параметрам. Первый — материал, из которого сделано волокно:

1. *Стекланные волокна* имеют как стеклянную сердцевину, так и стеклянную оптическую оболочку. Стекло, используемое в данном типе волокон, состоит из сверхчистого сверхпрозрачного диоксида кремния или плавленого кварца. В стекло добавляют примеси, чтобы получить требуемый показатель преломления. Германий и фосфор, например, увеличивают показатель преломления, а бор и фтор, напротив, уменьшают его. Кроме того, в стекле присутствуют другие примеси, не извлеченные в процессе очистки. Они также влияют на свойства волокна, увеличивая затухание, обусловленное рассеянием и поглощением света.

2. *Стекланные волокна с пластиковой оптической оболочкой* имеют стеклянную сердцевину и пластиковую оптическую оболочку. Их характеристики, хотя и не столь хорошие, как у полностью стеклянного волокна, являются вполне приемлемыми.

3. *Пластические волокна* имеют пластиковую сердцевину и пластиковую оптическую оболочку. По сравнению с другими видами волокон пластиковые имеют ограниченные возможности с точки зрения затухания и полосы пропускания. Однако низкая себестоимость и простота использования делают их привлекательными там, где требования к величинам затухания и полосе пропускания не столь высоки.

Второй способ классификации волокон основан на виде профиля показателя преломления (ППП) сердцевины и модовой структуре света в ней.

Мода представляет собой математическое и физическое понятие, связанное с процессом распространения электромагнитных волн в среде [16]. В рамках данного курса под модой достаточно понимать вид траектории, вдоль которой может распространяться свет. Число мод, допускаемых волокном, колеблется от 1 до 100 000. Таким образом, волокно позволяет свету распространяться по множеству траекторий, число которых зависит от размера и свойств волокна.

Тип оптического волокна идентифицируется по типу путей, или так называемых «мод», проходимых светом в ядре волокна. Существуют два основных типа волокна — **многомодовое MMF** (*multi mode fiber*) и **одномодовое SMF** (*single mode fiber*) (рис. 3.7).

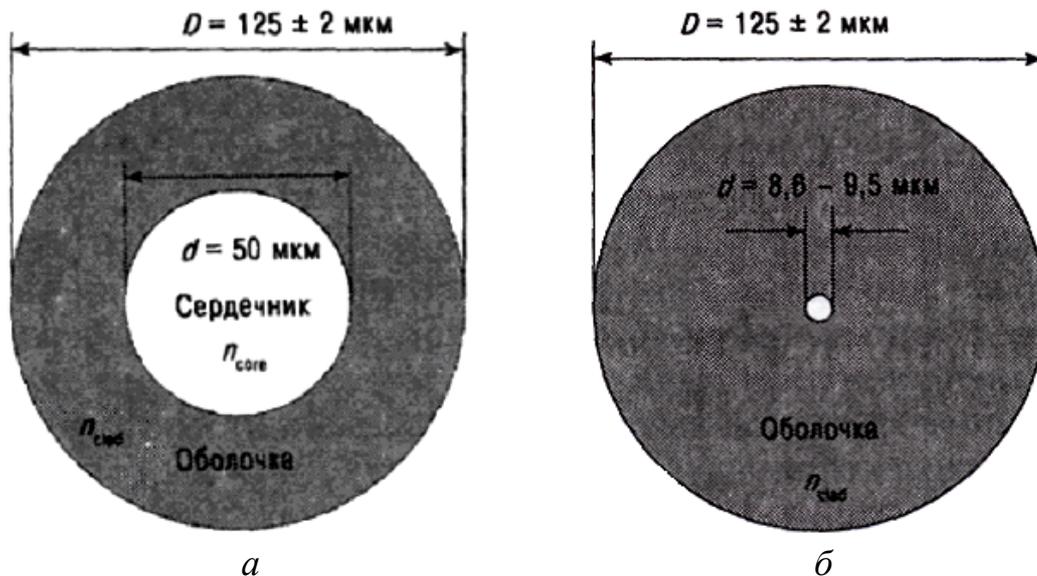


Рис. 3.7 — Многомодовое волокно (а) и одномодовое волокно (б)

Волокна отличаются диаметром сердцевины и оболочки, а также профилем показателя преломления сердцевины (рис. 3.8, 3.9). Одномодовое волокно (ООВ) проектируется так, что в нем может распространяться только одна мода. Многомодовое волокно (МОВ), с его относительно большой сердцевиной, допускает распространение по волокну нескольких или многих мод.

Многомодовые волокна могут обладать *ступенчатым* или *градиентным* профилем показателя преломления. Ступенчатый

профиль показателя преломления характеризуется резким (в виде ступеньки) изменением показателя преломления (от n_1 к n_2) на границе раздела, тогда как градиентный — плавным изменением [12].

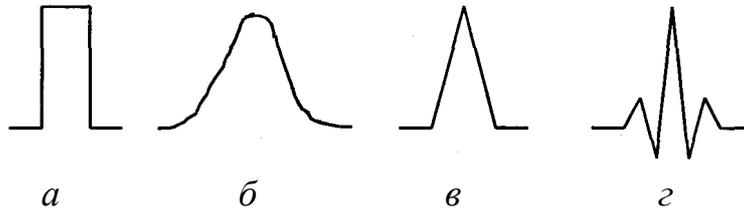


Рис. 3.8 — Профили показателей преломления оптических волокон:
a — ступенчатый (многомодовое и стандартное одномодовое волокно);
б — градиентный (многомодовое волокно); *в* — треугольный (одномодовое волокно со смещённой дисперсией); *г* — треугольный (волокно с ненулевой смещённой дисперсией)

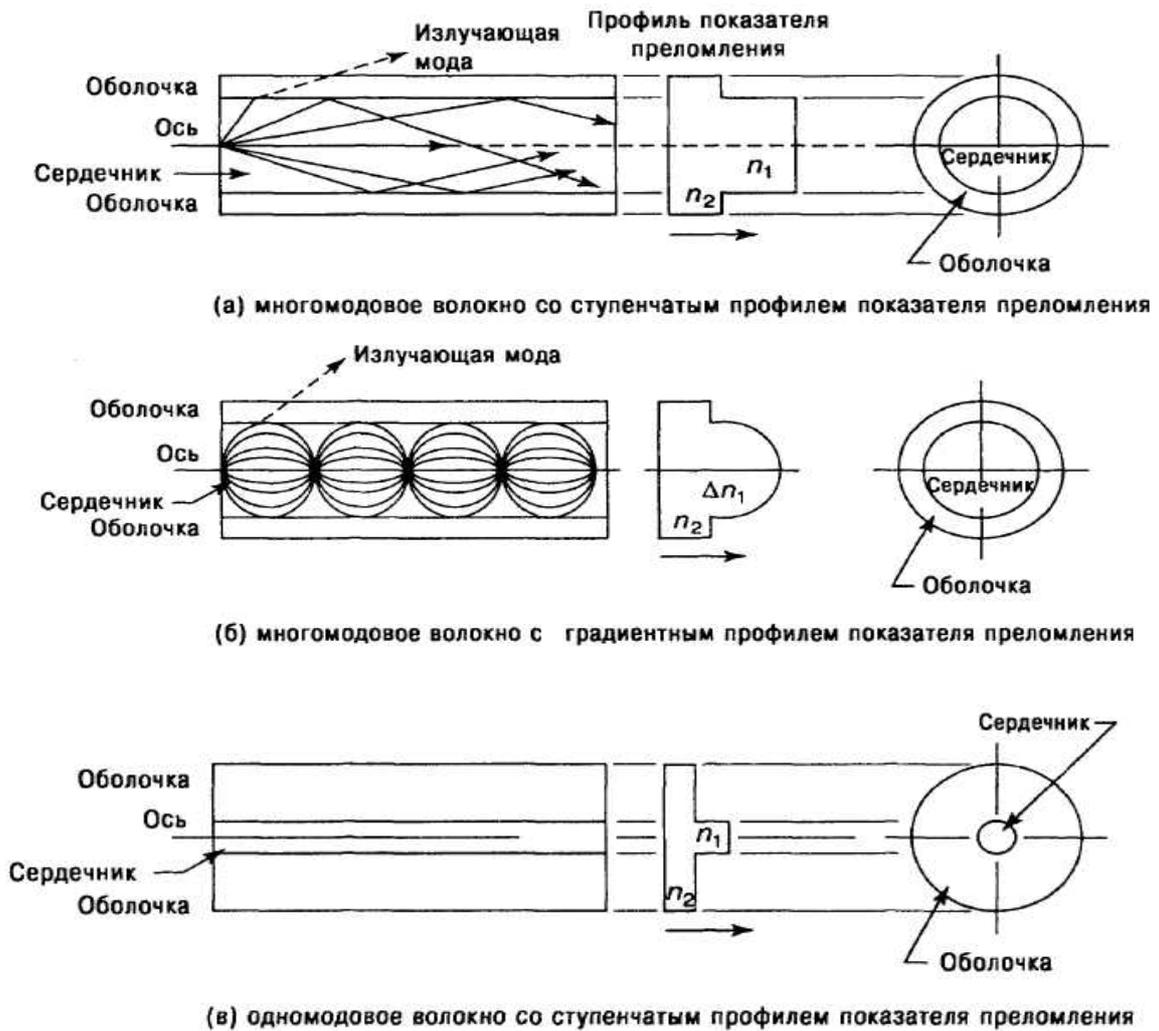


Рис. 3.9 — Типы оптических волокон

Многомодовое волокно со ступенчатым показателем преломления получило своё название от резкой, ступенчатой разницы между показателями преломления ядра и оболочки.

В более распространённом *многомодовом волокне с градиентным показателем преломления* пучки света также распространяются в волокне по многочисленным путям. В отличие от волокна со ступенчатым показателем преломления, ядро с градиентным показателем содержит многочисленные слои стекла, которые по мере удаления от оси волокна имеют более низкий показатель преломления по сравнению с предыдущим слоем. Результатом такого формирования градиента показателя преломления является то, что пучки света ускоряются во внешних слоях и хотя они проходят большие расстояния, их время распространения в волокне сравнимо с временем распространения пучков, проходящих по более коротким путям вблизи оси.

Одномодовое волокно, в отличие от многомодового, имеет значительно меньший диаметр сердцевины, что позволяет распространяться по её сердцевине только одному пучку или моде света. Вследствие этого устраняются все искажения оптического сигнала, распространяющегося по одномодовому волокну, связанные с межмодовым взаимодействием. Основные типы *одномодовых волокон*, применяемых в линиях связи, нормируются международными стандартами ITU-T Rec. G. 652...G. 655 [16, 18].

Основными факторами, влияющими на характер распространения света по волокну, являются: основные характеристики оптического волокна, затухание и дисперсия.

Основные характеристики волокна. К основным характеристикам ОВ относятся: передаточные характеристики (*затухание, дисперсия*), конструктивные характеристики и механические характеристики.

Относительная разность показателей преломления. Волокно состоит из сердцевины и оболочки. Оболочка окружает оптически более плотную сердцевину, являющуюся светонесущей частью волокна. Одним из важнейших параметров, который характеризует волокно как передающую среду, является относительная разность Δ показателей преломления сердцевины и оболочки:

$$\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2 .$$

Если показатель преломления оболочки выбирается обычно постоянной величиной, то показатель преломления сердцевины в общем случае может зависеть от радиуса. В этом случае для проведения различных оценок параметров волокна вместо n_1 используют $n_{\text{эфф}}$.

Числовая апертура. Важным параметром, характеризующим волокно, является числовая апертура NA . Она связана с максимальным углом Θ_A (апертурный угол) ввода излучения из свободного пространства в волокно, при котором свет ещё испытывает полное внутреннее отражение и распространяется по волокну, выражением:

$$NA = \sin \Theta_A.$$

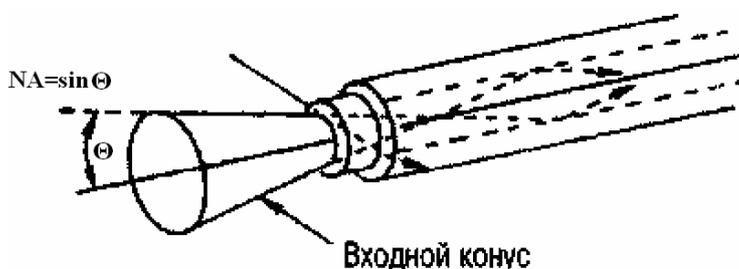


Рис. 3.10 — Числовая апертура

Если имеются два волокна с одним и тем же диаметром сердечника, но с различными числовыми апертурами, волокно с большей апертурой будет принимать больше световой энергии от источника света, чем волокно с меньшей апертурой. Если есть два волокна с одинаковыми апертурами, но с различными диаметрами, волокно с большим диаметром получит в сердечник больше световой энергии, чем волокно с меньшим диаметром. Это показано на рис. 3.11. Оптические волокна с большими апертурами или диаметрами принимают больше света, чем волокна с меньшими апертурами или диаметрами. Волокна с большими апертурами и диаметрами больше подходят для недорогих передатчиков, таких, как светодиоды, которые не способны концентрировать выходную энергию в узкий когерентный пучок (как лазеры) и излучают под большим углом. Однако недостатком волокна с такими параметрами является снижение полосы пропускания волоконной передачи. С другой стороны, волокно с мень-

шей апертурой или диаметром будет иметь большую полосу пропускания. Недостатком же в этом случае является необходимость в более дорогих источниках света (таких, как лазеры), предоставляющих более узкие пучки света, и в более точном выравнивании передатчика и сердцевины.

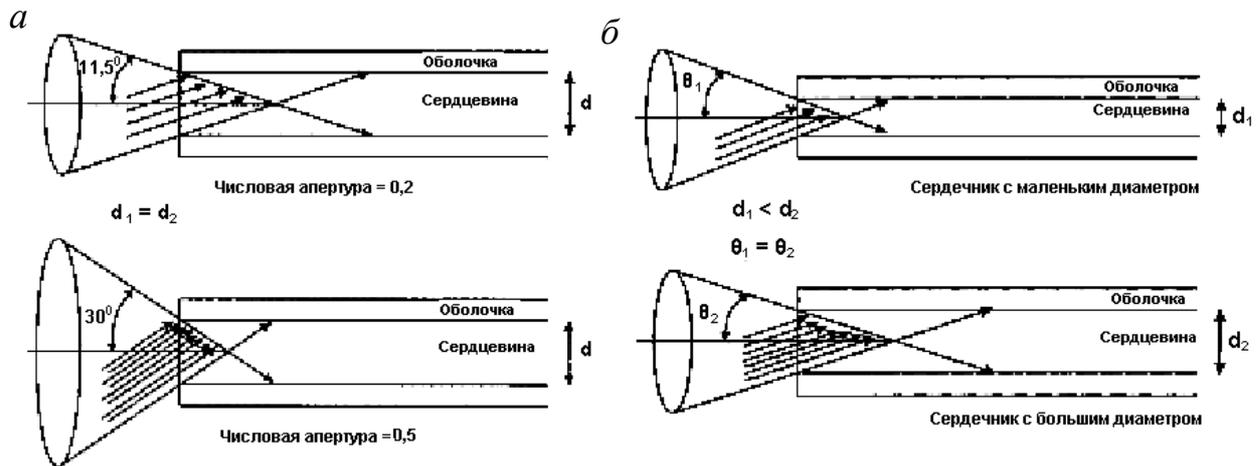


Рис. 3.11

a — ОВ с различными числовыми апертурами, но с одинаковыми диаметрами; *б* — ОВ с одинаковыми числовыми апертурами, но с различными диаметрами

Нормированная частота. Другим важным параметром, характеризующим волокно и распространяющийся по нему свет, является нормированная частота V , которая определяется как:

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot \lambda}{NA},$$

где d — диаметр сердцевины волокна.

Если нормированная частота V будет меньше 2,405, то волокно будет одномодовым.

Затухание. Волокно характеризуется двумя важнейшими параметрами: затуханием и дисперсией. Чем меньше затухание (потери) и чем меньше дисперсия распространяемого в волокне сигнала, тем больше может быть расстояние между регенерационными участками или повторителями [14].

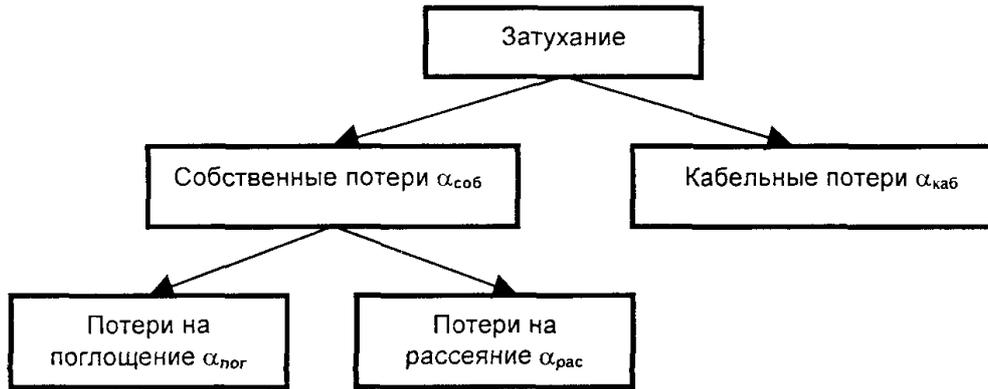


Рис. 3.12 — Основные типы потерь в оптическом волокне

На затухание света в волокне влияют такие факторы, как:

- потери на поглощение;
- потери на рассеяние;
- кабельные потери.

Потери на поглощение и на рассеяние называются *собственными потерями*, в то время как кабельные потери в силу их природы называют также дополнительными потерями. Полное затухание в волокне, измеряемое в дБ/км, определяется в виде суммы:

$$\alpha = \alpha_{\text{пог}} + \alpha_{\text{рас}} = \alpha_{\text{соб}} + \alpha_{\text{каб}} + \alpha_{\text{доп}}.$$

Потери на поглощение $\alpha_{\text{пог}}$, состоят как из собственных потерь в кварцевом стекле (ультрафиолетовое и инфракрасное поглощение), так и из потерь, связанных с поглощением света на примесях.

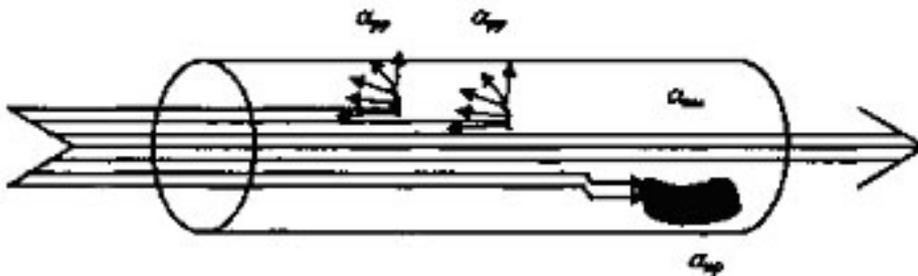


Рис. 3.13 — Основные виды потерь в ОВ

Потери на рассеяние $\alpha_{\text{рас}}$. Основной причиной потерь из-за рассеяния является так называемое *рэлеевское рассеяние*, которое вызывается наличием в оптическом волокне неоднородностей микроскопического масштаба. Свет, попадая на такие неоднородности, частично отражается назад и частично рассеивается вбок.

родности, рассеивается в разных направлениях. В результате часть его теряется в оболочке. Эти неоднородности неизбежно появляются во время изготовления волокна. Потери из-за рэлеевского рассеяния зависят от длины волны по закону λ^{-4} и сильнее проявляются в области коротких длин волн.

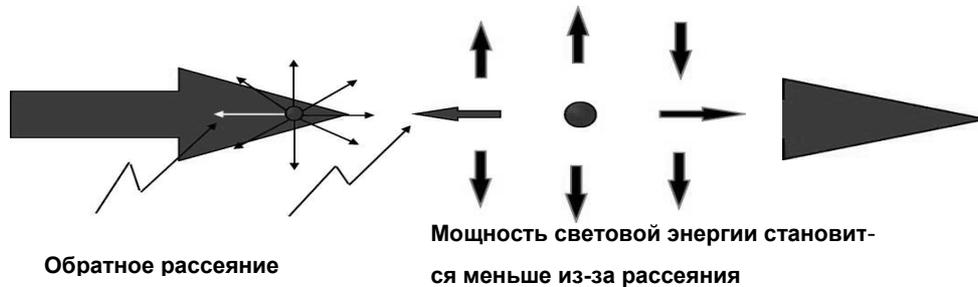


Рис. 3.14 — Релеевское рассеяние

Кабельные потери ($\alpha_{\text{каб}}$) обусловлены скруткой, деформациями и изгибами волокон, возникающих при наложении покрытий и защитных оболочек при производстве кабеля, а также в процессе его прокладки.

Дисперсия. Импульсы света, последовательность которых определяет информационный поток, при распространении по волокну расплываются. Расплывание импульса приводит к перекрыванию крыльев соседних импульсов, как изображено на рис. 3.15. При достаточно большом уширении импульсы начинают перекрываться, так что становится невозможным их выделение при приёме. Вследствие этого импульсы трудно отличить один от другого, а заключенная в них информация теряется.

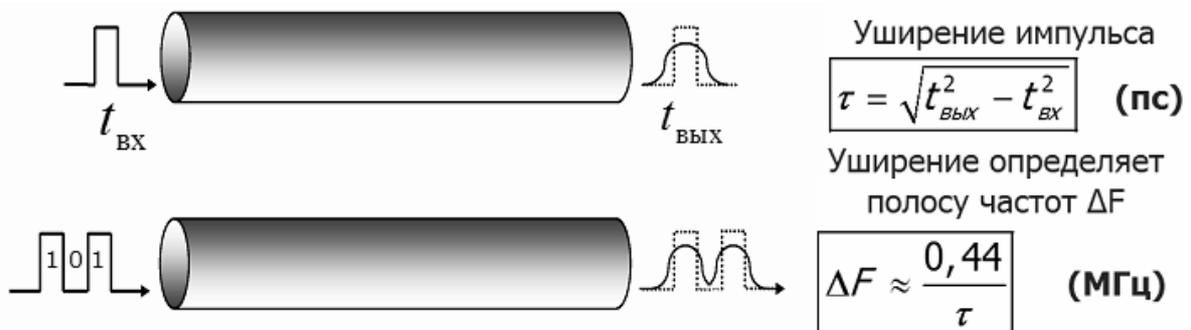


Рис. 3.15 — Искажения формы импульсов из-за дисперсии

Дисперсия — это расплывание светового импульса по мере его движения по оптическому волокну. Дисперсия ограничивает ширину полосы пропускания и информационную емкость кабеля. Уменьшение дисперсии приводит к увеличению полосы пропускания.

Наличие дисперсии объясняется тремя основными факторами:

1. Различными скоростями распространения направляемых мод в волокне (межмодовая дисперсия $\tau_{\text{мод}}$).
2. Различными направляющими свойствами световодной структуры (волноводная дисперсия $\tau_{\text{вол}}$).
3. Зависимостью свойств материала оптического волокна от длины волны (материальная дисперсия $\tau_{\text{мат}}$).

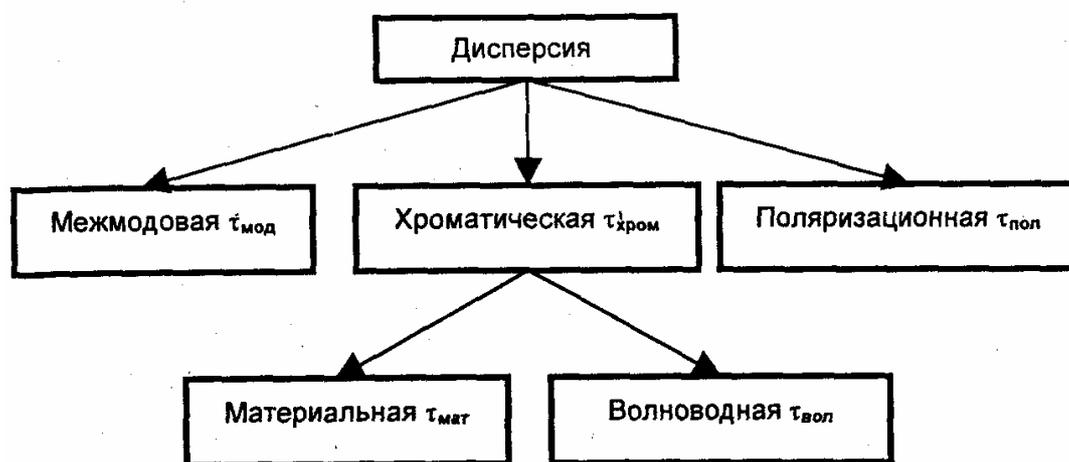


Рис. 3.16 — Виды дисперсии

Межмодовая дисперсия свойственна только многомодовым волокнам. Различные моды имеют различные фазовые и групповые скорости и их максимумы энергии достигают детектор в различные моменты времени. Лучи проходят различные пути и, следовательно, достигают противоположного конца волокна в различные моменты времени.

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

Материальная дисперсия обусловлена зависимостью показателя преломления от длины волны.

Волноводная (внутримодовая) дисперсия обусловлена процессами внутри моды. Внутримодовая дисперсия, в первую очередь, определяется профилем показателя преломления ОВ и пропорциональна ширине спектра излучения источника $\Delta\lambda$.

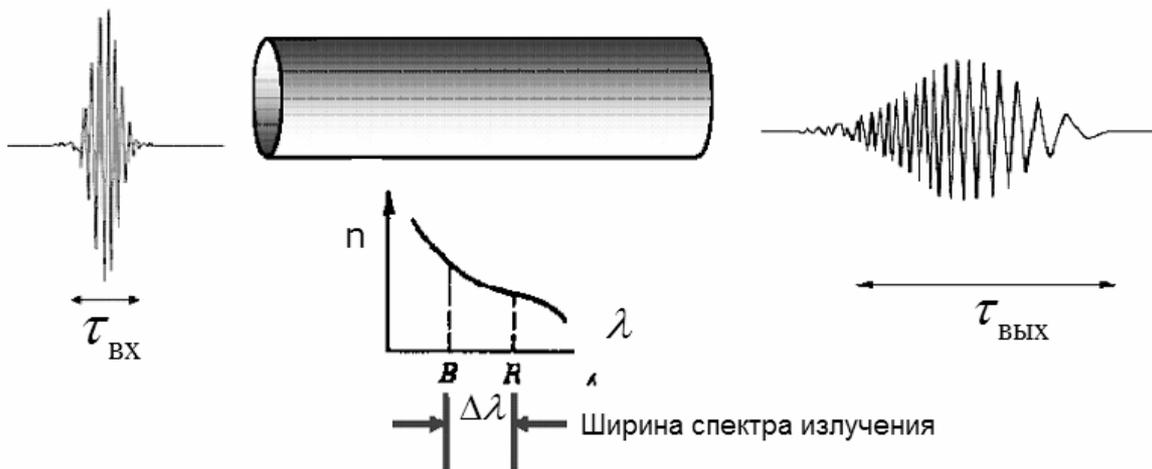


Рис. 3.17 — Хроматическая дисперсия

Поляризационная модовая дисперсия ($\tau_{\text{пол}}$) возникает вследствие различной скорости распространения двух взаимно перпендикулярных поляризационных составляющих моды.



Рис. 3.18 — Поляризационная модовая дисперсия

Результирующая дисперсия в ООВ включает в себя все виды дисперсии и ограничивает максимальную скорость передачи информации по линиям связи.

$$\tau = \sqrt{(\tau_{\text{волн}} + \tau_{\text{мат}})^2 + \tau_{\text{ПМД}}^2}$$

Информационную емкость ОВ различных типов принято характеризовать полосой пропускания и коэффициентом широкополосности. *Полоса пропускания* определяется как диапазон частот, в пределах которого значение АЧХ больше или равно половине максимального значения. Это соответствует снижению уровня оптической мощности сигнала на границах полосы пропускания на 3 дБ. *Коэффициент широкополосности* равен полосе пропускания ОВ длиной $L = 1$ км и выражается в МГц·км. Полоса пропускания ОВ (в мегагерцах) обратно пропорциональна длине L линии связи. Многомодовое ОВ имеет коэффициент широкополосности 200...1000 МГц·км и используется, в основном, во внутриобъектовых системах связи и в структурированных кабельных системах (СКС).

Одномодовое ОВ является весьма широкополосным (10÷100 ГГц) и позволяет реализовать огромные скорости передачи на большие расстояния (сотни км).

3.2 Классификация и конструкция волоконно-оптических кабелей

Как правило, волокна перед использованием должны быть снабжены защитной оболочкой, называемой кабельной или защитной. Кабельная оболочка — это внешняя защитная структура, окружающая одно или более волокон. Она схожа по назначению с изоляцией, применяемой в медных кабелях. Кабельная оболочка защищает медные проводники и волокна от внешних агрессивных и механических воздействий, способных привести к повреждению или ухудшению их характеристик. Цель данной главы — описание типичной структуры оптического кабеля [15].

Подобно своим медным аналогам, оптические кабели имеют весьма разнообразную структуру. Но в основном оптический кабель состоит из скрученных по определённой системе оптических волокон, заключённых в общую защитную оболочку. При необходимости кабель может содержать силовые (упрочняющие) и демпфирующие элементы, а также некоторое количество металлических проводников.

Для любого кабеля важными характеристиками являются предел его прочности на разрыв, твердость, срок службы, гибкость, защищенность от внешнего воздействия, диапазон рабочих температур и даже внешний вид.

ОК применяют на информационных сетях различного назначения, при этом они могут подвергаться всевозможным вредным воздействиям окружающей среды. Поэтому конструкции ОК должны быть разнообразными, пригодными для эксплуатации при любых внешних условиях.

3.2.1 Классификация оптических кабелей

Существующие оптические кабели по своему назначению могут быть классифицированы на несколько групп:

Магистральные кабели предназначены для передачи информации на большие расстояния и на большое число каналов. Они обладают малыми затуханием и дисперсией и большой информационно-пропускной способностью.

Зоновые кабели предназначены для связи областного центра с районами и городами области. Дальность связи, как правило, составляет порядка сотни километров.

Городские кабели применяют в качестве соединительных между городскими АТС и узлами связи. Они рассчитаны на короткие расстояния (5...10 км) и большое число каналов.

Объектовые кабели служат для передачи информации внутри объекта. Сюда относятся учрежденческая и видеотелефонная связь, внутренняя сеть кабельного телевидения, а также бортовые информационные системы подвижных объектов, например, самолётов, кораблей и спутников.

В зависимости от условий прокладки и эксплуатации ОК подразделяют на следующие группы:

- подземные;
- для прокладки в кабельной канализации, коллекторах и трубах;
- подводные;
- подвесные;
- внутренние (станционные).

Подземные ОК прокладывают в грунтах всех категорий, через неглубокие болота и несудоходные реки.

Кабели второй группы предназначены для прокладки в кабельной канализации, трубах, блоках, коллекторах, шахтах и на мостах.

Подводные кабели предназначены для осуществления связи через большие водные преграды. Применяемые для этой цели оптические кабели должны обладать высокой механической прочностью на разрыв и иметь надёжные влагостойкие покрытия. Для подводной связи также важно иметь затухание и большие длины регенерационных участков.

Подвесные ОК применяют для прокладки на грозотросе и фазовом проводе ЛЭП, контактной сети электрифицированных железных дорог, а также для устройства переходов от одного здания к другому в городских условиях и для прокладки на опорах воздушных линий связи и специальных стойках в сельских районах.

Станционные кабели предназначены для межстоечных и блочных соединений и монтажа аппаратуры. Они выполняются чаще всего в виде жгутов или плоских лент.

3.2.2 Основные компоненты волоконно-оптического кабеля

На рис. 3.19 представлены основные компоненты простого оптического кабеля с одним волокном.

Конструкция кабелей может быть достаточно разнообразной, но общими являются следующие компоненты:

- Оптическое волокно.
- Буферная оболочка.
- Силовой элемент.
- Внешняя оболочка.

Поскольку устройство оптических волокон уже достаточно подробно обсуждено, то остановимся на буферной оболочке, силовом элементе и внешней оболочке.

Буферная оболочка. Наиболее простой вид буфера представляет собой пластиковую оболочку, расположенную поверх оптической оболочки. Данный буфер является частью волокна и наносится производителями волокна.

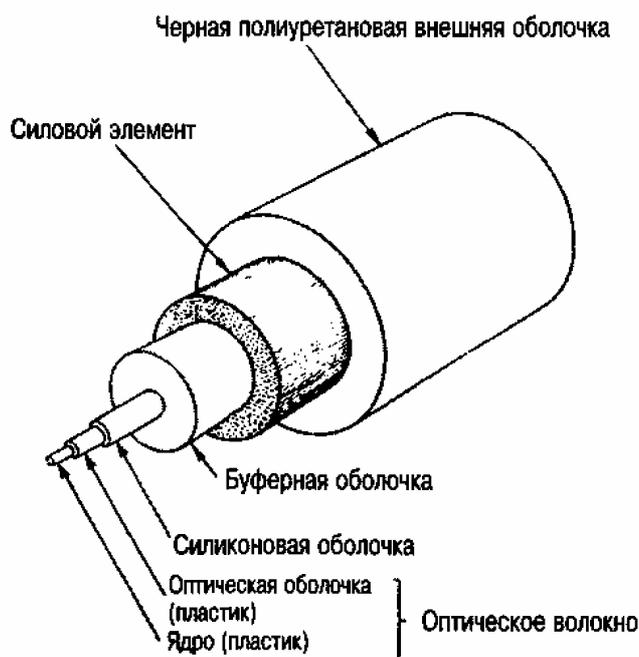


Рис. 3.19 — Конструкция волоконно-оптического кабеля

Силовые элементы — важная часть ВОК, особенно в процессе протягивания во время монтажа линии. Уровень напряжений в кабеле в процессе протяжки и других действий при монтаже таков, что может вызвать увеличение потерь за счет возникновения микроизгибов, что в свою очередь приводит к возрастанию затухания и возможным эффектам «усталости» материала. Чтобы снять эти стрессовые нагрузки во время монтажа и эксплуатации, в структуру ВОК добавляются внутренние силовые элементы. Эти элементы обеспечивают свойства растяжения под нагрузкой, подобно тому, что имеет место при прокладке телефонных линий и других кабельных конструкций. Они предохраняют ВОК от перегрузки путем минимизации удлинений и сжатий. Нужно иметь в виду, что оптическое волокно хрупкое и растягивается очень мало, перед тем как разорваться. Таким образом, силовые элементы должны иметь лишь небольшое удлинение под действием ожидаемой растягивающей нагрузки.

Наиболее распространенными силовыми элементами являются кевларовая нить, стальные и эпоксидные стержни. Кевлар используется тогда, когда каждое волокно помещается внутри индивидуальной оболочки. Стальные нити и стекловолокна применяются в многожильных кабелях. Сталь характеризуется луч-

шей механической устойчивостью по сравнению со стекловолокном, но в ряде случаев требуется изготовление полностью диэлектрических кабелей. Сталь, например, притягивает разряды молнии, а стекло избавлено от этого недостатка.

В настоящее время известны две конструктивные разновидности оптического кабеля:

- Кабели, содержащие металлические элементы (проводники, оболочки из свинца или алюминия, бронепокровы).
- Кабели полностью диэлектрические (без металла).

К достоинству первых относятся высокая механическая прочность и влагостойкость. По медным проводникам можно осуществлять служебную связь, использовать их для дистанционного электропитания линейных регенераторов и находить трассу прокладки кабеля. Но такие кабели уязвимы в отношении электромагнитных воздействий (грозы, промышленные и транспортные помехи и др.) и имеют большие габариты и массу.

Диэлектрические кабели свободны от электромагнитных воздействий, но менее прочны механически, менее влагостойки и подвержены агрессии со стороны грызунов.

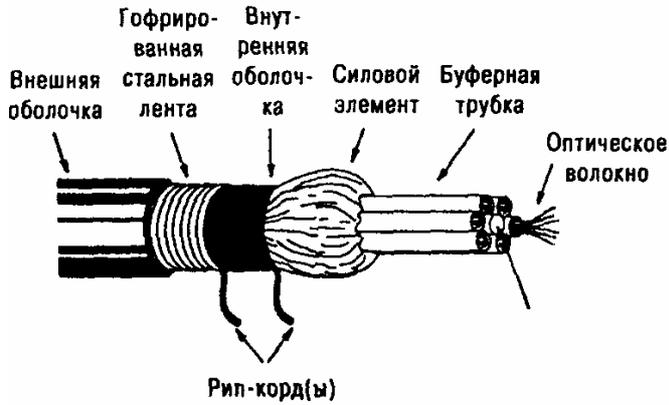
Внешняя оболочка. Внешняя оболочка, подобно изоляции провода, обеспечивает защиту от механического трения, масла, озона, кислот, щелочей, растворителей и т.д.

Броневые покровы. Применяются для защиты подземных ОК от давления земляной засыпки. Наряду с традиционными видами стальной проволочной брони широко используют оплетку из тонких стальных проволок и броню из неметаллических материалов в виде повива из арамидовых нитей или пластмассовых лент с упрочняющими стекловолокнами. Подводные кабели имеют усиленную двойную броню из стальной проволоки с цинковым покрытием или проволоки из нержавеющей стали.

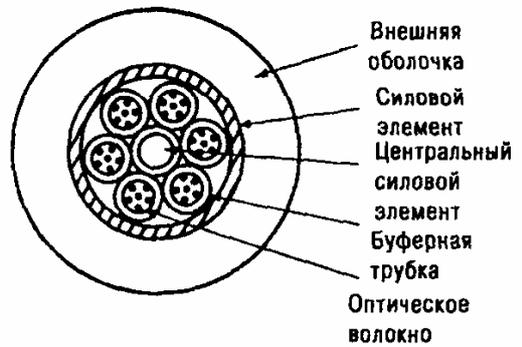
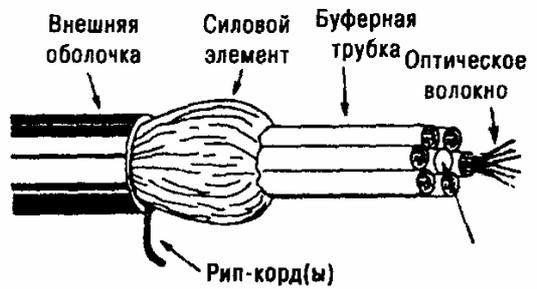
Гидрофобные заполнители. В ОК наружной прокладки очень важна защита ОК от проникновения воды. Традиционный метод защиты заключается в использовании гидрофобного компаунда в виде желе или геля. Компаунд в сердечник вводят под давлением при температуре 65...70 °С.

Оболочки, бронепокровы в соответствии с их функциональными назначениями и областью применения должны обеспечивать:

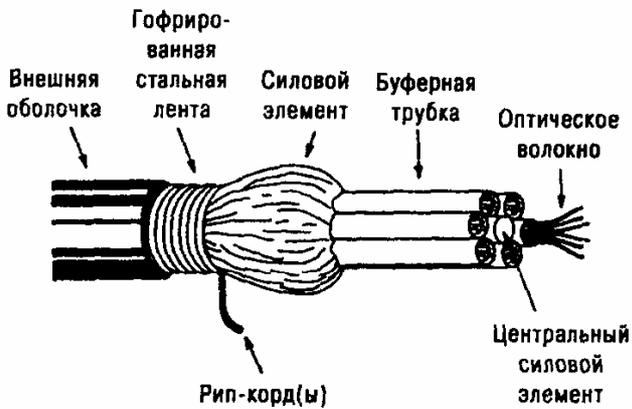
Армированные, с двойной оболочкой



Полностью диэлектрические



Легкие армированные



С несущим тросом

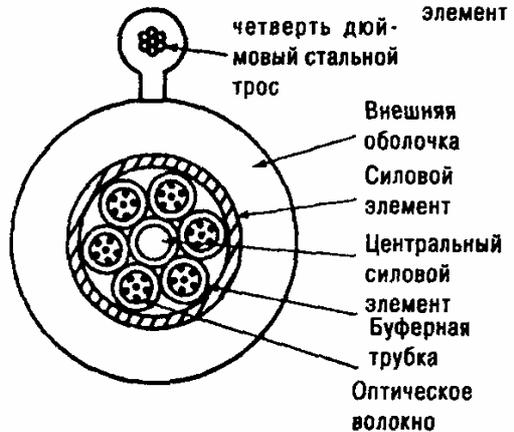
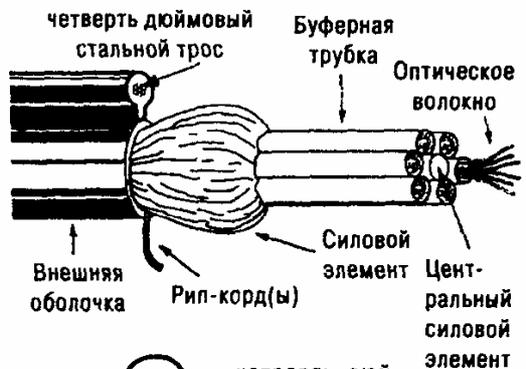


Рис. 3.20 — Возможные конструкции волоконно-оптических кабелей

- герметичность и влагостойкость;
- механическую защиту;
- стойкость к воздействию соляного тумана, солнечного излучения;
- стойкость к избыточному гидростатическому давлению;
- защиту от грызунов;
- нераспространение горения.

3.3 Пассивные компоненты ВОЛС

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

По мере роста сложности и увеличения протяжённости волоконно-оптической кабельной системы роль пассивных компонентов возрастает. Практически все системы волоконно-оптической связи, предназначенные для магистральных информационных сетей, локальных вычислительных сетей, а также для сетей кабельного телевидения, охватывают сразу всё многообразие пассивных волоконно-оптических компонентов. Ниже будут рассмотрены лишь некоторые из них.

3.3.1 Оптические соединители

Одной из самых важных задач, которую необходимо решить при построении любой оптической системы связи, является задача обеспечения надёжного соединения оптических волокон. Оптический соединитель — это устройство, предназначенное для соединения различных компонентов волоконно-оптического линейного тракта в местах ввода и вывода излучения. Такими местами являются: оптические соединения оптоэлектронных модулей (приёмников и передатчиков) с волокном кабеля, соединения отрезков оптических кабелей между собой, а также с другими компонентами.

Различают *неразъёмные* и *разъёмные* соединители. Неразъёмные соединители используются в местах постоянного монтажа кабельных систем. Разъёмные соединители (широко употребляется термин *коннекторы* (*connectors*)) допускают многократные соединения/разъединения.

Основными требованиями к оптическим соединителям являются:

- малые вносимые потери;
- устойчивость к внешним механическим, климатическим и другим воздействиям;
- высокая надёжность;
- простота конструкции.

Дополнительно к разъёмным соединителям предъявляют требования неизменности параметров при многократных соединениях. Кроме того, любая их целесообразная конструкция по возможности должна исключать необходимость дополнительной юстировки.

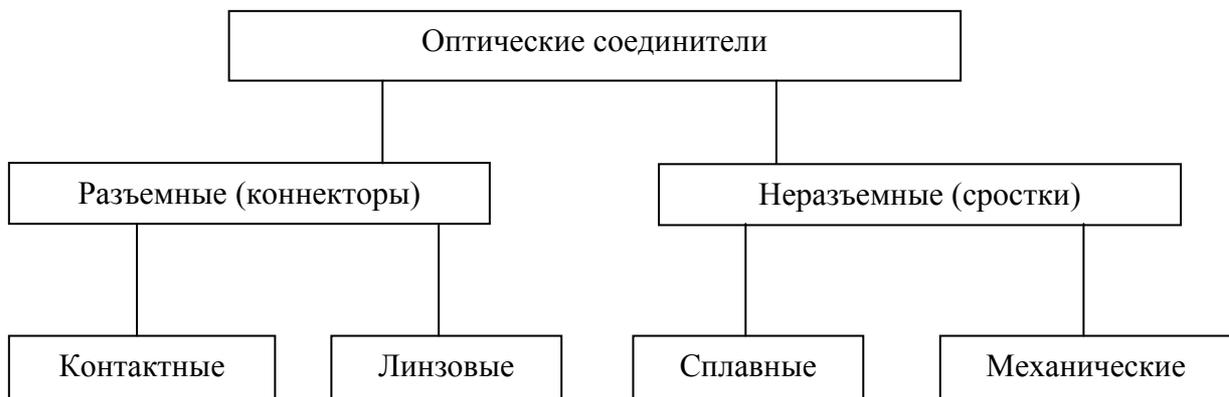


Рис. 3.21 — Основные разновидности оптических соединителей

1. Разъёмные соединители.

На рынке существует большое количество специализированных оптических разъемов. Волоконно-оптические разъемы доступны в двух типоразмерах: разъемы стандартного размера и миниатюрные оптические разъемы.

Номенклатура стандартных соединителей достаточно велика. Наиболее широкое распространение получили соединители FC, ST и SC, которые различаются по уровню затухания света в них, конструкции и материалам изготовления.

2. *Неразъемные соединители.*

Неразъемное соединение, или *сросток*, постоянно соединяет два волокна. Существуют два типа соединений (сростков):

1. Механическое соединение.
2. Сварное соединение.

Сварные неразъемные соединители. В настоящее время для постоянного соединения ОВ кабелей почти всегда применяют сварные соединения. Освобожденные от покрытия ОВ после шлифовки торцов закрепляют в юстировочном устройстве и сваривают электрической дугой или лазерным лучом. Для установки сварных соединителей применяется электрическая дуга, позволяющая сварить два волокна между собой. Сварные соединители позволяют добиваться очень точного, контролируемого компьютером расположения волокон, что, в свою очередь, определяет их чрезвычайно низкие потери на уровне 0,05 дБ. Основным недостатком сварных неразъемных соединителей является высокая стоимость оборудования. Тем не менее, сварные соединители продолжают применяться там, где существуют строгие ограничения на уровне допустимых потерь.

Возможности получения хорошего сварного соединения постоянно возрастают с усовершенствованием применяемого оборудования и технологии сварки, в дополнение к непрерывному совершенствованию геометрии волокна.

Качество сварного соединения можно характеризовать двумя параметрами:

- затуханием в месте сварки;
- прочностью сварного соединения.

Механические неразъемные соединители. *Механическое соединение* — небольшой участок механически соединенного оптоволокна — *сросток* длиной 6 см и диаметром 1 см. Этот сросток осуществлен путем точного выравнивания двух концов волокон и их надежного постоянного механического соединения. Сросток закреплен с помощью быстросхватывающего покрытия или клеевой обвязки, или с использованием того и другого. Механические сростки допустимы как для организации постоянного, так и временного соединения. Вносимые потери за счет механического соединения обычно выше, чем сварного соединения, и имеют поря-

док 0,1–0,8 дБ. В настоящее время разработано несколько видов механических неразъемных соединителей. Все они имеют следующие общие характеристики: легко устанавливаются в полевых условиях, с использованием только простого инструмента.

3.3.2 Оптические разветвители

Оптический разветвитель представляет собой в общем случае многополюсное устройство, в котором излучение, подаваемое на часть входных оптических полюсов, распределяется между его остальными оптическими полюсами.

Различают направленные и двунаправленные разветвители, а также разветвители, чувствительные к длине волны (спектрально-селективные) и нечувствительные (неселективные). В двунаправленном разветвителе каждый полюс может работать как на приём сигнала, так и на его передачу. Поэтому в этом случае группы приёмных и передающих полюсов могут меняться местами в функциональном смысле. В направленном разветвителе коэффициенты передачи между оптическими полюсами зависят от направления оптического излучения, а в спектрально-селективном разветвителе — от длины волны.

По своей конструкции разветвители разделяют на две основные группы — *биконические*, в которых излучение передается через боковую поверхность, и *торцевые*, в которых излучение передается через торец. В обеих группах излучение может передаваться либо при непосредственном контакте световодов, либо через вспомогательные элементы — зеркала, линзы, смесители. В биконических разветвителях свет может быть извлечен через боковую поверхность при преобразовании направляемой моды в моду излучения или при связи со вторым световодом через исчезающее поле. Аналогично биконическим ответвителям могут быть реализованы ответвители на планарных структурах.

Различают следующие типы разветвителей: древовидный, звездообразный и ответвитель (рис. 3.22).

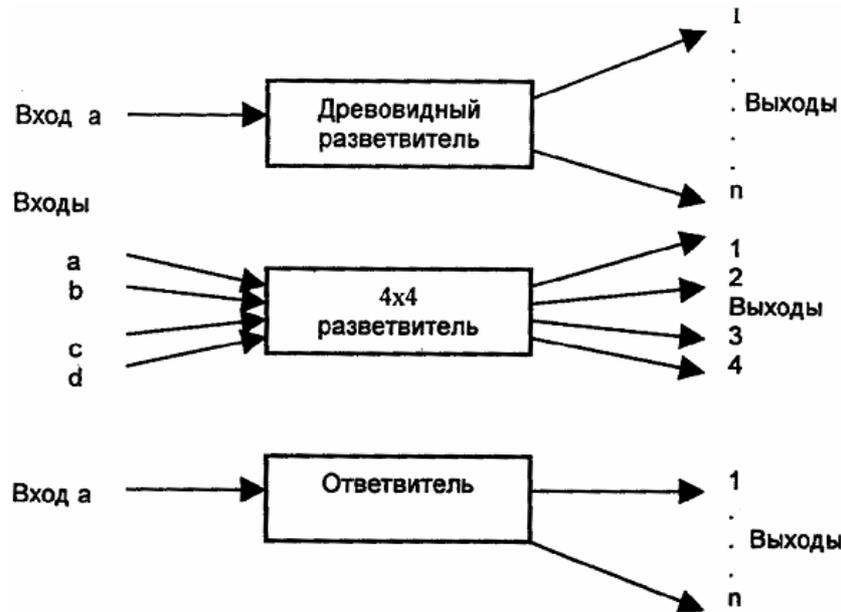


Рис. 3.22 — Типы разветвителей:
 а — древоподобный разветвитель; б — звездообразный разветвитель; в — ответвитель

Древоподобный разветвитель осуществляет расщепление одного входного оптического сигнала на несколько выходных, или выполняет обратную функцию — объединение нескольких сигналов в один выходной (рис. 3.22, а). Обычно древоподобные разветвители распределяют мощность в равной степени между всеми выходными полюсами. Конфигурация полюсов обозначается как $n \times m$, где n — число входных полюсов (для древоподобного разветвителя $n = 1$), m — число выходных полюсов, когда устройство работает в режиме расщепления. В поставляемых в настоящее время моделях количество выходных портов может находиться в пределах от 2 до 32.

Звездообразный разветвитель обычно имеет одинаковое число входных и выходных полюсов. Оптический сигнал в таком разветвителе приходит на один из n входных полюсов и в равной степени распределяется между n выходными полюсами. Наибольшее распространение получили звездообразные разветвители 2×2 и 4×4 . Звездообразные разветвители распределяют мощность в равной степени между всеми выходными полюсами.

Ответвитель — это обобщение древоподобного разветвителя, когда выходная мощность распределяется необязательно в равной пропорции между выходными полюсами (рис. 3.22, в). Кон-

фигурации ответвителей бывают 1x2, 1x3, 1x4, 1x5, 1x6, 1x8, 1x16, 1x32. Некоторая доля (меньше 50 %) выходной мощности идёт на канал (каналы) ответвителя, в то время как большая часть остаётся в магистральном канале. Выходные полюса нумеруются в порядке убывания мощности.

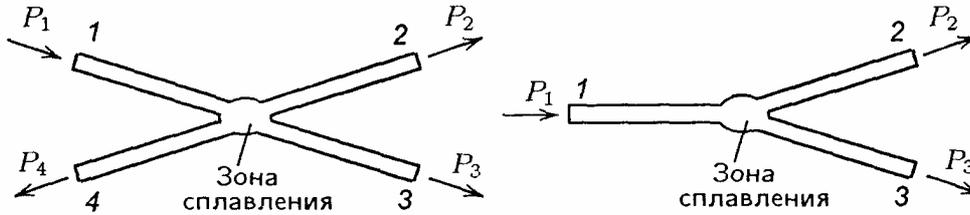


Рис. 3.23 — Схемы волоконно-оптических разветвителей

Оптические изоляторы и *вентили* пропускают свет в одном направлении с малым затуханием и практически не пропускают свет в обратном направлении.

Изоляторы исключают влияние отражения прямого излучения на частоту и амплитуду сигналов, генерируемых полупроводниковыми лазерами и другими источниками. Одним из способов реализации оптических изоляторов является использование эффекта Фарадея, т.е. вращения плоскости поляризации оптического луча, распространяющегося в оптически активных средах, находящихся под действием магнитного поля.

Оптические аттенюаторы, или *ослабители*, характеризуются теми же параметрами, что и соединители. Только у соединителей вносимое затухание должно быть минимальным, а у аттенюаторов оно имеет разную величину. Различают фиксированные и регулируемые аттенюаторы.

К пассивным компонентам относятся и другие специальные компоненты ВОЛС, такие как:

- оптические переключатели, осуществляющие коммутацию одного или нескольких оптических сигналов, переходящих из одних волокон в другие;
- соединительные муфты, задача которых герметично и на длительный срок закрыть область сваренных ОВ;
- оптические распределительные устройства и кроссовые устройства.

3.4 Приёмники и передатчики — активные компоненты ВОСП

В системах оптической связи происходит передача и обработка оптических сигналов. В состав ВОСП входят: оборудование сопряжения, оптический передатчик, оптическое волокно, оптический ретранслятор, оптический приемник.

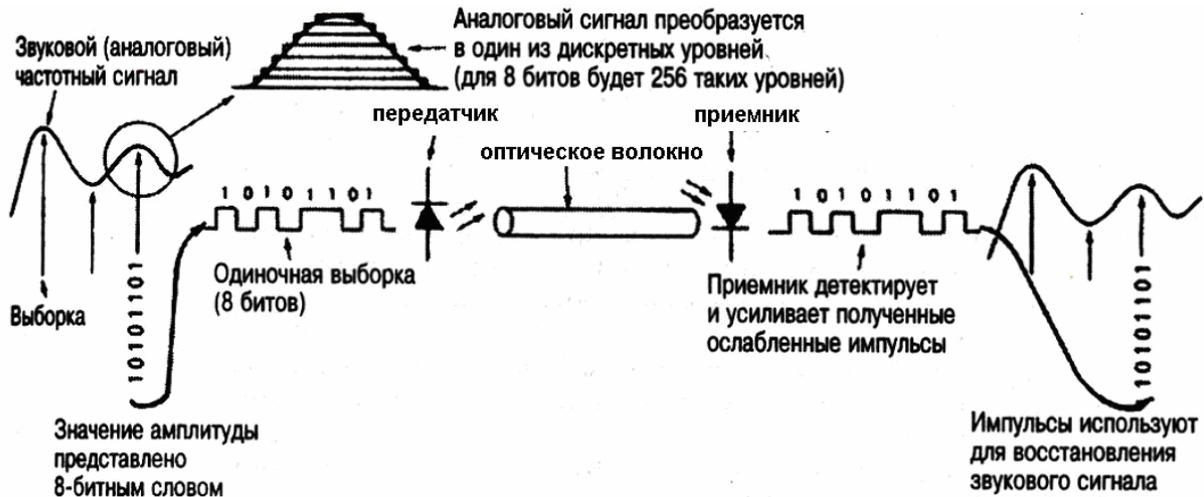


Рис. 3.24 — Передача сигнала в ВОЛС

3.4.1 Оптический передатчик

Передающие оптоэлектронные модули (ПОМ), применяемые в волоконно-оптических системах, предназначены для преобразования электрических сигналов в оптические. Последние должны быть введены в волокно с минимальными потерями. Производятся весьма разнообразные ПОМ, отличающиеся по конструкции, а также по типу источника излучения. Одни работают на невысоких скоростях на линиях с максимальной длиной до нескольких метров, другие передают сотни и даже тысячи мегабит в секунду на расстояния в несколько десятков километров.

В состав оптического передатчика обычно входят источник оптического излучения, согласующее оптическое устройство, электронные схемы модуляции и стабилизации режимов работы источника излучения.

Главным элементом ПОМ является источник излучения. Он должен излучать на длине волны, соответствующей одному из

окон прозрачности ОВ; обеспечивать достаточно высокую мощность излучения и эффективный ввод его в ОВ; иметь высокое быстродействие, позволяющее осуществлять высокоскоростную модуляцию; отличаться простотой, надежностью и малыми габаритами.

Этим требованиям наиболее полно удовлетворяют полупроводниковые источники излучения: светодиоды (СИД) и лазеры (ЛД).

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

Применяются две основные конструкции СИД: с поверхностным и торцевым излучением. Основой первой является двухслойный полупроводник, содержащий p - n -переход. При прямом напряжении смещения спонтанная излучательная рекомбинация происходит непосредственно в области p - n -перехода, а свет распространяется по всем направлениям. Поэтому излучение на выходе СИД является некогерентным и слабонаправленным. В СИД с торцевым излучением используется двойная гетероструктура, представляющая собой в упрощенном виде трехслойный полупроводник (рис. 3.25).

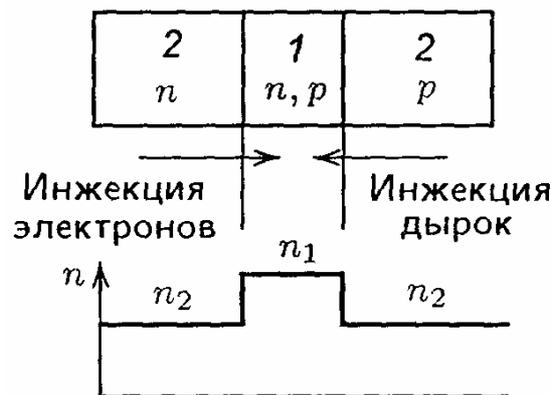


Рис. 3.25 — Схематичное изображение двойной гетероструктуры

Излучательная рекомбинация происходит в узком активном слое 1. Пассивные слои 2 образуются из полупроводниковых материалов с большей шириной запрещенной зоны $E_{g2} > E_{g1}$. Граница раздела между двумя слоями с различными E_g называется ге-

теропереходом. Другая особенность двойной гетероструктуры — это то, что показатель преломления активного слоя больше, чем пассивных ($n_1 > n_2$). Поэтому рекомбинационное излучение распространяется вдоль активного слоя, испытывая полное внутреннее отражение на границах.

В торцевых СИД, как и в СИД с поверхностным излучением, используется механизм спонтанной рекомбинации, что делает источники некогерентными. Однако частичная внутренняя канализация спонтанного излучения активным слоем позволяет сделать излучение торцевых СИД на выходе более направленным. При повышении напряжения смещения (тока накачки) спонтанно образующиеся фотоны распространяются вдоль активного слоя, испытывая полное внутреннее отражение на границах.

Вывод излучения из источников с двойной гетероструктурой осуществляется с торца. Поскольку его распространение сопровождается большими потерями на поглощение, активный слой делают очень тонким (порядка 0,5 мкм).

В торцевых СИД, как и в СИД с поверхностным излучением, используется механизм спонтанной рекомбинации, что делает источники некогерентными.

Лазерные диоды. Принципиальным отличием лазерного диода от светодиода является наличие в нём встроенного оптического резонатора, что позволяет при условии превышения током инжекции некоторого порогового значения получить режим индуцированного излучения, которое характеризуется высокой степенью когерентности. В связи с чем ЛД имеют значительно меньшую ширину спектра излучения (1–2 нм) по сравнению со светодиодами (30–50 нм).

Зависимость мощности излучения от тока накачки описывается ватт-амперной характеристикой ЛД. При малых токах накачки лазер испытывает слабое спонтанное излучение, работая как малоэффективный светодиод. При превышении некоторого порога током накачки $I_{\text{пор}}$ излучение становится индуцированным, что приводит к резкому росту мощности излучения и его когерентности.

Главная отличительная черта между светодиодами и лазерными диодами — это *ширина спектра излучения*. Светоизлучаю-

щие диоды имеют широкий спектр излучения, в то время как ЛД имеют значительно более узкий спектр (рис. 3.26).

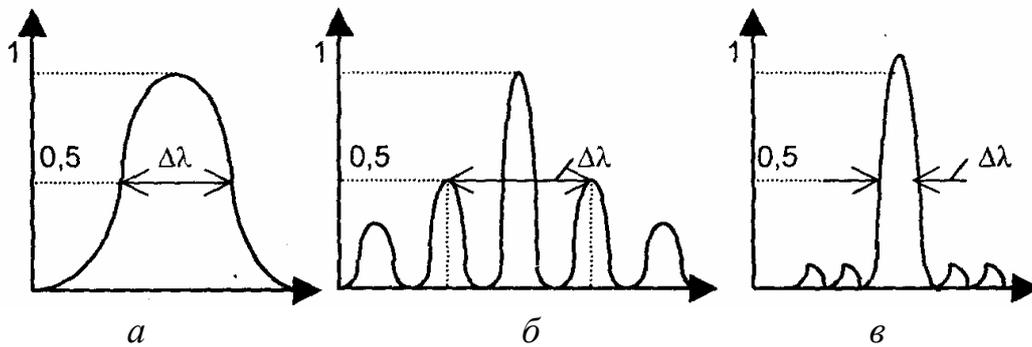


Рис. 3.26 — Спектры излучения светодиодов (а) и лазерных диодов (б, в):
 а — $\Delta\lambda = 30\text{--}50$ нм; б — многомодовый лазер ($\Delta\lambda = 1\text{--}3$ нм);
 в — одномодовый лазер ($\Delta\lambda = 0,1\text{--}0,4$ нм)

Оба типа устройства весьма компактны и хорошо сопрягаются со стандартными электрическими цепями.

Характеристики источников. Сравним СИД и лазеры, данное сравнение позволит определить пригодность того или другого вида источников для различных применений. В таблице 3.1 представлены характеристики лазеров и светоизлучающих диодов.

Таблица 3.1 — Сравнительные характеристики лазеров и СИД

Параметр	СИД	Лазер
Выходная мощность	Низкая	Высокая
Скорость	Низкая	Высокая
Выходная апертура (NA)	Высокая	Низкая
Спектральная характеристика	Широкая	Узкая
Совместимость с одномодовым волокном	Нет	Да
Применение	Простое	Сложное
Период эксплуатации	Очень длинный	Длинный
Стоимость	Низкая	Высокая

Выходной мощностью называется мощность излучения при специфицированном значении управляющего тока. Как показано на рис. 3.27, СИД излучает большую мощность по сравнению с лазером, работающим ниже порога генерации. Выше порога генерации мощность лазера резко возрастает и непрерывно увеличивается вместе с силой управляющего тока.

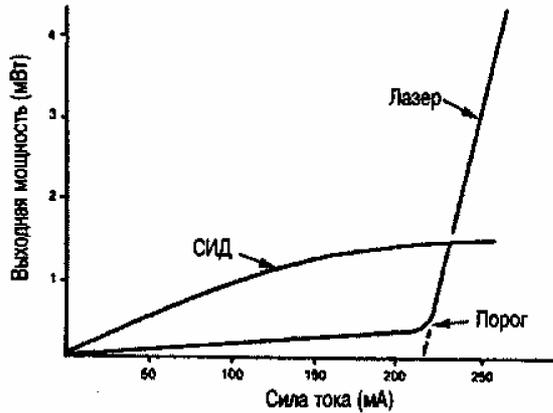


Рис. 3.27 — Зависимость выходной мощности от силы тока

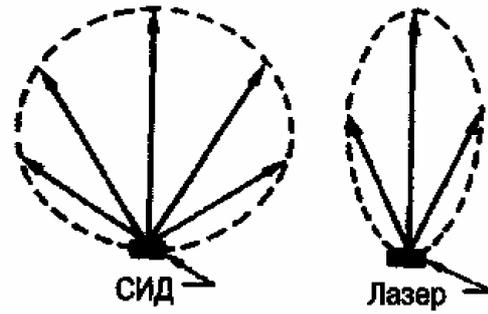


Рис. 3.28 — Угловые диаграммы

В настоящее время мощности выпускаемых светодиодов составляет величину порядка 0,1–0,5 мВт (что соответствует от –10 до –3 дБм), лазерные диоды имеют выходную мощность порядка 1–5 мВт (0 – 7 дБм).

Расходимость излучения света является важной характеристикой для волоконно-оптических приложений. После выхода света из источника начинается расширение светового пучка, и только малая его часть в действительности попадает в волокно. Чем уже световой пучок, тем большая часть света может попасть в волокно. Хорошие источники должны иметь малые диаметры выходных пучков света и малую апертуру (NA). На рис. 3.28 представлены типичные угловые диаграммы излучения диодов и лазеров.

Передающий оптический модуль кроме СИД или ЛД включает в себя схемы стабилизации напряжения и тока, формирователь импульсов, микрохолодильник, поддерживающий постоянную температуру излучателя, и устройство согласования излучателя с ОВ.

3.4.2 Оптический приемник

Приёмные оптические модули (ПРОМ) являются важными элементами волоконно-оптических систем. Их функция — преобразование оптического сигнала, принятого из волокна, в элек-

трический, который обрабатывается далее электронными устройствами.

Основными элементами ПРОМ являются фотоприёмник, преобразующий полученный оптический сигнал в электрический, и каскад электрических усилителей, усиливающих сигнал и преобразующих его в форму, пригодную для обработки.

Фотодетектор, как и источник оптического излучения, должен отвечать определенным требованиям, а именно: обладать высокой чувствительностью и быстродействием, вносить минимальные шумы в приемную систему, отличаться стабильностью рабочих характеристик, иметь небольшие размеры, быть высоконадежным и недорогим.

Полнее всего этим требованиям удовлетворяют полупроводниковые фотодетекторы.

Принцип работы фотоприёмника. Среди полупроводниковых фотодетекторов наибольшее применение в ВОСП получили рп-фотодиоды (ФД) и лавинные фотодиоды (ЛФД). В основе работы фотоприёмника лежит явление внутреннего фотоэффекта, при котором в результате поглощения фотонов с энергией, превышающей энергию запрещённой зоны, происходит переход электронов из валентной зоны в зону проводимости (генерация электронно-дырочных пар). Если к полупроводнику приложить напряжение, то появится электрический ток, обусловленный движением электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне.

Эффективная регистрация генерируемых в полупроводнике электронно-дырочных пар обеспечивается путём разделения носителей заряда. Для этого используется полупроводниковая конструкция с *p-n*-переходом, которая называется фотодиодом.

p-i-n-фотодиод. Отличительной особенностью ***p-i-n-фотодиода*** является наличие *i*-слоя (слаболегированного полупроводника *n*-типа) между слоями p^+ - и n^+ -типа (+ означает сильное легирование) (рис. 3.29).

Такой *i*-слой называется обеднённым слоем, поскольку в нём нет свободных носителей. Сильное легирование крайних слоев делает их проводящими, поэтому всё напряжение падает на *i*-слое и в нём создаётся максимальное значение электрического

поля. Но поскольку в i -слое нет свободных носителей, то в нём нет и электрического тока.

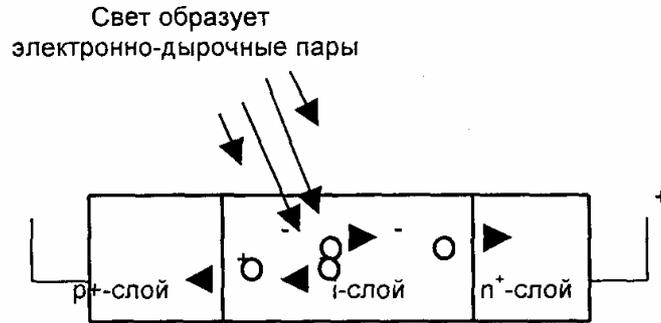


Рис. 3.29 — Схема структуры p - i - n -фотодиода

При наличии падающего на i -слой излучения в нём образуются свободные электронно-дырочные пары, которые под воздействием электрического поля быстро разделяются и двигаются в противоположных направлениях к своим электродам, образуя электрический ток. Электрический ток идёт до тех пор, пока образуются электронно-дырочные пары, то есть пока на фотодиод падает свет. Эффективным является взаимодействие излучения только с i -слоем, поэтому его делают протяжённым, а крайние слои узкими.

Лавинные фотодиоды. Главное отличие ЛФД от обычного фотодиода — наличие внутреннего усиления сигнала. Если структура слоев у обычного фотодиода имеет вид $p^+ - i - n^+$, то в ЛФД добавляют p -слой ($p^+ - i - p - n^+$). Причём профиль распределения легирующих примесей выбирается так, чтобы наибольшее сопротивление, а следовательно, и наибольшую напряжённость электрического поля имел p -слой.

При воздействии света на i -слой образуются электронно-дырочные пары и благодаря небольшому полю происходит направленное движение носителей к соответствующим полюсам (рис. 3.30).

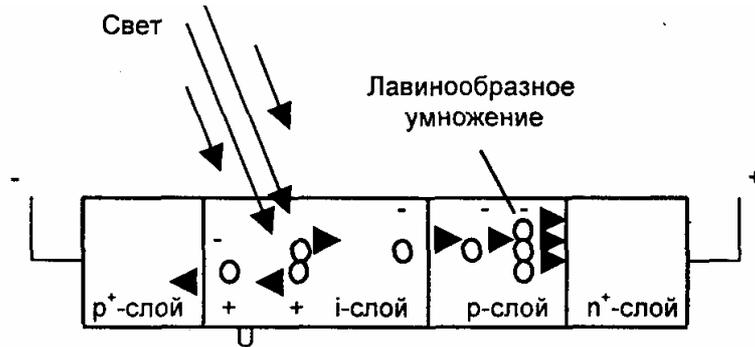


Рис. 3.30 — Схема структуры лавинного фотодиода

Лавинные фотодиоды имеют преимущество перед $p-i-n$ -фотодиодами по чувствительности. Однако они обладают рядом недостатков по сравнению с $p-i-n$ -фотодиодами. Основными недостатками ЛФД являются более высокое рабочее напряжение питания по сравнению с $p-i-n$ -фотодиодами и довольно сильная зависимость коэффициента умножения от температуры. Другими недостатками являются меньшая надёжность и относительно высокая стоимость. Поэтому в ВОЛС более широко используются $p-i-n$ -фотодиоды.

Основным параметром оптического приемника является *пороговая чувствительность* (минимально допустимый уровень мощности принимаемого оптического сигнала), *квантовая эффективность* и *время отклика*.

Квантовой эффективностью называется отношение числа первичных пар электрон-дырка к числу падающих на материал диода фотонов. Данный параметр является либо безразмерным, либо выражается в процентах. Квантовая эффективность 1, или 100 %, означает, что каждый поглощенный фотон приводит к образованию электронно-дырочной пары.

Временем отклика называется время, которое требуется фотодиоду для преобразования поступающей оптической энергии в электрический ток.

Чувствительность современных $p-i-n$ составляет величину от 10 нВт до 100 пВт (что соответствует -50 дБм — -70 дБм).

3.4.3 Оптические усилители и повторители

По мере распространения оптического сигнала по оптическому волокну происходит его ослабление, а также уширение

импульсов из-за дисперсии. Любой из этих факторов может оказаться причиной ограничения *максимальной длины* волоконно-оптической линии связи. Если же максимально допустимая длина между приёмником и передатчиком превышена, то необходимо в промежуточных точках линии связи добавлять один или несколько повторителей и оптических усилителей.

Типы повторителей. По методу усиления оптического сигнала повторители подразделяются на две категории: *регенераторы* и *оптические усилители*.

В волоконно-оптических линиях связи *регенераторы* значительно больше распространены, чем оптические усилители. При построении оптических магистралей оптические усилители в последнее время играют незаменимую роль.

Регенератор (электронно-оптический повторитель) сначала преобразует оптический сигнал в электрическую форму, усиливает, корректирует, а затем преобразовывает обратно в оптический сигнал (рис. 3.31).



Рис. 3.31 — Электронно-оптический повторитель

Повторитель можно представить как последовательно соединённые приёмный и передающий оптические модули. Блок регенерации восстанавливает прямоугольную форму импульсов, устраняет шум.

Оптический усилитель (ОУ), в отличие от повторителя, не осуществляет оптоэлектронного преобразования, а сразу производит усиление оптического сигнала (рис. 3.32).



Рис. 3.32 — Оптический усилитель

Оптические усилители в равной степени усиливают как входной сигнал, так и шум. Кроме того, они вносят собственные шумы в выходной оптический канал.

Одним из основных достоинств ОУ является простота конструкции, в которой преобладают пассивные компоненты, имеющие низкую цену, и меньшее число компонентов чем у повторителя. ОУ имеет более высокую надёжность, чем повторитель, что особенно важно для ретрансляторов ВОЛС, пролегающих под водными преградами.

Оптический усилитель не привязан к скорости передачи, в то время как повторитель обычно предназначен для работы на определённой скорости.

Повторители работают с одноволновым сигналом, а ОУ могут одновременно усиливать несколько оптических сигналов с разными длинами волн в пределах определённого волнового интервала, который называется зоной усиления. Это позволяет наращивать пропускную возможность линии связи, на которой установлены ОУ, без добавления новых волокон.

В настоящее время наиболее перспективными для ВОСП считаются полупроводниковые усилители и усилители на примесном ОВ.

Принципы действия указанных ОУ весьма сложны, и их рассмотрение выходит за рамки настоящего пособия.

Сравнительный анализ повторителей и ОУ позволяет сделать некоторые выводы. Повторители осуществляют регенерацию цифрового оптического сигнала, но имеют сложную конструкцию и, как следствие, высокую стоимость и относительно низкую надёжность. Кроме того, регенератор обычно предназначен для работы на определенной скорости передачи информации

и не допускает одновременной передачи нескольких волновых каналов, что затрудняет его использование в ВОСП с волновым мультиплексированием. ОУ имеет простую и высоконадежную конструкцию, а его стоимость постоянно снижается. Он не привязан к скорости передачи информации, что позволяет увеличивать пропускную способность действующих ВОСП без значительного увеличения затрат на оборудование.

Создание современных сверхпротяженных ВОСП невозможно без регенераторов и ОУ.

3.5 Измерение параметров волоконно-оптических систем

Так как большинство параметров систем передачи могут определяться числовыми значениями физических величин, роль измерительной техники в телекоммуникациях трудно переоценить. В настоящее время используется множество методов и средств измерений, служащих для определения соответствия этих параметров установленным нормам. Последние, как и при тестировании взаимодействия открытых систем, регламентируются соответствующими стандартами, включающими комплекс взаимосвязанных рекомендаций, совместно определяющих методики измерений и обработки их результатов, а также требования к характеристикам используемых для этой цели средств. Однако, для обеспечения необходимой точности и достоверности результатов измерений тех или иных параметров, сами средства измерений должны отвечать совокупности требований, наиболее важным из которых является точность средства измерения. Обеспечение требуемой точности и единства измерений являются задачами метрологического обеспечения предприятий, организаций и государства и решаются органами государственной метрологической службы.

Назначение и виды измерений. В процессе строительства и технической эксплуатации ВОЛС проводится комплекс измерений для определения состояния кабелей, линейных сооружений, качества функционирования аппаратуры линейного тракта, пре-

дупреждения повреждений, а также накопления статистических данных с целью разработки мер повышения надежности связи.

На этапе строительства ВОЛС в целях контроля качества строительства и связи измеряют следующие параметры: затухание ОВ на строительных длинах и смонтированных участках регенерации; затухание, вносимое соединениями ОВ; уровни мощности оптического излучения на выходных передающих и входных приемных электронных модулях; коэффициент ошибок. При необходимости устанавливают места повреждений.

Измерение трассы ВОСП. В настоящее время наибольшее распространение для измерений в ВОСП получил прибор, называемый *рефлектометр*. В основе метода измерения рефлектометром лежит явление обратного рэлеевского рассеяния. При реализации этого метода измеряемое волокно зондируют оптическими импульсами, вводимыми в ОВ через оптический направленный ответвитель. Из-за флуктуаций показателя преломления сердцевины вдоль волокна, отражений от рассеянных и локальных неоднородностей, распределенных по всей длине волокна, возникает обратнорассеянный поток. Мощность этого потока, измеренная в точке ввода оптических зондирующих импульсов в волокно с некоторой задержкой t относительно момента послыски зондирующего импульса, пропорциональна мощности, обратнорассеяной в точке кабеля, расположенной на расстоянии $l_x = tv/2$ от места измерения, где v — групповая скорость распространения оптического импульса. Соответственно при измерении с конца кабеля зависимости мощности обратнорассеянного потока от времени определяется распределение мощности обратнорассеянного оптического сигнала вдоль кабеля — характеристика обратного рассеяния волокна. По этой характеристике можно определить функцию затухания по длине конца кабеля.

Для реализации данного метода разработаны специальные приборы — оптические рефлектометры во временной области. Они получили широкое распространение благодаря своей универсальности, так как обеспечивают одновременное определение целого ряда важнейших параметров: степени регулярности кабеля, мест неоднородностей и повреждений, потерь в местах соединений, затухания и др.

Измерение затухания. Измерение затухания осуществляется на всех стадиях производства оптического кабеля, строительства и эксплуатации ВОЛС. Измеряют коэффициент затухания оптического кабеля, затухание строительных длин, затухание смонтированного участка регенерации, затухание соединений ОВ.

Оптическими вносимыми потерями называют отношение суммарной мощности оптического излучения на входных оптических полюсах компонента ВОСП к суммарной мощности оптического излучения на входных полюсах компонента ВОСП, выраженное в децибелах. Соответственно при измерении вносимого затухания определяют разность уровней мощности, воспринимаемой приемником излучения при его непосредственном подключении к источнику излучения, и мощности, поступающей на приемник при его включении на выходе измеряемого волокна, концы которого армированы оптическими соединителями.

Измерение числовой апертуры. Числовую апертуру необходимо знать для лучшего согласования ОВ при соединении между собой, а также с источниками и приемниками излучения, уточнения потерь на стыках ОВ при измерениях с одной стороны и т.п. Наиболее простой способ измерения числовой апертуры — косвенный: по результатам измерения апертурного угла.

Измерение профиля показателя преломления. Профиль показателя преломления является одним из основных параметров ОВ, определяющих его широкополосность. В отдельных случаях на стадиях строительства и эксплуатации ВОЛС может возникнуть потребность в его измерении. Для измерения профиля показателя преломления могут использоваться различные методы: интерферометрические, лучевые и рассеяния, сканирования отражения от торца, пространственного распределения излучения и др.

Измерение геометрических характеристик ОК. Поперечные геометрические параметры ОВ могут быть определены различными методами. Однако на практике в условиях строительства и эксплуатации ВОЛС их оценка, как правило, осуществляется по результатам измерения профиля показателя преломления; определение конструктивных размеров кабеля и модулей, а также отклонение сечения от круглого могут производиться обычными

визуальными методами, в частности микроскопом с измерительной сеткой, микрометром и т.д.

Измерение механических характеристик ОК. Механические характеристики ОК играют важную роль. Их значение необходимо при производстве работ по строительству ВОЛС. Оценка механических характеристик ОК осуществляется в процессе их производства.

Измерение уровней оптической мощности. Измерение уровней оптической мощности в процессе строительства и эксплуатации ВОЛС производится достаточно часто. Под *абсолютным уровнем мощности* понимают величину

$$P = 10 \lg(P/P_n),$$

где P — мощность измеряемого оптического излучения в заданной точке, мВт; P_n — мощность нормального генератора, равная 1 мВт.

Для измерения уровня оптической мощности используют ваттметры поглощаемой оптической мощности.

Измерение коэффициента ошибок. Коэффициент ошибок — важнейшая характеристика линейного тракта. Он измеряется как для отдельных участков регенерации, так и для тракта в целом. Определяется коэффициент ошибок $k_{\text{ош}}$ по формуле:

$$k_{\text{ош}} = N_{\text{ош}}/N,$$

где N — общее число символов, переданных за интервал измерения; $N_{\text{ош}}$ — число ошибочно принятых символов за интервал измерения.

Измерение коэффициента ошибок носит статистический характер. Для измерения $k_{\text{ош}}$ разработаны специальные приборы — измерители коэффициента ошибок, включающие генераторы псевдослучайной последовательности символов и приемное оборудование, осуществляющее собственно измерение коэффициента ошибок.

Измерение энергетического потенциала и чувствительности приемного оптического модуля. Энергетический потенциал — это разность между уровнем оптического сигнала на выходе передающего и чувствительностью приемного оптических модулей. Чувствительность приемного оптического модуля (ПрОМ) — это минимальный уровень оптического сигнала на

входе ПрОМ, при котором обеспечивается требуемый коэффициент ошибок.

Величину энергетического потенциала можно определить как разность между измеренными уровнями средней мощности цифрового оптического сигнала на выходе ПОМ и входе ПрОМ, соединенных оптической линией связи, при таком максимальном значении вносимого затухания, при котором обеспечивается максимально допустимое значение коэффициента ошибок.

Соответственно для измерения энергетического потенциала необходимо иметь линию с регулируемым затуханием. В качестве такой линии обычно используют оптический аттенюатор. При проведении измерений он контролирует коэффициент ошибок. Аттенюатор может быть включен между ПОМ и ПрОМ одного пункта.

3.6 Строительство, монтаж и техническая эксплуатация ВОЛС

Организация и особенности строительства ВОЛС. Строительство волоконно-оптических линий связи так же, как и электрических кабельных линий связи, осуществляется строительно-монтажными управлениями (СМУ), а также передвижными механизированными колоннами (ПМК), в системе которых организуются линейные или прорабские участки. Силами этих участков выполняются такие основные виды работ по строительству, как разбивка трассы линии и определение мест установки НРП на местности в соответствии с проектом на строительство, доставка кабеля, оборудования и других материалов на кабельную трассу, испытание, прокладка и монтаж кабеля и оконечных устройств, проведение приемосдаточных испытаний.

Строительство и реконструкция ВОЛС осуществляются по утвержденным техническим проектам. В процессе подготовки к строительству, как правило, выполняются следующие основные виды работ: изучается проектно-сметная документация; составляется проект производства работ (ППР); решаются организационные вопросы взаимодействия строительной организации с представителями заказчика; проводится входной контроль по-

ставленного ОК; решаются задачи материально-технического обеспечения.

Прокладка ОК кабелеукладчиком. Строительство магистральных и внутризоновых ВОЛС характеризуется большой протяженностью, различными климатическими, почвенно-грунтовыми и топографическими условиями. Прокладку ОК осуществляют комплексные механизированные колонны, в состав которых входят строительные машины и механизмы общестроительного назначения (тракторы, бульдозеры, экскаваторы и др.), а также специальные машины и механизмы для прокладки кабеля (кабелеукладчики, тяговые лебедки, пропорщики грунта, машины для прокола грунта под препятствиями и др.).

Бестраншейный способ прокладки кабеля с помощью кабелеукладчика благодаря высокой производительности и эффективности является основным. Он широко применяется на трассах с различными рельефами местности и разными грунтами. Для прокладки используются кабелеукладчики с активными и пассивными рабочими органами. С помощью ножевого кабелеукладчика в грунте прорезается узкая щель, и кабель укладывается на её дно на заданную глубину залегания (0,9...1,2 м).

Монтаж ВОЛС. Важнейшей технологической операцией при монтаже ОК является сращивание ОВ, которое должно удовлетворять требованиям эксплуатации ВОЛС. Необходимо, чтобы эксплуатационная надежность стыков ОВ была не ниже, чем самих ОВ, соответственно, соединение ОВ должно обладать достаточной механической прочностью, возможность возникновения дефектов в волокнах при подготовке концов ОВ к соединению при их сращивании должна быть сведена к минимуму.

Качество соединения ОВ определяется вносимым затуханием (потерями мощности оптического излучения). Известно, что величина потерь на месте стыка ОВ зависит от параметров соединяемых волокон и уровня технологии, выбранной для сращивания ОВ, в частности, потери определяются геометрическими размерами ОВ (диаметром сердцевины), числовой апертурой и их отклонениями, а также профилем показателя преломления. Кроме того, потери обусловлены наличием зазора между торцами со-

единяемых волокон, осевым и угловым смещениями осей сращиваемых ОВ, деформацией сердцевины при сварке, загрязнением сердцевины, образованием пузырьков газа, качеством подготовки торцов соединяемых ОВ. Места соединения ОВ защищают от воздействия внешней среды с помощью *муфт*. Как и для всех кабелей связи вообще, муфты ОК различают по назначению: для магистральных, внутризоновых и местных сетей связи; для кабелей, прокладываемых в канализации, в грунт и под водой; прямые и разветвительные муфты (перчатки). Конструкции муфт зависят от их назначения.

За рубежом наибольшее распространение для монтажа ОК находят различные варианты сборных муфт, которые могут использоваться многократно. Герметичность подобных муфт обеспечивается с помощью специальных прокладок, резьбовых и болтовых соединений.

Организация технической эксплуатации ВОЛС. Основной задачей технической эксплуатации ВОЛС является обеспечение качественной и бесперебойной их работы. Бесперебойная работа ВОЛС достигается постоянным техническим надзором за их состоянием, систематическим выполнением профилактических мероприятий по предупреждению повреждений и аварий, своевременным устранением возникающих неисправностей и проведением необходимых дополнительных работ.

Для повышения эффективности технической эксплуатации ВОЛС необходимо проводить систематический анализ состояния действующих оптических линейных трактов, своевременно выявлять причины и характер станционных и линейных повреждений, учитывать длительность перерывов связи, накапливать статистические данные о работе ВОЛС. С этой целью эксплуатационные предприятия должны вести производственную документацию.

Глава 4. НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ

4.1 Развитие волоконно-оптических систем передачи

В настоящее время во всем мире средства телекоммуникации переживают период широчайшего внедрения ВОЛС в практику. Стремительный процесс информатизации общества явился главной причиной широкого использования волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) на информационных сетях различного назначения [21].

Как можно в настоящее время оценить уровень мирового развития волоконно-оптических систем связи?

В мире сейчас проложены десятки тысяч километров волоконно-оптических линий связи. Сети ВОЛС охватили страны Западной Европы, США, Японии. Речь идет о местных линиях протяженностью от нескольких десятков — сотен километров до магистралей в тысячи километров, на которых информация передается со скоростью от десятков Кбит/с до 2,4 Гбит/с.

Первые ВОСП, введенные в эксплуатацию в начале 1980-х годов, работали на длине волны $\lambda = 0,85$ мкм с применением многомодового ОК. Основной областью их внедрения были соединительные линии между автоматическими телефонными станциями (АТС) в крупных городах. С середины 1980-х годов начинается распространение ВОСП, работающих на длине волны $\lambda = 1,3$ мкм по многомодовому и одномодовому ОК. Уменьшение затухания ОК позволило увеличить в три раза длину каждого из регенерационных участков, что способствовало широкому распространению магистральных ВОСП. Внедряемые с конца 1980-х гг. ВОСП в основном работали по одномодовому ОК, что резко повысило пропускную способность магистральных линий передачи. Широкое использование длины волны $\lambda = 1,55$ мкм в свою очередь стимулировало переход от строительства отдельных линий к построению телекоммуникационных сетей с преимущественным применением ОК.

Наиболее характерным событием развития ВОСП явилось создание в 1988 г. первой трансатлантической магистрали ТАТ-8.

Ее сравнение с первой подводной кабельной линией на металлическом кабеле ТАТ-1 (1956 г.) показало, что стоимость одного канала уменьшилась в 100 раз. Это обстоятельство привело к тому, что генеральным направлением последующего десятилетия явилось построение стремительными темпами сверхпротяженных подводных и подземных ВОСП. Кроме трансатлантических и транстихоокеанских магистралей следует выделить магистраль ТАЕ (Trans Asia Europe), проходящую по «шелковому пути», подводную магистраль FLAG (Fiber Optic Link Around the Globe — волоконно-оптическая линия связи земного шара) и SEA-ME-WE-3 (South-East Asia-Middle East-East-Western Europe — линия связи Юго-Восточная Азия — Ближний Восток — Западная Европа).

Вторая половина 1990-х годов характеризуется вхождением России в мировое телекоммуникационное пространство. В последние годы значительно расширилось строительство ВОЛС в Российской Федерации. Проложены сотни коммерческих ВОСП на импортных комплектующих, ведущие предприятия кабельной промышленности развернули производство высококачественных ОК, не уступающих аналогичным зарубежным образцам, но значительно дешевле. В 2000 г. Россия полностью прекратила закупки ОК за рубежом.

Но главным достижением этого периода явилось сооружение Трансроссийской линии связи (ТЛС) в несколько этапов. В 1993 г. был создан Западный комплекс международной связи Россия — Дания (Москва — Санкт-Петербург — Копенгаген). В 1995 г. на Дальнем Востоке были введены две линии, соединившие г. Находка с г. Наоэцу (Япония) и г. Пусан (Ю. Корея). В 1996 г. было закончено строительство Южного комплекса международной связи Россия — Украина — Турция — Италия (Москва — Ростов-на-Дону — Новороссийск — Стамбул — Палермо). В том же году введен в эксплуатацию Центральный комплекс связи Москва — Хабаровск.

В 1999 г. было закончено строительство последнего, очень сложного участка ТЛС Новосибирск — Хабаровск, состоящего из подземного и подвешного ОК. Трансроссийская линия связи представляет собой комплекс современных цифровых ВОСП, резервируемых в большей части радиорелейными линиями. Транс-

российская линия связи вошла в состав мировой межнациональной сети и замкнула глобальное кольцо цифровой связи.

Трасса мировой межнациональной сети проходит через четыре континента — Европу, Азию, Америку, Австралию — и три океана — Атлантический, Тихий и Индийский.

На рубеже веков использование ОК в сетях распределения и местных сетях заметно возросло. Так, в 1997 г. смонтированная длина ОВ распределялась между информационными сетями различного назначения следующим образом: дальняя связь — 37 %, сети распределения и местные сети — 30 %, кабельное телевидение — 17 %, другие применения одномодового и многомодового — ОВ соответственно — 7 и 9 %. Данные 2002 г.: дальняя связь 21 %, сети распределения и местные сети — 55 %, кабельное телевидение — 8 %, другие применения одномодового и многомодового ОВ соответственно — 6 и 10 %. При этом необходимо учитывать, что общая длина смонтированного ОК в мире и в Европе увеличивается в среднем на 15 % в год: 1997 г. — 38 и 5,7 млн. км, 2002 г. — 77 и 12,2 млн. км соответственно.

Дальнейшее развитие ВОСП, по мнению специалистов, будет происходить в двух основных направлениях.

Первое — разработка и внедрение в сетях различного назначения новых волоконно-оптических технологий, направленных на повышение эффективности ВОСП. На линиях дальней связи основное внимание по-прежнему будет уделяться повышению скорости передачи информации, увеличению длины регенерационных участков и повышению надежности. Широкое распространение получат промежуточные оптические усилители и методы волнового (спектрального) мультиплексирования (см. ниже). Доминирующей особенностью развития волоконно-оптических технологий в местных и локальных сетях будет приближение ОВ к конечному пользователю сети (абоненту).

Рост потребности в новых видах информационного обслуживания индивидуальных абонентов, а также совершенствование и постоянное снижение стоимости аппаратуры и средств коммутационной техники готовят окончательный переход сетей доступа на ОВ. Ведущая роль в этом процессе принадлежит сети Internet. По оценкам средний объем потока информации в расчете на одного пользователя сети увеличивается ежегодно в восемь

раз. Постоянно появляются новые виды услуг. Это выдвигает повышенные требования к скорости передачи информации в сетях доступа, удовлетворить которые можно только с помощью ОВ.

Второе направление развития ВОСП — это создание линий передачи, в которых используются нелинейные свойства ОВ, обеспечивающие *солитонный режим распространения*. Импульс лазерного луча состоит из набора волн, несколько отличающихся по частоте. При распространении этого импульса по ОВ в линейном режиме низкочастотные волны обгоняют высокочастотные, и форма импульса изменяется. В нелинейном режиме работы ОВ высокочастотные волны «догоняют» низкочастотные. Происходит самосжатие импульсов и формирование оптических солитонов, которые характеризуются замечательным свойством распространяться без изменения формы и длительности. В таких ВОСП можно достичь скорости передачи, равной десяткам гигабит в секунду при длине регенерационного участка до 1000 км.

4.2 Проблемы увеличения пропускной способности ВОСП

На данный момент протяженность проложенных во всем мире стандартных одномодовых волокон весьма велика, поэтому перед многими владельцами систем на их основе встает вопрос о том, как можно модернизировать систему, чтобы ее пропускная способность соответствовала современным требованиям. Один из путей — привлечение оптических технологий и построение магистралей на основе технологии полностью оптических сетей (PON), что делает возможным значительно повысить экономичность, гибкость и надежность сетей и, самое главное, значительно увеличить пропускную способность, не переоборудуя существующие кабельные системы.

Повысить пропускную способность волоконно-оптической линии связи можно с помощью увеличения битовой скорости или путем добавления каналов с несколькими длинами волн, т.е. построения систем, обеспечивающих спектральное мультиплексирование WDM (Wave Division Multiplexing) или, иначе, мультиплексирование по длине волны. Ввод в действие систем WDM продиктован экономическими соображениями, поскольку гораздо

дешевле заменить терминальное оборудование, чем прокладывать новые кабели и устанавливать дополнительные регенераторы.

Суть WDM заключается в том, что независимые оптические информационные потоки объединяются и передаются по одному волокну на разных длинах волн (рис. 4.1). Это значит, что операторы связи могут увеличить пропускную способность своих волокон без серьезных капиталовложений, связанных со строительством или арендой новых волокон. Передавая сигналы на n длинах волн (т.е. по n каналам), можно увеличить пропускную способность сети в n раз.

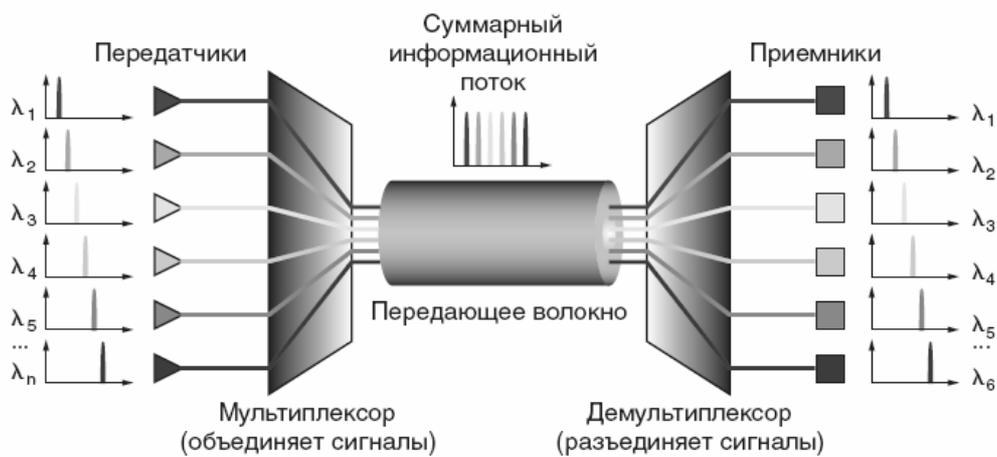


Рис. 4.1 — Принцип WDM

Оценим пропускную способность оптического диапазона 1280–1620 нм. Полоса частот во 2, 3, 4-м окнах прозрачности $\Delta F = 49,2$ ТГц. При межканальном интервале 100 ГГц можно организовать 492 канала. Если использовать аппаратуру со скоростью передачи 2,5 Гбит/с в каждом канале, то суммарная пропускная способность составит $B \approx 1230$ Гбит/с, а при использовании скорости 10 Гбит/с получим почти 5 Тбит/с.

Для строительства волоконно-оптических систем следующего поколения, использующих технологию WDM, как нельзя лучше подходят новые оптические волокна с малой дисперсией, предоставляя массу возможностей по дальнейшей модернизации и эффективному использованию полосы пропускания. Например, часть каналов можно задействовать под передачу аналогового видео, часть — под передачу данных, а часть — для речи. Распределение различных сервисов по волновым диапазонам, несо-

мненно, имеет свои преимущества, и все больше операторов начинают осознавать это.

Практически ни у кого сегодня не возникает сомнений, что будущее — за системами WDM.

4.3 ОВ в СКС

Международный стандарт ISO/IEC 11801 установил, что в СКС используются лишь симметричные электрические кабели и волоконно-оптические кабели, и определил электромагнитные характеристики СКС по ширине полосы пропускания. В параграфе 2.4 были рассмотрены электрические кабельные линии. Этот параграф посвящен ВОЛС, используемым в СКС [19].

К основным преимуществам ВОЛС по сравнению с электрическими линиями связи в СКС можно отнести:

- высокую пропускную способность и быстродействие;
- высокую помехозащищенность. В промышленности и природе отсутствуют источники электрического и магнитного поля такой напряженности, которая способна изменить условия распространения светового импульса в ОВ;

- малое затухание сигналов. Если для сетей максимальная рекомендуемая длина медного кабеля составляет 100 м, то для волоконно-оптического кабеля это 2000 м и более. Недостатком медного кабеля является увеличение потерь с ростом частоты сигнала. В витой паре затухание на 100 МГц выше, чем на 10 МГц. Это означает, что при более высокой скорости передачи увеличиваются потери мощности сигнала и уменьшается реальное предельное расстояние. В ОК потери не увеличиваются с ростом частоты сигнала. На рис. 4.2 показано соотношение между частотой сигнала и затуханием для медного и волоконно-оптического кабеля.

Для поддержки различных классов приложений специфицированы 4 типа ОВ: три типа многомодовых градиентных ОВ, имеющих размеры $50\pm 3/125\pm 2$ мкм или $62,5\pm 3/125\pm 2$ мкм, — *OM1*, *OM2*, *OM3* и один тип одномодового ОВ — *OS1*. Максимально допустимое ослабление ОК в СКС составляет для *OM1*, *OM2*, *OM3* на длине волны 850 нм 3,5 дБ/км, на длине волны 1300 нм — 1,5 дБ/км, а для ООВ *OS1* — 1 дБ/км.

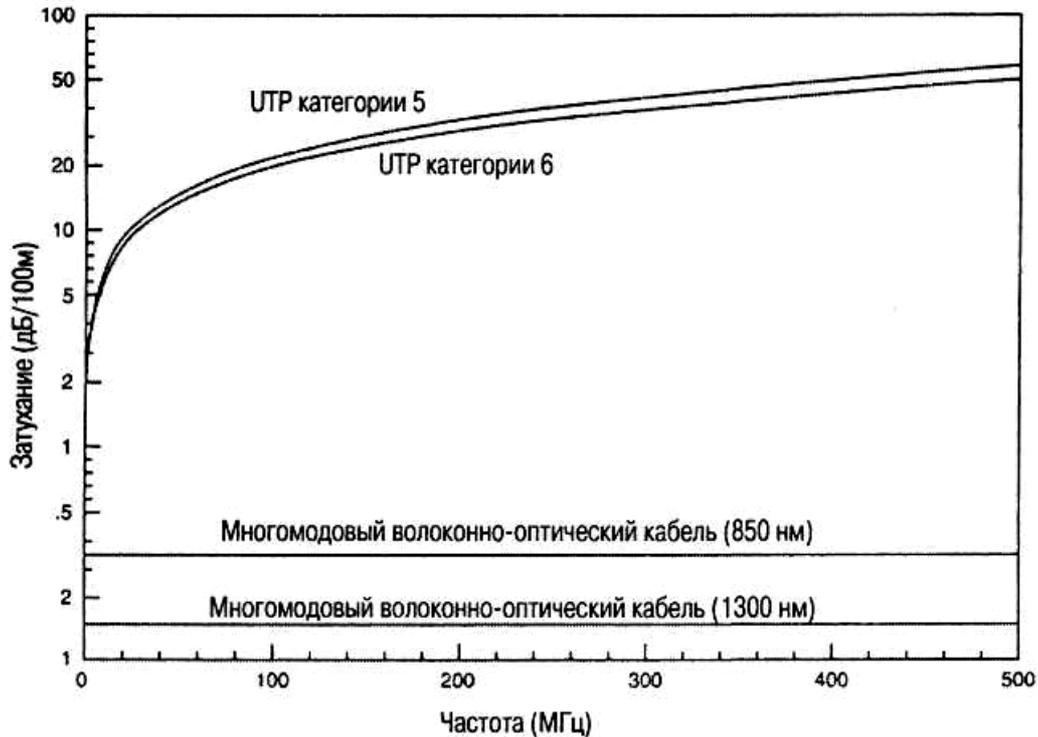


Рис. 4.2. — Затухание и частота для волоконно-оптического кабеля и кабеля UTP

Большая числовая апертура позволяет применять не только ЛД, но и СИД. Значение числовой апертуры NA лежит в пределах приблизительно $0,2 \div 0,3$. Это означает, что угол раскрытия конуса лучей, то есть угловая апертура, составляет $23\text{--}35^\circ$.

В СКС, построенной в соответствии со стандартом ISO/IEC, в случае наихудшего окна прозрачности ($0,85\text{ мкм}$) и канала наибольшей длины (2000 м) ослабление не превышает $8,50\text{ дБ}$. Активное же оборудование, как правило, нормально работает при $11 \div 15\text{ дБ}$. Таким образом, СКС способна обеспечить гарантированно работу любого оборудования.

Минимально допустимый стандартом коэффициент широкополосности многомодовых ОВ класса $OM1$, $OM2$ и $OM3$ на длине волны 850 нм составляет, соответственно, 200 , 500 и $1500\text{ МГц}\cdot\text{км}$, а на длине волны 1300 нм — $500\text{ МГц}\cdot\text{км}$ при использовании СИД.

Рынок СКС с начала 1990-х гг. стремительно рос благодаря появлению новых Интернет-приложений, а также расширению уже существующих локальных сетей и потребности в скоростях

передачи, превышающих 1 Гбит/с. При этом естественно увеличение спроса на применение ОВ в СКС, так как только ВОЛС способны поддерживать скорость до 10 Гбит/с, необходимую для информационных центров ЛВС.

4.4 Волоконно-оптические датчики

Современные волоконно-оптические датчики позволяют измерять почти все. Например, давление, температуру, расстояние, положение в пространстве, скорость вращения, скорость линейного перемещения, ускорение, колебания, массу, звуковые волны, уровень жидкости, деформацию, коэффициент преломления, электрическое поле, электрический ток, магнитное поле, концентрацию газа, дозу радиационного излучения и т.д. [20].

Помимо высоких метрологических характеристик датчики должны обладать высокой надежностью, долговечностью, стабильностью, малыми габаритами, массой и энергопотреблением, совместимостью с микроэлектронными устройствами обработки информации при низкой трудоемкости изготовления и небольшой стоимости. Этим требованиям в максимальной степени удовлетворяют волоконно-оптические датчики.

Основными элементами волоконно-оптического датчика являются оптическое волокно, светоизлучающие (источник света) и светоприемные устройства, оптический чувствительный элемент.

В истории волоконно-оптических датчиков трудно зафиксировать какой-либо начальный момент в отличие от истории волоконно-оптических линий связи. Первые публикации о проектах и экспериментах с измерительной техникой, в которой использовалось бы оптическое волокно, начали появляться с 1973 г.

К 1978 г. число исследований и разработок в Японии и других странах стало уже ощутимым. Однако в публикациях 1970-х годов термин «волоконно-оптический датчик» еще не был общепринятым. В японской технической литературе этого периода чаще всего использовался термин «измеритель на основе оптических волокон», а в статьях на английском языке — «оптический датчик на волокне». Лишь в 1981 г. термин волоконно-оптический датчик» признан всеми и окончательно утвердился после со-

стоявшейся в 1982 г. в Лондоне первой международной конференции по волоконно-оптическим датчикам.

Если классифицировать волоконно-оптические датчики с точки зрения применения в них оптического волокна, то, как уже было отмечено выше, их можно грубо разделить на датчики, в которых оптическое волокно используется в качестве линии передачи, и датчики, в которых оно используется в качестве чувствительного элемента.

В датчиках типа «линии передачи» используются в основном многомодовые оптические волокна, а в датчиках сенсорного типа чаще всего — одномодовые.

Волоконно-оптические датчики используют:

1) Изменение характеристик волокна (рис. 4.3, *а*) при механическом воздействии. При этом используются такие физические явления, как эффект Фарадея, эффект Керра.

2) Изменение параметров передаваемого света (рис. 4.3, *б*).

3) Преобразование «физическая величина — свет». Чувствительным элементом может быть как сам измеряемый объект, так и специальный элемент, прикрепляемый к нему (рис. 4.3, *в*).

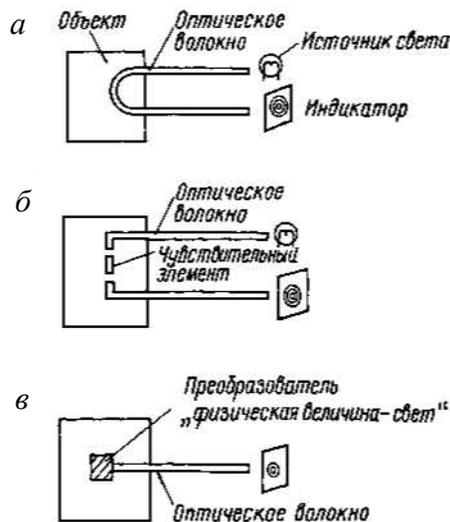


Рис. 4.3 — Классификация основных структур волоконно-оптических датчиков:

а — с изменением характеристик волокна.

Используемые физические явления: эффект Фарадея, эффект Керра, изменение давления, радиация.

Материал — люминесцентное волокно;

б — с изменением параметров передаваемого света;

в — с чувствительным элементом на торце волокна

Волоконно-оптические технологии используются в приборах: определения давления, температуры, загрязнений, магнитных и электрических полей, ускорений и т.д. Волоконно-оптические гироскопы очень надежны, так как у них нет движущихся частей.

4.5 Технологии, использующие оптическое волокно

Волоконная оптика претерпевает бурное развитие и существенно влияет на технический прогресс. На рис. 4.4 изображены в виде дерева области применения волоконной оптики и решаемые

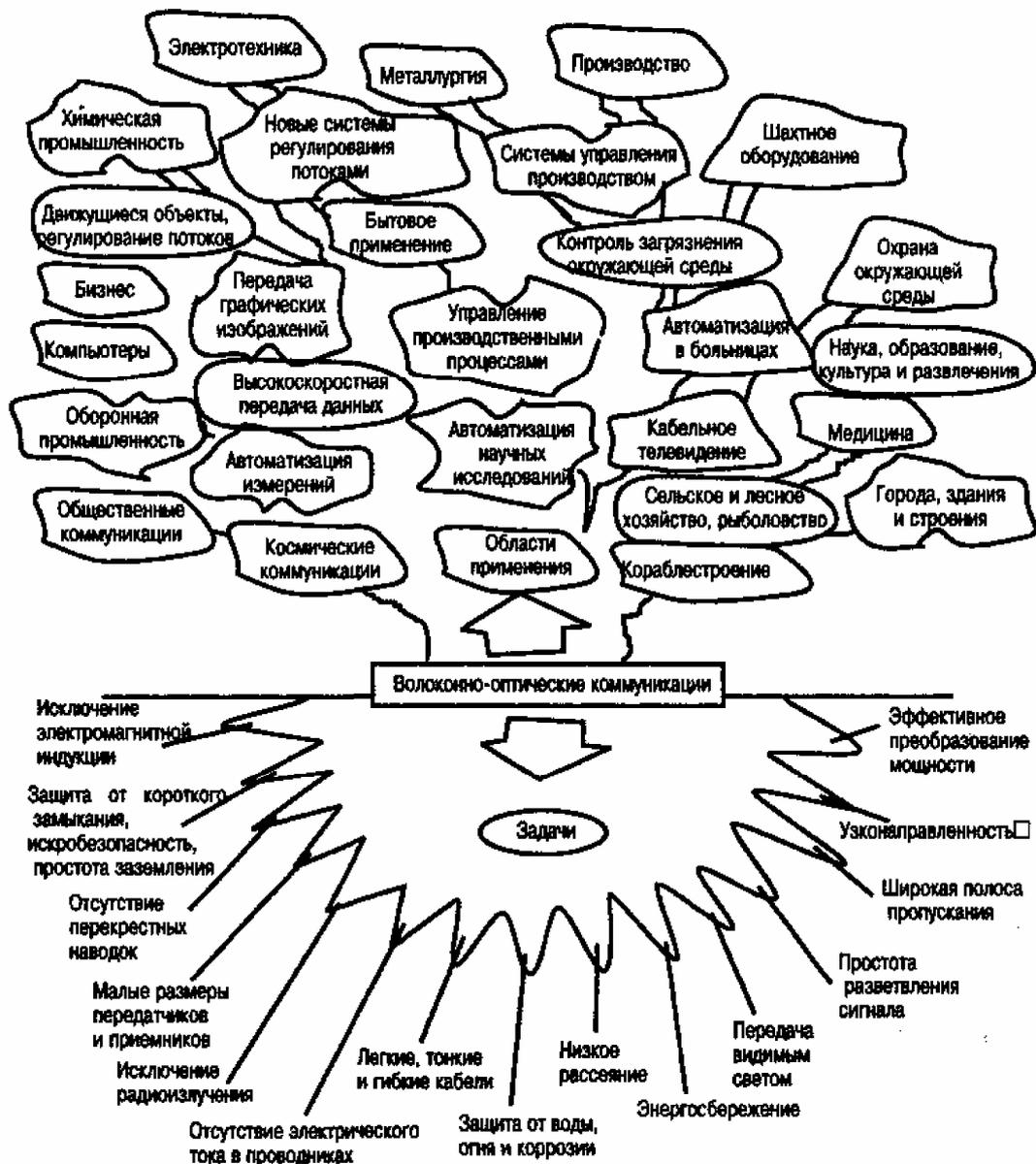


Рис. 4.4 — Применение волоконной оптики

ею задачи. Ветви дерева представляют собой основные направления использования, а причины применения именно волоконной оптики показаны в виде питающих дерево корней [12]. Из рисунка видно, что волоконная оптика используется в различных областях, и на это имеются, как описано выше, важные причины, заключающиеся в уникальных свойствах самого ОВ.

Волоконная оптика является новой технологией, только начинающей свое развитие, но уже доказана необходимость ее применения как среды передачи для различных прикладных задач, а характеристики волоконной оптики позволят в будущем существенно расширить область ее применения.

Глава 5. ЭТАПЫ СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ НАШЕГО УНИВЕРСИТЕТА

5.1 Краткая история становления и развития ВУЗа

Истоки. Создание в Томске вуза радиотехнического профиля, первого и единственного на Востоке страны, было подготовлено развитием радиотехнического образования в Томском политехническом институте (ТПИ, ныне ТПУ) и радиофизического — в Томском государственном университете (ТГУ). Еще в 1923 г. по инициативе академика В.Д. Кузнецова в ТГУ была начата подготовка специалистов по электромагнитной специализации, преподаватели и студенты которой совместно с сотрудниками Нижегородской радиолaborатории исследовали распространение коротких радиоволн на длинных трассах. Созданная профессором В.Н. Кессенихом в 1925 г. Ионосферная лаборатория в существенной степени способствовала радиофикации Западно-Сибирского региона и Востока страны. В 40-х годах прошлого века в Томске сформировалась достаточно серьезная группа специалистов в области радиоэлектроники: профессора ТГУ В.Н. Кессених, А.Б. Сапожников (под руководством которого был разработан первый электромагнитный дефектоскоп для контроля линий Московского метрополитена); доценты ТГУ В.И. Иванчиков, Б.П. Кашкин; сотрудники кафедры электросвязи в Томском электромеханическом институте инженеров железнодорожного транспорта (ТЭМИИТе, впоследствии переведенном в г. Омск), возглавляемой Заслуженным деятелем науки и техники, профессором П.А. Азбукиным; солидная научная школа электроэнергетиков в ТПИ. Вторая мировая война показала, что без ускоренного развития военной радиоэлектроники государство не сможет обеспечить свою безопасность. Еще шли ожесточенные бои в Восточной Пруссии, когда в марте 1945 г. вышло Постановление Всесоюзного комитета по делам высшей школы при Совете народных комиссаров СССР об открытии в ТПИ электрофизического факультета (ЭФФ).

Причинами появления Постановления были:

1) уроки Великой Отечественной войны, свидетельствовавшие о необходимости ускоренного развития оборонного ком-

плекса на Востоке страны;

2) наличие ТПИ, как хорошо зарекомендовавшей себя кузницы инженерных кадров;

3) наличие в Томске кадрового потенциала для быстрой реализации задач массовой подготовки инженеров нужного профиля.

В составе ЭФФ были организованы кафедры радиотехники, кабельной техники, электровакуумной техники. Этим кафедрам была поручена подготовка инженеров соответствующих специальностей. Организация кафедры радиотехники положила начало формированию первой радиотехнической школы в азиатской части Союза. Первым заведующим кафедрой радиотехники был Р.М. Шевчук (выпускник ТГУ). К подготовке радиоинженеров были привлечены выпускники ТГУ (Е.Н. Силов, И.А. Суслов, А.И. Лихачев и др.), а также специалисты ведущих Московских и Ленинградских вузов (В.Н. Панов, Б.В. Извозчиков, Л.С. Гуткин, Е.И. Фиалко, К.М. Шульженко, И.Ш. Соломоник и др.). Этот коллектив в дальнейшем пополнялся выпускниками ТПИ и ТГУ.

Радиотехнический факультет (РТФ). В 1950 г. по инициативе ректора ТПИ профессора А.А. Воробьева электрофизический факультет был разделен на два факультета — физикотехнический (ФТФ) и радиотехнический (РТФ). Деканом РТФ был назначен доцент В.Н. Титов. С первых дней существования РТФ его отличительной особенностью стало целенаправленное сочетание подготовки студентов с выполнением научно-исследовательских работ в интересах народного хозяйства и обороны страны. Это сочетание позволило РТФ быстро создать квалифицированный кадровый состав (первыми аспирантами РТФ, а затем и кандидатами наук, стали его выпускники — Е.В. Падусова, Г.С. Зубарев., Ф.И. Перегудов), материальную базу для обеспечения учебного процесса и для проведения научных исследований и разработок на должном уровне. Обучение студентов на основе решения актуальных задач народного хозяйства и обороны страны позволяло выпускникам РТФ непосредственно после окончания вуза активно включаться в производственную и научную деятельность.

К началу 1960-х годов РТФ стал весьма известным коллективом. За его плечами отлаженный процесс массовой подготовки

квалифицированных специалистов, отлично зарекомендовавших себя не только в Сибири, но и во всей стране, решение ряда важнейших научно-технических и производственных задач. К этому времени специалисты РТФ разработали и внедрили первые высокоточные фазовые разностно-дальномерные навигационные системы для проводки кораблей в проходах минных полей (руководители — И.А. Суслов, И.А. Веселков); разработали основы надежной скрытой связи за счет отражения радиоволн УКВ диапазона от метеорных следов (руководитель — Е.И. Фиалко); создали и внедрили комплекс телевизионных радиопередающих центров для ряда городов Сибири и Средней Азии (руководитель — В.С. Мелихов). РТФ готовит специалистов уже по пяти специальностям и выполняет крупные научно-исследовательские работы по заданиям Правительства. Факультету стало «тесно» в стенах ТПИ и (по инициативе Ф.И. Перегудова) был поставлен вопрос об организации на базе РТФ нового томского вуза радиоэлектронного профиля.

Организация и становление вуза. Томский институт радиоэлектроники и электронной техники (ТИРеЭТ) был организован 12.05.1962 г. Ректором ТИРеЭТ был утвержден Григорий Семенович Зубарев. Проректорами ТИРеЭТ были назначены: по научной работе — Всеволод Сергеевич Мелихов, по учебной работе — Гений Иванович Левашкин. В составе ТИРеЭТа было четыре факультета: радиотехнический (РТФ), радиоуправления (РУФ), электронной техники (ФЭТ), вечернего и заочного обучения (ВиЗФ).

В ТИРеЭТ из ТПИ были переведены:

1) все студенты РТФ и студенты специальности «Радиоуправление» с факультета электрорадиоуправления (всего 1535 студентов очного обучения и 479 студентов вечернего и заочного обучения);

2) полностью или частично кафедры теоретических основ радиотехники (зав. каф. К.М. Шульженко), конструирования и производства радиоаппаратуры (зав. каф. П.П. Болтрукевич), радиоприемных устройств (зав. каф. Г.С. Шарыгин), радиопередающих устройств (зав. каф. И.Н. Пустынский), радиоуправления (зав. каф. Х.С. Бакшт, бывший командир первой импульсной ра-

диоолокационной станции, работавшей на Ленинградском фронте), промышленной электроники (зав. каф. И.В. Шипунов), электронных приборов (зав. каф. Д.А. Носков), диэлектриков и полупроводников (зав. каф. А.М. Трубицын).

В момент организации в ТИРиЭТе было 58 преподавателей, в том числе только 18 кандидатов наук и ни одного профессора [4].

В течение первого года в ТИРиЭТе был создан ряд новых кафедр: 1) сверхвысоких частот (зав. каф. Е.С. Коваленко); 2) электрорадиоизмерений (зав. каф. Е.Н. Силов), 3) деталей и узлов точных механизмов (зав. каф. Ю.А. Жулев), 4) физики (зав. каф. Э.А. Аринштейн), 5) прикладной механики (зав. каф. В.М. Мостовой), 6) высшей математики (зав. каф. С.П. Кузнецов), 7) химии (зав. каф. В.Г. Столярчук), 8) теоретических основ электротехники (зав. каф. А.П. Левдикова), 9) начертательной геометрии и черчения (зав. каф. Г.Г. Гайнутдинов), 10) экономики и организации производства (зав. каф. О.П. Володина), 11) иностранных языков (зав. каф. Д.А. Фугенфирова), 12) диалектического и исторического материализма и политэкономии (зав. каф. Г.М. Иванов), 13) физического воспитания и спорта (зав. каф. А.И. Иванов), 14) специальной (военной) подготовки (зав. каф. С.И. Максимов). В конце 1962 г. на кафедрах работали 131 человек.

Становление нового вуза шло в сложных условиях. ТИРиЭТу было передано всего около 3000 м² площадей (это позволяло обеспечить учебный процесс только 3-сменной работой) и одно небольшое студенческое общежитие по пр. Кирова 22 (в комнатах, рассчитанных на 3–4 человека, жили до 12 студентов). Острая нехватка для реализации уставных функций нового вуза общежитий, площадей, оборудования, фонда учебно-научной литературы, необходимость завершения реконструкции главного корпуса — далеко не полный перечень первоочередных задач, которые требовали немедленного решения. В такой ситуации была необходима четкая организация и мобилизация администрации нового вуза и всего коллектива на решение этих и сопутствующих им задач.

Для решения стоящих перед новым вузом задач потребовалось не только запустить в работу сложный механизм вуза, но и решить ряд социальных и градостроительных проблем. Именно благодаря инициативе Г.С. Зубарева вместо заболоченной окраи-

ны студенты Томска и все томичи имеют самый престижный район города (от ОАО «Реатон» до площади Южной и до Лагерного сада), комплекс учебных корпусов и студенческих общежитий на пл. Южная. Решение этих проблем требовало от Г.С. Зубарева постоянного и продуктивного взаимодействия с местными и центральными органами власти. О высокой эффективности этого взаимодействия свидетельствуют, в частности, два факта. Уже в начале 1963/64 учебного года учебные площади ТИРиЭТ достигли 10000 м², что позволило перейти в основном на односменное обеспечение учебного процесса, а в 1967–1968 гг. были запущены в эксплуатацию 2 девятиэтажных общежития на пл. Южная, полностью решившие 100 % обеспечение общежитием студентов ТИРиЭТа. Практически весь преподавательский коллектив к этому же времени был обеспечен благоустроенным жильем. Это создало нормальные условия для работы студентам и стабильность кадрового состава молодых преподавателей, гарантирующих стабильное развитие вуза, и позволило перейти к следующему этапу работы, связанному с ростом квалификации молодого преподавательского состава и с дальнейшим повышением уровня и качества научно-исследовательских работ. Был разработан и утвержден Министерством генеральный план строительства ТИРиЭТ. Он включал строительство на берегу Томи главного корпуса с бетонированной террасой до берега Томи, корпуса радиотехнического факультета (РТК), корпуса факультета электронной техники (корпус ФЭТ), корпуса конструкторско-технологического факультета (корпус КТФ). Началось строительство корпусов РТФ и ФЭТ.

Развитие специализированного вуза требовало определения стратегических целей с учетом мировых тенденций в современной радиоэлектронике. Такая задача была поставлена Г.С. Зубаревым и решена Ф.И. Перегудовым. По предложению Феликса Ивановича Перегудова, энергично поддержанному Г.С. Зубаревым, Советом ТИРиЭТ было принято дерево целей вуза. Оно требовало дополнения и уточнения сфер деятельности с учетом развития и внедрения вычислительной техники, автоматизации управления не только технических, но и административных, управленческих, хозяйственных и социальных систем. Название и структура вуза стали не полностью соответствовать дереву це-

лей. Для устранения этого несоответствия были открыты кафедры, обеспечивающие новое направление в деятельности вуза: технической кибернетики, физической электроники, оптимальных и адаптивных систем управления, конструирования и производства электронно-вычислительной аппаратуры. Это послужило причиной изменения названия вуза.

В 1971 г. ТИРиЭТ был переименован в Томский государственный институт автоматизированных систем управления и радиоэлектроники (ТИАСУР).

За первые 10 лет существования нового института:

- выпущено около 5000 инженеров (в т.ч. 95 получили дипломы с отличием);
- процент преподавателей высшей квалификации со степенями и званиями вырос с 13,7 % до 35,6 % (было подготовлено 105 кандидатов и 4 доктора наук);
- в 10 раз увеличился объем научно-исследовательских работ (с 235 до 2523 тыс. руб., в основном за счет хоздоговорных работ);
- создана Проблемная лаборатория радиотехнических систем и телевизионной автоматики (руководители Г.С. Шарыгин и И.Н. Пустынский);
- построен и сдан в эксплуатацию радиотехнический корпус (РТК) с блоком военной кафедры (18700 м²), начато строительство корпуса факультета электронной техники (ФЭТ) с современным аудиторным блоком.

Вуз прочно закрепился в первой десятке технических вузов страны (занимал 1–3 места в социалистическом соревновании вузов СССР). Закончился первый, «революционный», период в жизни вуза.

Второй, «эволюционный», этап жизни вуза связан с расширением и совершенствованием всех сфер деятельности, повышением квалификации преподавательского состава, с улучшением материального и методического обеспечения учебного процесса, с повышением качества, значимости и уровня внедрения результатов НИР. Не очень удобный для руководства области, неумный в своих планах Г.С. Зубарев больше был не нужен (вкладывая в организацию работы вуза все свои ресурсы по времени и по способностям, он не защитил докторской диссертации). Ставший

передовым вуз, по мнению руководства области, должен был возглавлять доктор наук.

Вторым ректором ТИАСУРа (1972–1981 гг.) был назначен участник войны, выпускник ТПИ, **профессор, доктор технических наук И.П. Чучалин**, имевший опыт работы секретаря парткома ТПИ.

В 1972 г. для расширения подготовки специалистов нового профиля в состав ТИАСУРа из ТПИ был переведен Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики (НИИ АЭМ). Руководителем НИИ АЭМ в 1974 г. был назначен Главный конструктор Автоматизированной системы управления Томской области (АСУ ТО) **Феликс Иванович Перегудов** (руководитель нового научного направления «Разработка теории и методов проектирования автоматизированных систем управления организационного типа»). Этот период жизни вуза связан с бурным развитием нового направления по подготовке специалистов в области АСУ, с дальнейшим ростом квалификации профессорско-преподавательского состава и сотрудников научно-исследовательского сектора, с расширением, укрупнением и повышением значимости, результативности внедрения научных разработок.

Решению главной задачи на втором этапе жизни вуза — интенсификации работ по частичной переориентации работы на подготовку квалифицированных специалистов по автоматизированным системам управления — способствовало **назначение в 1981 г. ректором ТИАСУРа Феликса Ивановича Перегудова**. Он смог в очень короткий срок поднять на достойный вуза уровень не только учебный процесс в этом направлении, но и комплексировать его с фундаментальными и важными прикладными разработками АСУ, с развитием традиционных сфер работы ТИ-РиЭТа, с подготовкой кадров высшей квалификации. Об этом свидетельствуют и присуждение в 1983 г. Ф.И. Перегудову Премии СМ СССР за работы в области АСУ и за создание Вычислительного центра коллективного пользования (для ВЦКП было построено специальное здание), и регистрация в 1984 г. первого научного открытия, сделанного в ТИАСУРе — «Явление взрывной электронной эмиссии» (С.П. Бугаев, Г.А. Месяц, Д.И. Проскуровский). Частично работы, начатые при ректоре Ф.И. Перегудове, получили признание в более поздние годы:

– в 1987 г. премия Ленинского комсомола была присуждена молодому сотруднику кафедры радиотехнических систем (РТС) В.Л. Гулько за работы в области поляризационной радиолокации;

– в 1988 г. за разработку и внедрение технологических электронно-лучевых систем с плазменным эмиттером присуждена Государственная премия РСФСР группе сотрудников вуза (В.А. Груздев, Н.Г. Ремпе и др.);

– в 1993 г. Государственная премия РФ за цикл работ по созданию корреляционно-экстремальных систем навигации присуждена группе ученых вуза (В.П. Тарасенко, В.И. Алексеев и др.);

– в 1999 г. зарегистрировано научное открытие «Закономерность пробоя твердого диэлектрика на границе с жидким диэлектриком при действии импульса напряжения» (Г.А. Воробьев — ТУСУР, А.А. Воробьев и А.Т. Чепиков — ТПИ), которое нашло широкое применение в нефтедобывающей промышленности. Благодаря Ф.И. Перегудову (кроме постройки ВЦКП) начато строительство двух модулей (в одном из них — Технопарк, во втором был инженерный центр по внедрению наукоемких разработок вуза).

В 1984 г. Ф.И. Перегудов был назначен первым заместителем министра высшего и среднего образования РСФСР (а в 1985 г. — первым заместителем председателя Государственного комитета СССР по народному образованию, министром СССР). **Ректором ТИАСУРа стал Иван Николаевич Пустынский.** Завершение второго этапа развития ТИАСУРа попало на труднейший период жизни нашего государства вообще и высшей школы в частности. На долю И.Н. Пустынского достался самый горький период в жизни вуза. Рухнуло производство, особенно в военно-промышленном комплексе, на который в основном работал вуз. Рухнули оборонные заказы, составлявшие основу внебюджетных доходов, почти прекратилось бюджетное финансирование. Институт оказался на грани выживания. Но в его недрах на кафедре Промышленной электроники (ПрЭ) заведующим кафедрой **Анатолием Васильевичем Кобзевым** (не без помощи министра СССР Ф.И. Перегудова.) было посеяно зерно, давшее впоследствии благодатные всходы. В порядке исключения, в виде экономического эксперимента кафедре ПрЭ была разрешена организация учебно-научного кооператива. Работа этого предприятия под

руководством талантливого менеджера, каким оказался А.В. Кобзев, придала второе дыхание сначала кафедре ПрЭ, затем — другим кафедрам, сотрудничавшим с ней по работам с внебюджетным финансированием, а затем — и всему вузу.

Начался третий период жизни вуза — работа в новых экономических условиях.

В 1993 г. ТИАСУР переименован в Томскую государственную академию систем управления и радиоэлектроники (ТАСУР). Это было связано с изменением статуса (а соответственно, и бюджетного финансирования) государственных вузов разного типа (для перехода в новый статус ТИАСУР прошел соответствующую аттестацию министерства). Отчасти это связано с возможностью расширения организационной структуры вуза. Последнее было необходимо для выживания вуза и для адаптации подготовки его выпускников к новым условиям изменившегося рынка труда. Потребность адаптации к новому рынку труда породила открытие ряда новых специальностей, особенно для факультетов, традиционно ориентированных на военно-промышленный комплекс. Дальнейший шаг в этом направлении был сделан в 1997 г., когда ТАСУР вновь прошел государственную аттестацию и аккредитацию и **был переименован в Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР),** т.е. получил наивысший статус среди государственных вузов РФ. ТУСУР подготовку специалистов технического профиля дополнил подготовкой квалифицированных специалистов гуманитарного профиля на современной технической базе.

Огромное значение в адаптации вуза к новым экономическим условиям сыграла инициатива А.В. Кобзева и В.А. Бондаря по созданию при ТУСУРе в 1998 году *Томского межвузовского центра дистанционного образования (ТМЦДО).* Четко уловив экономические перспективы коммерциализации обучения, социальные и транспортные сложности желающих получить высшее образование и возможности работы вуза с привлечением современных систем телекоммуникаций, они реализовали современную систему дистанционного высшего образования.

Наряду с взаимовыгодным (для студентов и для вуза) процессом обучения *ТМЦДО дал недостижимый ранее для вуза ре-*

зультат — стопроцентное учебно-методическое и программное обеспечение учебного процесса своей новой учебной и методической литературой. Последнее обстоятельство по иному заставило взглянуть на основные проблемы, связанные с перегрузкой студентов традиционной очной формы обучения обязательными учебными занятиями. На повестку дня вуза встали вопросы повышения роли самостоятельной работы студентов в процессе обучения и адаптации работы вуза к потребностям современного рынка труда в специалистах, способных организовывать и вести собственный бизнес. Несколько позднее итогом этого стали переход на рейтинговую систему оценки работы студентов и организация в 2004 г. нового структурного подразделения вуза — Межвузовского студенческого бизнес-инкубатора.

В 1999 г. ректором ТУСУРа был избран Анатолий Васильевич Кобзев. Последний год двадцатого столетия стал первым годом работы новой администрации ТУСУРа, сформированной А.В. Кобзевым. В основу ее деятельности положен стратегический план развития университета. Особенность бюджета ТУСУРа, принятого на 2000 г., заключалась в наличии специального раздела — «Программа развития университета», которая представлялась в то время просто фантастической после почти десятилетнего периода стагнации и разрухи. На социальное развитие, на создание корпоративной сети, отделения фундаментального образования, экономического факультета, центров языковой подготовки, дополнительного образования, на развитие спорта и досуга студентов планировалось истратить 3,6 млн. рублей. Аналогичные планы развития были приняты (и выполнены!) на суммы 5,8 млн. руб. и 15,7 млн. руб. соответственно в 2001 г. и 2002 г.

Главной задачей вуза новая администрация поставила сохранение динамики развития по всем видам деятельности на основе идеи «большого» университета, основные элементы современной структуры которого приведены в Приложении 1.

Сегодня в ТУСУРе более 16 тысяч студентов. Обеспеченность студентов учебной литературой, учебно-методическими и программными продуктами приближается к 100 %. ТМЦДО превратился в высокотехнологическое, высокорентабельное производство. Он имеет 120 представительств в России и странах СНГ. Филиальная сеть ТУСУРа имеет 14 лицензированных филиалов.

Завершено создание корпоративной сети ТУСУР, в которой оптоволоконными коммуникациями связаны все корпуса и общежития университета. В ТУСУРе (с учетом филиалов) один компьютер обслуживает не более двух студентов. Возрождена художественная самодеятельность. Работают около 20 клубов по интересам.

Система «ВУЗ-НИИ» в ТУСУРе включает 15 НИИ и малых высокорентабельных предприятий, работающих в сфере наукоемкого производства. Уже в 2002 г. годовой доход ТУСУРа (12 млн. долларов) превысил максимальный доход вуза (11 млн. долларов), имевшийся в середине 80-х годов прошлого века. В ближайшие годы ставится задача сделать ТУСУР вузом-миллиардером. Немаловажная роль в решении этой задачи отводится новому структурному подразделению ТУСУРа — Студенческому бизнес-инкубатору, который начинает функционировать с 2004 г. Это подразделение обеспечивает не менее 200 рабочих мест для студентов, обучающихся по индивидуальной траектории. Оно ориентировано на ежегодный выпуск около 70 специалистов в области малого наукоемкого бизнеса и частного предпринимательства. За счет этих выпускников будет идти ускоренное развитие научно-производственного окружения университета и увеличение темпов развития ТУСУРа.

Начато строительство нового университетского комплекса на площади Южная, в котором будут интегрированы учебные заведения различных уровней образования, научные, научно-производственные и производственные фирмы. Восстанавливается после пожара второй модуль — инженерный центр по внедрению наукоемких разработок вуза.

5.2 Радиотехнический факультет (РТФ)

Радиотехнический факультет ТУСУРа (Приложение 1) сегодня один из ведущих факультетов вуза. Он обеспечивает профессиональную подготовку более 2000 студентов по очной форме обучения и курирует профессиональную подготовку студентов филиальной сети ТУСУРа и ТМЦДО по 13-ти специальностям: «Радиотехника», «Радиосвязь, радиовещание и телевидение», «Средства связи с подвижными объектами», «Аудиовизуальная

техника», «Бытовая радиоэлектронная аппаратура», «Радиоэлектронные системы», «Защищенные системы связи», «Сервис», «Антикризисное управление», «Физика и техника оптической связи», «Организация и технология защиты информации», «Информационная безопасность телекоммуникационных систем». Руководит работой факультета **декан** (должность выборная, в настоящее время деканом РТФ является профессор Лев Алексеевич Боков).

Подготовку студентов ведет высококвалифицированный преподавательский коллектив, в составе которого 9 действительных членов и членов-корреспондентов общественных и международных академий наук, 2 заслуженных деятеля науки и техники, 2 заслуженных работника РФ. Многие ведущие преподаватели имеют Правительственные награды, являются Лауреатами Губернаторских премий. В составе преподавательского коллектива около 20 докторов и 70 кандидатов наук. Преподавательский состав и научные кадры факультет готовит через аспирантуру и докторантуру вуза. Заметим, что в момент организации вуза РТФ вел подготовку студентов только по 2-м специальностям, а среди преподавательского состава всего вуза (58 человек) было лишь 18 кандидатов наук и не было ни одного доктора наук.

Учебный процесс обеспечивается массовым использованием вычислительной техники, информационных технологий, пакетов прикладных программ, дисплейными классами, имеющими выход в Интернет.

Профессиональная подготовка студентов каждой из специальностей ведется совместно всеми 6 кафедрами РТФ.

Кафедра — это основное структурное подразделение вуза, непосредственно обеспечивающее учебный процесс студентов по ряду дисциплин, укладывающихся в профиль ее специализации. При этом, каждая из кафедр обеспечивает учебный процесс по дисциплинам профиля работы не только для своего, но и для других факультетов вуза. Кроме учебного процесса, каждая кафедра ведет научно-исследовательские работы, связанные с профилем учебной специализации. Для этого в составе кафедры существуют специальные научно-исследовательские подразделения (лаборатории, отделы и др.). В этих работах, как правило, принимают участие и студенты.

Учебная деятельность РТФ тесно связана с научными исследованиями и разработками. Непосредственно на факультете работают 2 научно-исследовательских института (НИИ радиотехнических систем (РТС), НИИ систем электросвязи (СЭС)), 15 научных лабораторий, 2 научно-исследовательских полигона. В учебной и научно-исследовательской работе РТФ активно сотрудничает с зарубежными странами. Это сотрудничество идет со странами как ближнего, так и дальнего зарубежья (Болгария, Голландия, Иран, Италия, Китай, Корея, Польша, США, Франция, ФРГ, Швейцария). Студенты РТФ имеют возможность прохождения практики в Китае, в ФРГ, в Швейцарии, в США. Эта возможность более широко используется студентами, обучающимися в Российско-Американском центре (ТПУ-ТУСУР) по специальностям РТФ ТУСУРа при Томском политехническом университете.

Выпускники РТФ высоко зарекомендовали себя в преподавательской работе (в ТУСУР и в других вузах страны), в научной, производственной, организационно-управленческой и предпринимательской деятельности как на территории Западно-Сибирского региона, РФ, так и за пределами России.

5.3 Кафедра Сверхвысококачастотной и Квантовой Радиотехники (СВЧ и КР)

Кафедра Сверхвысококачастотной и Квантовой Радиотехники (СВЧ и КР) — профилирующая для специальности «Физика и техника оптической связи», т.е. организующая и обеспечивающая специальную подготовку выпускников, включая постоянный контроль и совершенствование рабочих учебных планов и рабочих программ по всем дисциплинам. В ее функции входит также организация производственной и преддипломной практик, дипломного проектирования, защит выпускных квалификационных работ (дипломных проектов и работ), распределение выпускников и связь с ними после окончания вуза.

С учетом бурного развития сверхвысококачастотной техники весной 1962 года ректором ТПИ был издан приказ об организации с 1 сентября 1962 года на радиотехническом факультете кафедры сверхвысоких частот (СВЧ). Однако только родившаяся

кафедра начала свою жизнь уже в составе другого факультета — радиоуправления, в новом институте — ТИРиЭТе. Первыми сотрудниками кафедры были Е.С. Коваленко (зав. кафедрой с 1962 по 1998 гг.), доцент Е.В. Падусова, старшие преподаватели В.А. Замотринский, Г.Г. Куш, В.А. Наследник, Ж.М. Соколова.

Кафедра достаточно быстро развивалась, уже через 3–4 года ее состав удвоился, сложилось основное направление научной работы, связанное с исследованием фундаментальных процессов в материалах и устройствах СВЧ и квантовой радиотехники, включая устройства оптического диапазона, исследование антенных устройств и разработку методов выращивания монокристаллов для СВЧ-техники. С 1965 года начались многолетние исследования методов генерации лазерного излучения с характеристиками, пригодными для практического использования в системах обработки информации. Впервые был разработан оптический квантовый генератор на рубине, работающий в непрерывном режиме. С 1967 года начались работы по исследованию акустооптических взаимодействий для целей мгновенного анализа радиосигналов в широкой полосе частот. Работы велись по Постановлению правительства в интересах повышения обороноспособности страны. В этот год кафедра получила название сверхвысоко-частотной и квантовой радиотехники.

Одновременно с этим велись исследования магнитоупругих и магнитостатических волн в монокристаллах редкоземельных гранатов и принципов построения на их основе СВЧ-линий задержки и фильтров сжатия. Впервые в стране были получены монокристаллы итрий-железного граната, выращенные из раствора в расплаве и пригодные для технических применений.

Фундаментальные научные исследования в области акустооптоэлектроники, нелинейной и интегральной оптики получили мировое признание. Был накоплен большой опыт теоретического анализа, разработаны оригинальные методики экспериментальных исследований взаимодействия волн различной природы в кристаллических материалах. Актуальность проводимых исследований определяется тем, что они направлены на обнаружение и изучение новых физических эффектов в области акустооптического взаимодействия, взаимодействия светового излучения с веществом. Результаты исследований являются основой для

практических применений в таких областях, как динамическая голография, оптическая память, нейронные сети, волоконно-оптические системы связи, акустоэлектронные и оптические сенсоры, спектральный анализ и обработка широкополосных радиосигналов. Эти работы продолжаются поныне, и по их результатам сотрудниками и аспирантами кафедры защищено 26 кандидатских диссертаций. Пять сотрудников кафедры (Е.С. Коваленко, А.В. Пуговкин, С.М. Шандаров, В.М. Шандаров, А.С. Задорин) стали докторами физико-математических и технических наук.

В результате на кафедре СВЧиКР сформировалась научная школа «Когерентная оптика, акустооптоэлектронные взаимодействия и фоторефрактивные явления в устройствах и системах микроволновой, оптической и функциональной электроники», возглавлявшаяся профессором Е.С. Коваленко, ставшая основой одного из научных направлений университета.

В настоящее время основное научное направление кафедры — разработка принципов построения и элементной базы оптических и волоконно-оптических систем связи, сбора, обработки и передачи информации.

По результатам научных исследований опубликовано не менее 1000 научных трудов, 10 монографий и учебных пособий. В частности, только за последние пять лет опубликовано более 120 работ в центральной российской и зарубежной печати, представлено 35 докладов на всероссийских конференциях и 50 — на международных научных конференциях в США, Франции, Германии, Швейцарии, Японии. Ряд сотрудников коллектива получили приглашения и прошли зарубежные научные стажировки (Китай — С.Н. Шарангович, Германия — А.С. Задорин, В.М. Шандаров, Финляндия — В.И. Ефанов).

Новизна, актуальность и значимость проводимых научных исследований подтверждены грантами, полученными членами научно-педагогического коллектива кафедры: это индивидуальный грант Международного научного фонда; 6 грантов Международного научного фонда; 2 гранта Российского фонда фундаментальных научных исследований; грант Госкомитета РФ по высшему образованию.

В составе кафедры пять учебно-научных лабораторий: вычислительная, антенно-фидерных устройств, оптических систем

передачи, квантовых и СВЧ-устройств, функциональной, квантовой и оптической электроники.

Традиционно кафедра СВЧ и КР осуществляла подготовку инженеров по специальности «Радиотехника» со специализацией «Радиооптоэлектронные процессорные комплексы сверхвысокого быстродействия». Кафедра обеспечивает учебные курсы «Электромагнитные поля и волны», «Техническая электродинамика и антенны», «Электронные приборы СВЧ и квантовые приборы», «Распространение радиоволн и АФУ», «Квантовая и оптическая электроника», «Оптоэлектронные и СВЧ-приборы и устройства».

Новый этап в развитии кафедры начался с открытием в 1996 году телекоммуникационной специальности «Физика и техника оптической связи». Большую работу по открытию и постановке новой специальности провели проф. Е.С. Коваленко, доц. В.И. Ефанов. В последние годы на кафедре появились новые курсы: «Основы физической и квантовой оптики», «Оптические линии связи и пассивные компоненты ВОЛС», «Оптические системы передачи», «Измерения в оптической связи», «Волоконно-оптические локальные сети и системы кабельного телевидения», «Волоконно-оптические устройства и системы технологического назначения», «Строительство и эксплуатация линейных сооружений ГТС».

В рамках международного сотрудничества кафедрой СВЧ и КР заключены договоры о научно-техническом сотрудничестве между ТУСУРом и Политехническим институтом им. Г. Ома г. Нюрнберга (Германия), факультетом телекоммуникационных систем Хельсинкского технологического университета, фирмой «Nokia-CABLES» (Финляндия). В соответствии с ними студенты РТФ проходят технологическую, преддипломную практики, а также обучение и стажировку в вузах Германии и Финляндии.

Наиболее заметный вклад в становление и развитие кафедры внесли заведующий кафедрой почетный профессор ТУСУРа Е.С. Коваленко, профессор Г.Г. Гошин, А.С. Задорин, А.В. Пуговкин, В.М. Шандаров, С.М. Шандаров, доценты Х.С. Бакшт, Л.Н. Безматерных, Л.А. Боков, В.И. Ефанов, В.А. Замотринский, В.А. Краковский, Г.Г. Куш, В.И. Лаптев, А.Е. Мандель, Е.В. Падусова, Н.Д. Хатьков, Л.И. Шангина, С.Н. Шарангович, Г.И. Шварцман, старшие преподаватели Г.Г. Кретов, В.А. Наследник, В.К. Са-

вицкий, Ж.М. Соколова, зав. лаб. А.Н. Никифоров, В.Е. Галкин, старшие научные сотрудники Н.С. Вернигоров, А.Я. Демидов, Л.Я. Серебренников, старшие инженеры А.П. Афанасьев, А.Ф. Васильев, Г.А. Колчина, С.М. Кужелев, В.Г. Машенко, С.И. Романов, инженер А.Ф. Нагин.

В настоящее время в коллективе каф. СВЧиКР 19 сотрудников, среди них 4 профессора — доктора наук, 10 доцентов — кандидатов наук. С 1998 г. заведующим каф. СВЧиКР является доцент, канд. физ.-мат. наук С.Н. Шарангович.

Выдающимися выпускниками кафедры СВЧиКР являются А.А. Тихомиров — профессор, зам. директора Института оптического мониторинга СО РАН РФ, Н.С. Вернигоров — профессор, ген. директор фирмы «Вихрь», И.И. Иткин — директор НПО «Контур», президент фирмы «Стэк», В.Л. Попов — ген. директор фирмы «Интант».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Знакомство со специальностью, по данному пособию, является не более чем предварительным. Ваши знания будут непрерывно углубляться в течение всего периода обучения, приобретая новое качество, именуемое профессионализмом. В заключении даются рекомендации студенту как сформировать свой *профессиональный облик*.

Начало карьеры. Карьера начинается с того момента, когда вы твердо решаете стать физиком, биологом, экономистом, врачом или *специалистом в области телекоммуникации*. Насколько верным будет выбор, зависит в первую очередь от вашего чистосердечия. Он не должен быть продиктован сегодняшним спросом на ту или иную специальность. Ситуация на рынке труда постоянно меняется, хорошие специалисты в любой отрасли всегда в цене, а работая на нелюбимой работе или изучая неинтересные предметы, вы никогда не достигнете успехов.

Человек — то, что он делает. Дерево узнается по плодам. Именно за плоды, за достижения в своем деле вас будут уважать и ценить большинство знакомых.

Вы должны стать не только профессионалом, но и обрести себя, свою личность и индивидуальность в будущем деле. Поэтому *с первого курса начинайте работать на свой профессионализм*.

Отношение к образованию. Образование не единственное, но неперемное условие успешной карьеры. И речь тут идет не о дипломе, пусть даже красном, а о том багаже, который вы вынесете из вуза, а также книг и собственного опыта. Все дисциплины, которые включает в себя академический минимум на нашем факультете, действительно необходимы и пригодятся вам при дальнейшей работе. Поэтому ни одну из них нельзя игнорировать, как говорится, сдав зачет и забыв. Мало того, нужно *регулярно возвращаться к уже пройденному материалу*, чтобы не забывать фундаментальных основ, на которых базируется наша специальность. Любой предмет может стать интересным, если не пытаться брать его штурмом, а подходить к нему постепенно, с разных сторон. Тогда вы убедитесь, что первое понимание тех или иных истин само по себе приносит огромное удовлетворение. Когда вы научитесь сопоставлять и соединять разные науки в

единую объемную картину мира, то отказаться от этого удовольствия уже не можете. Подобное мышление — первый залог вашей посвященности, а следовательно, и *профессионализма*.

Определите свою цель. Определиться с факультетом и специальностью не означает выбрать профессию. Присмотревшись ко всему разнообразию направлений отрасли, вы *должны отдать предпочтение одному из них* — это и будет ваша узкая цель, в которой вы достигнете наибольших успехов. Именно за работу в данном направлении вам впоследствии будут платить деньги. Чем больше вы сузите будущую специальность, тем яснее окажется дальнейший карьерный путь. Это отнюдь не означает, что остальные направления нужно забыть. *Напротив, всё, что лежит в близости от вашей цели, постигайте усердно.* Однако, чем точнее вы возьмете прицел, тем меньше будет вероятность промаха. Перечитайте всю литературу по своей тематике. Узнайте о людях, которые в этом направлении чего-нибудь добились. Регулярно просматривайте специализированные журналы и страницы Интернета, чтобы быть в курсе всех последних новостей вашей отрасли. Умение терпеливо преследовать свою цель — неотъемлемое свойство каждого профессионала.

Научная деятельность. Студентов ТУСУР учат научному мышлению. Для этого существуют курсовые и дипломные работы, а также рефераты и доклады. Однако лишь немногие отдают себе отчет в том, что таким образом получают еще и прекрасный инструмент для решения самых сложных задач, которые, в частности, встанут перед вами в будущей работе. Пока вы студент, у вас есть широчайшие возможности для проведения самостоятельных исследований в том направлении, которое вы для себя выбрали. Не упускайте шанс. Результаты исследований станут украшением первого резюме, а их публикация — гарантом того, что с вами можно иметь дело. К тому же научная деятельность — лучший помощник в учебе. Столкнувшись лицом к лицу с предметом, вы сможете говорить с преподавателями на равных, что они, безусловно, оценят.

Работа и практика. Трудовую деятельность следует начинать еще в студенческие годы. Дело даже не в том, что сегодняшняя стипендия студента невелика, а в том, что уже по окончании вуза необходим стартовый опыт работы. Во-первых, он за-

ключается в умении оперировать современными технологиями на предприятии, а во-вторых, вы должны хорошо знать рынок того материала, с которым вам предстоит работать. Наша профессия напрямую не связана с рынком, но сам по себе рынок существует везде, где есть товар или услуга. В программу обучения умение ориентироваться на этом рынке может и не входить, однако для будущего работодателя данные навыки окажутся решающим фактором при выборе кандидатуры. Пять лет учебы — достаточный срок для того, чтобы досконально исследовать рынок нашей отрасли в России и в мире.

Работа в компании, деятельность которой связана с вашей целью, поможет и в учебе. Пускай ваши функции и зарплата на работе будут незначительными, зато вы сразу почувствуете себя, как говорится, в теме.

Сопутствующие знания. Есть ряд предметов, разбираться в которых должен любой ценный профессионал независимо от специальности. Существуют также знания и навыки, которые придают солидный вес *резюме* — самохарактеристика, которую вы предъявляете при обращении к работодателю с предложением принять вас на работу.

Во-первых, это иностранные языки. Но для начала рекомендуем вам выучить родной русский — грамотная и синтаксически правильная речь заставит соотечественников, кем бы они не были, уважать вас. Займитесь английским, на котором общаются представители самых разных стран и народов. К тому же на этом языке издают массу интереснейших периодических изданий, отражающих новости всех отраслей деятельности. Большинство серьезных российских компаний сегодня рассматривают только резюме, в которых значится владение хотя бы одним иностранным языком.

Во-вторых, безусловно, продвинутое знание компьютера. Кроме основных пользовательских программ овладейте теми, которые необходимы для работы в выбранной вами отрасли.

И в третьих, нечего и говорить о гуманитарном минимуме, включающем хотя бы базовые знания в области истории, литературы, философии, политологии и пр.

Школа общения. Одним из важнейших навыков для человека, живущего в социуме, является умение общаться с людьми.

Выстраивать отношения с сослуживцами и подчиненными — искусство, которым должен владеть каждый руководитель, да и любой сотрудник вообще. Тонкий дипломат, внимательный слушатель и вежливый собеседник — такой сотрудник придется по душе любому из начальников и подчиненных. Учитесь быть равнодушным к проблемам коллег и всех, кто работает рядом с вами. Учебная группа — отличная тренировочная площадка для выработки хороших манер, а вежливое, уважительное общение с преподавателем — отличный тренинг общения с руководителем.

Итак, для большинства работодателей диплом вуза не показатель профессионализма и образованности. Для того, чтобы найти по окончании учебы достойную работу по специальности, необходимо представить профессиональный облик молодого специалиста, отражением которого является резюме. Однако данное понятие весьма широкое и содержит много составляющих. Чтобы работодатели выделили ваше резюме среди десятков прочих, ***формировать себя как профессионала необходимо с первого курса.***

ЛИТЕРАТУРА

1. Электросвязь. Введение в специальность: Учебное пособие для ВУЗов / Б.И. Крук и др. — М.: Радио и связь, 1988. — 240 с.
2. Зиновьев А.Л., Филиппов Л.И. Введение в специальность радиоинженера. — М.: Высш. шк., 1989. — 207 с.
3. Крук Б.И., Попов Г.Н. ...И мир загадочный за занавесой цифр. — 2-е изд., испр. — Новосибирск: ЦЭРИС, 2001 — 264 с.
4. Мелихов С.В., Колесов И.А. Введение в специальность. Средства связи с подвижными объектами. — Томск: ТМЦДО, 2005. — 170 с.
5. Кабельные линии связи. История развития в очерках и воспоминаниям. — М.: Радио и связь, 2002.
6. Нефедов В.И. Основы радиоэлектроники и связи. — М.: Высш. шк., 2002. — 510 с.
7. Основные положения развития Взаимоувязанной сети Российской федерации на перспективу до 2005 г. — М.: Информ-связь, 1996.
8. Гордиенко В.Н., Тверецкий М.С. Многоканальные телекоммуникационные системы. — М.: Горячая линия — Телеком, 2005. — 416 с.
9. Справочник по лазерной технике: Пер. с нем. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 544 с.
10. Волоконно-оптические линии связи: Справочник / Л.М. Андрушко и др. — Киев: Техника, 1988. — 240 с.
11. Дж. Гауэр. Оптические системы связи. — М.: Радио и связь, 1989. — 504 с.
12. Вербовецкий А.А. Основы проектирования цифровых оптоэлектронных систем связи. — М.: Радио и связь, 2000.
13. Дональд Дж. Стерлинг. Кабельные системы. — М.: Лори, 2003.
14. Горлов Н.И., Микиденко А.В., Минина Е.А. Оптические линии связи и пассивные компоненты ВОСП: Учебное пособие. — Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2003.
15. Иоргачев Д.В., Бондаренко О.В. Волоконно-оптические кабели и линии связи. — М.: Эко-Трендз, 2002.

16. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. — М.: Эко-Трендз, 1998. — 274 с.: ил.

17. Гитин В.Я., Кочановский Л.Н. Волоконно-оптические системы передачи. — М.: Радио и связь, 2003. — 128 с.

18. Фриман Р. Волоконно-оптические линии связи. — М.: Техносфера, 2003. — 440 с.

19. Семенов А.Б., Стрижаков С.К., Сунчелей И.Р. Структурированные кабельные системы. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: ЛАЙТ Лтд., 2001. — 608+16 с.: ил.

20. Окоси Т. и др. Волоконно-оптические датчики. — Л.: Энергоатомиздат, 1990. — 256 с.

21. Е.М. Дианов, А.М. Прохоров. Волоконно-оптическая связь: состояние дел и роль в экономике // ВЕСТНИК РАН. — 1998. — №5. — ТОМ 68. — С. 393–395.

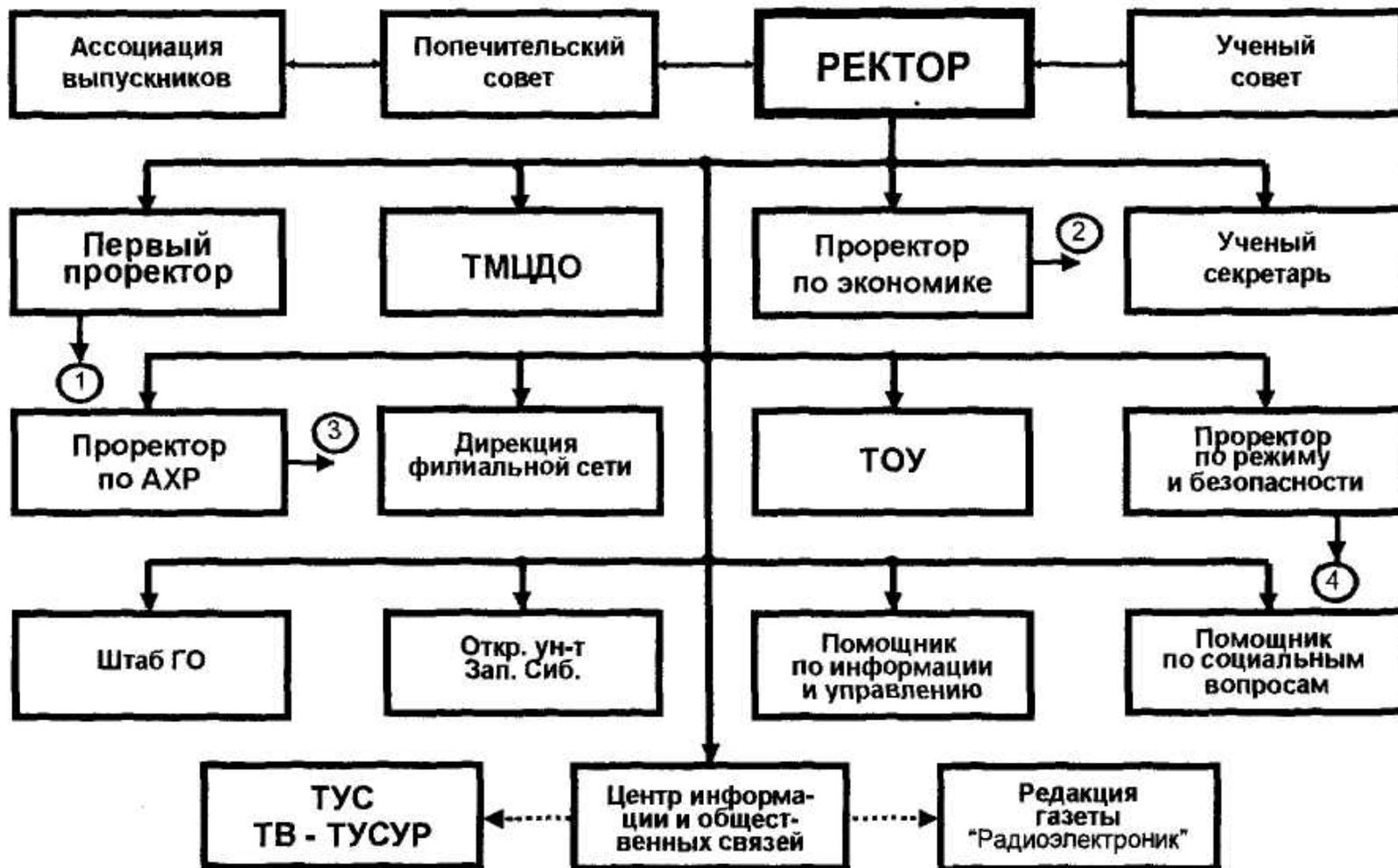
22. Томский Государственный Университет Систем Управления и Радиоэлектроники. 1962–2002. Исторический очерк. — Томск: Изд-во ТУСУР, 2002. — 175 с.

23. <http://www.tusur.ru>: ТУСУР / Главная / Образование / Методическая работа / Рейтинговая система, учебные планы.

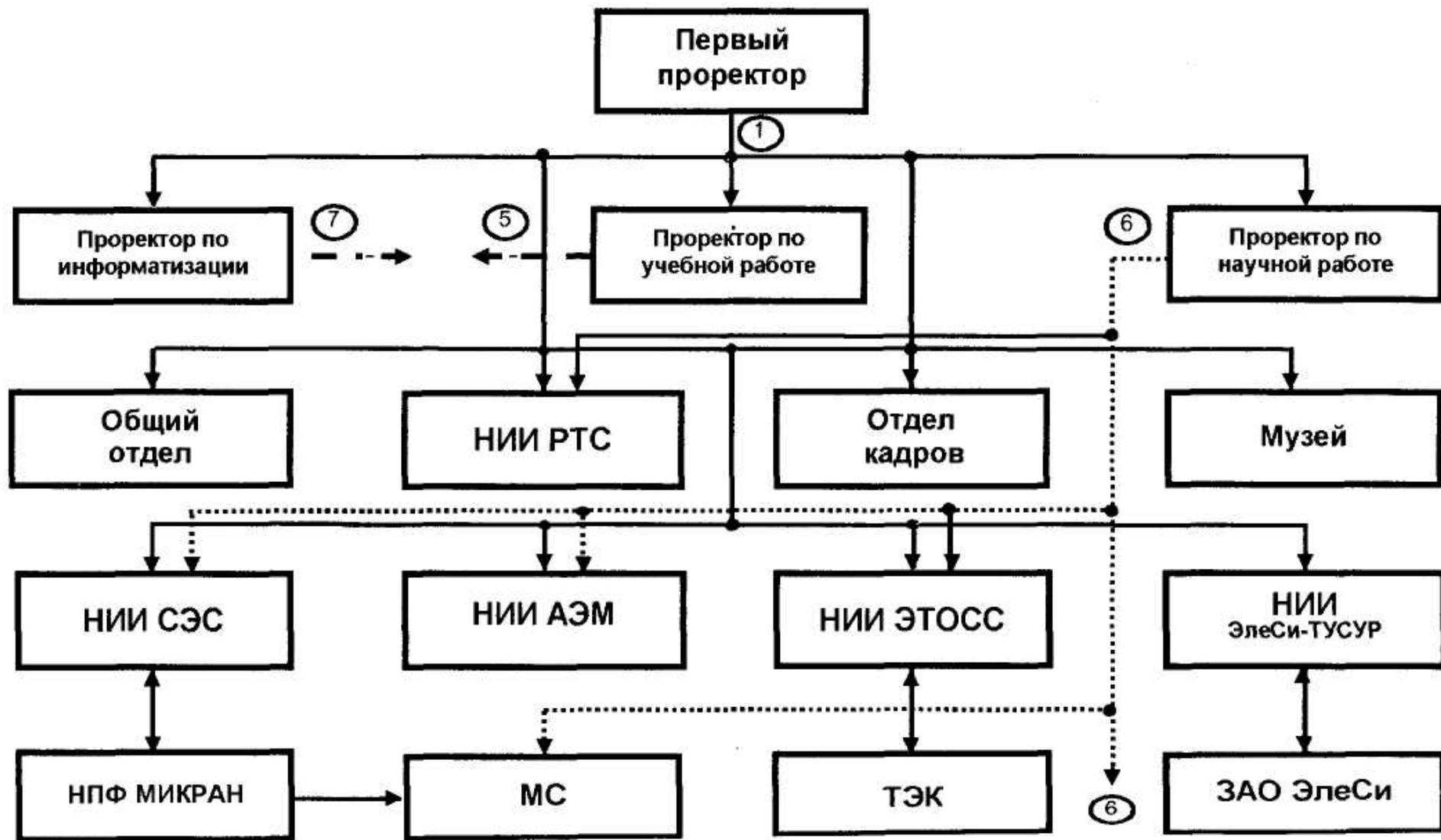
24. Государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования. Направление подготовки дипломированного специалиста — «Телекоммуникации», 2002.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

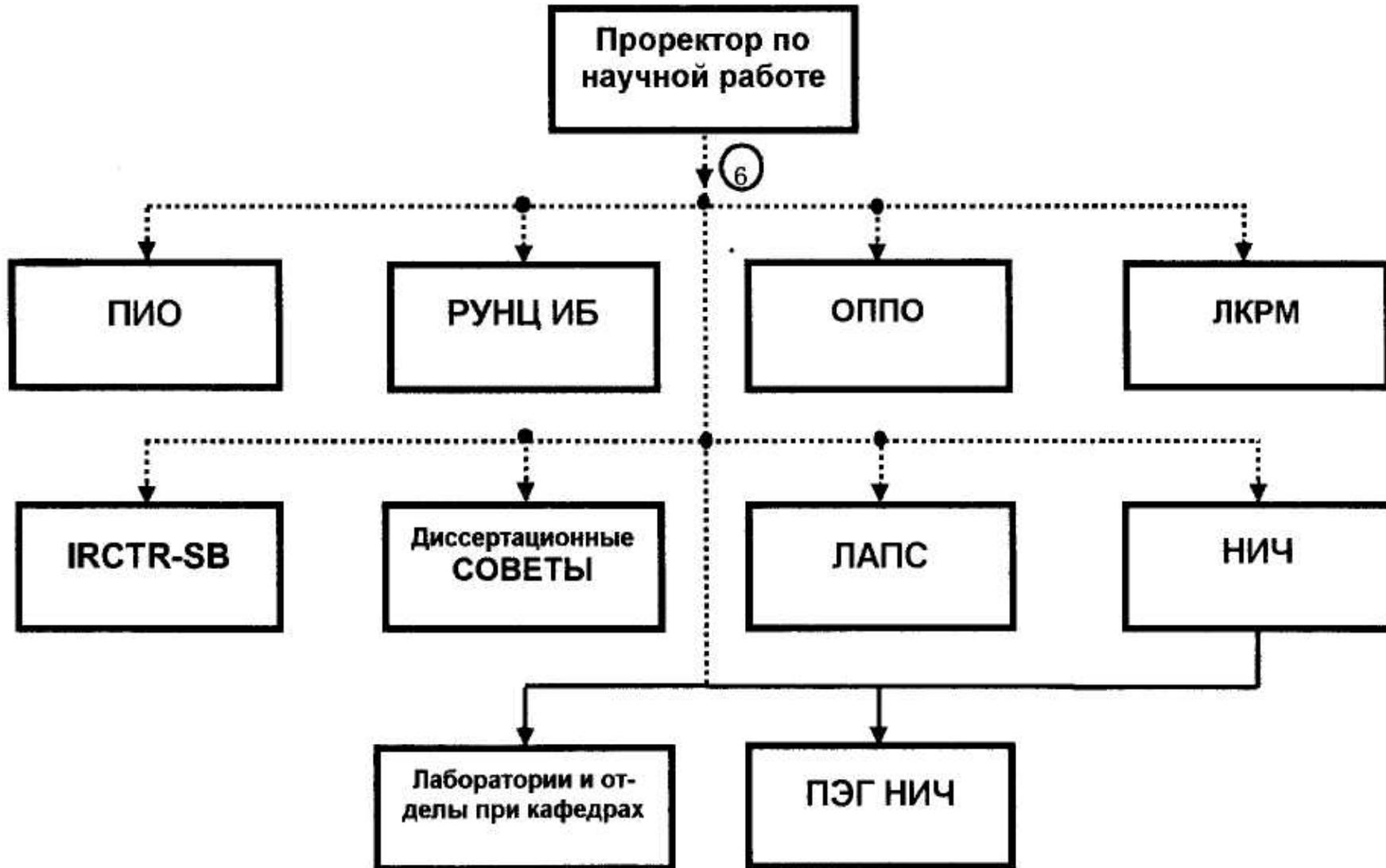
СТРУКТУРА ТУСУРа



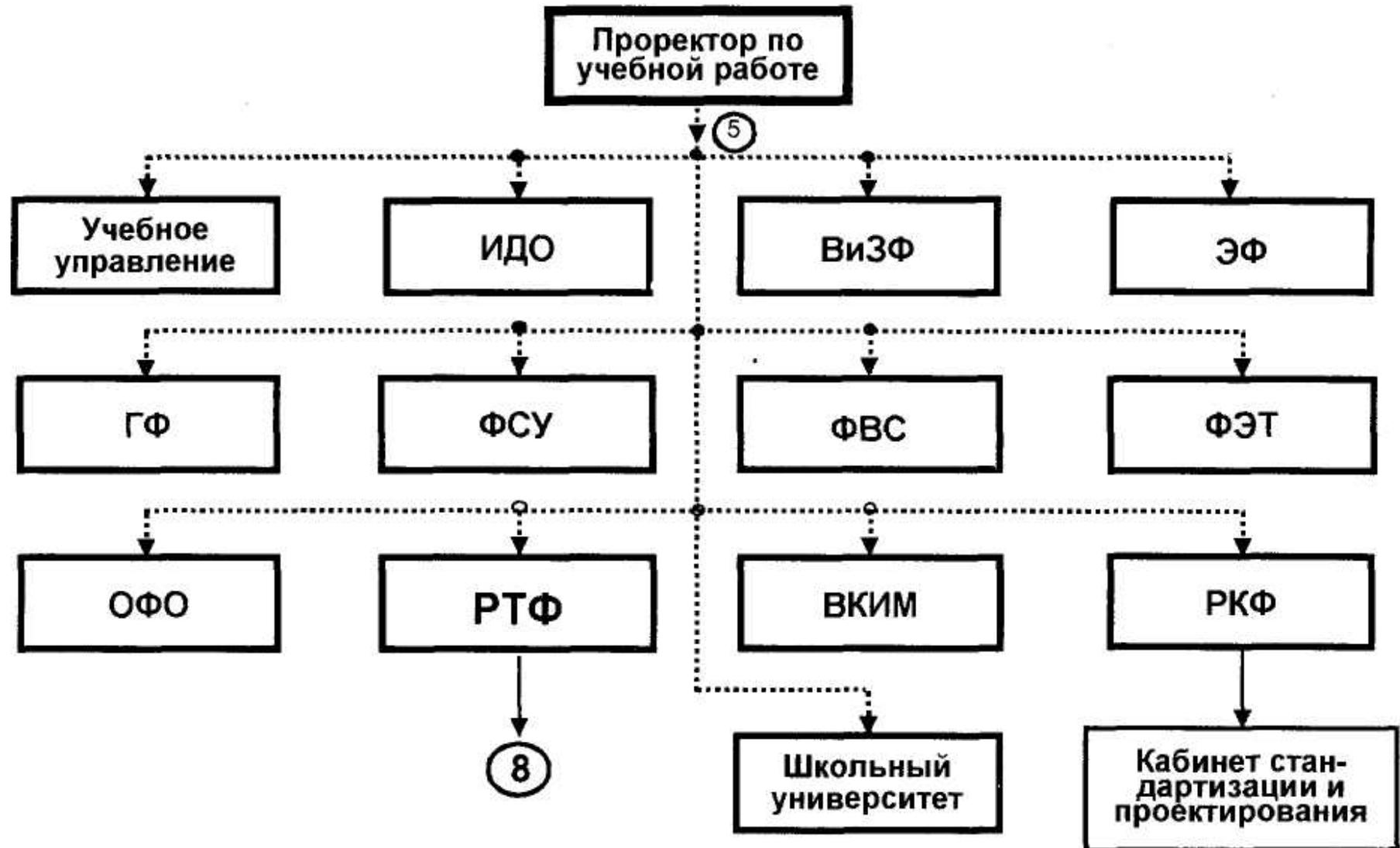
Структурная схема ТУСУРа (продолжение)



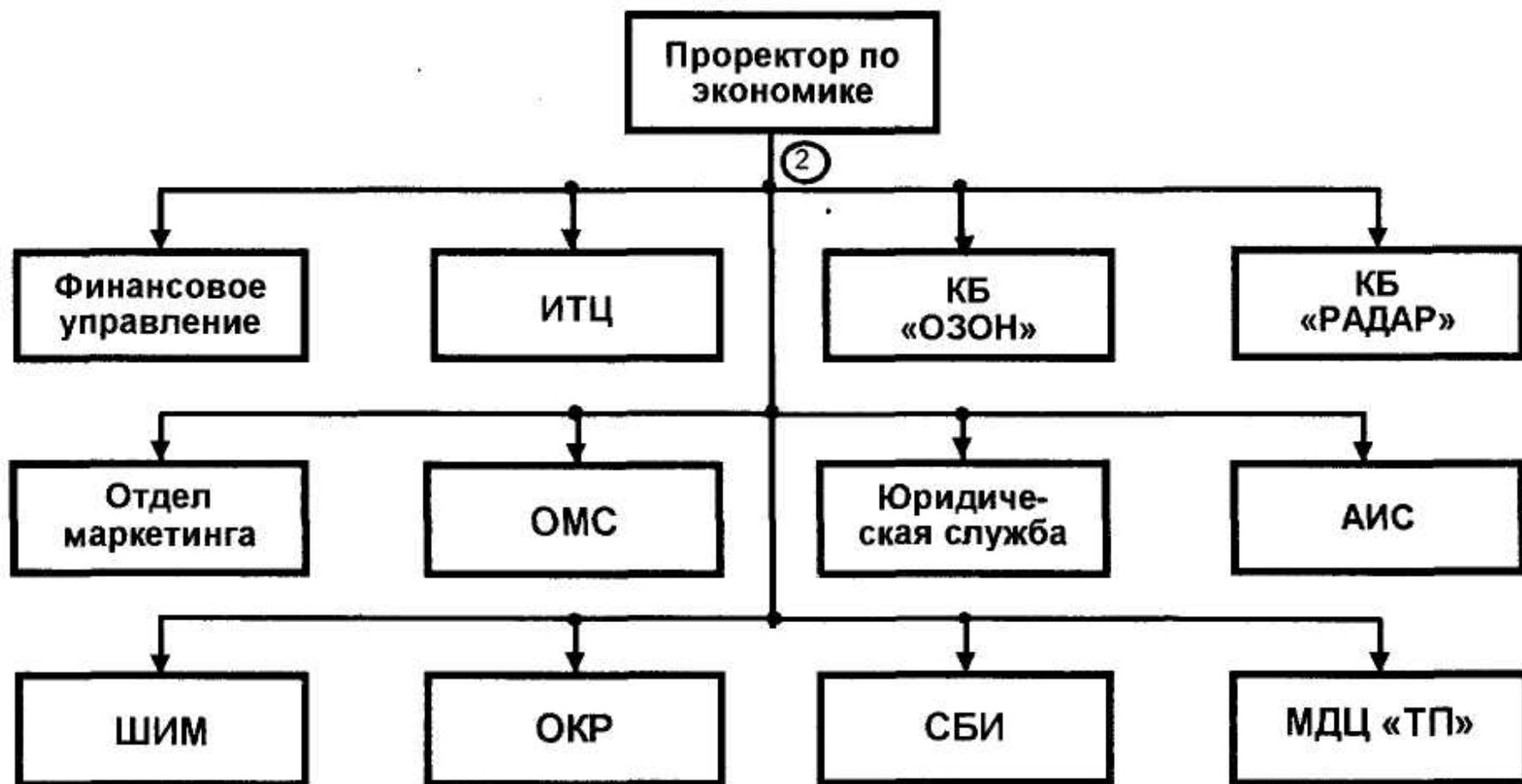
Структура ТУСУР (продолжение)



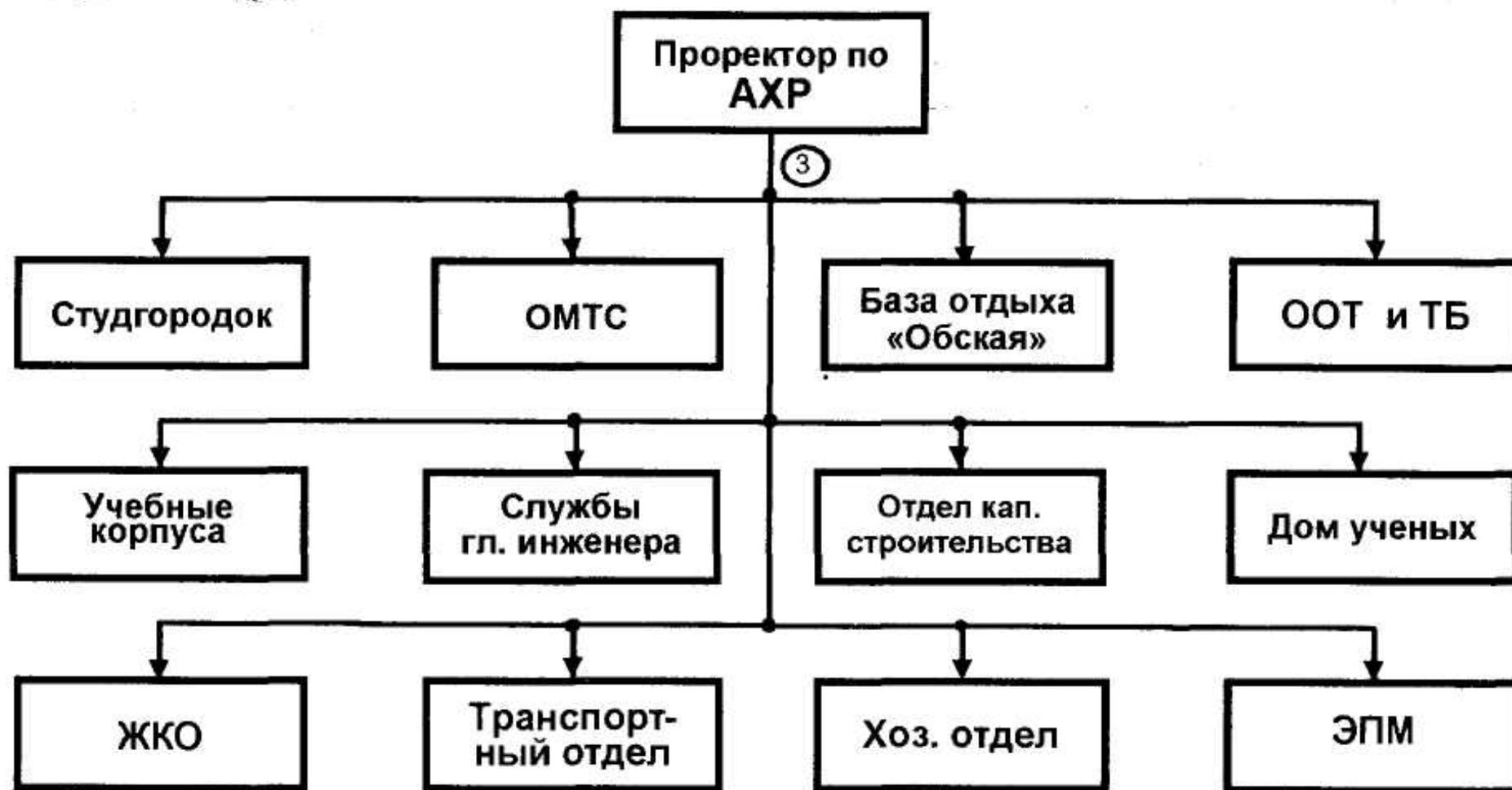
Структура ТУСУРа (продолжение)



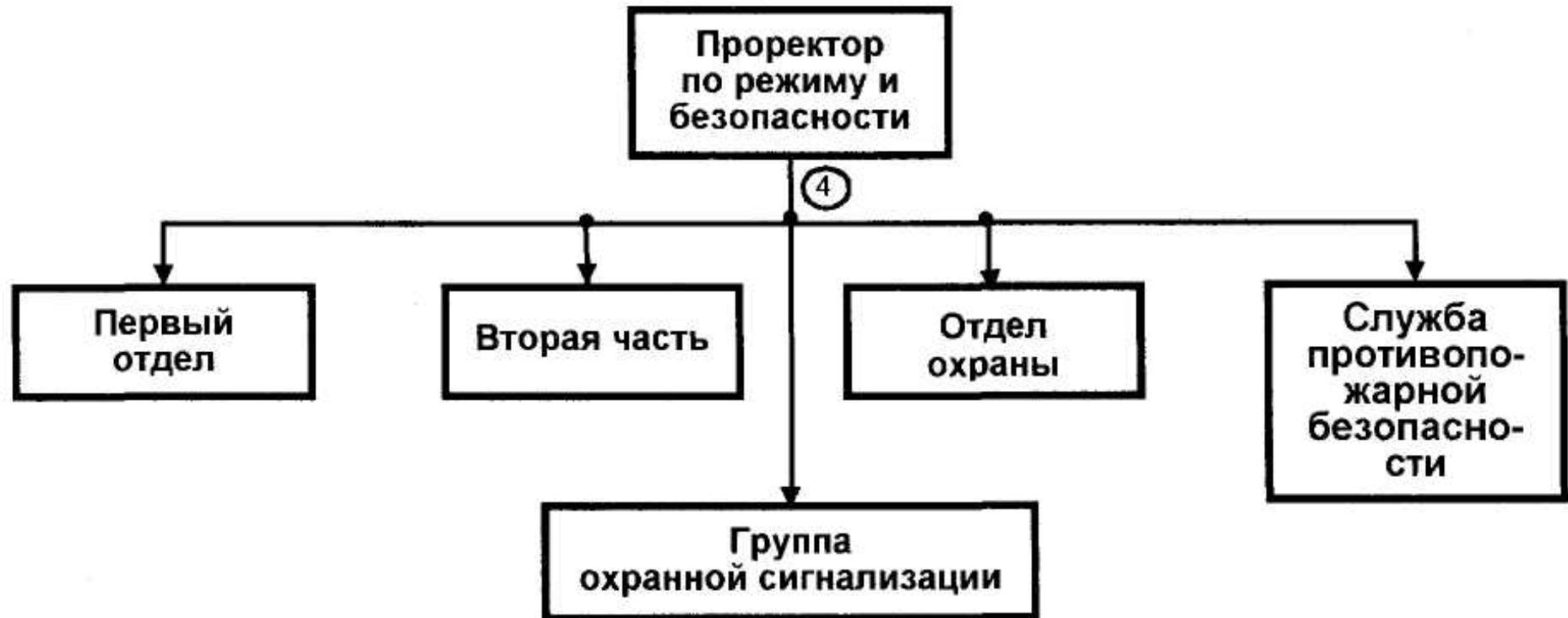
Структура ТУСУРа (продолжение)



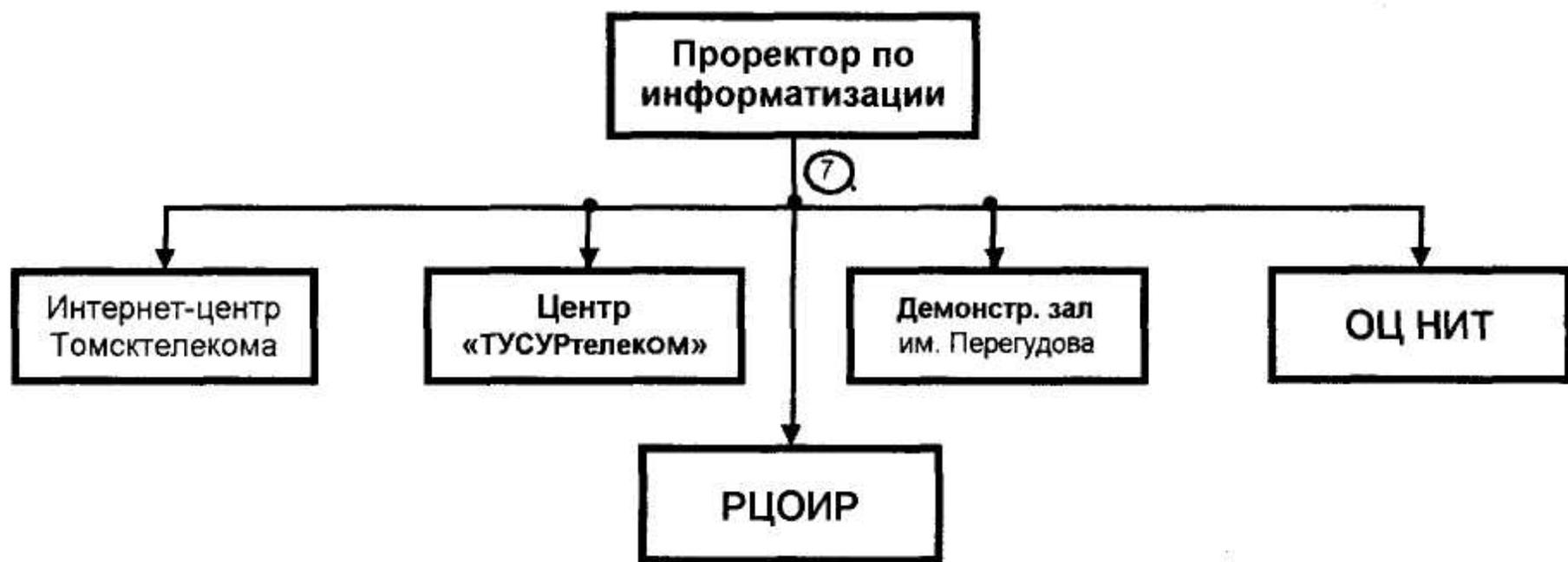
Структура ТУСУРа (продолжение)



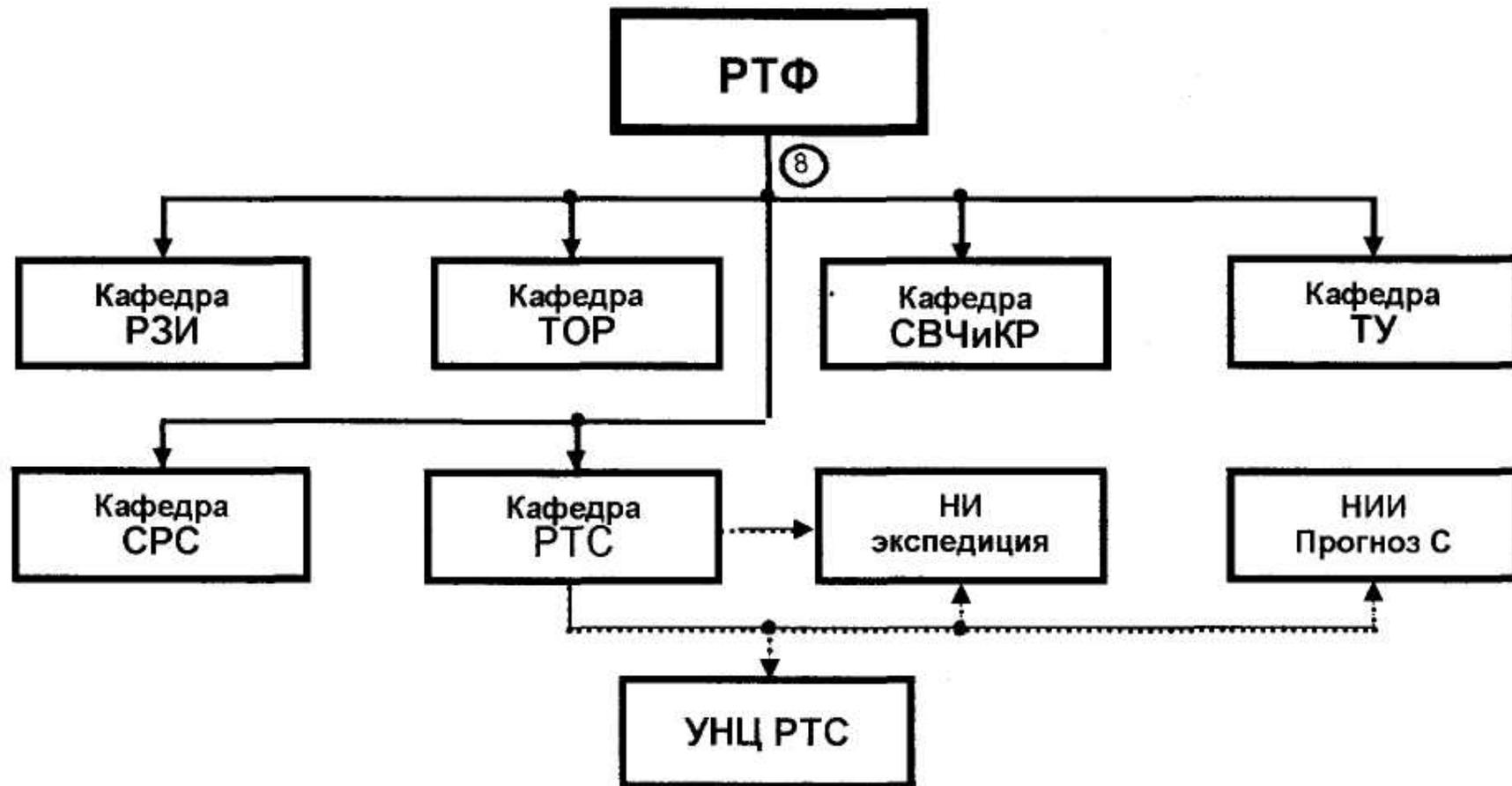
Структура ТУСУРа (продолжение)



Структура ТУСУРа (продолжение)



Структура ТУСУРа (окончание)



Структура ТУСУРа

Сокращения на структурной схеме:

- АХР — Административно-хозяйственная работа
- АИС — Агентство интеллектуальной собственности
- ГФ — Гуманитарный факультет
- ВКИЭМ — Высший колледж информатики, электроники и управления
- ЖКО — Жилищно-коммунальный отдел
- З и ВФ — Заочный и вечерний факультет
- ИДО — Институт дополнительного образования
- ИТЦ — Инженерно-технический центр
- IRSTR — Сибирское отделение международного исследовательского центра телекоммуникаций излучения и радиолокации
- КБ — Конструкторское бюро
- ЛАПС — Лаборатория автоматизированных профориентационных систем
- ЛКРМ — Лаборатория радиокосмических материалов
- МДЦ «ТП» — Международный деловой центр «Технопарк»
- МС — Метрологическая служба
- НИИ АЭМ — Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики
- НИИ РТС — Научно-исследовательский институт радиотехнических систем
- НИИ СЭС — Научно-исследовательский институт систем электросвязи
- НИИ ЭлеСи — Научно-исследовательский институт электронных систем ТУСУР
- НИИ ЭТОС — Научно-исследовательский институт электронного технологического оборудования ТУСУР и систем связи
- НИЧ — Научно-исследовательская часть
- НПФ — Научно-производственная фирма
- ОКР — Отдел коммерциализации разработок
- ОМС — Отдел международных связей
- ОМТС — Отдел материально-технического снабжения
- ООТ и ТБ — Отдел охраны труда и техники безопасности
- ОППО — Отдел послевузовского профессионального образования

- ОФО — Отделение фундаментального образования
 ОЦ НИТ — Областной центр новых информационных технологий
- ПИО — Патентно-информационный отдел
 ПЭГ НИЧ — Планово-экономическая группа
 НИЧ РКФ — Радиоконструкторский факультет
 РТС — Радиотехнические системы
 РТФ — Радиотехнический факультет
 РУНЦ ИБ — Региональный учебно-научный центр Восточной Сибири и Дальнего Востока по информационной безопасности
- РЦОИР — Ресурсный центр учета, регистрации и обеспечения доступа к образовательным информационным ресурсам
 СБИ — Студенческий бизнес-инкубатор
 СВЧиКР — Сверхвысокочастотная и квантовая радиоэлектроника
- СРц СТВ — Сибирский региональный центр содействия трудоустройству выпускников
- ТМЦДО — Томский межвузовский центр дистанционного образования
- ТОР — Теоретические основы радиотехники
 ТОУ — Томский открытый университет ТУ — Телевидение и управление
- ТУС ТВ ТУ — Телевизионная учебная студия «ТВ-ТУСУР»
 ТЭК — Томская электронная компания
 УНЦ РТС — Учебно-научный центр кафедры
 РТС ФВС — Факультет вычислительных систем
 ФСУ — Факультет систем управления
 ФЭТ — Факультет электронной техники
 ШИМ — Школа инновационного менеджмента
 ЭМП — Экспериментально-производственные мастерские
 ЭФ — Экономический факультет