

Предисловие к русскому изданию

Вышедшая в апреле прошлого года в издательстве John Wiley & Sons, Inc. коллективная монография написана тремя высококвалифицированными специалистами — ведущими сотрудниками всемирно известного в данной области научного учреждения U.S. Naval Research Laboratory (NRL).

Являющееся предметом исследования данной монографии направление «микроволновая фотоника» (отечественный эквивалент — «радиофотоника») в последние десятилетия широким фронтом развивается зарубежным научно-техническим сообществом применительно к таким высокотехнологичным, важным для развития экономического и оборонного потенциала страны отраслям промышленности, как телекоммуникации (аналоговые волоконно-эфирные системы (Radio-over-Fiber), системы радиосвязи терагерцевого диапазона), радиолокация и радиоэлектронная борьба. В подтверждение уровня актуальности темы монографии приведем три факта.

1. За последние 20 лет теме «Микроволновая фотоника» посвящено 10 специальных выпусков в таких высокорейтинговых международных журналах, как IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, IEEE Journal of Lightwave Technologies.
2. Настоящая монография является уже третьей за последние пять лет зарубежной книжной публикацией, специально посвященной микроволновой фотонике.
3. Согласно самой крупной в мире научной базе данных IEEE Explore в последние пять лет ежегодное число публикаций, связанных с микроволновой фотоникой, превышает 20 тысяч.

По нашему мнению, отмеченный выше уровень интереса и актуальности значительно превышает любую из развивающихся в настоящее время областей естественных знаний.

В современном понимании фотоника означает обширную область знаний, в которой изучаются разнообразные явления, связанные с оптическим излучением (светом). Одним из новых направлений фотоники является сверхвысокочастотная оптоэлектроника¹, появившаяся в результате интеграции оптоэлектроники и СВЧ-радиоэлектроники. В развитие СВЧ-оптоэлектроники в нашей стране получил распространение новый термин «радиофотоника» (РФ), охватывающий более широкую область знаний. Основные объекты исследования РФ: полупроводниковые лазеры, фотодиоды и фототранзисторы, СВЧ-диоды и транзисторы с дополнительным оптическим вводом, а также узлы и модули на основе их сочетания между собой и со сверхскоростной цифровой и аналоговой компонентной базой микроэлектроники. Цели и задачи РФ: исследование и разработка сверхбыстродействующих активных оптоэлектронных приборов и устройств с полосой пропускания в радиодиапазоне и их применение в различных оптических и радиотехнических системах передачи информации, а также активных приборов и устройств формирования и обработки сигналов радиочастотного диапазона с использованием оптических и оптоэлектронных средств.

К фундаментальным преимуществам радиофотонной технологии, позволяющим совершенствовать характеристики радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона, можно отнести следующие.

Базирующиеся на фундаментальных свойствах носителей информации: фотон — безмассовая элементарная частица, способная существовать, только двигаясь со скоростью света. Электрический заряд фотона равен нулю. Это обеспечивает:

- повышенное быстродействие (до десятков фемтосекунд),
- расширенную полосу пропускания (до терагерцевого диапазона).

В результате улучшаются тактико-технические показатели традиционных узлов формирования и обработки СВЧ-сигналов: генератора, преобразователя частоты, линии задержки, фильтра и т. д.

¹ М. Е. Белкин, А. С. Сигов. Новое направление фотоники — сверхвысокочастотная оптоэлектроника. Радиотехника и электроника, 2009, т. 54, № 8, с. 901—914.

Базирующиеся на свойствах среды распространения: кварцевое оптическое волокно:

- малые потери при передаче ($<0,2$ дБ/км) и независимость их от частоты модуляции в радиочастотном диапазоне (см. гл. 1, рис. 1.7, а);
- расширенная рабочая полоса частот (до 15 ТГц);
- гораздо лучшие массогабаритные характеристики (волоконный кабель: масса 1,7 кг/км, диаметр 250 мкм; коаксиальный кабель: масса 560 кг/км, диаметр 10 мм);
- нечувствительность к электромагнитным наводкам (диэлектрик): улучшение электромагнитной совместимости внутри системы, повышение имитостойкости аппаратуры;
- значительно лучшие фазо-температурные характеристики (см. гл. 1, рис. 1.8): фазовая стабильность и возможность когерентного приема и обработки сигналов. Относительное изменение задержки на единицу длины и градус температуры для волокна без покрытия¹ составляет 8×10^{-6} , если оно не прикреплено механически к другому материалу с большим коэффициентом температурного расширения.

В результате улучшаются тактико-технические показатели и характеристики передачи радиоэлектронных систем (РЭС).

Принципиальным недостатком использования радиопотонной технологии в РЭС является необходимость операций прямого и обратного преобразований в оптический диапазон, в ходе которых возникают существенные потери мощности сигнала. Тем не менее их влияние в значительной степени компенсируется за счет малых собственных потерь в волокне. В подтверждение этого на рис. 1.7, б (см. гл. 1) приведены расчетные интервальные характеристики полных потерь, из которых следует преимущество использования фотоники при длине линии передачи более 100 м на частоте радиосигнала 1 ГГц и более 30 м на частоте 10 ГГц. При необходимости передачи радиосигналов более высоких частот баланс потерь достигается при еще меньшей длине линии.

Использование вышеуказанных фундаментальных достоинств обеспечивает конкретные практические преимущества, приводящие к возможности улучшения ключевых тактико-технических характеристик (ТТХ) РЭС, что иллюстрируется на примере радиолокационной системы на базе активной фазированной антенной решетки (АФАР).

- Возможность работы с пространственным (сейчас до 7 сердцевин в одном волокне, в дальнейшем до 19 сердцевин²) или/и спектральным (до 80 оптических несущих по одной сердцевине с шагом 50 ГГц) уплотнением: передача с терабитными скоростями, улучшение массогабаритных характеристик и упрощение схемы диаграммообразующего устройства (ДОУ), многофункциональное (локация, радиоэлектронная борьба (РЭБ), связь, мониторинг), многодиапазонное (от L- до K_a-диапазона) функционирование, связь наземной и бортовой аппаратуры по одному кварцевому волокну (например, для 1500-элементной АФАР).
- Широкополосность: расширение мгновенной полосы обработки (сейчас до 2–3 ГГц, в будущем до 10 ГГц): повышение скорости и пропускной способности систем обработки.
- Широкий динамический диапазон тракта приема: повышение скрытности функционирования РЭС за счет работы на фоне сильных сигналов и помех.
- Малые потери и дисперсия в оптическом волокне: высококачественная передача цифровых и аналоговых СВЧ-сигналов между разнесенными постами аппаратуры, что упрощает размещение аппаратуры на носителях и позволяет создавать когерентный прием в системах распределенной структуры.

¹ Hartog A. H., Conduit A. J. and Payne D. N. Variation of pulse delay with stress and temperature in jacketed and unjacketed optical fibers. *Optical and Quantum Electronics*, 1979, v. 11, No 3, p. 265–273.

² Inao S., Sato T., Senstui S., Kuroha T., and Nishimura Y. Multicore optical fiber // In *Optical Fiber Communication Conference (OFC'79)*, Washington, D.C., United States, 6 March 1979, Paper WB1.

Основываясь на предыдущем рассмотрении, введем следующие определения для чисто фотонного и радиофотонного устройств.

Фотонное устройство — обособленный функциональный узел, структура которого содержит исключительно элементы оптического диапазона.

Радиофотонное устройство — обособленный функциональный узел, структура которого содержит элементы радио- и оптического диапазонов.

С этих позиций компонентную базу радиофотоники и строящиеся на их основе функциональные элементы и устройства можно разделить на пять типов¹. А именно приборы и элементы с прямым взаимодействием СВЧ- и оптического излучений, которые включают:

- оптико-электрический преобразователь, например полупроводниковый фотодиод;
- электрооптический преобразователь, например полупроводниковый лазер;
- датчик СВЧ-сигнала с оптическим управлением, например оптоэлектронный генератор СВЧ-сигналов;
- преобразователь оптического сигнала, например оптический модулятор, лазерный усилитель;
- преобразователь СВЧ-сигнала, например СВЧ-усилитель, коэффициент усиления которого регулируется оптическим сигналом, оптоэлектронная схема задержки, оптоэлектронный смеситель.

Общая отличительная черта всех вышеперечисленных приборов и функциональных элементов заключается в работе в С (1530—1565 нм) и/или L (1565—1625 нм) спектральных диапазонах по классификации МСЭ-Т. Основными причинами такого выбора являются самые низкие потери в кварцевом волокне и самая широкая рабочая спектральная полоса, что, например, позволяет эффективно заменить обычно применяемый в АФАР набор переключаемых линий задержек на базе большого числа СВЧ-линий передачи на многоволновую передачу со спектральным разделением каналов по одной общей волоконно-оптической линии. Также только в указанных диапазонах существует уникальная возможность компенсации потерь за счет экономичных и высокотехнологичных волоконных усилителей. Устройства данного типа, основанные на чисто оптическом взаимодействии, появились в процессе развития волоконно-оптических систем и также могут быть эффективно применены в радиофотонной аппаратуре. К ним относятся: преобразователь оптического сигнала с оптической накачкой, например эрбиевый, рамановский и бриллиантовый волоконные усилители, датчик оптического сигнала с оптической накачкой, например эрбиевый волоконный генератор.

Исследования в данном направлении начали проводиться с конца 70-х годов прошлого столетия. Отправной точкой для них служили потенциальные возможности по увеличению пропускной способности канала передачи информации, предоставляемые быстро развивающимися в те годы цифровыми волоконно-оптическими системами передачи (ВОСП), что требовало создания оптоэлектронных и электронных компонентов и устройств для преобразования и обработки сигналов с быстродействием в пикосекундном диапазоне. С годами интерес к данной тематике только продолжает увеличиваться, о чем, например, свидетельствуют специальные выпуски (начиная с 1990 г.) в ведущих зарубежных журналах (см. выше), а также создание специальных секций практически на всех крупных международных конференциях по СВЧ- и оптической технике и проведение ежегодной международной конференции научного общества IEEE, полностью посвященной микроволновой фотонике.

В нашей стране работы в этом направлении, в основном связанные с теоретическими и экспериментальными исследованиями предельного быстродействия оптоэлектронной компонентной базы, начались в 80-х годах силами сотрудников университетских

¹ Белкин М. Е., Яковлев В. П. Наноструктурный поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором О и С спектральных диапазонов в качестве ключевого элемента компонентной базы радиофотоники. Наноматериалы и наноструктуры, 2014, т. 5, № 3, с. 37—49.

лабораторий и институтов академии наук СССР¹. В конце 80-х годов рядом отраслевых НИИ были проведены НИР по разработке элементной базы и устройств цифровых и аналоговых ВОСП². В начале нового века отечественные разработки в данной области продолжались³, хотя интенсивность их в целом значительно понизилась. Наиболее важные монографии и учебные пособия отечественных авторов, связанные с радиофотоникой, приведены в конце настоящего издания.

В отличие от двух предыдущих иностранных книг последних лет, посвященных отдельным направлениям микроволновой фотоники, данный труд представляет собой последовательное описание физических основ исследований и разработок в области компонентной базы и оборудования радиофотонных систем. В частности, в 10 главах книги профессионально освещены следующие темы: сравнение с цифровыми волоконно-оптическими линиями, основная компонентная база, ключевые технические показатели, источники шумов и искажений, влияние волоконно-оптического тракта передачи сигналов, способы модуляции и демодуляции, применение в телекоммуникационных волоконно-оптических системах и локационных радиосистемах СВЧ-диапазона. Отдельная глава посвящена еще слабо изученным вопросам разработки мощных высоколинейных фотодетекторов, в которых NRL является признанным мировым лидером. Помимо основных глав книга включает шесть приложений, облегчающих понимание использованного математического аппарата. Важной методической особенностью настоящей монографии является согласованное изложение методов, принципов и подходов, изученных еще в прошлом столетии и введенных в последние 2—3 года.

Издание этой первой книжной публикации по современной микроволновой фотонике на русском языке инициировано группой компаний «РТИ», которая на сегодня является отечественным лидером по развитию радиолокационных и телекоммуникационных систем с использованием радиофотонной технологии. Перевод выполнен высококвалифицированным научным коллективом: д. т. н. М. Е. Белкиным (гл. 1, 4, 8—10, приложения), к. ф.-м. н. И. В. Мельниковым (гл. 2, 3, 5), к. ф.-м. н. В. П. Яковлевым (гл. 6, 7). В ходе перевода и редактирования мы придерживались основного принципа: перевод должен быть полным, точным и адекватным, но с соблюдением норм, правил и традиций, принятых в письменном русском языке и в отечественных научных публикациях. Особую сложность вызвало наличие множества терминов и сокращений, обычно свойственных текстам

¹ Евтихийев Н. Н., Лукашин А. В., Морозов М. А. и др. Модуляция в полосе до 5 ГГц InGaAsP-лазера на подложке р-типа с заравниванием полужолирующими слоями. Письма в журнал технической физики, 1988, т. 14, вып. 17, с. 1580—1583.

Бахрах Л. Д., Блискавицкий А. А. Применение лазеров и волоконно-оптических систем для управления формированием СВЧ-сигналов и их распределения в антенных решетках. Квантовая электроника, 1988, т. 15, № 5, с. 879—914.

Голдобин И. С., Курносое В. Д., Плявенек А. Г. и др. Глубокая амплитудная модуляция излучения гетеролазеров с зарощенной мезаструктурой в полосе до 5 ГГц. Квантовая электроника, 1990, т. 17, № 2, с. 218—221.

Fetisov Y. K., Romanov I. G., Studenov V. P., Optical control of microwave signals in magnetostatic wave transmission line. Electronics Letters, 1995, vol. 31, No. 14, pp. 1168—1169.

² Дураев В. П., Калашников В. С., Коняев В. П. и др. СВЧ-модуляция инжекционных лазеров. Радиотехника, 1988, № 8, с. 46—50.

Белкин М. Е. Взаимное сопряжение световодных и сверхвысокочастотных линий передачи. / Труды НИИ радио, 1985, № 4, с. 30—33.

Белкин М. Е. Локальная волоконно-оптическая система передачи с СВЧ-поднесущей. Радиотехника, 1991, № 2, с. 75—79.

Belkin M. E., Ravich V. N. Photodiode Module for Analog and Digital Transmission Systems. // ISFOC'92 Conference Proceedings. — St. Petersburg, 1992. — p. 224—230.

³ Fetisov Y. K., Klimov A. A., Waveguide light-spin wave interaction in nonuniformly magnetized yttrium-iron-garnet films. Journal of the Optical Society of America B, 2005, v. 22, No 1, p. 274—280.

Реутов А. П., Белкин М. Е. Волоконно-оптические системы для мультисервисных сетей абонентского доступа. Научное издание, 2004, т. 5, № 12, с. 21—26.

мультидисциплинарного уровня, но еще не получивших хождения в российской научной периодике. Для них при переводе, как правило, подбирался отечественный эквивалент, либо они в неизменном виде выносились в введенный список сокращений с дословным переводом на русский язык. Тем не менее возникали «особые случаи». Например, часто употребляемый в оригинале термин «photonic link» был переведен как «фотонная линия», хотя, по нашим данным, он не используется в российской научной периодике. С другой стороны, в качестве эквивалента широко известного англоязычного термина «direct modulation» в российских журнальных и книжных изданиях имеют равное хождение сразу два синонимичных термина: прямая и непосредственная модуляция. В переводе мы придерживались второго варианта.

Для расширенного изучения отдельных аспектов этого междисциплинарного научно-технического направления в издание введен перечень монографий и учебных пособий отечественных авторов и переведенных на русский язык книг, связанных с микроволновой фотоникой и волоконно-оптическими системами.

Несмотря на высокий научный уровень авторского изложения и тщательную сверку текста рукописи в издательстве, в ходе работы были обнаружены некоторые несоответствия изображений на рисунках и описаний в тексте, а также ссылок на рисунки и формулы. Они оставались в неизменном виде, а правильные, на наш взгляд, указания выносились в сноски в конце страницы.

Данный труд предназначен главным образом для студентов высшей школы и аспирантов, обучающихся по направлению «Фотоника», но, разумеется, может быть полезен для преподавательского состава, для разработчиков аппаратуры в рамках этого только развивающегося в России направления науки и техники, а также для научных и технических специалистов в смежных областях.

Генеральный директор ОАО «РТИ»,
д. т. н., д. э. н., проф. С. Ф. Боев

Президент МИРЭА, академик РАН,
д. ф.-м. н., проф. А. С. Сигов

Предисловие

Представленная книга, как мы надеемся, детальнейшим образом освещает современное состояние исследований по микроволновой фотонике, которую иногда также называют СВЧ или аналоговой фотоникой. Целевая аудитория охватывает широкий круг читателей — от студентов бакалавриата физических и технических специальностей высших учебных заведений до специалистов в этой и смежных областях. Предлагаемый подход является фундаментальным по своей сути и может быть использован во вводном курсе по микроволновой фотонике для студентов магистратуры или продвинутых студентов бакалавриата. Хотя подборка задач и отсутствует, имеющиеся в тексте примеры позволят изобретательному преподавателю разработать задания. Мы также надеемся, что эта книга будет максимально полезна и для закаленных ветеранов данной области. Мы попытались вложить в нашу книгу столько материала по физическим основам, насколько это возможно для издания таких размеров. Иногда эта информация теряется в столь прикладной области, как СВЧ-фотоника. Книга изобилует большим количеством графического материала, отражающего эффективность различных рабочих сценариев. Каждая глава содержит обширную библиографию, включающую, где это возможно, оригинальные источники. Все уравнения приводятся в удобной для использования и поиска форме. Мы полагаем, что этой книгой будет легко пользоваться в ходе исследований, разработки и при проектировании реальных устройств и систем.

Мы стремились к непрерывному повествованию от первой до последней страницы и надеемся, что успешно справились с этой задачей. Новичкам в данной области мы советуем последовательное чтение книги, поскольку содержание последующих глав основано на материале глав предыдущих. Опытные читатели легко разберутся с навигацией по главам книги.

Глава 1 содержит введение в микроволновую фотонику и является самостоятельной в том смысле, что дает привязку материала к последующим главам, в которых излагаются детали. В главе 2 описываются радиочастотные характеристики, наиболее важные для количественного описания систем микроволновой фотоники и по большей части не имеющие непосредственного отношения к оптике. В главах 3–5 проведено фундаментальное исследование шумов, искажений, эффектов распространения и нелинейности оптического волокна в той мере, как это связано с микроволновой фотоникой. Материал этих трех глав не концентрируется на каком-то отдельном механизме модуляции, но скорее предлагает читателю общий подход. Конкретно методы модуляции и соответствующей демодуляции излагаются в главах 6–8 на основе материала предыдущих четырех глав. В главе 6 подробно рассматривается модуляция по интенсивности с использованием внешнего модулятора Маха–Цандера и прямого детектирования. Возможно, сейчас эта техника является наиболее распространенной в микроволновой фотонике и поэтому заслуживает наиболее тщательного изучения. В главе 7 чуть менее подробно рассматривается фазовая модуляция. В главе 8 выполнен полный, но относительно краткий анализ иных многочисленных форматов модуляции. Глава 9 посвящена мощным фотодетекторам. В главе 10 рассматриваются примеры применения и направления современного развития микроволновой фотоники.

Во время написания этой книги мы расширили наши знания во многих разделах, что вдохновило нас на новые идеи. Мы искренне надеемся, что это произойдет со всеми, кто прочитает эту книгу.

ВИНСЕНТ УРИК
ДЖЕЙСОН МАККИНИ
КЕЙТ ВИЛЬЯМС
Вашингтон, округ Колумбия,
США, апрель 2014

Благодарности

Настоящая монография была написана по частной инициативе, и, таким образом, точка зрения, выраженная в ней, есть личная точка зрения авторов, и она не отражает официальной позиции ни исследовательской лаборатории ВМФ США (NRL), ни ВМФ США, ни правительства США. Однако эта работа не могла бы состояться без поддержки NRL, которую авторы чувствовали на протяжении всей своей карьеры. Рабочая обстановка NRL сделала возможным непрерывный прогресс детального теоретического и экспериментального понимания технологии микроволновой фотоники. Этого не случилось бы без поддержки руководства NRL, особенно со стороны администрации и начальников отделений, что способствовало нашим успехам в этой важной технологической области. В их числе Dr. Francis Klemm, Dr. Thomas Giallorenzi, Dr. John Montgomery, Dr. Joseph Weller, Dr. Ronald Esman, Mr. Michael Monsma и Dr. Don Northam. Нам также хотелось бы выразить свою благодарность сотрудникам лаборатории, бывшим и настоящим, внесшим свой вклад в развитии микроволновой фотоники.

Мы признательны всем коллегам и сотрудникам, с которыми имели удовольствие работать на протяжении многих лет. Процитированные в тексте работы указывают на многих вдохновлявших нас, однако некоторые из них заслуживают отдельного упоминания. Прежде всего это Dr. Frank Bucholtz из NRL, который внес значительный вклад в анализ и понимание принципов функционирования аналоговых оптических линий передачи. Его работа является реальным вкладом в представленный результат и заслуживает значительно большего, чем простое, хотя и широкое, цитирование. Профессор Nicholas Frigo с кафедры физики Военно-морской академии США (US Naval Academy Physics Department) оказал помощь в написании разделов, касающихся поляризационных эффектов. Mr. Carl Villarruel из NRL (в отставке) провел бесчисленные часы, обсуждая с нами технические тонкости микроволновой фотоники, особенно аспекты, связанные с влиянием оптического волокна. Dr. Preetpaul Devgan из научно-исследовательской лаборатории ВВС США (US Air Force Research Laboratory) ввел важные понятия, связанные с форматами модуляции. Dr. Andrew Kowalevicz из компании Raytheon повлиял на наши суждения об оптических полях в различных средах. Dr. Marcel Pruessner из NRL дал нам ценный совет по применению кремниевых интегральных схем в микроволновой фотонике. Dr. Olukayode Okusaga из научно-исследовательской лаборатории армии США (US Army Research Laboratory) ознакомил нас с особенностями работы оптоэлектронных генераторов. Bill Jacobs из командования космических и военно-морских систем ВМС США (US Space and Naval Warfare Systems Command) предложил альтернативный взгляд на приложения микроволновой фотоники, а также оказал помощь в выполнении профессиональных обязанностей во время написания этой книги. Мы признательны Dr. Thomas Clark Jr. из лаборатории прикладной физики университета Джонса Хопкинса (Johns Hopkins Applied Physics Laboratory) за детальное рассмотрение многооктавной миллиметровой фотоники и обработки сигналов. Наконец, мы хотели бы поблагодарить всех тех целеустремленных студентов, которых мы учили и наставляли, что позволило нам двигаться вперед на базе уже освоенного материала. Это один из тех случаев, когда понимание приходит только тогда, когда учишь этому кого-то другого; наша убежденность в справедливости этой точки зрения возросла десятикратно в процессе написания этой книги.

Помимо в основном профессиональной признательности, выраженной выше, необходимо поблагодарить многих людей, оказавших на нас огромное влияние. Эта работа никогда не состоялась бы без наших семей и родителей. Наши жены и дети оказывали нам поддержку на протяжении всей работы, постоянно идя нам навстречу. Мы будем вечно благодарны нашим родителям Vincent Urick Sr., Susanne Urick, Dwight McKinney, Deborah McKinney и Gertrude Williams. Это они воспитали в нас интеллектуальный интерес и добросовестность, которые потребовались, чтобы завершить эту книгу. Paul Urick, старомодный фермер из Пенсильвании, и Norman Zlotorzynski, любезный человек, выживший во время высадки союзников в 1944 г. (Омаха-бич), всегда, когда было необходимо, вдохновляли нас. Они оба скончались во время написания этой монографии, которую они так хотели бы увидеть.

Список сокращений

- ACF — amplitude comparison function (функция сравнения амплитуд).
- ASE — amplified spontaneous emission (усиленная спонтанная эмиссия).
- BER — bit error ratio (битовый коэффициент ошибок).
- CDR — compression dynamic range (динамический диапазон по компрессии усиления).
- CDV — compressed digital video (сжатый цифровой формат видеосигнала).
- CIR — carrier-to-intermodulation ratio (отношение несущей к интермодуляционным искажениям).
- CNR — carrier-to-noise ratio (отношение сигнала несущей к шуму).
- CSO — composite second-order (композиционные интермодуляционные искажения второго порядка).
- CTB — composite triple-beat (композиционные интермодуляционные искажения третьего порядка).
- DARPA — Defense Advanced Research Projects Agency (Агентство перспективных исследовательских проектов оборонного назначения).
- DDR — dual depletion region (двойная обедненная область).
- DGD — differential group delay (дифференциальная групповая задержка).
- DPMZM — dual parallel Mach-Zehnder modulator (двойной параллельный ММЦ).
- DRS — double Rayleigh scattering (двойное рэлеевское рассеяние).
- EVM — error vector magnitude (амплитуда вектора ошибок).
- FEC — forward error correction (прямое исправление ошибок).
- FSR — free-spectral range (область свободной дисперсии).
- FWHM — full width at half-maximum (полная ширина на половине максимального значения).
- IFM — instantaneous frequency measurement (измерение мгновенной частоты).
- IP_n — nth-order input intercept point (входная точка пересечения n-го порядка).
- IMDD — intensity modulation direct detection (модуляция по интенсивности и прямое детектирование).
- MDS — minimum detectable signal (минимально обнаруживаемый сигнал).
- MER — modulation error ratio (коэффициент ошибок модуляции).
- MFD — mode field diameter (диаметр модового поля).
- NBUTC — near-ballistic uni-traveling-carrier (один тип почти баллистических носителей заряда).
- NP — noise penalty (штраф за шум).
- OIP₂ — second-order output intercept point (выходная точка пересечения второго порядка).
- OIP₃ — third-order output intercept point (выходная точка пересечения третьего порядка).
- PDA — partially depleted absorber (частично обедненная область поглощения).
- PDG — polarization-dependent gain (поляризационно-зависимое усиление).
- PDL — polarization dependent loss (поляризационные потери).
- PM — polarization-maintaining (с сохранением плоскости поляризации).
- PSK — phase-shift keying (цифровая фазовая модуляция).
- QAM — quadrature amplitude modulation (квадратурная амплитудная модуляция).
- RIN — related intensity noise (относительный шум интенсивности).
- SBS — Stimulated Brillouin scattering (вынужденное рассеяние Манделъштама — Бриллюэна).

- SFDR — spurious-free dynamic range (динамический диапазон по помехам).
SNR — signal-to-noise ratio (отношение сигнала к шуму).
SRS — Stimulated Raman scattering (вынужденное комбинационное рассеяние).
SSB — single sideband (однополосный).
TTD — true time delay (задержка в истинном масштабе времени).
UTC — uni-traveling-carrier (один тип носителей заряда).
VCSEL — vertical cavity surface emitting laser (лазер поверхностного излучения с вертикальным резонатором).
XPM — cross-phase modulation (фазовая кросс-модуляция).
АИГ — алюмоиттриевый гранат.
АОМ — акустооптический модулятор.
АФАР — активная фазированная антенная решетка.
АЦП — аналого-цифровой преобразователь.
АЧХ — амплитудно-частотная характеристика.
БВУ — Бриллюэновский волоконный усилитель.
БИХ-фильтр — фильтр с бесконечной импульсной характеристикой.
ВАХ — вольт-амперная характеристика.
ВОЛЗ — волоконно-оптическая линия задержки.
ВОЛП — волоконно-оптическая линия передачи.
ВОСП — волоконно-оптическая система передачи.
ВтАХ — ватт-амперная характеристика.
ВЧ — высокая частота.
ГКПФ — генератор колебаний произвольной формы.
ГМС — гибридное мостовое соединение.
ДФП — двухфотонное поглощение.
ИМИ — интермодуляционные искажения.
ИМЦ — интерферометр Маха — Цандера.
ИОМ — измеритель оптической мощности.
КИХ-фильтр — фильтр с конечной импульсной характеристикой.
КП — контроллер поляризации.
КТВ — кабельное телевидение.
ЛФД — лавинный фотодиод.
МВФ — микроволновая фотоника.
МЛИ — многолучевая интерференция.
ММЦ — модулятор Маха — Цандера.
МШУ — малошумящий усилитель.
ОАС — оптический анализатор спектра.
ОГКЧ — оптический генератор комбинационных частот.
ОФМ — оптическая фазовая модуляция.
ОЭГ — оптоэлектронный генератор.
ОЭП — оптико-электрический преобразователь.
ПВП — полуволновая пластина.
ПДЛ — поляризационный делитель луча.

- ПКМ — поляризационная кросс-модуляция.
ПЛИ — полупроводниковый лазерный излучатель.
ПМ — поляризационный модулятор.
ПМД — поляризационная модовая дисперсия.
ПОА — переменный оптический аттенюатор.
ПОУ — полупроводниковый оптический усилитель.
ППФ — полосно-пропускающий фильтр.
ПЧ — промежуточная частота.
ППЧ — понижающее преобразование частоты.
РАС — радиочастотный анализатор спектра.
РБО — распределенный брэгговский отражатель.
РВУ — рамановский волоконный усилитель.
РЛС — радиолокационное средство.
РОС — распределенная обратная связь.
РЭБ — радиоэлектронная борьба.
РЭП — радиоэлектронное противодействие.
СВЧ — сверхвысокая частота.
СДМП — спектральный демультимплексор.
СМП — спектральный мультиплексор.
СПМ — спектральная плотность мощности.
СПМШ — спектральная плотность мощности шума.
СРК — спектральное разделение каналов (WDM).
СФС — схема фазовой синхронизации.
ФИС — фотонная интегральная схема.
ФКМ — фазовая кросс-модуляция.
ФСМ — фазовая самомодуляция.
ФЧХ — фазочастотная характеристика.
ЦОС — цифровая обработка сигналов.
ЧВП — четвертьволновая пластина.
ЧВС — четырехволновое смешение.
ЧМХ — частотно-модуляционная характеристика.
ЭАМ — электроабсорбционный модулятор.
ЭВУ — эрбиевый волоконный усилитель.
ЭМП — электромагнитная помеха.
ЭОП — электрооптический преобразователь

ГЛАВА I

ВВЕДЕНИЕ

Микроволновая фотоника¹ (МВФ) представляет собой междисциплинарную область знаний, охватывающую оплотехнику, сверхвысокочастотную (СВЧ) радиоэлектронику и электротехнику. Соответственно, рабочие частоты МВФ должны простирались от менее 1 кГц в радиочастотном диапазоне до сотен терагерц в оптическом диапазоне. Причина появления данного направления связана с необходимостью решения постоянно усложняющихся инженерно-технических задач, заставивших радиоинженеров в поисках новых возможностей выйти за пределы своей дисциплины и обратиться к оптическому диапазону. В общем, микроволновая фотоника естественным образом связана с ее основами и развивается на базе современных потребностей радиосистем. Тем не менее технологии создания ее компонентной базы требуют развития множества областей фундаментальных исследований.

Хотя микроволновая фотоника как область знаний не была формально признана в международном масштабе вплоть до конца 80-х — начала 90-х годов прошлого столетия [1.1], история ее развития продолжается несколько десятков лет. Начало использования радиочастотного диапазона для осуществления телеграфной связи в первой половине 19-го века привело к появлению такой профессии, как радиоинженер. Однако потребность в ней была не слишком велика вплоть до интенсивного развития во время Второй мировой войны радиолокационной техники [1.2], предназначенной для «электронного» поиска летательных аппаратов, что резко увеличило необходимость в специалистах с опытом работы в аналоговой или радиотехнической области. Позже, когда радиолокатор был признан как эффективный инструмент для обнаружения, получило развитие радиоэлектронное противодействие (РЭП), назначение которого состояло в запутывании и препятствии эффективной работе операторов радиолокационных средств (РЛС). Появление РЭП вызвало необходимость модернизации РЛС так, чтобы ослабить влияние противодействия. Этот итерационный процесс идет по сегодняшний день и будет продолжаться в будущем, поскольку конечной целью разработчиков РЛС является «видеть, но при этом быть невидимым» [1.3]. Продвижение в область более высоких частот и стремление задержать сигналы на этих частотах вызвали необходимость в линиях задержки с уменьшенными потерями. Таким образом, ранние перспективы создания с помощью технологий МВФ линий задержки СВЧ-сигналов с низкими потерями и большими временами запаздывания тесно связаны с вышеописанной конкуренцией РЛС и средств РЭП.

Современный этап общественного развития состоит в широчайшем использовании электромагнитного спектра для коммуникаций. Для облегчения связи между двумя и более пользователями были разработаны радио- и телевизионное вещание, сотовые телефоны, спутниковая связь, радиопереговорные устройства и множество других аппаратурных средств. В аппаратуре данных систем используются передача и обработка сигналов радиочастотного диапазона. За счет широкого внедрения микроэлектронных схем с их преимуществами в габаритах, потребляемой мощности и быстродействию в большинстве этих систем произошел переход от чисто аналоговых к смешанным аналого-цифровым методам обработки сигналов. При этом аналоговые сигналы оцифровываются и еще до обратного преобразования в непрерывные колебания для дальнейшего использования в аналоговом формате обрабатываются и/или транспортируются в цифровой форме. Хотя в современных

¹ Отечественный эквивалент — «радиофотоника». — *Прим. пер.*

радиосистемах все больше и больше применяется цифровая обработка сигналов (ЦОС), аналоговые волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) также являются важным и практичным инструментальным средством для радиоинженера в разработке вышеуказанных радиосистем. Возможность обработки сигнала в аналоговой среде может упростить общее системное проектирование, особенно в широкополосных системах, где требования к полосе пропускания сложно удовлетворить при помощи средств ЦОС. Однако чтобы обеспечить максимальные эффективность и производительность, разработчик аналоговой системы должен выбрать аналоговые аппаратурные средства, наилучшим образом сочетающиеся с характеристиками современных средств ЦОС.

В наиболее общей форме аналоговая фотонная схема представляет собой линию задержки, содержащую электрооптический преобразователь (ЭОП), предназначенный для преобразования радиочастотного сигнала в оптический диапазон, оптическую среду передачи и оптико-электрический преобразователь (ОЭП). Обобщенная функциональная схема многоканальной ВОСП представлена на рис. 1.1. Сигналы одного или нескольких радиочастотных входов конвертируются в оптический диапазон с помощью соответствующих ЭОП. Преобразованный в оптический диапазон радиочастотный сигнал может быть задержан во времени посредством оптического волокна, обработан и доставлен на входы одного или нескольких ОЭП, где оптические сигналы демодулируются обратно в электрические сигналы радиочастотного диапазона. Элементы обработки могут выполнять множество функций, включая, например, коммутацию, маршрутизацию, фильтрацию, частотное преобразование и усиление. Характеристики различных форм реализации вышеуказанных аналоговых фотонных схем будут рассмотрены в последующих главах.

В настоящее время преимущества волоконно-оптических линий по сравнению с «электронными» аналогами (линиями на базе коаксиальных кабелей) уже получили подтверждение для целого ряда применений. На рис. 1.2 показано одно из первых применений в военной технике, заключающееся в использовании волоконно-оптической линии в бортовой буксируемой радиолокационной ловушке ALE-55. Принцип выноса радиопередатчика из летательного аппарата в целях ухода от назначенной цели радиоуправляемой ракеты известен, по крайней мере, с 60-х годов прошлого столетия [1.4] и позже был реализован в волоконно-оптическом варианте [1.5]. В ранних разработках обнаруженный с помощью приемной антенны радиолокационной ловушки сигнал потенциальной угрозы усиливался и снова передавался в обратном направлении с большей мощностью. Однако из-за неизбежных габаритных ограничений, диктуемых требуемыми аэродинамическими характеристиками ловушки, с ее помощью мог выполняться только ограниченный объем операций по обработке радиосигналов. Применение между летательным аппаратом и ловушкой соединительного волоконно-оптического кабеля дает возможность использования расположенных на борту самолета современных сигнальных процессоров с последующей передачей результатов дистанционной обработки в буксируемую за ним ловушку, на борту которой осуществляются усиление и передача аналоговых радиосигналов. Это обеспечивает ее многофазное действие по устранению ракетной угрозы, включая подавление возможности РЛС противника отслеживать летательное средство, дезориентирование РЛС посредством ложных целей и уход ракеты от самолета путем постановки более привлекательной цели.



Рис. 1.1. Обобщенная функциональная схема многоканальной ВОСП

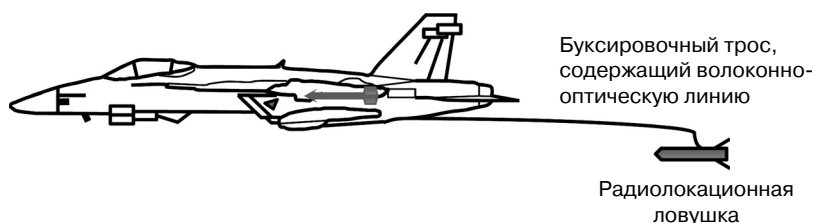


Рис. 1.2. Вид буксируемой радиолокационной ловушки с самолетом F/A-18

Применение волоконно-оптического подхода минимизирует габариты ловушки и уменьшает механические напряжения соединительного троса, что обеспечивает ее эффективное использование для более широкого класса летательных аппаратов.

Одним из первых примеров широкого коммерческого применения аналоговых ВОСП стали сети гибридной волоконно-коаксиальной структуры для распределения сигналов кабельного телевидения [1.6]. Данный подход предоставил операторам кабельных сетей возможность повысить количество и качество доставляемых в дома и квартиры видеопрограмм и предоставить абонентам экономичные и высоконадежные услуги по высокоскоростной передаче цифровых данных по обратному каналу. Комбинированные волоконно-коаксиальные системы преобразовали роль операторов кабельной индустрии от поставщика только видеоконтента в реального конкурента на рынке локальных сетей доступа, что было традиционной нишей операторов телефонных систем. Наряду с распространением интернет-сетей это позволило в настоящее время сформировать конкурентоспособную инфраструктуру по передаче широкополосных видов информационных услуг. К середине 90-х годов прошлого столетия появилась возможность одновременной доставки посредством сетей волоконно-коаксиальной структуры более 100 стандартных телевизионных каналов в формате AM-VSB (амплитудная модуляция с частично подавленной боковой полосой) на расстояния более 20 км при различной топологии оптических сетей. Ключевую роль в этом достижении сыграла способность распределения в оптическом диапазоне видеосигналов с высоким уровнем отношения сигнала несущей к шуму (CNR) и низкими уровнями композитных интермодуляционных искажений второго и третьего порядков: соответственно CSO — compositesecnd-order, CTB — compositetriple-beat. Для данного применения уже на раннем уровне была проделана значительная работа по улучшению линейности аналоговых ВОСП, включая линеаризацию процесса внешней модуляции [1.7] и изучение влияния на переходные помехи нелинейностей оптического волокна [1.8]. Источникам нелинейности в аналоговой ВОСП посвящена существенная часть настоящей монографии. Почти одновременно с преобразованием кабельной и телефонной отраслей с помощью сетей волоконно-коаксиальной структуры начался переход от распределения аналоговых видеопрограмм в формате AM-VSB к доставке видеопрограмм в сжатом цифровом формате (CDV). Хотя этот переход замедлился из-за стоимости замены укоренившейся и дорогой инфраструктуры, к настоящему моменту формат CDV вытеснил большинство технологий распределения аналоговых видеопрограмм в формате AM-VSB. Тем не менее волоконно-оптическая среда передачи оставляет возможность выбора формата передачи информации в таких информационно-телекоммуникационных системах, включая традиционные аналоговые телевизионные каналы.

В радиоастрономии для приема эфирного радиочастотного излучения используются большие антенные устройства. Важная роль в данной области отводится микроволновой технике, которая в современных системах сочетается с аналоговыми ВОСП [1.9]. Самая большая в мире полностью управляемая одиночная антенна входит в состав расположенного в Западной Вирджинии радиотелескопа Greenbank (GBT) с рабочей полосой от 0,1 до 115 ГГц [1.10, 1.11]. Для повышения уровня научного понимания в таких направлениях, как обнаружение гравитационных волн (с прецизионной синхронизацией по радиоизлучению пульсара), формирование звезд, галактик и галактических кластеров, а также

строение планет, используется параболическая антенна диаметром 100 м. Предметом исследований с помощью данной антенны является обнаружение атомных и молекулярных линий излучения, начиная с ситуаций высокого красного смещения (эмиссия областей, близких к черным дырам) и до случаев измерения слабых пространственно-протяженных спектральных линий, что может быть использовано для выявления новых органических молекул в космосе. В GBT аналоговые ВОСП применяются для удаленной передачи сигналов в центр обработки данных [1.12]. Для повышения пространственного разрешения параболические антенны с относительно небольшой апертурой могут быть объединены в форме фазовой решетки, что позволяет расширить их базу при измерении малых фазовых сдвигов. Такая решетка, фрагмент которой показан на рис. 1.3, была впервые введена в эксплуатацию в 2013 году в горах Чили [1.13]. В настоящее время аналоговые ВОСП продемонстрировали потенциал эффективного применения в больших радиоастрономических антенных решетках при дистанционной передаче сигналов миллиметрового диапазона волн [1.14]. В связи с тем, что радиосигналы возникают на астрономических расстояниях и, таким образом, их мощность очень мала, крупные антенные системы с очень малыми коэффициентами шума конфигурируются и работают в форме больших фазовых решеток. Преимущество таких систем заключается в общем усилении решетки благодаря ее большой эффективной апертуре и фазовой чувствительности вследствие длинной базы. В некоторых системах сигналы от целых 64 двенадцатиметровых параболических антенн с длиной базы 16 км должны когерентно складываться на центральной станции. Поскольку рабочие частоты могут достигать сотен гигагерц, необходимо с высокой точностью учитывать относительную разность хода. Это очень критично даже при применении волоконной оптики [1.15], так как совместное действие температурных вариаций, дрейфа поляризации и хроматической дисперсии вызывает погрешности, требующие активной компенсации. Детальное рассмотрение волоконно-оптических линий для радиотелескопов GBT и ALMA выполнено в главе 10.

Выше было упомянуто лишь несколько из большого числа примеров эффективного применения волоконно-оптических средств в составе радиосистем метрового, дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн. В настоящее время подтверждена полезность микроволновой фотоники в военном, промышленном и академическом секторах экономики. Другие направления применения включают: волоконно-эфирные топологии сетей радиосвязи, доставку энергии на антенные облучатели для калибровки антенн и антенных решеток, маршрутизацию и диаграммообразование с задержкой в истинном масштабе времени (*true time delay*, TTD) в антенных решетках, обработку,



Рис. 1.3. Большая интерферометрическая антенная решетка миллиметровых/субмиллиметровых волн ALMA в Атакама, Чили (с разрешения ALMA (национальные обсерватории Европы, Японии и США), J. Guarda)

фильтрацию, синтез радиосигналов в оптическом диапазоне, оптоэлектронные генераторы для прецизионного формирования радиосигналов, оптические синхрогенераторы для прецизионного хронирования, а также повышающие и понижающие преобразователи частоты радиосигналов. Предметом изучения настоящей монографии являются основная техника построения и компонентная база аналоговых ВОСП, включая некоторые особенности применения данной технологии в главе 10.

1.1. Технологические достижения и преимущества, способствующие развитию волоконно- оптических линий

Частотный диапазон, занимаемый областью МВФ, в большой степени определяется природными условиями. Затухание в атмосфере радиочастотного излучения на уровне моря при различных атмосферных условиях показано на рис. 1.4 [1.16]. Как видно из рисунка, в атмосфере имеются полосы сильного поглощения в районах 23, 60, 119 и 182 ГГц. Между этими частотами расположены так называемые окна прозрачности с относительно низким уровнем затухания радиоволн. Системы, работающие на частотах ниже 20 ГГц, получили распространение для наземных применений или применений на уровне моря, и только небольшое число радиосистем работают во втором и третьем окнах с центральными частотами соответственно в районе 35 и 94 ГГц. Из рис. 1.4 следует, что эти системы функционируют при атмосферном затухании на уровне моря не более 0,3 дБ/км. На высотах более 9,2 км затухание в вышеуказанных атмосферных окнах прозрачности уменьшается и составляет менее 0,05 дБ/км на частотах вплоть до 300 ГГц [1.17]. Задав 0,3 дБ/км в качестве допустимого затухания на уровне моря, можно рассматривать использование сигналов с частотами до 300 ГГц на больших высотах, как, например, между воздушными объектами. В терминах относительной ширины полосы 300 ГГц — это всего лишь 0,16% от полосы оптической несущей на волне 1550 нм (193 ТГц). Такая малая относительная полоса дает возможность реализовать с помощью фотоники большое число применений, включая

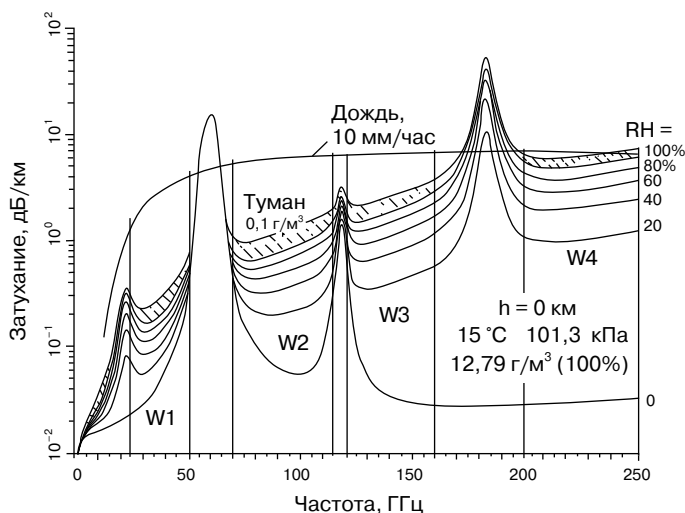


Рис. 1.4. Специфическое атмосферное затухание на уровне моря для различных уровней относительной влажности (RH), включая туман и дождь. Окна прозрачности обозначены W1–W4 [1.16]

мультиплексирование радиосигналов. Вдобавок показано, что многие технологии создания фотонных устройств пригодны в диапазоне 100–300 ГГц, что делает эту технологию применимой во всей частотной полосе (см. раздел 10.5). Область микроволновой фотоники развивалась в большой мере благодаря таким прикладным потребностям. Однако прежде чем данная технология смогла процветать, потребовался ряд значительных прорывных достижений, включая разработку оптических волокон с низкими потерями и высокоэффективных широкополосных ЭОП и ЭЭП.

На рис. 1.5 представлены типичные поперечное сечение и профиль изменения показателя преломления ступенчатого оптического волокна. Оптически высокоплотная стеклянная сердцевина с показателем преломления n_1 и диаметром d_1 окружена немного менее оптически плотной стеклянной оболочкой с показателем преломления n_2 и диаметром d_2 . Толщина оболочки достаточно велика, чтобы в ней слабое электрическое поле распространяющейся моды (или мод) экспоненциально затухало. Для защиты от воздействия окружающей среды стекло оболочки обычно покрывается полимером с еще более низким показателем преломления. Типичные диаметры сердцевины и оболочки находятся в пределах соответственно от 8 до 50 мкм и от 60 до 125 мкм. Разность показателей преломления сердцевины и оболочки и диаметр сердцевины определяют, сколько распространяющихся мод волоконного световода может поддерживаться на данной длине волны.

Распространение волн внутри диэлектрического волновода, сформированного в оптическом волокне, описывается уравнениями Максвелла. Решая волновые уравнения, можно определить нормализованную частоту или число V волокна:

$$V = \frac{\pi d_1}{\lambda} \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}, \tag{1.1}$$

где λ — длина волны. Для типичных оптических волокон нормализованная разность показателей преломления: $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ обычно $\ll 1$. При этом уравнение (1.1) упрощается:

$$V = \frac{\pi d_1}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta} = \frac{\pi d_1}{\lambda} NA, \tag{1.2}$$

где NA — числовая апертура волокна. В лучевой оптике $NA = n_0 \sin \theta$, где θ — половинный угол падения, а n_0 — показатель преломления среды, в которой распространяется луч до падения на торец волокна (для воздуха $n_0 = 1$). Параметр NA является мерой способности волокна собирать оптическое излучение, при этом свет, падающий на торец волокна под углом, большим θ , по отношению к его главной оптической оси не возбуждает распространяющуюся моду. Можно показать, что для всех значений V вплоть до первого нуля функции Бесселя J_0 , когда $J_0(V) = 0$ (см. приложение 6), волновод будет поддерживать

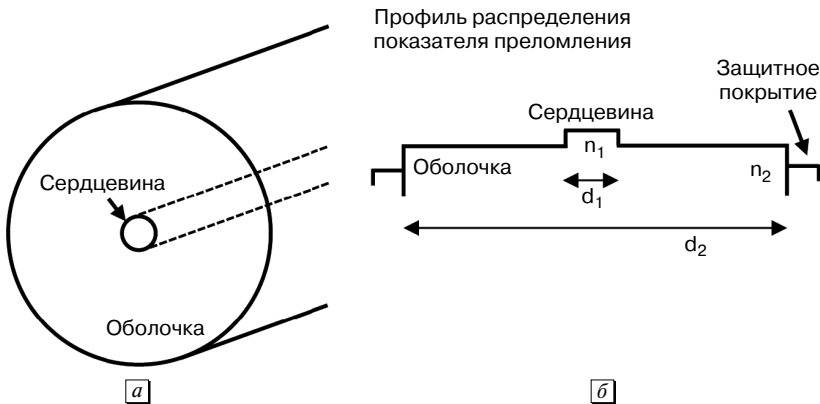


Рис. 1.5. Изображение областей сердцевины и оболочки одномодового волокна (а) и профиля распределения показателя преломления для волокна ступенчатого типа (б)

распространение только гибридной моды самого низкого порядка HE_{11} [1.18]. Таким образом, для $V < 2,405$ волновод является одномодовым. Когда значение V превышает 2,405, волновод поддерживает моды более высокого порядка, и при достаточно больших V число распространяющихся мод можно оценить как $V^2/2$. Диаметр сердцевины типичного одномодового волокна на волне 1550 нм составляет 10 мкм, и одномодовый режим сохраняется вплоть до разности показателей преломления 0,006. Столь малая разность показателей преломления возможна за счет добавления в чистое плавное кварцевое стекло (SiO_2) легирующих материалов, как, например, GeO_2 , P_2O_5 или B_2O_3 .

Многомодовые волокна с большими сердцевинами начали производиться раньше одномодовых и типично достигли меньших потерь благодаря повышенным допускам к несовершенству геометрии волновода. Однако в радиофотонных линиях при высоких передаваемых частотах для того, чтобы избежать дополнительных потерь вследствие межмодовой дисперсии, почти исключительно применяются одномодовые волокна. Временной прогресс в уменьшении оптических потерь многомодовых и одномодовых волокон в терминах потерь при распространении представлен на рис. 1.6. Фундаментально потери ограничиваются рэлеевским рассеянием в волокне и равны 0,175 дБ/км на волне 1,55 мкм. Как видно из рис. 1.6, потери в волокне уменьшились ниже 1 дБ/км к 1974 году и не превышали 10% от рэлеевского предела к 1981 году. В последующих главах будет показано, что для многих форматов модуляции ВОСП радиочастотные потери в МВФ линии в два раза (в дБ) превышают оптические потери. Следовательно, к 1981 году потери на распространение радиочастотного сигнала в линии задержки должны были составлять всего лишь 0,4 дБ/км на волне 1550 нм. Поскольку спектральная зависимость оптических потерь минимальна в пределах полосы шириной несколько нанометров (сотни гигагерц на волне 1550 нм), потери на распространение радиосигнала практически не зависят от частоты.

Низкие потери в оптическом волокне создали перспективу существенного улучшения параметров радиочастотных линий задержки при условии, что будут разработаны электрооптический и оптико-электрический преобразователи с соответствующими полосами пропускания. Первоначально наиболее важным рабочим частотным диапазоном считалась область ниже первого атмосферного окна прозрачности (рис. 1.4) с верхней частотой до 20 ГГц, в которой функционировало значительное число радиосистем. В качестве ЭОП выбором раннего этапа стал полупроводниковый лазер благодаря его субнаносекундному времени жизни фотонов в GaAs (длины волн до 860 нм) и InGaAsP (длины волн до 1600 нм). Непосредственная модуляция тока накачки в этих лазерах обеспечивает простой механизм

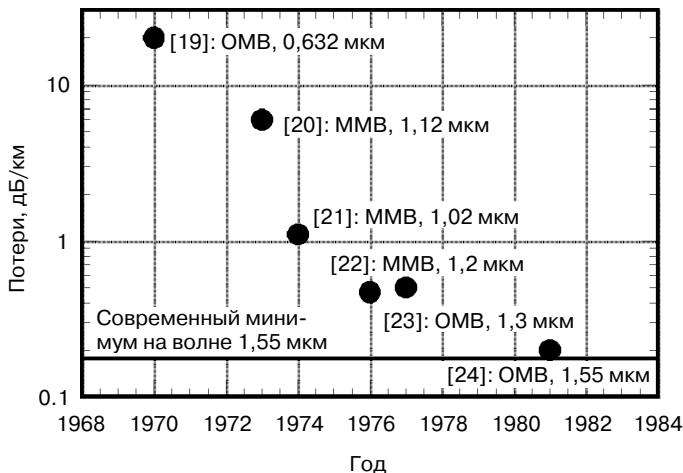


Рис. 1.6. Достигнутые потери в одномодовых (ОМВ) и многомодовых (ММВ) оптических волокнах для различных длин волн [1.19–1.24]

электрооптического преобразования. К середине 80-х годов был проведен целый ряд экспериментальных демонстраций с полосой модуляции вплоть до 10 ГГц [1.25]. Первая демонстрация полупроводникового лазера с полосой модуляции более 20 ГГц была на 1,3 мкм с использованием зарощенной гетероструктуры в объемном материале [1.26]. Исследования, продолжающиеся в этом направлении, заключались в улучшении дифференциальной эффективности (что давало возможность увеличить эффективность электрооптического преобразования) и расширении полосы модуляции. Большие ожидания были связаны с тем, что разработка многоквантоворазмерных лазеров приведет к улучшению дифференциальной эффективности благодаря их свойствам ограничения носителей заряда и малым концентрациям носителей, требуемым для создания инверсии [1.27]. Однако этого не произошло до тех пор, пока не был изучен высокоскоростной транспорт носителей при их двунаправленном взаимодействии с квантовыми ямами и не было показано [1.28], что полоса лазеров с квантовыми ямами превышает полосу лазеров с отсутствием квантового ограничения. Вскоре последовала разработка лазеров с распределенной обратной связью (РОС), обеспечивающих работу в режиме одной продольной моды. Хотя лазеры с полосой 20 ГГц обеспечивали применение в большом числе радиосистем, пик шума интенсивности полупроводникового лазера вблизи верхнего края полосы модуляции приводил к снижению отношения сигнала к шуму. Влияние этого пика шума интенсивности (или относительного шума интенсивности — RIN) может быть уменьшено за счет расширения полосы модуляции, что было показано для РОС-лазеров с полосой более 25 ГГц на волне 1550 нм [1.29] и более 40 ГГц [1.30].

На дальнем конце линии для обратного преобразования сигнала радиодиапазона, переносимого на оптической несущей, требуется оптико-электрический конвертер. Наиболее значимым прибором для этой цели является фотодиод с *p-n*-переходом и введенным для уменьшения емкости обедненным слоем с собственной проводимостью, получивший название *p-i-n*-фотодиода. Результаты работ по высокоскоростным фотодиодам раннего периода показали существенно более широкие полосы по сравнению с высокоскоростными лазерами [1.31], и, в общем, фотодиоды не стали ограничивающим по полосе устройством в составе первых радиофотонных линий. При конструировании этих фотодиодов в виде объемной структуры с поверхностной засветкой имеются компромиссные решения [1.32]: увеличение толщины обедненной области снижает емкость (расширяет полосу пропускания) и улучшает коэффициент поглощения, но увеличивает время пролета носителей (сужает полосу). Этого можно избежать путем использования волноводной либо распределенной с бегущей волной конструкций, что приводит к одновременному улучшению и эффективности, и полосы, но за счет сложности конструкций прибора и корпуса.

Помимо низких потерь при распространении для радиочастотных ВОСП большое значение имеют доступная информационная полоса и независимость от частоты потеря в волокне. Это резко контрастирует с потерями при распространении в радиочастотном коаксиальном кабеле, где зависимость, как правило, соответствует квадратному корню из изменения частоты. В качестве примера рассмотрим рис. 1.7(*a*), где приведены зависимости от частоты потерь при распространении в двух типах коаксиальных кабелей RG-401 и RG-405, а также потеря при распространении в оптическом волокне. В общем, больший диаметр кабелей, таких как RG-401, имеет тенденцию к меньшим потерям, но также и более низкой граничной частоте по сохранению в волноводе одномодового режима. Отметим, что потери в коаксиальном кабеле растут на порядок на каждые два порядка увеличения частоты, то есть его характеристика потерь изменяется по закону квадратного корня от частоты. Заметим также, что потери при распространении в коаксиальном кабеле на два-три порядка выше, чем в оптическом волокне. Эта причина сама по себе послужила толчком для дальнейшего развития технологии МВФ вплоть до настоящего времени.

Когда в ходе сравнения коаксиального кабеля и волокна кроме потерь на распространение учитываются также потери в ЭОП и ОЭП, разница не соответствует показанной на рис. 1.7(*a*). Полные потери в волоконно-оптической линии и потери при распространении в кабеле RG-401 на трех различных частотах как функция от дальности приведены

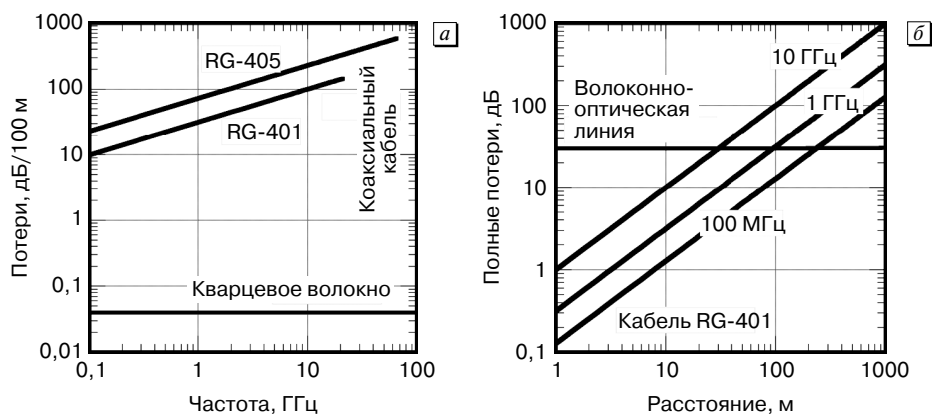


Рис. 1.7. Потери как функция частоты, включая только потери при распространении в кабеле типов RG-401, RG-405 и в кварцевом волокне (а) и дальности распространения для RG-401 на трех частотах (б). На рис. 1.7(б) в потери в оптическом волокне входят фиксированные потери 30 дБ вследствие прямого и обратного ЭОП

на рис. 1.7(б). В потери в волоконно-оптической линии входят 30-дБ потери на преобразование вследствие потерь при электрооптическом и оптико-электрическом преобразованиях. Благодаря исключительно низким потерям на распространение всегда найдется длина, при которой волоконно-оптическая линия будет превосходить коаксиальный кабель с точки зрения потерь. Эта точка пересечения имеет тенденцию к увеличению с понижением частоты, тем не менее типичными являются расстояния от десятков до нескольких сотен метров. Если бы потери были единственным критерием, то волокно всегда бы использовалось в длинных линиях, однако в таблице решений принимаются во внимание и другие факторы. В частности, могут совместно учитываться стоимость, шумовая характеристика, фазовая стабильность, габариты, нечувствительность к электромагнитным помехам и другие факторы. Эти дополнительные соображения могут оказаться решающим фактором для использования волоконной оптики даже в очень коротких линиях передачи. Например, на рис. 1.8 относительный фазовый сдвиг сигнала при распространении по оптическому волокну, выраженный в нормализованных единицах (частях на миллион), сравнивается со сдвигом в коаксиальном кабеле. Конструкция коаксиального кабеля содержит большое число разных материалов, включая сплошные и скрученные металлические экраны, различные виды металлов и разнообразные диэлектрические материалы, каждый из которых обладает собственным коэффициентом температурного расширения. В результате групповая скорость распространения сигналов в коаксиальном кабеле становится сложной функцией от температуры. В противоположность этому оптическое волокно изготавливается преимущественно из плавленного кварца. В нем температурные изменения задержки при распространении являются следствием зависимости от температуры как физической длины волновода, так и показателя преломления (см. также 5.3). Относительное изменение задержки на единицу длины и градус температуры для волокна без покрытия составляет 8×10^{-6} [1.33], если оно не прикреплено механически к другому материалу с большим коэффициентом температурного расширения. Данная величина учитывает температурные зависимости как материала, так и геометрии волновода. Флуктуации длины очень малы и легко предсказуемы в широком интервале температур при условии минимизации температурных зависимостей, связанных с покрытием волокна и конструкцией кабеля. Это свойство может стать серьезным преимуществом в системах, где требуется фазовая стабильность или предсказуемость изменения фазы в линии передачи.

Другие часто цитируемые преимущества, связанные с использованием волоконно-оптических линий, включают: 1) достигнутую полосу пропускания более 10000 ГГц; 2) уменьшенные габариты кабеля: субмиллиметровые диаметры оптических волокон

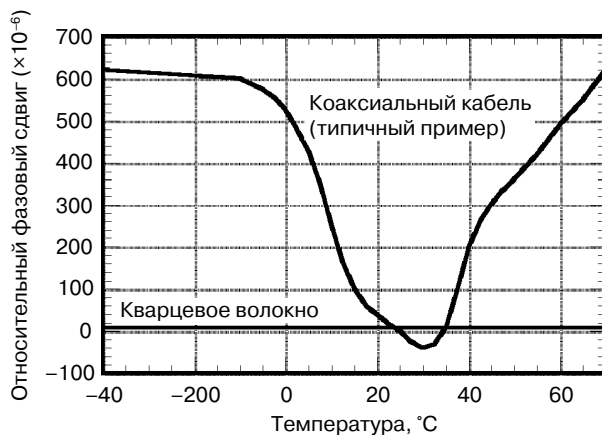


Рис. 1.8. Температурная зависимость относительного фазового сдвига для коаксиального кабеля и оптического волокна

против диаметров 3–10 и более миллиметров в коаксиальных кабелях; 3) соответствующее уменьшение массы при возможности минимизации требуемых в кабельных конструкциях защитных материалов; 4) непроводящие и неметаллические элементы, обеспечивающие пригодность волокна в случаях необходимости электрической изоляции между передатчиком и приемником; 5) преимущества в отношении воздействия окружающей среды, как, например, способность работы при погружении в жидкости, жидкий азот и т.д.; 6) невосприимчивость к коррозии. Использование аналоговых ВОСП дает дополнительные менее очевидные преимущества, которые трудно или невозможно достичь электрическим путем. Эти свойства содержат способность реализовать переменную задержку в истинном масштабе времени (TTD), а также мультиплексирование радиосигналов. Последнее достоинство заключается в тесном группировании миниатюрных волокон внутри одного кабеля, что позволяет уменьшить температурную зависимость между волоконными линиями [1.34]. Данный подход дает возможность улучшить отслеживание фазы при большом числе волоконных линий, что может быть использовано при построении фазированных антенных решеток. В качестве альтернативы группирования волокон можно воспользоваться исключительно широкой полосой пропускания волокна для того, чтобы мультиплексировать множество радиосигналов внутри одной волоконной линии с использованием различных оптических несущих. Такие линии и связанные с ними нелинейности были прежде всего изучены как средство распределения каналов кабельного телевидения [1.8] и позднее — для передачи более высокочастотных сигналов СВЧ-диапазона от антенных решеток [1.35]. Многие из перечисленных преимуществ и их влияние на характеристики линий передачи обсуждаются в тексте данной монографии.

1.2. Сравнение аналоговых и цифровых волоконно-оптических линий

Существующий на сегодняшний день уровень радиофотонной технологии был бы невозможен, если бы он не основывался на достижениях волоконной оптики в цифровых телекоммуникационных системах. Применение оптического волокна для транспортирования цифровых информационных данных в глобальном масштабе коренным образом изменило инфраструктуру мировой связи. Интернет и связанные с ним требования по расширению полосы неизбежно повлекли за собой разработку и внедрение многоканальных

волоконно-оптических цифровых линий так, чтобы максимально использовать информационную емкость каждого кабеля. Дополнительное преимущество широкого применения оптического волокна для телекоммуникаций заключается в существовании обширной компонентной базы, большая часть которой может быть использована для целей микроволновой фотоники. Эффекты от повышения масштаба применения и массового производства большинства этих приборов привели к снижению стоимости аналоговых ВОСП за исключением тех случаев, когда требовались специализированные компоненты, не имеющие двойного применения в цифровых ВОСП.

Различия между аналоговыми и цифровыми телекоммуникационными ВОСП могут быть весьма существенными. В цифровой области единицы и нули могут кодироваться в оптических линиях в виде групп фотонов (оптический импульс) или отсутствия фотонов. Причем соответствие текущего импульса единице или нулю не имеет значения. Шум и временная неопределенность могут исказить сигнал в процессе модуляции, распространения и/или детектирования. Пока шум и временная неопределенность достаточно малы, с помощью интегратора можно четко разделить наличие либо отсутствие импульса, используя пороговое решение в данном временном интервале. В оптических линиях связи раннего периода электрические регенераторы периодически устраняли шум и временную неопределенность и регенерировали информацию, обеспечивая, таким образом, распространение на очень большие расстояния. Наоборот, в аналоговых ВОСП необходимо принимать во внимание наличие или минимизировать влияние этого шума и временной неопределенности. Во многих современных цифровых системах количество электрических регенераторов минимизируется или же они совсем не используются из экономических соображений. Следовательно, многие линии цифровой связи большой протяженности являются по сути аналоговыми в смысле, что операция квантования осуществляется на выходе линии после передачи сигналов.

Чтобы пояснить данную точку зрения, на рис. 1.9 приведена структурная схема типичной линии цифровой связи большой протяженности. На вход ЭОП подается цифровой сигнал (последовательность единиц и нулей). Поскольку ослабление на всей длине распространения сигнала не дает возможности детектирования с низким коэффициентом ошибок, сигнал приходится периодически усиливать с помощью нескольких оптических усилителей типично эрбиевых волоконных усилителей (ЭВУ). На конце линии передачи сигнал снова преобразуется в электрическую форму с помощью ОЭП для дальнейшей электронной обработки. Входной цифровой сигнал (показан посередине слева) содержит последовательность единиц и нулей, представленных как два уровня напряжения. Это не более чем радиочастотный сигнал полосы модулирующих частот, который может быть представлен с помощью преобразования Фурье или эквивалентно посредством спектральной характеристики, как показано в нижней части рисунка (слева). Спектральная характеристика периодического псевдослучайного сигнала¹ в формате NRZ (без возвращения к нулю) представляет собой набор отдельных линий, амплитуда которых меняется с частотой согласно функции $\text{sinc}^2(f)$, а расстояние между ними — обратно пропорционально длине импульсной последовательности [1.36]. На рис. 1.9 также показаны уровни шума. На выходе линии шум увеличивается из-за влияния усилителей. Как показано на этом рисунке, основная тактовая частота, связанная со скоростью передачи данных, увеличилась, что может быть связано с влиянием малого уровня хроматической дисперсии линии, приводящей к уширению распространяющегося импульса. Такая «цифровая» линия может рассматриваться как аналоговая оптическая система, по которой с одного конца до другого передается множество радиочастот. Это справедливо только при отсутствии в транспортной цепочке решающих схем, как это получается при использовании линейного цифрового регенератора, в котором осуществляются операции детектирования, восстановления тактовой частоты и формы передаваемого сигнала. На современном этапе основное внимание

¹ Импульсная или цифровая последовательность бывает либо периодической, либо случайной (псевдослучайной). Судя по дискретному спектру, это все-таки периодическая последовательность. — *Прим. пер.*

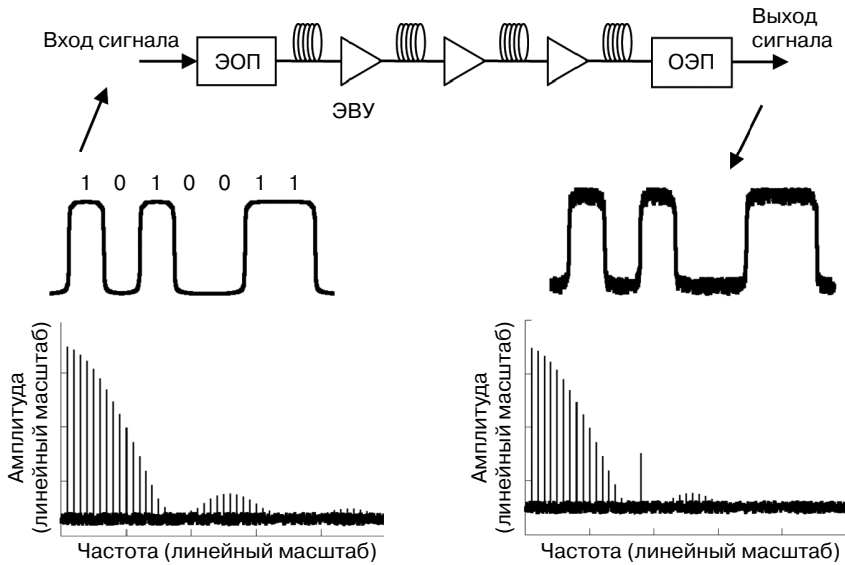


Рис. 1.9. Схема волоконно-оптической линии большой протяженности, предназначенной для транспортирования цифровых сигналов. На входе и выходе показаны цифровые сигналы с их типичными радиочастотными спектрами в полосе модулирующих частот. Выходной спектр обладает повышенным уровнем шума вследствие периодического усиления и искажений, ставших причиной появления составляющей тактовой частоты

при построении цифровых волоконно-оптических телекоммуникационных систем уделяется увеличению длины участка передачи между этими электрическими регенерациями (или повторителями) или даже их полному исключению, чтобы уменьшить стоимость и сложность системы.

По-видимому, вследствие постоянного роста требований к ширине полосы оптические телекоммуникационные системы к настоящему моменту достигли пределов спектральной эффективности одного оптического волокна [1.37]. Еще в 1949 году Шенноном была опубликована основополагающая статья [1.38], связанная с оценкой отношения сигнал/шум (SNR), требуемого для передачи некоторого числа бит в секунду в данной единице полосы для линейного информационного канала независимо от того, построен ли этот канал на базе волоконно-оптического или коаксиального кабелей либо какой-то другой среды передачи информации. Предел Шеннона может быть выражен как

$$C = B \log_2(\text{SNR} + 1), \quad (1.3)$$

где C — битовая скорость в канале с шириной полосы B , а SNR — отношение сигнал/шум на выходе (в линейной форме, не выраженной в дБ). Отношение C/B — нормированная на единицу полосы пропускная способность канала, выражающаяся как эффективность использования спектра в единицах «бит в секунду на герц». График расчета с помощью (1.3) эффективности использования спектра как функции от SNR приведен на рис. 1.10. Также показаны некоторые результаты для различных форматов модуляции. Хотя отношение сигнал/шум является ограничивающим фактором для увеличения информационной емкости оптического волокна, оно не может продолжать расти беспрестанно. Поскольку полностью устранить шум не представляется возможным, то для повышения SNR приходится увеличивать уровень сигнала. При больших значениях SNR достижимая эффективность использования спектра лимитируется нелинейностью волокна. В этом режиме должен использоваться нелинейный предел Шеннона [1.39, 1.40], который дает меньшую эффективность

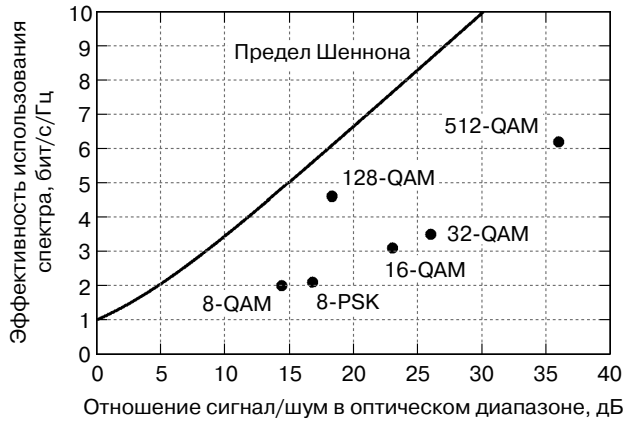


Рис. 1.10. Зависимость пропускной способности канала от отношения сигнал/шум в оптическом диапазоне в соответствии с (1.3). Также приведены опубликованные результаты экспериментов по передаче с квадратурной амплитудной модуляцией (QAM) и цифровой фазовой модуляцией (PSK): 8-позиционной PSK [1.41], 8-позиционной QAM [1.42], 16-позиционной QAM [1.43], 32-позиционной QAM [1.44], 128-позиционной QAM [1.45] и 512-позиционной QAM [1.46]

использования спектра, чем предсказывается с помощью (1.3). В аналоговых радиосистемах также важно максимизировать отношение сигнал/шум на выходе, поскольку при этом улучшается коэффициент шума. Таким образом, опыт в области оптических коммуникаций может быть использован разработчиком аналоговых ВОСП. Фактически разница между оптическими линиями, передающими цифровую и аналоговую информацию, приобретает расплывчатые формы. Неудивительно, что к характеристикам многих компонентов в более прогрессивных многоуровневых цифровых системах предъявляются более жесткие метрические требования, которые обычно важны в аналоговых линиях, как, например, неравномерность частотной характеристики, ширина линии генерации лазера и равенство амплитуд фотодетектора.

Может так случиться, что по мере дальнейшего роста пропускной способности цифровых транспортных систем и систем обработки данных все аналоговые сигналы будут сразу оцифровываться и обрабатываться в цифровой форме. Это не всегда возможно, как рассматривается в следующем разделе. Согласно теореме Найквиста аналоговый сигнал может без искажений быть преобразован в цифровую форму только в случае, когда сигнал разбивается на регулярные интервалы с минимум двумя отсчетами на период верхней рабочей частоты [1.47]. Чтобы представить отсчеты в цифровой форме после стробирования, амплитуды отсчетов должны быть квантованы в дискретные уровни, а каждому из них присваивается дискретное число. Присваивание амплитуде отсчета одного из этих дискретных уровней приводит к появлению шума квантования. Этот шум квантования носит аддитивный характер по отношению к другим шумам самого сигнала. Пусть отношение сигнал/шум (SNR) будет определяться как отношение квадратов максимального напряжения сигнала к минимально различимому напряжению сигнала:

$$\text{SNR} = 20 \lg(V_{\max, \text{rms}}/V_{\min, \text{rms}}), \text{ дБ.} \quad (1.4)$$

Если разница между уровнями квантования одинаковая (необязательное требование) и состоит из 2^n дискретных уровней, то выражение для SNR упрощается [1.48]:

$$\text{SNR} = 20 \lg\left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} 2^n\right) = 6,02n + 1,76, \text{ дБ.} \quad (1.5)$$

Таким образом, часто определяется, что динамический диапазон n -разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) равен 6,02 дБ на эффективный разряд (пренебрегая слагаемым 1,76 дБ).

Рассмотрим радиолокатор на базе фазированной антенной решетки, состоящей из 1000 приемных элементов, работающих при мгновенной полосе 10 ГГц. Для работы радиолокатора часто требуется отношение сигнал/шум не менее 90 дБ [1.49], для чего необходим 15-разрядный АЦП. Для стробирования на частоте Найквиста требуется 20×10^9 выборок в секунду, и каждая выборка должна быть представлена 15-разрядной цифровой последовательностью. В результате совокупная скорость передачи на антенну составляет 300 Гбит/с. Предположим, что существует АЦП с параметрами, обеспечивающими данную скорость, хотя это выше современных технологических возможностей [1.50, 1.51]. Далее, вследствие того что это фазированная решетка, выходные сигналы всех ее 1000 элементов должны обрабатываться когерентно, то есть полная скорость данных, требующих обработки, составляет 300 Тбит/с. Такая скорость, хотя и реальна, представляет собой чрезмерно большой объем данных для управления и обработки. Аналоговая обработка сигналов, или диаграммообразование, возможно, будут всегда необходимы, поскольку системные требования в отношении увеличения динамического диапазона, мгновенной полосы пропускания и размеров решетки могут расти с большей скоростью, чем развитие цифровой обработки сигналов.

1.3. Принципиальные волоконно–оптические компоненты

Исчерпывающее представление об аналоговых линиях и системах не может быть получено без предварительного осмысления характеристик и свойств базовых компонентов. В данном разделе описывается несколько принципиальных компонентов так, чтобы читатель мог установить связь системы количественных показателей, описанных в последующих главах, и показанной на рис. 1.1 обобщенной функциональной схемы аналоговой ВОСП. Во-первых и прежде всего, требуются приборы, осуществляющие преобразование электрических сигналов в оптический диапазон. На ранней ступени развития волоконной оптики эта функция выполнялась диодным лазером на основе непосредственной модуляции током инжекции. Концептуальная преобразовательная характеристика лазера с непосредственной модуляцией приведена на рис. 1.11. При превышении некоего порога выходная мощность лазерного диода быстро и приблизительно линейно возрастает по мере увеличения тока инжекции. Пороговый ток необходим, чтобы создать инверсию носителей заряда и скомпенсировать потери в лазерном резонаторе. Как при аналоговой, так и при цифровой модуляции лазер смещается выше порога. Входной модулирующий ток вызывает изменение интенсивности выходного излучения лазера. В случае цифровой модуляции лазер смещается в область, близкую к выключению, при передаче цифровой «нуля» и в некоторую область более высокой мощности — при передаче цифровой «единицы». Это обеспечивает близкую к 100 % глубину модуляции лазерного диода. В аналоговых линиях глубина модуляции переменная, поскольку амплитуда входного модулирующего тока зависит от уровня высокочастотного сигнала на его входе. Чтобы обеспечить широкий динамический диапазон (широкий диапазон входных уровней высокочастотного сигнала), используется большой ток смещения, что дает возможность избежать ограничения сигналов большой амплитуды, поскольку их отрицательная полуволна может уменьшить ток накачки до значений, близких к пороговому току. Вторая и часто конкурирующая проблема — это линейность ватт-амперной характеристики (ВтАХ). Увеличение управляющего тока приводит у большинства лазерных диодов к уменьшению дифференциальной квантовой эффективности, когда соответствующее приращение тока (при большом управляющем токе) вызывает меньшее изменение мощности, чем при малых управляющих токах. Это проявляется как

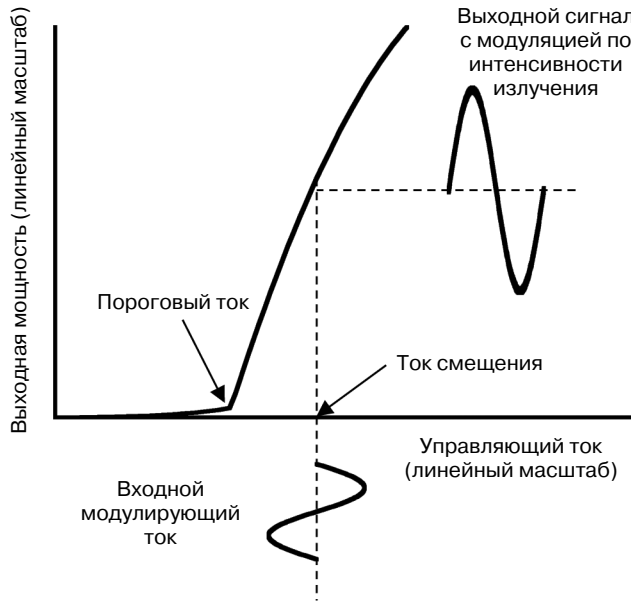


Рис. 1.11. Концептуальная характеристика преобразования лазерного диода с непосредственной модуляцией. Диод смещен на фиксированную величину постоянного тока, и его ток модулируется высокочастотным входным сигналом в окрестности точки смещения

отклонение от линейности ВТАХ (см. рис. 1.11), что может привести к искажению формы входного сигнала.

Другой важной характеристикой диодных лазеров с непосредственной модуляцией является скорость изменения тока и соответствующая полоса модуляции. Максимальная частота непосредственной модуляции связана с частотой релаксационных колебаний лазерного резонатора. Частота релаксационных колебаний может быть рассчитана из скоростных уравнений лазера и представляет собой характеристическую частоту, определяемую взаимосвязью осциллирующего поля в лазерном резонаторе и инверсии атомов. В полупроводниковом лазере частота релаксационных колебаний определяется как [1.52]

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Ap_0}{\tau_p}}, \quad (1.6)$$

где A — коэффициент усиления, p_0 — плотность фотонов в резонаторе, τ_p — время жизни фотона. Поскольку величина p_0 выше порога пропорциональна управляющему току, полоса модуляции лазерного диода расширяется по мере увеличения управляющего тока (см. также 8.1). Пик релаксационных колебаний (см. (1.6)) должен быть одного порядка или выше максимальной рабочей частоты. Следовательно, любой шум, присутствующий в управляющем токе ниже этой частоты, может быть воспринят как RIN в выходном оптическом излучении и, в конечном счете, на выходе высокочастотного сигнала. То есть существует сильная связь между рабочей полосой волоконно-оптической линии с непосредственной модуляцией и лазерным шумом. Вариантом работы, обеспечивающим независимость этих двух показателей (шума лазера и полосы модуляции) и, соответственно, отдельную оптимизацию каждого из них, является внешняя модуляция.

В процессе внешней модуляции излучение работающего в непрерывном режиме лазера управляется посредством внешнего модулятора. Эти устройства могут работать во множестве режимов, используя модуляцию интенсивности, фазы или поляризации излучения. Как уже упоминалось, внешняя модуляция позволяет оптимизировать шум лазера

независимо от рабочей полосы линии передачи. Общепринятый способ модуляции непрерывного лазерного излучения СВЧ-сигналом (электрооптического преобразования) состоит в использовании электрооптического эффекта [1.53]. Электрооптический эффект основан на изменении показателя преломления материала вследствие изменения приложенного электрического поля. Данный эффект существует в некоторых кристаллах и зависит от их ориентации, что описывается с помощью так называемых электрооптических коэффициентов. Наиболее распространенным в волоконно-оптических линиях материалом является ниобат лития (LiNbO_3), хотя также используются арсенид галлия, танталат лития и множество различных органических полимеров. Поперечное сечение ниобат-литиевого модулятора показано на рис. 1.12. Трехмерная ниобат-литиевая подложка ориентирована в форме z -среза, означая, что ось z кристалла совпадает с главными силовыми линиями входного электрического поля оптической волны. Ниобат лития имеет высокий электрооптический коэффициент в направлении оси z (r_{33}) и немного меньшие коэффициенты в направлении оси x (r_{23} или r_{13} в зависимости от ориентации системы координат). Оптические волноводы могут быть сформированы путем диффузии титана в ниобат-литиевую подложку. Затем после осаждения буферного слоя SiO_2 может быть сформирована структура металлических электродов, образующих высокочастотный волновод. На рис. 1.12 изображена копланарная волноводная структура GSG (ground-signal-ground) типа, где под сигнальными электродами и одним из заземляющих электродов расположены два оптических волновода. Это обеспечивает взаимодействие энергии приложенного высокочастотного сигнала (через силовые линии электрического поля между сигнальным и заземляющими электродами) с распространяющимся оптическим сигналом. Приложенный радиочастотный сигнал изменяет показатель преломления оптического волновода и, следовательно, фазу распространяющегося по волноводу оптического излучения. В такой схеме фаза оптического сигнала в волноводу под сигнальным электродом сдвигается примерно в два раза больше и с противоположным знаком по сравнению с фазовым сдвигом под заземляющим электродом. Многочисленные исследования были посвящены вопросу создания оптимальной конструкции этих модуляторов, чтобы улучшить перекрытие между высокочастотными полями и оптическими волноводами [1.54]. Особенно важно гарантировать, что оптическая и радиочастотная волны распространяются с одинаковой групповой скоростью и что передача энергии между радиочастотным и оптическим полями осуществляется с максимальной эффективностью [1.55]. Такое согласование скоростей может быть очень сложной задачей из-за большого различия у ниобата лития показателей преломления в высокочастотном и оптическом диапазонах.

В ходе предыдущего рассмотрения показано, как сигнал СВЧ-диапазона воздействует на фазу оптического поля в электрооптическом кристалле. Этого достаточно для создания оптического фазового модулятора, однако во многих оптических линиях в целях

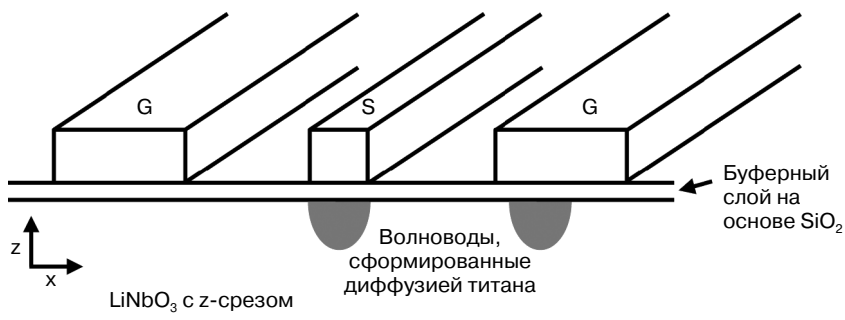


Рис. 1.12. Изображение поперечного сечения ниобат-литиевого электрооптического модулятора с z -срезом. Металлические сигнальный (S) и заземляющие (G) электроды располагаются над двумя оптическими волноводами, сформированными диффузией титана

обеспечения возможности простой демодуляции при помощи фотодиода применяется модуляция по интенсивности излучения. Для преобразования оптической фазовой модуляции в модуляцию по интенсивности часто используется оптический интерферометр. Общепринятым типом интерферометра является схема Маха—Цандера. Обобщенная функциональная схема модулятора Маха—Цандера (ММЦ) приведена на рис. 1.13(а). Входная оптическая мощность равномерно распределяется в два волновода. После распространения на некоторую длину два оптических поля объединяются и интерферируют друг с другом. В рассматриваемом примере два интерферирующих сигнала объединяются и поступают на выходы 1 и 2. Вследствие интерференции интенсивности оптического излучения может увеличиваться либо уменьшаться в зависимости от разности фаз между оптическими полями ($\phi_1 - \phi_2$). График зависимости интенсивности на обоих оптических выходах от разности фаз ($\phi_1 - \phi_2$) приведен на рис. 1.13(б). Отметим, что кривые находятся в противофазе. На базе этого интерферометра может быть создан модулятор интенсивности излучения путем фазовой модуляции полей какого-то одного волновода. На рис. 1.13(а) рассмотрен вариант расположения высокочастотного копланарного волновода только над одним из волноводов интерферометра, однако на практике могут быть также использованы оба оптических волновода, как это показано на рис. 1.12. Для увеличения эффективности электрооптического преобразования вследствие противоположной направленности фазовых сдвигов между двумя оптическими волноводами второй волновод может быть расположен непосредственно под внутренним заземляющим электродом. Следовательно, модуляцию по интенсивности можно получить путем регулировки статического фазового отклонения ($\phi_1 - \phi_2$) в некоторой точке передаточной функции, прикладывая напряжение входного

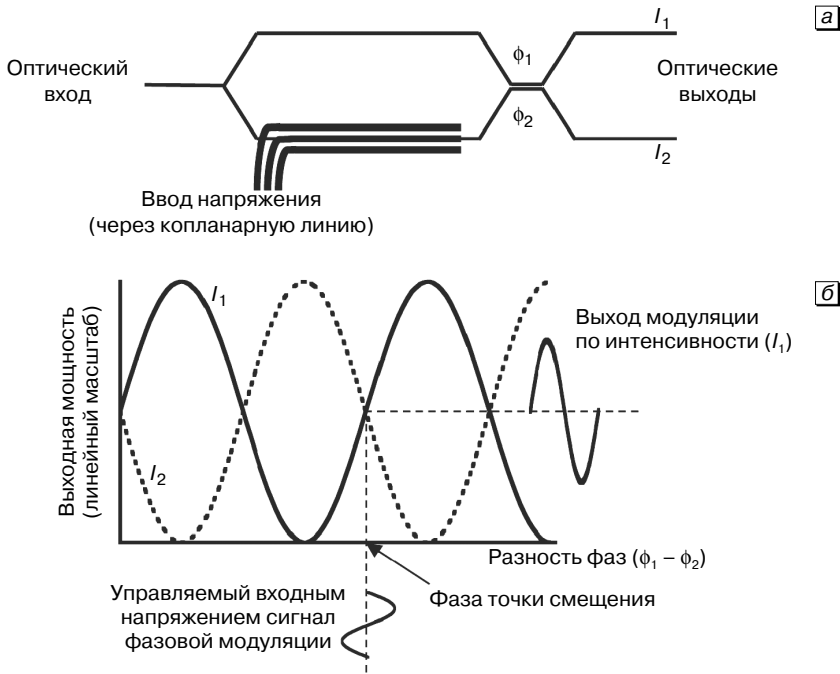


Рис. 1.13. (а) Обобщенная схема модулятора Маха—Цандера. Поле высокочастотного копланарного волновода перекрывается только с одним оптическим волноводом, но на практике один из заземляющих электродов располагается над вторым оптическим волноводом, как это показано на рис. 1.12. (б) Типичная передаточная характеристика ММЦ с комплементарными оптическими выходами. Модулятор смещается посредством фиксированного постоянного напряжения, и сигнал радиочастотного диапазона модулирует оптическое излучение

высокочастотного сигнала для фазовой модуляции света и используя интерферометр, чтобы преобразовать фазовую модуляцию в модуляцию по интенсивности. На рис. 1.13(б) показан график модуляции по интенсивности на выходе I_1 , при этом на выходе I_2 будет наблюдаться комплементарная (с фазовым сдвигом 180°) модуляция по интенсивности. Такая конфигурация пригодна для подавления некоторых видов оптического амплитудного шума, что будет описано в главе 6. В настоящее время предложено множество других внешних модуляторов, включая полупроводниковые абсорбционные модуляторы на эффекте Франца — Келдыша [1.56], поляризационные модуляторы [1.57] и модуляторы, использующие изменение показателя преломления вследствие эффектов свободных носителей заряда в кремнии [1.58]. Более детальному исследованию модуляторов посвящены главы 6–8.

Большое число пассивных оптических компонентов может быть использовано между электрооптическим и оптико-электрическим преобразованиями, входя в состав блока «Обработка» рис. 1.1. Данные компоненты включают: оптические разветвители, направленные ответвители, фильтры, резонаторы, аттенуаторы, изоляторы, циркуляторы, поляризаторы и переключатели. Подробное описание этих компонентов представлено в [1.59]. Некоторые из них описываются в настоящей главе. Первым рассмотрим изображенный на рис. 1.14 волоконно-оптический ответвитель на базе сплавного сужающегося перехода. Волоконно-оптический ответвитель данного типа был предложен в [1.60] и является важным компонентом для многих систем. Работа прибора основывается на эффекте резонансной связи электрических полей между двумя распространяющимися волноводными модами, когда профили оптических полей затухающих колебаний перекрываются в пространстве. Чтобы выполнить это, волноводные моды должны быть достаточно близки друг к другу, поскольку поля затухающих колебаний распространяются в оболочку оптического волокна только на несколько микрон. Следовательно, волокна должны адиабатически сужаться, чтобы обеспечить распространение фундаментальных волоконных мод в воздушном пространстве. В связи с уменьшением диаметра волокон сердцевина больше не в состоянии поддерживать канализированную моду и фундаментальная мода начинает распространяться в окружающем воздухе. Это обеспечивает взаимодействие электрического поля каждой канализированной моды, направляя энергию из одного волновода в другой. Коэффициент связи можно изменять, контролируя длину, на которой осуществляется взаимодействие полей. Аналогичный эффект взаимодействия электрических полей может быть использован в выходном ответвителе интерферометрического модулятора (рис. 1.13(а)).

Большинство пассивных устройств являются взаимными, что означает идентичность их передаточных функций в обоих направлениях. Обычным примером взаимного устройства является показанный на рис. 1.14 волоконно-оптический ответвитель. Тем не менее также часто применяются невзаимные устройства: оптические изоляторы и циркуляторы. Изолятор, как правило, используется в лазерных модулях, чтобы предотвратить попадание в лазерный резонатор обратного рассеяния света, которое вызывает нестабильность его работы. Многие лазеры, как, например, РОС-лазеры, чувствительны к отражениям, которые снова попадают в его резонатор [1.61]. Большинство невзаимных устройств основаны на эффекте Фарадея, когда состояние поляризации света поворачивается на величину, пропорциональную компоненте магнитного поля в направлении распространения волны. Оптический изолятор можно реализовать путем введения 45-градусного фарадеевского

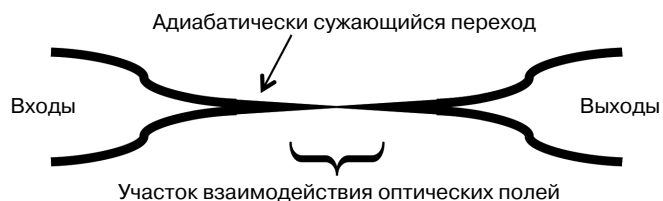


Рис. 1.14. Схематическое изображение волоконно-оптического ответвителя типа 2×2 на базе сплавного сужающегося перехода

поляризационного ротатора между двумя линейными поляризаторами, повернутыми друг относительно друга на 45° . Падающая линейная поляризация проходит через первый поляризатор, поворачивается на 45° с помощью фарадеевского ротатора и ориентируется так, чтобы пройти сквозь второй поляризатор. Поляризация прошедшего через выходной поляризатор сигнала, распространяющегося в обратном направлении, поворачивается на 45° в противоположном направлении, падает на входной поляризатор под углом 90° по отношению к его направлению пропускания, и сигнал блокируется. Благодаря сочетанию двух поляризованных делителей лучей так, чтобы пропускать оба линейно-поляризованных состояния, можно реализовать поляризационно-независимое устройство [1.62]. Если ввести поляризованный делитель между одним из поляризаторов и фарадеевским ротатором, распространяющийся в обратном направлении свет, который в изоляторе должен бы блокироваться изолирующим ротатором, будет перенаправлен в другое волокно, и в результате реализуется трехпортовое устройство, действующее как циркулятор. Рабочие характеристики такого оптического циркулятора приведены на рис. 1.15. Его схема содержит три состояния пропускания с малыми потерями и три направления с высокими потерями (изоляция). Циркуляторы часто применяются, чтобы собрать отражения от других устройств. Например, их можно использовать в схеме отражательных оптических фильтров, входящих в состав спектрально-селективных устройств суммирования и разделения сигналов, таких как спектральные мультиплексоры/демультиплексоры.

Активные устройства также имеют большое значение и часто входят в состав блока «Обработка» рис. 1.1. Одним из наиболее широко применяемых оптических компонентов является оптический усилитель. Усилители используются в целях компенсации ослабления сигнала, например вследствие потерь при распространении, избыточных потерь в компонентной базе и потерь от разветвления и распределения. Оптические усилители строятся на базе разнообразных форм, включая полупроводниковые усилители [1.63], а также бриллюэновские [1.64], рамановские [1.65] и легированные редкоземельными материалами [1.66] волоконные усилители. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки (см. 3.5 и 4.3), однако наибольшее распространение получил волоконный усилитель с легированием редкоземельными материалами. В усилителях данного типа сердцевина оптического волокна легируется небольшим числом редкоземельных ионов, например ионами эрбия Er^{3+} в ЭВУ. Обобщенная схема ЭВУ представлена на рис. 1.16. Волны длиной 980 нм и 1480 нм сильно поглощаются в Er^{3+} , следовательно, могут использоваться как накачка для легированного эрбием волокна. Это излучение накачки может быть суммировано в одном и том же волокне с сигналом диапазона 1550 нм при помощи спектрального мультиплексора. За счет инверсии среды входное излучение диапазона 1550 нм может стимулировать переход возбужденных ионов эрбия в основное состояние, что влечет за собой стимулированную эмиссию фотонов и, следовательно, когерентное оптическое усиление. Оптический изолятор на выходе усилителя используется для предотвращения возврата отраженного излучения в активное волокно, что может вызвать нестабильность выходного сигнала. Два самых важных параметра ЭВУ, которые делают его идеальным усилителем, — это низкий коэффициент спонтанной эмиссии (низкий коэффициент шума) и большое

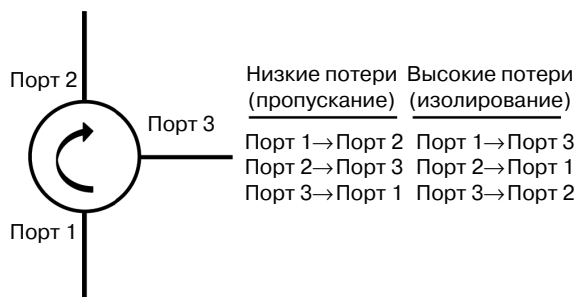


Рис. 1.15. Функциональная схема трехпортового циркулятора

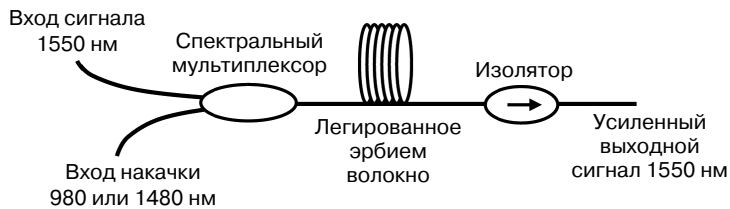


Рис. 1.16. Принципиальные элементы схемы эрбиевого волоконного усилителя

(миллисекунды) время жизни в возбужденном состоянии. Миллисекундное время жизни исключает быстрые флуктуации усиления и, следовательно, минимизирует искажения на высокочастотных (\gg килоггерц) сигналах (см. главу 4). Количественная оценка шумовой характеристики ЭВУ в составе аналоговой ВОСП будет рассмотрена в главе 3.

На дальнем конце линии передачи должен быть установлен ОЭП, выполняющий функцию обратного преобразования оптического сигнала в электрический. Эта операция стандартно выполняется при помощи фотодетектора. Наиболее широко распространенный вариант фотодетектора, p - i - n -фотодиод, используется в различных исполнениях. Базовые конфигурации включают схемы с поверхностной засветкой, волноводную и бегущей волны. На рис. 1.17 показана обобщенная структура p - i - n -фотодиода, характеристики которого глубоко изучены. Качественный обзор p - i - n -фотодиодов выполнен в [1.32]. В структуре между двумя легированными материалами p - и n -типа помещается собственный (нелегированный) полупроводник. Материалы могут быть идентичными (гомопереход) или различными (гетеропереход), и в некоторых специальных случаях не требуется согласование их кристаллических решеток [1.67]. Прикладывание напряжения смещения вызывает обеднение области собственной проводимости, образующей плоский конденсатор, и повышение напряжения приводит к расширению обедненной области и соответствующему уменьшению емкости прибора. Оптическое излучение поглощается в i -области при облучении через материалы p - или n -типов (конфигурация с поверхностной засветкой) либо сбоку через i -область (волноводная конфигурация), создавая электронно-дырочные пары. Фотогенерированные носители заряда, двигаясь в обедненной области, формируют ток во внешней цепи. В связи с тем что поглощение фотонов вызывает появления тока, фотодетектор действует аналогично устройству с квадратичной характеристикой, реагируя только на изменение интенсивности оптического излучения и отражая, таким образом, огибающую модуляции интенсивности (входным высокочастотным сигналом) в форме выходного тока. Реакция данных приборов определяется в терминах их чувствительности в единицах ампер на ватт, то есть сколько ампер тока генерируется на каждый ватт падающей мощности. Электрически фотодиоды в пренебрежении импедансами, связанными с монтажом кристалла в корпусе, имитируются очень простой эквивалентной схемой. Фотодиод представляется в виде параллельного соединения источника тока, емкости перехода (C_j) и шунтирующего сопротивления (R_{sh}), подключенного к выходной цепи через небольшое последовательное сопротивление (R_{series}). Емкость перехода определяется специфичными свойствами материала, геометрией и объемом обедненной области. Последовательное сопротивление связано с сопротивлением контактов и с сопротивлением объемных полупроводников p - и n -типов. Источником шунтирующего сопротивления является ток утечки, и оно обычно значительно выше (более 1 кОм) по сравнению с характеристическим импедансом высокочастотной линии передачи, равным 50 Ом. Следовательно, шунтирующим сопротивлением обычно пренебрегают в ходе анализа фотодиода. В связи с большой величиной шунтирующего сопротивления на практике для улучшения согласования с нагрузкой часто дополнительно вводится внешнее согласующее сопротивление (R_{match}). Этот согласующий резистор дает отрицательный эффект двукратного уменьшения фотогенерированного тока, таким образом, уменьшая коэффициент усиления в линии передачи на 6 дБ. Дальнейшее, более детальное, рассмотрение фотодиодов, включая другие типы фотодиодов, будет выполнено в главах 6 и 9.

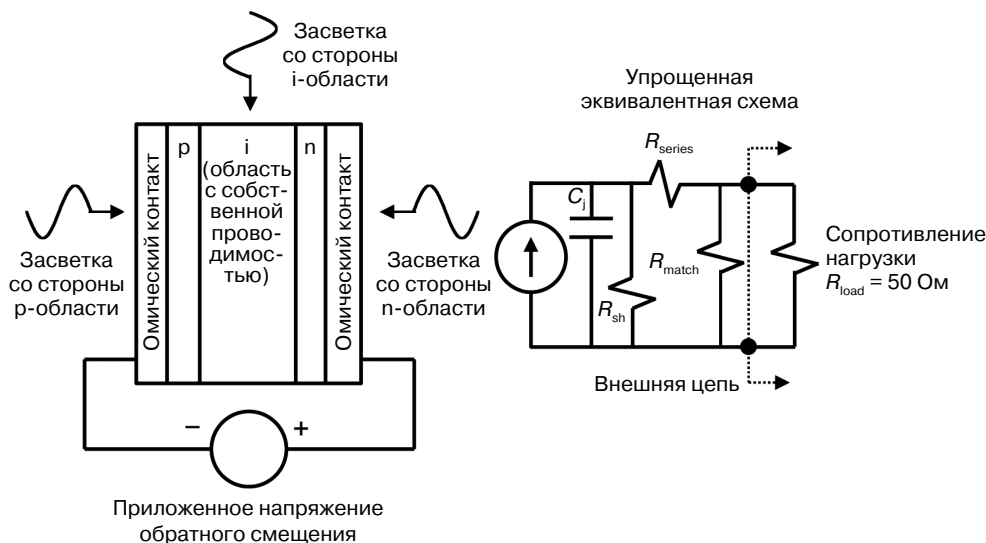


Рис. 1.17. Фотодиод p - i - n -типа и его эквивалентная электрическая схема. Фотодиод может быть с поверхностной засветкой через p - или n -контакты либо с облучением параллельно области с собственной проводимостью, как в случае волноводной конфигурации

1.4. Аналоговые линии передачи в составе радиочастотных систем

Рассмотрим приведенную на рис. 1.18 типичную структурную схему радиоприемника. Целью такого схемного построения может быть оцифровка принятых радиосигналов для определения ситуационной окружающей обстановки. Антенна принимает радиосигналы из окружающей пространства, и эти сигналы усиливаются и ограничиваются по полосе с помощью полосно-пропускающего фильтра. Поскольку АЦП функционирует только в специфичной полосе частот, для переноса центральной частоты радиосигнала в полосу АЦП используется смеситель. После частотного преобразования сигнал фильтруется и усиливается до уровня, находящегося внутри динамического диапазона АЦП с разрешением n бит на данной частоте стробирования.

Применение радиофотоники в схеме, показанной на рис. 1.18, дает многочисленные преимущества. В частности, в целях пространственного разнесения высокочастотных и низкочастотных узлов волоконно-оптическая линия может быть введена между антенной и входным усилителем высокой частоты либо между усилителем и электронным смесителем. В этом случае может быть выполнен общий анализ системы, учитывающий потери (см. рис. 1.7), коэффициент шума и динамический диапазон. Если же требуется многоканальная антенная система, например, для определения направления воздействия, в анализе может также учитываться фазовая стабильность. Волоконно-оптический метод решения обеспечивает улучшенную фазовую стабильность по сравнению с полностью электронным подходом (см. рис. 1.8). Если фотонная линия обладает приемлемой характеристикой коэффициента шума, то потенциально можно обойтись без антенного усилителя. Устранение этого усилителя дает возможность уменьшить искажения, так как малошумящие радиочастотные усилители имеют относительно узкий динамический диапазон. Применение фотоники для разделения каналов с разрешением, близким к требованиям в электронике, становится реальностью; в результате фильтр на рис. 1.18 может быть заменен на оптический аналог. Другие реальные возможности для использования фотоники в такой системе — это