

Предисловие к первому изданию

В 2001 году была издана моя книга «Современные волоконно-оптические системы передачи. Аппаратура и элементы». Она быстро разошлась, но потребность в ней сохранилась, о чем свидетельствуют телефонные звонки автору с просьбой помочь приобрести книгу. Назрела необходимость в ее переиздании. Однако за истекшее с 2001 года время волоконно-оптические технологии продолжали стремительно развиваться, чему способствовало одновременное развитие компьютерных технологий и рост числа пользователей сетью интернет. Новая книга дополнена материалами по основным протоколам передачи, используемым в оптических сетях, по отдельным вопросам тестирования систем ВОЛС.

В имеющейся литературе слабо освещены принципы работы оптических рамановских (ВКР) усилителей. В новой книге предпринята попытка восполнить этот пробел. Рассмотрены принципы работы внешнего электроабсорбционного модулятора света, широко используемого в современных высокоскоростных ВОСП-СР и также слабо освещенного в опубликованных работах. Кроме того, исправлены ошибки, замеченные в первом издании.

Автор выражает искреннюю благодарность Елене Александровне Филимоновой за ее огромную помощь при подготовке рукописи книги.

Введение

В последние два десятилетия прошедшего и в начале текущего века происходит смена эпохи индустриально-технологического развития передовых государств эпохой информационно-технологической. Ярким проявлением этого процесса является невиданный по скорости и результатам прогресс в создании новых методов и средств телекоммуникаций. Бурное развитие технологии производства систем и средств связи с практически неограниченной пропускной способностью и дальностью передачи и массовое их использование по сути привели к информационно-технологической революции и формированию глобального информационного общества. Сегодня телекоммуникации — это одна из самых быстроразвивающихся высокотехнологических и наукоемких отраслей мировой экономики. Уровень развития технологических разработок, производства и внедрения в различные сферы деятельности телекоммуникационных систем во многом формируют положительный образ передового государства. Такое развитие событий стало возможным благодаря широкому практическому использованию достижений фундаментальных наук — прежде всего физики, химии и математики, а также компьютерных технологий. Создание элементной базы современных волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСП) и технологий их серийного производства основано на практическом применении таких открытий в области физики и таких разделов математики, которые еще совсем недавно считались уделом самых высших кругов «чистой науки», на практическое использование которых не надеялась не только широкая общественность, но и сами авторы этих открытий. На самом же деле

оказывается, что к созданию современных телекоммуникационных систем и компьютерных технологий причастны почти все известные физики прошлого и настоящего: от Ньютона и Гюйгенса, Френеля и Декарта до большинства нобелевских лауреатов по физике — от М. Планка и А. Эйнштейна до А. М. Прохорова, Ч. Таунса, Н. Г. Басова и Ж. И. Алферова. В профессиональный лексикон специалистов, работающих в области волоконно-оптической связи входят такие термины, как кванты, электроны, фотоны, фононы, фермионы и бозоны, экситоны и многие другие, которые ранее в своей деятельности употребляли только профессиональные физики. Современные волоконно-оптические системы передачи — это концентратор практического использования самых глубинных достижений фундаментальных наук, ярчайшая демонстрация их практической необходимости и полезности.

Толчком к развитию оптических систем передачи информации явилось изобретение в 1960 году А. М. Прохоровым, Н. Г. Басовым (СССР) и Ч. Таунсом (США) квантового генератора оптического излучения — лазеров (аббревиатура из первых букв английского названия оптических квантовых генераторов света (ОКГ) — Light Amplification by the Stimulation Emission of Radiation). С 1962 года началось серийное производство ОКГ (так в СССР назывались эти приборы до начала 70-х годов), а в 1965 году в Московскую городскую телефонную сеть была включена одна из первых в мире оптических линий связи протяженностью 4,7 км между одним из центральных узлов связи (Зубовская площадь) и зданием МГУ им. М. В. Ломоносова. По этой линии с помощью лазерного луча с длиной волны 0,628 мкм (красный свет), распространявшегося в атмосфере (по воздуху), передавались методом ИКМ 12 телефонных каналов. По существу это была первая оптическая соединительная линия городской телефонной сети. Оборудование для этой линии и система в целом были разработаны в Центральном научно-исследовательском институте связи (ЦНИИС), в разработке и настройке которой участвовал и автор настоящих строк. К началу семидесятых годов в Советском Союзе работало несколько лазерных атмосферных линий связи: две в Москве — протяженностью 5 км (скорость передачи 32 Мбит/с) и 17 км (скорость 2,048 эпохой информационно-технологической бит/с, а также в г. Куйбышеве (ныне Самара) через р. Волга, в г. Клайпеда через Куршскую косу, Ереван—Бюракан (28 км). Руководство разработками и эксплуатацией этими линиями осуществлялось также ЦНИИС.

В 1970 году компанией CORNING (США) было создано оптическое волокно с малыми (по тому времени) километрическими потерями (менее 20 дБ/км на длине волны 0,85 мкм). В том же году сотрудниками Ленинградского физико-технического института под руководством Ж. И. Алферова были разработаны полупроводниковые приборы на основе двойных гетероструктур, в том числе полупроводниковые лазеры, работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре. С этого момента началось быстрое развитие волоконно-оптических систем передачи информации. К середине 70-х годов потери в оптических волокнах были снижены до 2,5—3 дБ/км в первом окне прозрачности (780—870 нм) оптического диапазона и в СССР, США, Японии, Англии, Франции и Германии были построены первые коммерческие волоконно-оптические системы со скоростями передачи 2, 048, 8,848 Мбит/с и 34 Мбит/с, а также системы кабельного телевидения. Эти системы работали в диапазоне 1280—1360 нм по многомодовым оптическим волокнам. Многомодовые волокна имеют весьма низкую полосу пропускания — не более 1200—1600 МГц/км, которая уже тогда была недостаточной. Поэтому усилия исследователей были направлены на создание одномодовых оптических

волокон, полоса пропускания которых на много порядков выше. В результате в конце 70-х годов были получены одномодовые волокна с коэффициентом потерь 0,2 дБ/км на длине волны 1550 нм (третье окно прозрачности). В этот же период были разработаны и освоены в серийном производстве полупроводниковые лазеры и фотоприемники, работающие в этом же окне прозрачности. На основе перечисленных элементов были построены магистральные ВОСП протяженностью более 1000 км при скорости передачи 155 Мбит/с. Одновременно с развитием оптических и квантовых элементов для ВОСП быстрыми темпами происходило совершенствование цифровых методов передачи информации и элементной базы для реализации этих методов. В качестве альтернативы плезioxронному методу, исчерпавшему свои возможности, был разработан метод синхронной цифровой передачи. Скорость 155 Мбит/с — первая скорость, с которой началось внедрение синхронного метода временного уплотнения цифровых сигналов. Вслед за этим были достигнуты скорости передачи 622 Мбит/с, 2,5 Гбит/с и 10 Гбит/с. В настоящее время скорость передачи синхронным методом доведена до предельной для электроники величины 40 Гбит/с. Для перечисленных скоростей передачи международным комитетом по электросвязи — МСЭ-Т (ITU-T) была разработана следующая классификация иерархий скоростей: синхронная цифровая иерархия (СЦИ, или SDH в английском варианте) — СТМ-1 (155 Мбит/с), СТМ-4 (622 Мбит/с), СТМ-16 (2,5 Гбит/с), СТМ-64 (10 Гбит/с) и СТМ-256 (40 Гбит/с). За исключением СТМ-1, все остальные уровни иерархий СЦИ предназначены для передачи только по волоконно-оптическим системам. В результате такого развития пропускная способность ВОСП увеличилась на несколько порядков. При этом многократно возросла также и дальность передачи. Благодаря резкому улучшению параметров систем передачи коренным образом выросло качество традиционных услуг связи и появились новые услуги: цифровое телевидение повышенной четкости, интерактивное кабельное ТВ, видеоконференции, передача технологической, коммерческой, банковской информации, сеть интернет, электронная почта, телефакс, телемедицина и т. д. Рост качества и количества услуг связи сопровождается экспоненциальным возрастанием числа потребителей этих услуг — абонентов. Эти факторы влекут за собой необходимость дальнейшего увеличения пропускной способности систем передачи. Повсеместное распространение этих услуг в свою очередь требует увеличения дальности передачи. Кроме того, предоставление высококачественных услуг связи постоянно растущему числу абонентов делает актуальной проблему повышения эффективности и гибкости управления сетями связи. Одним из решений этой проблемы стала разработка и внедрение асинхронного метода переноса сообщений — АТМ, который в последнее время получает все большее распространение как в магистральных транспортных сетях, так и в сетях доступа.

Потребность в дальнейшем наращивании пропускной способности систем передачи информации стимулировала исследования в направлении поиска новых методов решения этой задачи. Одним из чрезвычайно эффективных решений поставленной задачи является увеличение пропускной способности с помощью уплотнения оптических каналов по длинам волн оптического излучения — WDM (Wavelength Division Multiplexing), в российской документации — ВОСП-СР. Использование этого метода позволило повысить пропускную способность волоконно-оптических систем до величины более 10 Тбит/с, превышающую потребности сегодняшнего дня, сняв таким образом проблему на ближайшие 3—5 лет.

Для реализации метода уплотнения оптических каналов по длинам волн (или метода спектрального разделения) были разработаны такие оптические элементы, как оптические мультиплексоры и демultipлексоры, оптические фильтры, полупроводниковые лазеры с малой шириной линии излучения на заданной длине волны, методы и средства, обеспечивающие необходимую стабильность оптической частоты, оптические усилители с широкой полосой усиления и ряд других элементов.

Как уже отмечалось, одновременно с увеличением пропускной способности, вызванной ростом количества и качества услуг связи, а также числа пользователей, происходит быстрое расширение территорий, на которых проживают или расположены потребители услуг связи. По этой причине продолжала оставаться актуальной необходимость увеличения дальности передачи. В настоящее время эта задача также в значительной степени может считаться решенной благодаря внедрению оптических и квантово-оптических технологий. Решение поставленной задачи происходило по двум направлениям: были разработаны новые типы оптических волокон с затуханием, близким к теоретическому пределу, с большой эффективной площадью сечения и малым коэффициентом хроматической дисперсии; созданы и освоены в серийном производстве оптические усилители различных типов, позволяющие резко повысить мощность оптических сигналов на входе линии и компенсировать потери в оптическом волокне. Созданы также эффективные компенсаторы хроматической дисперсии. Использование этих элементов позволяет увеличивать длину регенерационных участков магистральных систем передачи до 1000—1500 км. В настоящее время находится в стадии реализации проект магистральной ВОСП-СР протяженностью 28 тыс. км.

Впечатляющие результаты прогресса магистральных волоконно-оптических систем передачи не имели бы смысла без соответствующего развития сетей доступа различных уровней, включая абонентские участки. Сегодня наибольшие усилия исследователей и разработчиков элементов и оборудования для ВОЛС направлены на внедрение оптических технологий в оптические сети доступа. Несмотря на то что исторически городские сети доступа были первым объектом внедрения волоконно-оптических технологий, в течение довольно большого периода времени основное внимание уделялось развитию магистральных сетей связи. Вместе с тем проблема доведения оптического волокна (точнее оптического кабеля) до абонента, выразившаяся в концепции «волокно в дом» (FTTH) или «последняя миля», была поставлена давно, но до конца по сей день не решена. Современные сети доступа развиваются по двум направлениям: сети общего пользования и корпоративные сети. Необходимо отметить, что решение проблемы «волокно в дом» в настоящее время сдерживается главным образом по экономическим причинам, поскольку, если говорить о чисто технических проблемах, то их практически нет. Во всяком случае технические проблемы во многом сводятся к снижению стоимости элементной базы, оборудования и снижению стоимости работ при строительстве и настройке (инсталляции) систем доступа. На сегодняшний день значительные успехи в использовании оптических технологий наблюдаются в развитии корпоративных сетей доступа, что объясняется их более высокой платёжной способностью по сравнению с абонентами сетей доступа общего пользования. В современных корпоративных сетях доступа основными протоколами, обеспечивающими необходимые услуги связи, являются Ethernet, E-mail, IP-телефония, широкополосный доступ в Internet и телефакс. Если в первых компьютерных сетях длины соединительных линий не превышали 100 м, а скорость передачи 10 Мбит/с, то в

современных компьютерных сетях (Ethernet) их длина нередко существенно больше 1000 км, а скорость передачи достигает 10 Гбит/с. Очевидно, что такие результаты могли быть достигнуты только благодаря использованию волоконно-оптических технологий.

Резкое повышение пропускной способности соединительных линий в корпоративных сетях доступа при одновременном увеличении расстояний осуществляется как путем повышения скорости электронного мультиплексирования по времени, так и использованием технологий уплотнения оптических каналов по длинам волн (WDM-wavelength division multiplexing). В отличие от магистральных систем передачи, в которых широко используется плотное спектральное мультиплексирование (DWDM), в оптических сетях доступа экономически более целесообразным является применение разреженного спектрального уплотнения оптических каналов — CWDM. Применение технологий спектрального уплотнения в оптических сетях доступа не только увеличивает пропускную способность, но и повышает эффективность и гибкость управления. Для этого были разработаны соответствующие оптические элементы: оптические волновые коммутаторы, маршрутизаторы, волновые конверторы и другие устройства, позволяющие проводить оперативное и гибкое конфигурирование оптических сетей. Для повышения экономической эффективности городских оптических сетей доступа, в том числе абонентских участков в сетях общего пользования, активно внедряется технология PON — пассивная оптическая сеть (ПОС). Как следует из названия, ПОС состоит только из пассивных элементов: оптического кабеля вместе с соединительными муфтами ответвителей, разветвителей, оптических мультиплексоров и демultipлексоров, оптических фильтров, оптических изоляторов и некоторых других элементов. Все перечисленные элементы не требуют подведения к ним электрического питания и не нуждаются в обслуживании. Кроме того, в отличие от активных элементов — лазеров, оптических усилителей и фотоприемников, пассивные элементы, как правило, отличаются более низкой стоимостью.

Для решения той же задачи — снижения стоимости оптических сетей доступа вновь все шире начинают использоваться многомодовые оптические волокна. Несмотря на то что эти волокна несколько дороже одномодовых, они позволяют использовать недорогие многомодовых излучателей и фотоприемников. Кроме того, большой диаметр сердечника многомодового волокна существенно снижает допуски на оптические соединители, в результате чего значительно снижается стоимость проведения монтажных работ при прокладке оптического кабеля. Многомодовые волокна в оптических сетях доступа, в частности в ПОС, используются в соединительных линиях, длина которых не превышает нескольких километров, что обычно имеет место в городских сетях. Возрождение интереса к использованию многомодовых волокон вызвано также тем, что в семидесятых и в середине восьмидесятых годов в городах многих стран, включая Советский Союз, было проложено большое количество оптических кабелей с многомодовыми волокнами. Как показали исследования, проведенные некоторыми компаниями, в частности Corning и Lucent Technologies, за прошедшие 20 лет параметры волокон в этих кабелях практически не изменились. Многие из них на сегодняшний день не загружены. Поэтому, учитывая тенденции развития сетей доступа с участками ПОС, использование ранее проложенных оптических кабелей становится весьма актуальным. Кроме многомодовых волокон, возрождается также интерес к использованию первого окна прозрачности (780—860 нм), что также связано с более низкой стоимостью излучателей и фотоприемников, работающих в указанном диапазоне

длин волн. Использование оптических кабелей с многомодовыми волокнами и отмеченных выше активных элементов направлено на развитие прежде всего абонентских участков сетей общего пользования. Вместе с тем стремление к использованию новейших фотонных технологий в настоящее время концентрируется также на внедрении их как в корпоративных, так и в сетях доступа общего пользования.

Стремительное развитие волоконно-оптических и квантово-оптических технологий для ВОЛС продолжается. В последние 2—3 года для увеличения длины регенерационных секций магистральных ВОСП активно внедряются волоконные оптические усилители, работа которых основана на нелинейном оптическом явлении — вынужденном комбинационном рассеянии (в литературе на русском языке советского периода — ВКР, в зарубежной — SRS — Stimulated Raman Scattering). Проводятся интенсивные исследования нового типа оптических волокон — т. н. микроструктурированных волокон и фотонных кристаллов, на основе которых прогнозируется создание новых типов оптических элементов.

В настоящее время в России ведется активное строительство волоконно-оптических систем передачи информации. Развиваются как магистральные ВОСП со спектральным разделением оптических каналов (ВОСП-СП), так и городские оптические сети доступа, в том числе ПОС. Быстрыми темпами растет количество пользователей сетями Internet и Ethernet. Оборудование, поступающее на эти сети, с каждым годом становится все более наукоемким и высокотехнологичным. Очевидно, что в связи с этим все более высокие требования предъявляются к специалистам, которые устанавливают, настраивают и обслуживают как оборудование, так и системы в целом. В то же время в периодических изданиях уделяется недостаточно внимания, например, описанию принципов работы и устройству как отдельных волоконно-оптических элементов, так и узлов, блоков и всего оборудования. Это создает досадные проблемы для специалистов, работающих с этими системами и оборудованием и желающих повысить свой профессиональный уровень.

Эта книга предназначена и адресована этим людям. Она может быть также полезной для студентов соответствующих учебных заведений и тем, кто желает поближе познакомиться с технологиями волоконно-оптической связи.

Часть I. Виды услуг связи, протоколы, методы передачи информации

Появление новых видов услуг связи и совершенствование традиционных услуг в сочетании с многократно увеличившимся количеством абонентов коренным образом изменили всю инфраструктуру сетей связи, на много порядков возросла пропускная способность систем передачи, в особенности магистральных, увеличилась их протяженность. Это стало возможным благодаря широкому внедрению волоконно-оптических технологий. Для реализации и максимального использования возможностей, предоставляемых этими технологиями, потребовались разработки новых методов передачи цифровой информации — СЦИ и их иерархий — СТМ-1, СТМ-4, СТМ-16, СТМ-64 и СТМ-256, АТМ, новых правил или алгоритмов — протоколов передачи информации, методов уплотнения оптических каналов, а также технических средств реализации этих методов. Все это будет рассмотрено в первой части книги. Кроме того, в этой же части будут рассмотрены вопросы тестирования и мониторинга различных волоконно-оптических систем передачи.

Глава 1. Методы и основные виды протоколов передачи информационных потоков

По способам передачи сигналов, переносящих информацию, все системы, в том числе и волоконно-оптические, можно разделить на две категории: системы связи с аналоговым методом передачи информации и системы с цифровым методом. В аналоговых системах один из параметров несущего колебания — амплитуда, частота или фаза изменяется по закону изменения тока (или напряжения) первичного источника информации. В цифровых системах информация передается в виде определенной последовательности импульсов с постоянными амплитудой и длительностью. Эти импульсные последовательности соответствуют числам в двоичной системе исчисления — битам. Если в аналоговых системах передачи количество передаваемой информации характеризуется полосой частот, то в цифровых — количеством бит за одну секунду, т. е. бит/с. Каждому сообщению соответствует определенное количество бит. Например, для передачи одной буквы требуется передать 7 бит [1]. Для определения и разделения отдельных слов, предложений и т. д. вводятся соответствующие идентификационные импульсы (биты), распределенные во временном пространстве в определенном порядке и сочетании. При одновременной передаче большого количества сообщений для их различения также вводятся идентификационные биты. Таким образом, в цифровых системах передача информации осуществляется по определенным правилам — протоколам. В настоящее время подавляющая часть систем передачи являются цифровыми. Широко используется несколько разновидностей цифровых методов передачи: плездохронный (ПЦИ — на английском — PDH), синхронный (СЦИ —

SDH), ATM, к цифровым относятся компьютерные сети Ethernet, электронная почта — E-mail и т. д.

По различным причинам каждая из перечисленных цифровых систем передачи может быть предпочтительней для оказания той или иной услуги связи. Впрочем, сегодня большинство из цифровых систем могут быть мультисервисными (напомним, что в переводе с английского сервис — это услуга). Перечень услуг, предоставляемых современными сетями связи, весьма обширен. Для своевременного и качественного оказания этих услуг системы передачи должны обладать соответствующими параметрами и характеристиками. Какими именно, станет более понятным после их рассмотрения.

1.1. Характеристики современных видов услуг связи

Жизнь цивилизованной части человечества в нынешних условиях трудно представить без услуг связи. Сегодня спектр услуг, предоставляемых пользователям, столь широк, что даже перечень их займет немало места. Если 25—30 лет тому назад абоненты довольствовались телефонными услугами, телеграфом и телевизионными передачами, то сегодня абонент может воспользоваться доступом в международную глобальную сеть Интернет, в которой он может получить любую информацию, выбрать желаемый кинофильм, пообщаться с другим абонентом, сделать заказ в библиотеке и многое другое. По электронной почте можно отправить сообщение по любому адресу в удобное время или, наоборот, получить сообщение. Воспользовавшись телефаксом, можно получить или отправить по нужному адресу статью, копию документа, или справки и любые другие материалы. Интерактивное цифровое телевидение повышенной четкости существенно повысит качество изображения на экране телевизора заказанной телевизионной программы. В наши дни абонент может также получить или послать сообщение по электронной почте.

Еще большими возможностями обладает абонент корпоративной сети доступа. Кроме перечисленных выше услуг связи, в зависимости от рода деятельности, современная сеть связи предоставляет целый ряд дополнительных услуг. При передаче технологической информации: например, предприятие, разрабатывающее электронное оборудование, после компьютерной разработки и испытаний электронной схемы, высылает другому предприятию топологию разводки электронной схемы на монтажной плате по каналу связи (например по телефаксу). Это другое предприятие, получив отправленную ему топологию в электронном виде, изготавливает реальную монтажную плату и по обычной почте пересылает ее в адрес разработчика. О дистанционных медицинских услугах сообщается в работах [2, 3]. Например, в работе [2] описан случай выполнения внутрисплетной хирургической операции, при которой хирург и пациент находились на разных континентах. Широкое распространение получили банковские и финансовые дистанционные услуги по каналам связи: безналичная оплата при покупке товаров в предприятиях торговли, банкоматы и другие виды безналичных расчетов. Все чаще проводятся видеоконференции и семинары, дистанционное обучение и т. д. Понятно, что линии связи, по которым предоставляются перечисленные услуги, должны иметь высокую пропускную способность и надежность при приемлемой стоимости предоставляемых услуг. Для того, чтобы иметь более конкретное представление о необходимой пропускной способности абонентских соединительных линий, приве-

дем некоторые данные о количестве передаваемых бит информации при передаче следующих услуг связи: как уже отмечалось, одна буква требует передачи 7 бит информации, граммофонная пластинка с 50-минутной записью — 1,68 Гбит, цветной кинофильм продолжительностью 100 мин — 550 Гбит или 90 Мбит/с [1]. Такое количество информации необходимо передавать одному абоненту для предоставления ему услуги связи в виде цветного кинофильма. Количество абонентов в одном городе может достигать от сотен тысяч до нескольких миллионов. Для своевременного и качественного предоставления услуг связи большому числу абонентов соответствующая сеть связи должна иметь надежную систему управления, которая обеспечивается определенными службами, т. е. специфическими услугами связи со специально отведенными для этого каналами со своей пропускной способностью и алгоритмами передачи. Очевидно, что существующая сеть связи общего пользования в России, созданная главным образом для предоставления телефонных услуг, не может обеспечить необходимую пропускную способность. Имеющаяся в крупных городах сеть кабельного телевидения — это отдельная сеть, не входящая в состав сети связи общего пользования. Предоставление всего спектра услуг связи может быть осуществлено только после создания широкополосных цифровых сетей интегрального обслуживания (ШЦСИО) на базе новейших волоконно-оптических технологий с широким использованием технологий цифровых методов передачи информации — СЦИ (SDH), ATM, Ethernet, E-mail, Internet.

Ниже будут рассмотрены методы и протоколы цифровой передачи информации.

1.2. Цифровые методы передачи информации

По методам передачи информации волоконно-оптические системы передачи (ВОСП), как и все другие системы связи, можно разделить на две категории: системы с цифровым методом передачи информации — цифровые ВОСПИ и системы, в которых информация передается в виде аналоговых сигналов. Поскольку цифровые системы связи в настоящее время получили широкое распространение, представляется целесообразным большее внимание уделить таким системам.

В современных сетях и линиях связи среди разнообразных видов услуг основной вид — это телефонные услуги. Согласно требованиям ГОСТ и нормам международного комитета ИТУ-Т исходный аналоговый телефонный канал занимает полосу передаваемых частот от 400 до 3400 Гц. Однако в таком аналоговом виде он передается только от АТС к абоненту и обратно. Точнее, сигнал на абонентском участке является смешанным — сигналы посылки номера абонента и отбой являются цифровыми, а речевой сигнал — чисто аналоговый.

1.3. Плезioxронный метод цифровой передачи. Плезioxронная цифровая иерархия — ПЦИ (PDH)

По соединительным линиям между АТС, городским, зонавым и магистральным линиям сообщения передаются в цифровой форме. Для этого аналоговый телефонный сигнал подвергается преобразованию в цифровой поток методом импульсно-кодовой модуляции (ИКМ). Суть этого метода состоит в следующем. Ана-

логовый электрический сигнал разбивается (дискретизируется) на равные доли по амплитуде и по времени. После этого отдельные выборки, следующие периодически с частотой дискретизации, передаются в виде импульсов. Выборки амплитуд дискретизируются (квантуются) на равные части, в результате чего значениям выборок соответствуют численные значения в виде двоичных символов (бит). Для телефонных сигналов информация об амплитуде передается двоичным кодом, состоящим из 8 бит. максимальная частота дискретизации по времени определяется верхней граничной частотой телефонного канала, которая по ГОСТ принята равной 4 кГц. По теореме Котельникова, частота дискретизации аналогового сигнала по времени f_d равна удвоенной верхней частоте спектра этого сигнала, т. е. $f_d = 2f_v = 8$ кГц. Двоичный код из 8 бит соответствует 256 (2^8) квантованным уровням амплитуды аналогового сигнала. При частоте дискретизации 8 кГц и 8 битах информации об амплитуде общее количество бит за одну секунду получается равным 64 кбит/с. Такой сигнал представляет собой последовательность импульсов, длительность и частота следования которых определяются методом кодирования. При этом амплитуда и форма (чаще всего прямоугольная, а точнее, трапецеидальная) остаются постоянными. В результате преобразования аналогового сигнала в цифровой он превращается в поток информации в виде двоичных символов (бит) со скоростью передачи 64 кбит/с. Канал, в котором передается такой цифровой поток, получил название «Основной цифровой канал» (ОЦК) или по международной классификации DSO. Из сказанного выше понятно, что 64 кбит/с — это скорость, соответствующая одному телефонному каналу. В существующих линиях и сетях связи передается одновременно большое количество (группа) таких каналов. Следовательно, по всем линиям, за исключением абонентского участка, передается групповой цифровой сигнал. Он формируется методом временного разделения каналов, состоящим в том, что импульсы основного цифрового потока DSO квантуются по времени на более короткие импульсы, которые затем с соответствующими временными сдвигами располагаются в один ряд, образуя новый цифровой поток (частота, с которой происходит временное квантование, называется тактовой). Для последующего выделения (разделения) каналов на приеме в этот цифровой поток на границах импульсов, соответствующих каждому основному каналу, добавляются идентификационные синхроимпульсы. Таким образом, в групповом канале скорость передачи информации возрастает в зависимости от количества основных каналов. Операция образования группового цифрового потока информации из ряда основных каналов DSO получила название мультиплексирования с временным разделением каналов.

Формирование групповых цифровых сигналов, предназначенных для передачи по линии связи, осуществляется методом линейного кодирования [4], для чего применяется ряд двоичных кодов, основные из которых следующие: 1b2b, ADI, AMI, B3Z9, B6ZS, B8ZS, CMI, HDB2, HDB3, mBnB, NRZ, RZ, Miller code. Более подробно с характеристиками этих кодов можно ознакомиться в [4, 5, 6]. В соединительных линиях связи между АТС в настоящее время чаще всего применяются коды HDB3 и AMI. В соответствии с нормами ИТУ-Т и ГОСТ РФ на этих линиях в европейских странах и странах Латинской Америки передается 30 телефонных (т. е. основных) каналов DSO. Кроме этого, в групповом линейном потоке передается еще два дополнительных канала сигнализации и управления. Таким образом, фактически количество передаваемых каналов $n = 32$. Перемножение количества каналов (32) на скорость основного канала (64 кбит/с) дает скорость передачи группового цифрового потока, равную 2048 кбит/с (2,048 Мбит/с). В США и

Канаде аналогичный канал имеет скорость 1544 кбит/с (24 канала DSO). Параметры систем с этими скоростями стандартизированы документами МСЭ-Т (ITU-T) соответственно Рек. G.733 и G.732. Если исходный цифровой (абонентский) канал 64 кбит/с называется основным (ОЦК или DSO), то групповой цифровой канал со скоростью 2048 (или 1544) кбит/с называется первичным цифровым каналом (ПЦК или DS1).

Очевидно, что количество телефонных каналов, равное 30 (24), особенно при передаче в региональных, а тем более в магистральных линиях, совершенно недостаточно. Поэтому международными соглашениями было установлено, что скорость передачи ПЦК и каждого канала последующего порядка может быть увеличена с помощью мультиплексирования с коэффициентом, кратным 4. При этом используется тот же метод временного квантования импульсных последовательностей мультиплексируемых сигналов с новой, более высокой (в 4 раза) тактовой частотой, которая может быть не синхронизированной с тактовой частотой исходных каналов ПЦК (или каналов предыдущего порядка). Таким образом получается ряд скоростей передачи информации: 2048, 8448, 34368, 139264 и 564992 кбит/с. Из приведенного ряда видно, что значения скоростей не точно кратны четырем. Объясняется это тем, что для идентификации групп каналов (или блоков, пакетов, контейнеров) вводятся дополнительные биты, нарушающие указанную выше кратность. Вместе с тем, по числу основных каналов (DSO), которые передаются в групповых потоках с перечисленными выше скоростями, кратность четырем соблюдается четко: 30 (DSO) — 120 — 480 — 1920 — 7680. Перечисленные скорости образуют иерархический ряд или цифровые иерархии. Для стран Европы и Латинской Америки каждая цифровая иерархия получила свое обозначение [4]:

- E1 — Первичная цифровая иерархия — ПЦИ (2048 кбит/с)
- E2 — Вторичная цифровая иерархия — ВЦИ (8448 кбит/с)
- E3 — Третичная цифровая иерархия — ТЦИ (34368 кбит/с)
- E4 — Четверичная цифровая иерархия — ЧЦИ (139264 кбит/с)
- E5 — Пятеричная цифровая иерархия — ПЦИ (564992 кбит/с)

Отметим, что в перечисленных иерархиях скоростей передачи тактовые частоты соседних уровней, а тем более удаленных, не обязательно должны быть синхронизированы. Кроме того, частоты дискретизации в разных каналах также могут отличаться на небольшую величину. При этом используется внутренняя синхронизация в индивидуальных каналах. В таких системах в процессе мультиплексирования для выравнивания скоростей или тактовых частот добавляются (или изымаются) дополнительные биты. В результате на выходе мультиплексора формируется синхронизированная цифровая импульсная последовательность, скорость которой в n раз выше, чем в индивидуальных каналах (n кратно 4). Такие системы получили название плезиохронных (плезио — почти) цифровых систем передачи, а цифровая иерархия — плезиохронная цифровая иерархия — ПЦИ (PDH).

Приведенные выше системы ПЦИ были первоначально разработаны для линий связи, в которых средой распространения групповых сигналов являлись либо электрический (металлический) коаксиальный кабель, либо радиорелейные линии. Для таких линий передачи была разработана соответствующая аппаратура иерархий E1 — E4. В этих линиях связи вследствие малой полосы пропускания и большого затухания коаксиальных кабелей длина регенерационного участка для E1 — E2 не превышала 5 км, а для E4 и того меньше — 1,5...2 км. Такие линии связи были очень дорогими и широкого распространения не получили (особенно это относится к E4). Линии связи на коаксиальном кабеле для скорости

564992 кбит/с (E5) имели регенерационный участок менее 1,5 км и по причине очень высокой стоимости не получили дальнейшего развития. малая длина регенерационных участков для E4 и E5 — не единственная причина того, что E4 не получила широкого распространения в кабельных линиях на основе традиционных (металлических) кабелей, а E5 не получила дальнейшего развития. Вторая, не менее важная причина указанного выше обстоятельства связана с особенностями плезиохронных систем передачи. Отсутствие общей жесткой синхронизации тактовых частот различных уровней E1 — E5, а также добавление (или изъятие) вставок (стаффингов) в виде дополнительных бит в соответствующий код для выравнивания кодовых комбинаций приводят к невозможности выделения на каком-либо промежуточном пункте зоновой или магистральной линии канала DSO или, скажем, DS1 из потока, например, уровня E3 или E4 без полного демультимплексирования группового информационного потока. И если для уровня E2 эта процедура не является сложной задачей и стоимость аппаратуры, осуществляющей эту операцию, повышается незначительно, то для уровня E3 стоимость аналогичных устройств существенно возрастает, а для уровней E4 и E5 в связи с необходимостью резкого повышения быстродействия электронных устройств эта стоимость возрастает до неприемлемых величин.

Развитие альтернативной среды распространения сигналов, переносящих информацию, — оптического волокна, в котором носителем информации является не электрический ток, а оптическое излучение (поток фотонов), позволило многократно увеличить длину регенерационных участков. Так, для иерархии ПЦИ E1 и E2 длина регенерационного участка возросла до 200 км, а для E3 и E4 — более 100 км. При этом из-за многократного уменьшения числа ретрансляторов стоимость плезиохронных систем передачи для уровней E1 — E4 весьма существенно снизилась, благодаря чему такие системы для ВОЛС получили широкое распространение.

1.4. Линейные коды в системах ВОЛС ПЦИ

При проектировании волоконно-оптических систем передачи необходимо учитывать целый ряд особенностей, связанных с физическими принципами работы как среды передачи — оптического волокна и кабеля, так и оконечных устройств — оптического передатчика и приемного устройства. Одна из этих особенностей — выбор типа линейного двоичного кода. Эти вопросы подробно рассмотрены в работах [4, 5, 6]. Здесь же мы коснемся тех аспектов этой проблемы, которые не были освещены в приведенных работах или рассмотрены недостаточно.

Как уже отмечалось выше, в соответствии с рекомендациями ИТУ-Т G.703, для иерархии ПЦИ E1, E2 и E3 следует применять трехуровневый код HDB3. Используется также аналогичный код AMI (чаще всего для скорости 2048 кбит/с). Отличительной чертой этих кодов является то, что единицы (или нули) двоичной импульсной последовательности передаются импульсами, полярность которых изменяется на противоположную при передаче каждой следующей единицы (или нуля). Эти коды не содержат постоянную составляющую в своем спектре, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым при выборе кода для электрических линий передачи. Это требование остается в силе и для оптических линий. В отличие от электрического кабеля, по которому можно передавать импульсы тока как положительной, так и отрицательной полярности, по оптическому волокну можно

передавать оптические импульсы, представляющие собой импульсы энергии, не имеющие отрицательных значений. Поэтому при передаче двуполярных кодов HDB3 или AMI по оптическому волокну с помощью импульсов оптического излучения на одной длине волны, эти коды превращаются в однополярные с постоянной составляющей. На рис. 1.1 представлена реализация последовательности двоичного импульсного кода HDB3, где рис. 1.1а соответствует электрическому сигналу для линии с электрическими кабелями, а рис. 1.1б — оптическому сигналу, вводимому в волокно. Из сопоставления двух последовательностей видно, что в случае оптического сигнала имеет место трехуровневый код, содержащий постоянную составляющую P_0 , величина которой зависит от статистики кодовых комбинаций.

Как отмечается в [4, 5], применение этого кода в линиях ВОСП нецелесообразно по следующим причинам:

- мощность соседних символов (например, двух единиц — 11) оказывается в два раза меньше по сравнению с максимальной мощностью, излучаемой оптическим передатчиком, что эквивалентно потере мощности в два раза или потери энергетического потенциала на 3 дБ;
- наличие постоянной составляющей требует стабилизации рабочей точки на ватт-амперной характеристике лазера, что усложняет схему передающего оптического модуля;
- зависимость величины P_0 от статистики кодовых комбинаций приводит к возникновению паразитной переменной составляющей, которая в результате также снижает энергетический потенциал линии.

К отмеченным в указанных работах недостаткам применения кода HDB3 в качестве линейного в системах ВОЛС необходимо добавить следующее. Наличие постоянной составляющей в оптическом сигнале в коде HDB3 эквивалентно присутствию фоновой засветки. Вследствие этого в процессе принятия решения при переходе от одного символа в другому необходимо учитывать дробовый шум, возникающий из-за наличия фона и уменьшающий отношение сигнал/шум, что также снижает потенциал системы. Более точный учет влияния фона на отношение сигнал/шум на выходе фотодетектора будет рассмотрен ниже в разделе, посвященном фотоприемным устройствам.

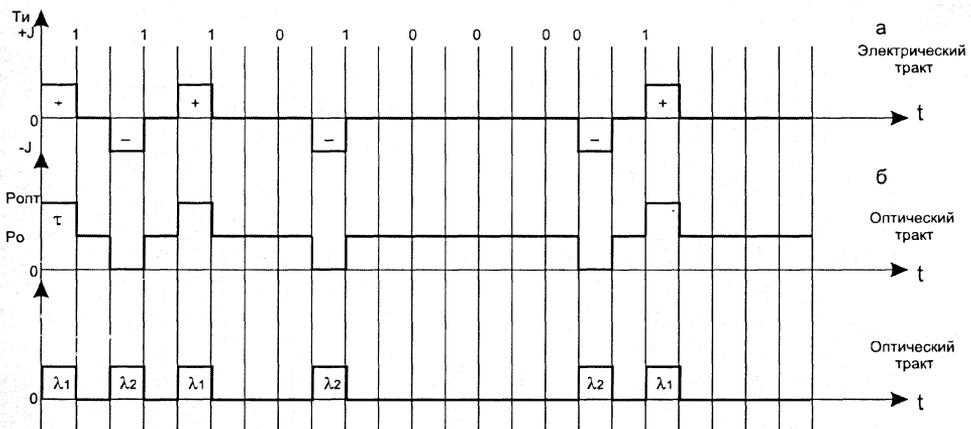


Рис. 1.1. Реализация последовательности двоичного импульсного кода HDB3

Выше было отмечено, что описанные недостатки применения кода HDB3 в линиях ВОСП характерны для случая, когда передача сигнала производится на одной длине волны. Эти проблемы снимаются в случае, когда символы двоичного кода типа HDB3 положительной полярности передаются на длине волны излучения λ_1 , отрицательной полярности — λ_2 . На рис. 1.1 представлена последовательность оптических импульсов, соответствующих этому процессу передачи. Такой метод передачи импульсов противоположной полярности можно назвать волновым кодированием. Преимущества этого метода и способы его реализации будут также рассмотрены в разделе фотоприемных устройств.

В современных системах ВОЛС, предназначенных для передачи цифровой информации для ПЦИ Е1, Е2, Е3, применяется преобразование кода HDB3 в другой код, подходящий для передачи в оптическом тракте. Чаще всего это линейные коды типа СМ1 или МСМ1, которые не содержат постоянной составляющей и по всем остальным параметрам оптимизированы для передачи по оптическому тракту. Вместе с тем эти достоинства достигаются ценой двукратного увеличения тактовой частоты и полосы частот. В более скоростных системах, например ПЦИ Е4, применяются линейные коды типа 5В6В, 10В1Р1R и др. Отметим, что для ВОСП код HDB3, поступающий на электрический вход аппаратуры ВОЛС на передаче и на электрический выход на приеме, является стыковым.

На рис. 1.2 представлена обобщенная структурная схема однопролетной волоконно-оптической линии связи (в одну сторону), где:

- 1 — электронные мультиплексоры основных информационных потоков уровня DS0 в информационный поток уровня DS1 в коде HDB3;
- 2 — электронный мультиплексор и преобразователь стыкового кода HDB3 в линейный код;
- 3 — блок согласования (накачки) излучателя 4 с выходом устройства преобразования кода 2;
- 4 — излучатель оптического сигнала (лазер или светоизлучающий диод);
- 5 — блок стабилизации выходной оптической мощности излучателя 4 и стабилизации температуры;
- 6 — фотодетектор;

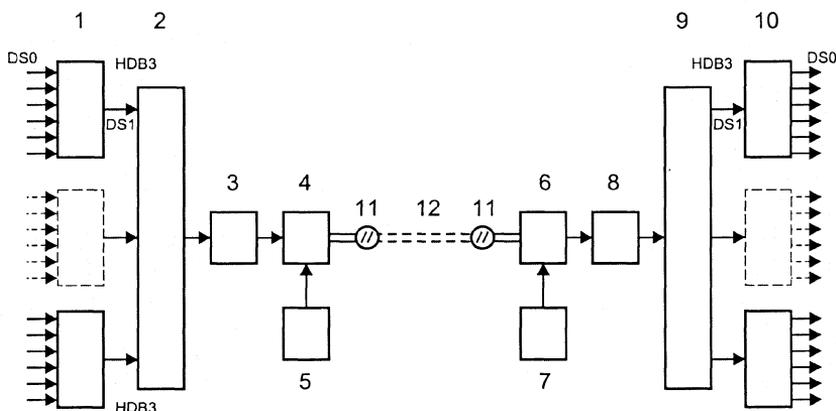


Рис. 1.2. Обобщенная структурная схема однопролетной волоконно-оптической линии связи

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru