

КОНСПЕКТ

з дисципліни: «Телекомунікаційні технології
комп'ютерних мереж»
викладач: Пушкін Юрій Олександрович

СОДЕРЖАНИЕ

1	14 сентября 2018 г.	3
1.1	Информация, сообщение, сигнал	3
1.2	Обобщённая структурная схема системы связи	4
2	20 сентября 2018 г.	6
2.1	Телекоммуникационные каналы	6
2.1.1	Кабели на витой паре	6
2.1.2	Коаксиальные кабели	7
2.1.3	Волоконно-оптические кабели	8
2.1.4	Радиоканалы	9
3	28 сентября 2018 г.	10
3.1	Спектральный анализ сигналов на линиях связи	10
3.2	Амплитудно-частотная характеристика, полоса пропускания и затухание	11
3.3	Помехоустойчивость и достоверность	12
4	4 октября 2018 г.	13
4.1	Методы передачи данных	13
4.1.1	Аналоговая модуляция	13
4.1.2	Методы аналоговой модуляции	13
4.1.3	Спектр модулированного сигнала	14
4.1.4	Цифровое кодирование	14
4.1.5	Требования к методам цифрового кодирования	15
4.1.6	Потенциальный код без возвращения к нулю	16
4.1.7	Метод биполярного кодирования с интерактивной инвер- сией	16
4.1.8	Биполярный импульсный код	16
4.1.9	Манчестерский код	17

1. 14 СЕНТЯБРЯ 2018 г.

1.1. Информация, сообщение, сигнал

Понятие «информация» имеет много различных аспектов, и в связи с этим существует несколько различных подходов к её определению. *Информация* — совокупность сведений о каком-то событии, явлении, предмете, являющихся объектом хранения, передачи и преобразования. Для выполнения указанных действий используют условные символы — буквы, жесты, математические знаки, позволяющие выразить информацию в необходимой форме. Совокупность знаков, которые используют для хранения, передачи и обработки, называют *сообщением*.

В различных технических системах информация представляется в двоичной форме. Соответственно, сообщением может служить последовательность конечного числа двоичных символов.

Различают дискретные и непрерывные сообщения. Дискретные сообщения формируются в результате последовательной выдачи источником сообщения отдельных знаков.

Множество различных знаков называют *алфавитом источника сообщений*, а их количество — объёмом алфавита. Непрерывные сообщения не разделены на элементы, они описываются функциями времени, принимающими непрерывное множество значений. Пример — телевизионное изображение.

Передача сообщений на расстояние осуществляется с помощью какого-либо материального носителя или физического процесса (волны, ток, колебания и т. д.). Физический процесс, посредством которого сообщение передаётся на расстояние, называется *сигналом*. В современных системах управления чаще всего используются электрические сигналы.

Процесс изменения параметров носителя принято называть модуляцией. Различают такие виды сигналов (рис. 2.1 (*Прим. Лектор сказал искать рисунки в тексте лаб.*)):

1. Непрерывные по уровню и по времени (2.1а).
2. Непрерывные по уровню и дискретные по времени (2.1б).
3. Дискретные по уровню и непрерывные по времени (2.1в).
4. Дискретные по уровню и по времени (2.1г).

Сигналы первого вида, называемые непрерывными, задаются на конечном или бесконечном временном интервале и могут принимать любые значения в некотором диапазоне.

Сигналы второго вида задаются в определённый дискретный момент времени и могут принимать любые значения из некоторого диапазона. Их можно

получить из непрерывных сигналов путём взятия отсчёта в определённый момент времени. Это преобразование называется дискретизацией по времени.

Сигналы третьего вида, называемые квантованными по времени, задаются на некотором временном интервале и характеризуются тем, что принимают вполне только определённые дискретные значения. Их можно получить из непрерывных сигналов, применяя к ним операцию квантования по уровню.

Сигналы четвёртого вида также называются дискретными, задаются в определённые дискретные моменты и принимают определённые значения. Их можно получить из непрерывных сигналов, осуществляя операцию дискретизации по времени и квантования по уровню.

1.2. Обобщённая структурная схема системы связи

Системой связи называют совокупность технических средств, предназначенных для передачи информации от передатчика сообщений и получателя информации.

Структурная схема простейшей системы связи показана на рис. 2.2. Источником сообщения (1) может быть человек или различного рода устройство, он осуществляет выбор сообщений из ансамбля сообщений. Если сообщение на выходе источника имеет не электрическую природу, то для его передачи в системе связи оно преобразуется в первичный электрический сигнал.

Первичные сигналы являются низкочастотными. Для передачи на большие расстояния используются специальные электромагнитные колебания высокой частоты, называемые переносчиками, которые могут эффективно распространяться по линиям связи.

В передающем устройстве (2) первичный сигнал превращается во вторичный (высокочастотный) сигнал $S(t)$. В качестве переносчика могут использоваться электромагнитные колебания, имеющие гармоничную или импульсную форму.

Для того, чтобы заложить в переносчики информацию, применяют операцию модуляции, которая заключается в изменении одного или нескольких параметров переносчика по закону передаваемого сообщения. Например, в гармоническом переносчике можно изменять амплитуду, частоту или фазу колебаний. При этом возможны три вида модуляции: амплитудная, частотная или фазовая.

Устройство, осуществляющее изменение одного или нескольких параметров переносчика, называется модулятором.

Линия связи (3) — это среда, используемая для передачи сигнала. Они могут быть проводными и беспроводными. В реальной системе связи сигнал передаётся при наличии помех, под которыми понимают любые случайные воздействия, накладывающиеся на сигнал и затрудняющие его приём. Поэтому

сигнал $S(t)$, в общем случае отличается от $S(t)$, который был на выходе передающего устройства.

Совокупность технических средств передачи информации, включающая среду распространения, и обеспечивающая передачу сигнала от некоторой точки A до точки B (рис 2.3) называют *каналом*. Если сигнал, поступающий на вход канала и снимаемый на его выходе, является дискретным, то канал также называется дискретным.

Любая телекоммуникационная система характеризуется рядом показателей, характеристиками канала. Наиболее существенными из них с точки зрения передачи информации такие:

1. Достоверность передачи информации — степень соответствия принятых сообщений переданным. Она зависит от параметров самой системы, степени её технического совершенства и условий работы.
2. Помехоустойчивость — способность системы противостоять вредному воздействию помех на передачу сообщений. Количественно помехоустойчивость телекоммуникационных систем можно характеризовать вероятностью ошибок $P_{\text{ош}}$ при заданном отношении мощностей сигнала и помехи в полосе частот, занимаемой сигналом, или требуемым отношением, при котором обеспечивается заданная.
3. Скорость передачи информации. *Технической скоростью* V_T называется число элементарных сигналов (символов), передаваемых по каналу в единицу времени. Она зависит от свойств линии связи и быстродействия аппаратуры. Единицей измерения технической скорости служит бод (baud) — скорость, при которой за одну секунду передаётся один символ. *Информационная скорость* (скорость передачи информации) — среднее количество информации относительно заданного сообщения, которое передаётся по каналу за единицу времени. Для практического применения телекоммуникационных систем важно выяснить, до какого предела и каким путём можно увеличить скорость передачи информации по каналу.
4. Предельные возможности канала по передаче сообщений характеризуются пропускной способностью — максимальная скорость передачи информации по данному каналу, которую можно достигнуть при самых совершенных способах передачи и приёма. Пропускная способность передачи канала измеряется числом двоичных единиц информации в секунду. Пропускная способность канала является характеристикой его самого и не зависит от сигнала.

С целью наилучшего соответствия характеристики сигнала и канала связи обычно применяется канальное кодирование. Устройство, осуществляющее заданную операцию, называется *кодером канала*. При реализации современных систем телекоммуникации предпочтение отдают цифровым методам обработки и передачи сигнала. Цифровые системы имеют ряд существенных преимуществ: представление сообщений в цифровой форме обеспечивают более высокую помехоустойчивость, возможность более полного использования пропускной способности канала, стабильность параметров передачи и гибкость при построении телекоммуникационных систем.

2. 20 СЕНТЯБРЯ 2018 Г.

2.1. Телекоммуникационные каналы

В настоящее время введено понятие телекоммуникационного канала (канала связи) как совокупности технических устройств и линий связи, необходимых для передачи сигналов между пунктами связи. Линию связи, представляющую собой физическую среду, в которой распространяется сигнал, называют *физическим каналом*. Классификация физических каналов приведена на рис. 4.1.

2.1.1. Кабели на витой паре

Витая пара представляет собой два изолированных медных провода, скрученных вместе. Скрутка проводов позволяет уменьшить индуктивность проводов, приводящую к ограничению технической скорости. Кроме того, скрутка способствует уменьшению электрических помех, наводимых соседними парами, а также внешними источниками. Кабели на витой паре характеризуются исключительной простотой. К недостаткам такого кабеля относятся:

1. Низкий уровень защищённости от электрических помех.
2. Сравнительно большой уровень собственных излучений, способствующих затуханию сигнала.
3. Возможности прослушивания передаваемого сигнала.

Для уменьшения данных недостатков на практике используется экранированный кабель (STP). Провода в кабеле имеют определённый цвет изоляции.

Телекоммуникационные кабели могут содержать от 2000 до 3000 витых пар, число пар в кабелях внутренней проводки — примерно 200. Входное полное сопротивление (импеданс) витой пары можно смоделировать двумя последовательно включёнными сопротивлениями, параллельно одному из которых включена ёмкость (рис. 4.2). На рис. 4.2а представлена эквивалентная схема за-

мещения полного входного сопротивления телефонной линии для диапазона звуковых частот. На рис 4.2б показана высокочастотная эквивалентная схема для частот выше звукового диапазона. Затухание сигнала в кабеле на витой паре сильно зависит от частоты передаваемого сигнала. Затухание возрастает пропорционально частоте, но в определённых частотных полосах затухание остаётся практически постоянным (рис. 4.3).

Характеристики кабелей на витой паре регламентируются в стандарте EIA/TIA 568. Этот стандарт включает 5 категорий неэкранированных кабелей на витой паре:

Категория 1 Традиционный телефонный кабель, по которому можно передавать только речь.

Категория 2 Кабель, предназначенный для передачи данных со скоростью 4 Мбит/с. Состоит из 4 витых пар.

Категория 3 Кабель, предназначенный для передачи данных со скоростью 10 Мбит/с.

Категория 4 Кабель, предназначенный для передачи данных со скоростью 16 Мбит/с.

Категория 5 Кабель, предназначенный для передачи данных со скоростью 100 Мбит/с.

Максимальная длина сегмента кабеля UTP — 100 м.

Экранированный кабель на витой паре применяется в локальных вычислительных сетях на основе Token Ring, компьютеры соединяются по кольцу. Электрические параметры кабеля тип 1 примерно соответствуют параметрам кабеля категории 5.

2.1.2. Коаксиальные кабели

Этот кабель состоит из центрального проводника, изолированного твёрдым нейлоном или полиэтиленом (рис. 4.4). Изолирующий слой затем покрывается проволоочной оплёткой или фольгой. Существуют кабели, в которых присутствуют и оплётка, и фольга, которые выполняют функции экрана, защищающего центральный проводник от внешних помех. Поверх этого изолятор покрывают поливинилхлоридом. Стоимость коаксиального кабеля в несколько раз выше кабеля на витой паре, и монтировать его гораздо сложнее. Наличие экрана существенно увеличивает помехозащищённость и снижает собственное излучение. Несанкционированное подключение к такому кабелю сложнее, чем к кабелю на витой паре. Пропускная способность кабеля в режиме модуляции высокочастотного сигнала может достигать 500 Мбит/с. Допустимая длина сегмента — несколько километров. Входное полное сопротивление коаксиаль-

ного кабеля обычно равно 50 Ом. Кабель для телевизионных фидеров имеет сопротивление 75 Ом.

В локальных вычислительных сетях, реализованных на основе технологии Ethernet, получили распространение два типа коаксиальных кабелей, которые получили название «тонкий» и «толстый» Ethernet.

2.1.3. Волоконно-оптические кабели

Волоконно-оптические кабели предназначены на расстояния оптических сигналов. Основным элементом волоконно-оптических кабелей являются световоды — тонкие нити из высокопрочных материалов. Оптическим сигналом служит модулированное оптическое излучение лазера или светодиода.

Для описания процесса распространения оптических волн пользуются волновым и лучевым методом. Первый метод основан на решении уравнений и позволяет получить точное решение электродинамической задачи. На практике широкое распространение получили лучевые методы (методы геометрической оптики).

В геометрической оптике световые волны изображаются световыми лучами, которые в однородной среде распространяются прямолинейно. При попадании на границу раздела двух сред с разными значениями показателей преломления, световой луч изменяет своё направление. И в общем случае появляются преломленный и отражённый лучи. Углы, которые образуют падающий, отражённый и преломлённый лучи с нормалью границы раздела сред, восстановленной в точке падения, называют соответственно углами падения, отражения и преломления.

Процесс распространения световых в оптически более плотной среде, окружённый менее плотной, показан на рис. 4.5. Траектория, показанная сплошной линией, соответствует световому лучу, который падает на границу раздела сред, отражается от неё и возвращается в область более плотной среды, где распространяется зигзагообразно. Такие лучи называются направляемыми, и их траектории полностью расположены внутри среды распространения.

Траектория, показанная штриховой линией, соответствует лучу, который падает на границу раздела сред под определённым углом, и испытывает не только отражение, но и преломление проникая в менее плотную среду. Такие лучи называются лучами излучений.

Оптические волокна, у которых показатель преломления на границе раздела сердцевины и оболочки изменяется скачком, называются ступенчатыми. Волокна, у которых показатель преломления изменяется плавно, называются градиентными.

Важнейшим параметром оптических волокон являются потери, приводящие к ослаблению сигнала. Ещё одним важным параметром является полоса

частот. Она определяет объём информации, который можно передавать по оптическому кабелю. Ограничение частоты, применительно к цифровым системам передачи, обусловлено тем, что импульс на приёме приходит размытым, искажённым в следствии различия скоростей распространения отдельных его составляющих в световоде. Данное явление носит название дисперсии. Сравнивая дисперсионные характеристики различных световодов, можно отметить, что лучшими данными обладают одномодовые световоды. Хорошие показатели также у градиентных световодов. Явление дисперсии также приводит к ограничению пропускной способности и дальности передачи.

2.1.4. Радиоканалы

Полоса частот, используемых в радиосвязи составляет от 3 Гц до 3000 ГГц, что соответствует длинам волны от 10^8 м до 10^{-6} м. Классификация частот и соответствующих им длин волн приведена в табл. 4.2.

По способу распространения радиоволн различают каналы с открытым и закрытым распространением. В каналах с закрытым распространением электромагнитная энергия распространяется по направляющим линиям, для них характерны малый уровень помех и постоянство параметров сигнала, что позволяет передавать информацию с высокой достоверностью и скоростью.

В диапазонах от крайне низких до низких частот на небольших расстояниях поле в месте приёма создаётся за счёт дифракционного огибания выпуклой поверхности Земли. На больших расстояниях радиоволны распространяются в своеобразном сферическом волноводе, внутренняя стенка которого образует поверхность Земли, а внешняя — ионосферой.

В распространении волн высоких частот принимает участие даже ионосфера, однако, если волны длиннее 1 км, они отражаются от нижнего её слоя практически зеркально, то дециметровые волны проникают в неё практически полностью, что приводит к эффекту многолучёвости. Дециметровые волны применяются для глобальной связи и радиовещания. С их помощью можно передать информацию сравнительно большого объёма в пределах земного шара со сравнительно небольшой мощностью передатчика.

Гектаметровые волны днём распространяются как земные, а ночью — как ионосферные. Дальность распространения не превышает 500 км (над морем — 1000 км). Волны частотой от 30 ГГц и выше распространяются в пределах прямой видимости.

Новую эру в освоении высокочастотной области радиодиапазона в радиосвязи открыл запуск искусственных спутников Земли. Линия спутниковой связи состоит из конечных земных станций и одного или нескольких спутников-ретрансляторов, вращающихся вокруг Земли.

В системах, в которых используются открытые каналы, передача оптиче-

ских сигналов передаётся непосредственно через атмосферу. Могут использоваться при объединении различных локальных вычислительных сетей, системах безопасности и т. д.

Выпускаемая в настоящее время аппаратура позволяет обеспечить оптических сигналов на расстояние до 3 км. Однако в зависимости от погодных условий это расстояние может уменьшаться. Оптическая система, устанавливаемая на каждом конце линии связи, состоит из двух станций, содержащих излучающий лазерный блок, принимающий оптический блок и дополнительное электронное оборудование.

Излучение лазера модулируется передаваемым цифровым потоком управляющего интерфейса. После прохождения излучения через атмосферу линзовая оптическая система на приёмнике противоположной станции фокусирует его на фотоприёмник. Электронные системы станций усиливают принятый сигнал и осуществляют синхронизацию исходного цифрового потока.

Оптическая линия связи хорошо защищена от несанкционированного доступа к данным, поскольку сигнал невидим и хорошо сфокусирован, попытка доступа к данным невозможна без нарушения связи.

Для надёжной работы во всепогодных условиях оптический приёмопередающий блок снабжают системой антиобледенения, исключающей образование конденсата, влаги и ледяной корки.

В качестве примера в таблице 4.3 приведены характеристики оптической атмосферной системы связи.

3. 28 СЕНТЯБРЯ 2018 Г.

3.1. Спектральный анализ сигналов на линиях связи

Известно, что любой периодический процесс можно представить в виде суммы синусоидальных колебаний различных частот и различных амплитуд. Каждая составляющая синусоида называется также гармоникой, а набор всех гармоник называют спектральным разложением исходного сигнала.

Техника нахождения спектра любого исходного сигнала хорошо известна: для некоторых сигналов, которые хорошо описываются аналитически, спектр легко вычисляются из формул Фурье. Для сигналов произвольной формы, встречающихся на практике, спектр можно найти с помощью специальных приборов — спектральных анализаторов, — которые отображают спектр сигнала на экране.

Искажение передающим каналом синусоиды какой-либо частоты приводит к искажениям передаваемого сигнала. При передаче импульсных сигналов, характерных для компьютерных сетей, искажаются высокочастотные и низкочастотные гармоники. В результате фронты импульсов теряют свою прямоуголь-

ную форму (рис. 3.5), в следствии этого на приёмном конце линии сигналы могут плохо распознаваться.

Линия связи искажает передаваемые сигналы из-за того, что её физические параметры отличаются от идеальных. Так, например, медные провода всегда представляют собой некоторую распределённую по длине комбинацию активного сопротивления и ёмкостной и индуктивной нагрузки (рис. 3.6).

В результате для синусоид различных частот линия будет обладать различным полным сопротивлением, а значит и передаваться они будут по-разному.

Волоконно-оптический кабель также имеет отклонения, мешающие идеальному распространению света. Кроме искажений сигналов, вносимых внутренними физическими параметрами линии, существуют и внешние помехи, которые вносят свой вклад в искажение формы сигналов на выходе линии.

3.2. Амплитудно-частотная характеристика, полоса пропускания и затухание

Степень искажения синусоидальных сигналов линиями связи оценивается с помощью таких характеристик как амплитудно-частотная характеристика, полоса пропускания и затухание на определённой частоте.

Амплитудно-частотная характеристика (рис. 3.7) показывает, как затухает амплитуда синусоиды на выходе линии связи по сравнению с амплитудой на её входе для всех возможных частот передаваемого сигнала. Часто вместо амплитуды в этой характеристике используют мощность сигнала. Знание амплитудно-частотной характеристики реальной линии позволяет определить форму выходного сигнала практически любого входного сигнала.

На практике вместо амплитудно-частотной характеристики применяются и другие упрощённые характеристики — полоса пропускания и затухание. Полоса пропускания — это непрерывный диапазон частот, для которого отношение амплитуды выходного сигнала ко входному превышает некоторый заранее заданный предел (обычно это 0,5). То есть полоса пропускания определяет диапазон частот синусоидального сигнала, при котором этот сигнал передаётся по линии связи без значительных искажений.

Затухание определяется как относительное уменьшение амплитуды или мощности сигнала при передачи по линии сигнала определённой частоты. Затухание обычно измеряется в децибелах и вычисляется так:

$$A = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} \right).$$

Пропускная способность линии характеризует максимально возможную скорость передачи данных по линии связи. Пропускная способность измеряется в битах в секунду. Пропускная способность зависит не только от характе-

ристик линии, но и от спектра передаваемых сигналов. Если значимые гармоники попадают в полосу пропускания линии, то такой сигнал будет хорошо передаваться по линии связи, и приёмник сможет правильно определить информацию.

Выбор способа представления дискретной информации в виде сигналов, подаваемых в линии связи, называется физическим или линейным кодированием. От выбранного способа кодирования зависит спектр сигналов и пропускная способность линии. Таким образом, для одного способа кодирования линии может обладать одной пропускной способностью, а для другого — другой.

Большинство способов кодирования используют изменение какого-либо параметра периодического сигнала (частоты, амплитуды, фазы синусоиды) или же знак потенциала последовательности импульсов.

Периодический сигнал, параметры которого изменяются, называется несущим сигналом или несущей частотой, если в качестве сигнала используется синусоида. Если сигнал изменяется так, что можно различить только два его состояния, то любое его изменение будет соответствовать наименьшей единице информации — биту. Если же сигнал может иметь более двух различных состояний, любое его изменение будет нести несколько бит информации.

Количество изменений информационного параметра несущего периодического сигнала в секунду измеряется в бодах. Период времени между соседними изменениями информационного сигнала называется тактом работы передатчика.

На пропускную способность линии оказывает влияние не только физическое, но и логическое кодирование. Логическое кодирование выполняется до физического кодирования и подразумевает замену бит исходной информации новой последовательностью бит, несущей ту же информацию, но обладающей кроме этого дополнительными свойствами.

При логическом кодировании чаще всего исходная последовательность бит заменяется более длинной последовательностью, поэтому пропускная способность канала по отношению к полезной информации при этом уменьшается.

3.3. Помехоустойчивость и достоверность

Помехоустойчивость линии определяет её способность уменьшать уровень помех, создаваемых во внешней среде. Помехоустойчивость линии зависит от типа используемой физической среды, а также от экранирующих, подавляющих помех, средств самой линии.

Перекрыстные наводки на ближнем конце (NEXT) определяют помехоустойчивость кабеля внутренним источникам помех, когда электромагнитное поле сигнала, передаваемое выходом передатчика по одной паре проводников, наводит на другую пару проводников сигнал помехи. Если ко второй паре будет

подключен приёмник, он может принять помеху. Чем меньше значение NEXT, тем лучше кабель. Показатель NEXT обычно используется применительно к кабелю с несколькими витыми парами.

4. 4 ОКТЯБРЯ 2018 Г.

4.1. Методы передачи данных

При передаче дискретных данных по каналам связи применяются 2 основных типа кодировки: на основе синусоидального несущего сигнала и на основе последовательности прямоугольных импульсов. Первый способ также называется модуляцией или аналоговой модуляцией, подчёркивая тот факт, что кодировка осуществляется за счёт изменения параметров аналогового сигнала. Второй способ называется цифровой кодировкой. Эти способы отличаются шириной спектра результирующего сигнала и сложностью аппаратуры для их реализации.

В настоящее время данные чаще всего имеют аналоговую форму, а передаются по каналам связи в дискретном виде. Процесс представления аналоговой информации в дискретной форме называется дискретной модуляцией. Термины «модуляция» и «кодирование» часто используют как синонимы.

4.1.1. Аналоговая модуляция

Аналоговая модуляция применяется для передачи дискретных данных по каналам с узкой полосой частот. Типичная амплитудно-частотная характеристика канала тональной частоты представлена на рис. 5.1. Этот канал передаёт частоты в диапазоне от 300 до 3400 Гц. Таким образом, его полоса пропускания равна 3100 Гц. Строгое ограничение полосы пропускания тонального канала связано с использованием аппаратуры уплотнения и коммутации канала в телефонных сетях.

Устройство, которое выполняет функции модуляции несущей синусоиды передающей стороны и демодуляции на приёмной стороне, носит название «модем» (модулятор-демодулятор).

4.1.2. Методы аналоговой модуляции

Аналоговая модуляция является таким способом физического кодирования, при котором информация кодируется изменением амплитуды, частоты или фазы синусоидального сигнала несущей частоты. Основные способы аналоговой модуляции показаны на рис. 5.2. На диаграмме (рис. 5.2а) показана последовательность бит исходной информации, представленная потенциалами высокого

уровня, что соответствует логической единице, и потенциалам нулевого уровня для логического нуля. Такой способ кодирования называется потенциальным кодом.

При амплитудной модуляции (рис. 5.2б) для логической единицы выбирается один уровень амплитуды, а для логического нуля — другой. При частотной модуляции (рис. 5.2в) значение нуля и единицы передаются синусоидами с различной частотой. При фазовой модуляции (рис. 5.2г), значениям нуля и единицы соответствуют сигналы одинаковой частоты, но с различной фазой.

4.1.3. Спектр модулированного сигнала

Спектр результирующего модулированного сигнала зависит от типа модуляции и скорости модуляции (то есть желаемой скорости передачи). Рассмотрим спектр сигнала при потенциальной кодировке. Пусть логическая единица кодируется положительным потенциалом, а логический ноль — отрицательным той же величины. Для упрощения предположим, что передаётся информация, состоящая из бесконечной последовательности чередующихся нулей и единиц, как это показано на рис. 5.2а. Для потенциальной кодировки спектр получается из формулы Фурье для периодической функции. Если дискретные данные передаются с битовой скоростью M бит/с, то спектр состоит из постоянной составляющей нулевой частоты и бесконечного ряда гармоник с частотами $f_0, 3f_0, 5f_0, 7f_0, \dots$, где $f_0 = M/2$. Амплитуды этих гармоник убывают достаточно медленно с коэффициентом $1/3, 1/5, 1/7, \dots$ от амплитуды гармоники f_0 (рис. 5.3). В результате следует, что спектр потенциального кода требует для качественной передачи широкую полосу пропускания.

При амплитудной модуляции спектр состоит из синусоиды несущей частоты f_c и двух боковых гармоник $(f_c + f_m, f_c - f_m)$, где f_m — частота изменения информационного параметра синусоиды, которая совпадает со скоростью передачи данных при использовании двух уровней амплитуды (рис. 5.3б).

При фазовой и частотной модуляции спектр сигнала получается более сложным, так как боковых гармоник здесь образуется более двух, но они симметрично расположены относительно основной несущей частоты, а их амплитуды быстро убывают.

4.1.4. Цифровое кодирование

При цифровом кодировании дискретной информации применяются потенциальные и импульсные коды. В потенциальных кодах для представления логических единиц и нулей используется только значение потенциала сигнала, а его перепады, формирующие законченные импульсы во времени, не принимаются.

Импульсные коды позволяют представить двоичные данные либо импульсами определённой полярности, либо частью импульса — перепадом потенциала определённого направления.

4.1.5. Требования к методам цифрового кодирования

При использовании прямоугольных импульсов необходимо выбрать такой способ кодировки, который достигал бы несколько целей:

1. Имел при одной и той же битовой скорости наименьшую ширину спектра.
2. Обеспечивал синхронизацию между передатчиком и приёмником.
3. Обладал способностью распознавать ошибки.
4. Обладал низкой стоимостью реализации.

Более узкий спектр сигнала позволяет на одной и той же линии связи добиваться более высокой скорости передачи данных. Кроме того, часто к спектру сигнала предъявляются требования отсутствия постоянной составляющей, то есть наличие постоянного тока между передатчиком и приёмником. В частности, применяются различные трансформаторные схемы гальванической разрядки, которые препятствуют прохождению тока.

Синхронизация передатчика и приёмника нужна для того, чтобы приёмник точно знал, в какой момент времени необходимо считывать информацию с линии связи. На небольших расстояниях хорошо работает схема, основанная на отдельной тактирующей линии связи (рис. 5.4), так что информация снимается с линии связи только в момент прихода такого импульса.

В сетях использование этой схемы вызывает трудности из-за неоднородности проводников в кабелях. На больших расстояниях неравномерность скорости распространения сигнала может привести к тому, что тактовый импульс придёт несколько позже или раньше данных. Другой причиной, по которой в сетях отказываются от использования тактирующих импульсов является экономия дорогостоящих проводников.

Поэтому в сетях применяются так называемые самосинхронизирующиеся коды, сигналы которых несут для приёмника указание о том, в какой момент времени надо осуществлять распознавание очередного бита. Любой резкий перепад сигнала (так называемый «фронт») может служить хорошим указанием для синхронизации приёмника с передатчиком.

При использовании синусоид в качестве несущего сигнала результирующий код обладает свойством самосинхронизации, так как изменения амплитуды несущей частоты даёт возможность приёмнику определить момент появления входного кода.

Требования, предъявляемые к методам кодирования, являются взаимно противоречивыми, поэтому каждый из них обладает своими преимуществами и своими недостатками.

4.1.6. Потенциальный код без возвращения к нулю

На рис. 5.5а показан упомянутый ранее метод потенциального кодирования, называемый также «кодирование без возвращения к нулю» (No Return to Zero, NRZ). Название отражает то обстоятельство, что при передаче последовательности единиц сигнал не возвращается к нулю в течение такта, как в других методах кодирования. Метод NRZ прост в реализации, обладает хорошей распознаваемостью ошибок, но не обладает свойством самосинхронизации. При передаче длинной последовательности единиц или нулей сигнал на линии не изменяется, поэтому приёмник лишён возможности определять по входному сигналу моменты времени, когда нужно в очередной раз считывать данные.

Другим серьёзным недостатком метода NRZ является наличие низкочастотной составляющей, которая приближается к нулю при передаче длинных последовательностей единиц и нулей. В результате в чистом виде код NRZ в сетях не используется.

4.1.7. Метод биполярного кодирования с интерактивной инверсией

Одной из модификаций метода NRZ является метод биполярного кодирования с альтернативной инверсией (AMI). В этом методе (рис. 5.5б) используется 3 уровня потенциалов: отрицательный, нулевой и положительный. Для кодирования логического нуля используется нулевой потенциал, а логическая единица кодируется либо положительным, либо отрицательным потенциалом, но при этом потенциал каждой новой единицы противоположен предыдущей по знаку.

Код AMI представляет также некоторые возможности по распознаванию ошибочных сигналов: нарушение строгого чередования полярности сигналов говорит о ложности импульса или исчезновении с линии корректного импульса.

4.1.8. Биполярный импульсный код

Кроме потенциальных кодов в сетях используют и импульсные коды, когда данные представлены полным импульсом или же его частью (фронтом). Простым случаем такого биполярного кода является биполярный импульсный код, в котором единица представлена импульсом одной полярности, а ноль — другой (рис. 5.5в). Каждый импульс длится половину такта. Такой код обладает

отличными самосинхронизирующими свойствами, но может присутствовать постоянная составляющая.

4.1.9. Манчестерский код

В локальных сетях до недавнего времени был самым распространённым методом кодирования (рис. 5.5г). Он применялся в технологиях Ethernet и Token Ring. В Манчестерском коде для кодирования единиц и нулей используется перепад потенциала (фронт импульса). При таком кодировании каждый такт делится на две части: информация кодируется перепадом потенциалов для единицы — низкого уровня к высокому, ноль — обратным перепадом от высокого к низкому. Так как сигнал изменяется по крайней мере один раз за такт, передача одного бита данных, то Манчестерский код обладает хорошими самосинхронизирующими свойствами. Полоса пропускания Манчестерского кода хуже, чем у биполярного импульсного. Манчестерский код имеет ещё одно преимущество перед биполярным кодированием: в последнем для передачи сигнала используются 3 уровня сигнала, а в Манчестерском — 2.