

Линии связи

БГАРФ, РТФ
Кафедра ИБ

Зензин Александр
Степанович, к.т.н.
Copyright © 2016



Обзор

1. Классификация линий связи

- Аппаратура передачи данных
- Первичные сети, линии и каналы связи
- Физическая среда передачи данных

2. Характеристики линий связи

- Спектральный анализ сигналов на линиях связи
- Затухание и волновое сопротивление
- Помехоустойчивость и достоверность
- Полоса пропускания и пропускная способность
- Биты и боды
- Соотношение полосы пропускания и пропускной способности

3. Типы кабелей

- Экранированная и неэкранированная витая пара
- Коаксиальный кабель
- Волоконно-оптический кабель
- Структурированная кабельная система зданий

Классификация линий связи

Аппаратура передачи данных

При построении сетей применяются линии связи, в которых используются различные физические среды: подвешенные в воздухе телефонные и телеграфные провода, проложенные под землей и по дну океана медные коаксиальные и волоконно-оптические кабели, опутывающие все современные офисы медные витые пары, всепроникающие радиоволны.

Как показано на рис. 1, линии связи состоят не только из среды передачи, но и аппаратуры. Даже в том случае, когда линия связи не проходит через первичную сеть, а основана на кабеле, в ее состав входит аппаратура передачи данных.

Аппаратура передачи данных (Data Circuit Equipment, DCE) в компьютерных сетях непосредственно присоединяет компьютеры или коммутаторы к линиям связи и является, таким образом, пограничным оборудованием. Традиционно аппаратуру передачи данных включают в состав линии связи. Примерами DCE являются модемы (для телефонных линий), терминальные адаптеры сетей ISDN, устройства для подключения к цифровым каналам первичных сетей DSU/CSU (Data Service Unit/Circuit Service Unit).

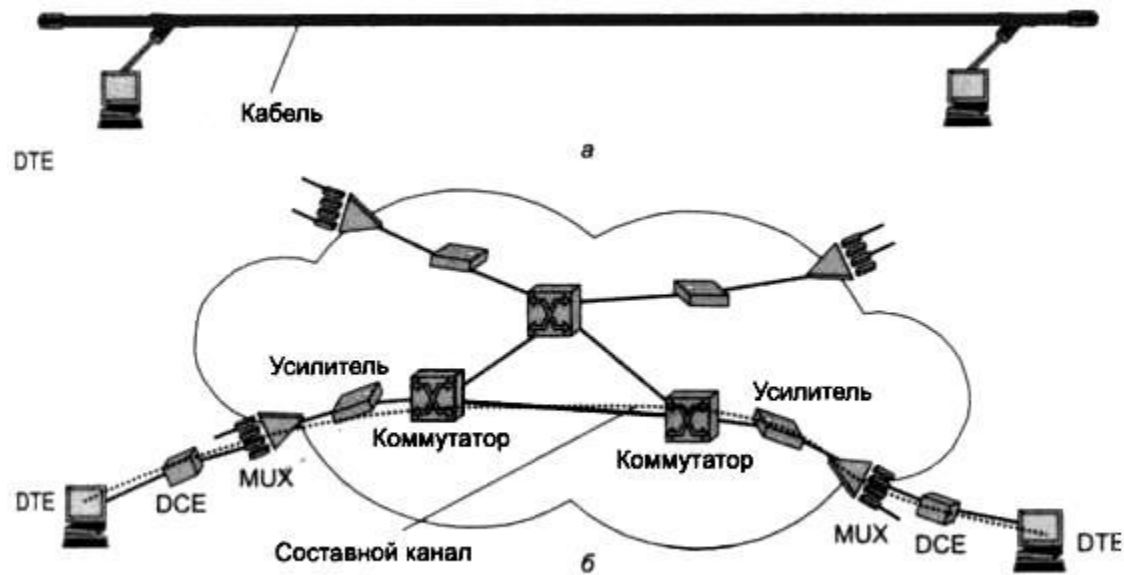


Рис. 1. Состав линии связи

Классификация линий связи

Аппаратура передачи данных

DCE работает на физическом уровне модели OSI, отвечая за передачу информации в физическую среду (в линию) и прием из нее сигналов нужной формы, мощности и частоты. Аппаратура пользователя линии связи, вырабатывающая данные для передачи по линии связи и подключаемая непосредственно к аппаратуре передачи данных, носит обобщенное название оконечное оборудование данных (Data Terminal Equipment, DTE). Примером DTE могут служить компьютеры, коммутаторы и маршрутизаторы. Эту аппаратуру не включают в состав линии связи.

Для подключения DCE-устройств к DTE-устройствам (то есть к компьютерам или коммутаторам/маршрутизаторам) существует несколько стандартных интерфейсов. Работают эти устройства на коротких расстояниях друг от друга (несколько метров).

Промежуточная аппаратура обычно используется на линиях связи большой протяженности. Она решает две основные задачи:

- улучшение качества сигнала;
- создание постоянного составного канала связи между двумя абонентами сети.

В локальных сетях промежуточная аппаратура может совсем не использоваться, если протяженность физической среды — кабелей или радиозэфира — позволяет одному сетевому адаптеру принимать сигналы непосредственно от другого сетевого адаптера без дополнительного усиления. В противном случае применяется промежуточная аппаратура, роль которой здесь играют устройства типа повторителей и концентраторов.

В глобальных сетях необходимо обеспечить качественную передачу сигналов на расстояния в сотни и тысячи километров. Поэтому без усилителей (повышающих мощность сигналов) и регенераторов (наряду с повышением мощности восстанавливающих форму импульсных сигналов, исказившихся при передаче на большое расстояние), установленных через определенные расстояния, построить территориальную линию связи невозможно.

Классификация линий связи

Аппаратура передачи данных

В *первичных сетях* помимо упомянутого оборудования, обеспечивающего качественную передачу сигналов, необходима промежуточная коммутационная аппаратура — мультиплексоры (MUX), демультимплексоры и коммутаторы. Эта аппаратура создает между двумя абонентами сети *постоянный составной канал* из отрезков физической среды — кабелей с усилителями.

В зависимости от типа промежуточной аппаратуры все линии связи делятся на аналоговые и цифровые. В *аналоговых линиях* промежуточная аппаратура предназначена для усиления аналоговых сигналов, то есть сигналов, которые имеют непрерывный диапазон значений. Такие линии связи традиционно применялись в телефонных сетях с целью связи телефонных коммутаторов между собой. Для создания высокоскоростных каналов, которые мультиплексируют несколько низкоскоростных аналоговых абонентских каналов, при аналоговом подходе обычно используется техника частотного мультиплексирования (Frequency Division Multiplexing, FDM).

В *цифровых линиях* связи передаваемые сигналы имеют конечное число состояний. Как правило, элементарный сигнал, то есть сигнал, передаваемый за один такт работы передающей аппаратуры, имеет 2, 3 или 4 состояния, которые в линиях связи воспроизводятся импульсами или потенциалами прямоугольной формы. С помощью таких сигналов передаются как компьютерные данные, так и оцифрованные речь и изображение (именно благодаря одинаковому способу представления информации современными компьютерными, телефонными и телевизионными сетями стало возможным появление общих для всех первичных сетей). В цифровых линиях связи используется специальная промежуточная аппаратура — регенераторы, которые улучшают форму импульсов и восстанавливают период их следования. Промежуточная аппаратура мультиплексирования и коммутации первичных сетей работает по принципу временного мультиплексирования каналов (Time Division Multiplexing, TDM).

Классификация линий связи

Первичные сети, линии и каналы связи

При описании технической системы, которая передает информацию между узлами сети, в литературе можно встретить несколько названий: линия связи, составной канал, канал, звено. Часто эти термины используются как синонимы, и во многих случаях это не вызывает проблем. В то же время есть и специфика в их употреблении.

- ❑ **Звено** (link) — это сегмент, обеспечивающий передачу данных между двумя соседними узлами сети. То есть звено не содержит промежуточных устройств коммутации и мультиплексирования.
- ❑ **Каналом** (channel) чаще всего обозначают часть пропускной способности звена, используемую независимо при коммутации. Например, звено первичной сети может состоять из 30 каналов, каждый из которых обладает пропускной способностью 64 Кбит/с.
- ❑ **Составной канал** (circuit) — это путь между двумя конечными узлами сети. Составной канал образуется отдельными каналами промежуточных звеньев и внутренними соединениями в коммутаторах. Часто эпитет «составной» опускается, и термином «канал» называют как составной канал, так и канал между соседними узлами, то есть в пределах звена.
- ❑ **Линия связи** может использоваться как синоним для любого из трех остальных терминов.

Не стоит относиться к путанице в терминологии очень строго. Особенно это относится к различиям в терминологии традиционной телефонии и более новой области — компьютерных сетей. Процесс конвергенции только усугубил проблему терминологии, так как многие механизмы этих сетей стали общими, но сохранили за собой по паре (иногда и больше) названий, пришедших из каждой области.

Классификация линий связи

Первичные сети, линии и каналы связи

Кроме того, существуют объективные причины для неоднозначного понимания терминов. На рис. 1 показаны два варианта линии связи. В первом случае (рис. 1, а) линия состоит из сегмента кабеля длиной несколько десятков метров и представляет собой звено. Во втором случае (рис. 1, б) линия связи представляет собой составной канал, развернутый в сети с коммутацией каналов. Такой сетью может быть первичная сеть или телефонная сеть.

Однако для компьютерной сети эта линия представляет собой звено, так как соединяет два соседних узла, и вся коммутационная промежуточная аппаратура является прозрачной для этих узлов. Повод для взаимного непонимания на уровне терминов компьютерных специалистов и специалистов первичных сетей здесь очевиден.

Первичные сети специально создаются для того, чтобы предоставлять услуги каналов передачи данных для компьютерных и телефонных сетей, про которые в таких случаях говорят, что они работают «поверх» первичных сетей и являются наложенными сетями.

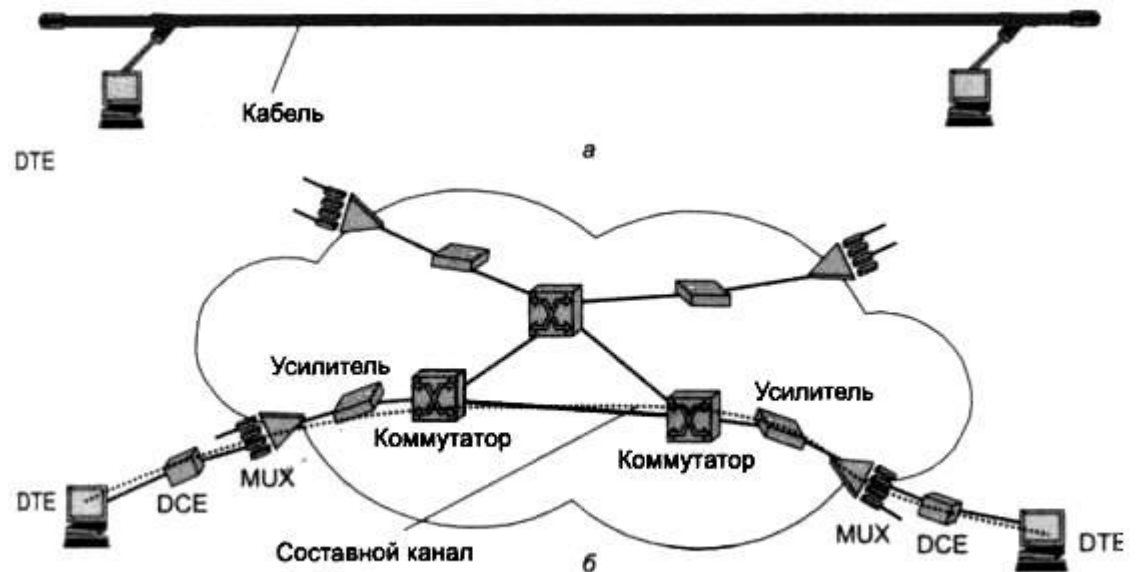


Рис. 1. Состав линии связи

Классификация линий связи

Физическая среда передачи данных

Линии связи отличаются также физической средой, используемой для передачи информации. Физическая среда передачи данных может представлять собой набор проводников, по которым передаются сигналы. На основе таких проводников строятся проводные (воздушные) или кабельные линии связи (рис. 1). В качестве среды также используется земная атмосфера или космическое пространство, через которое распространяются информационные сигналы. В первом случае говорят о *проводной среде*, а во втором — о *беспроводной*.

В современных телекоммуникационных системах информация передается с помощью электрического тока или напряжения, радиосигналов или световых сигналов — все эти физические процессы представляют собой колебания электромагнитного поля различной частоты.

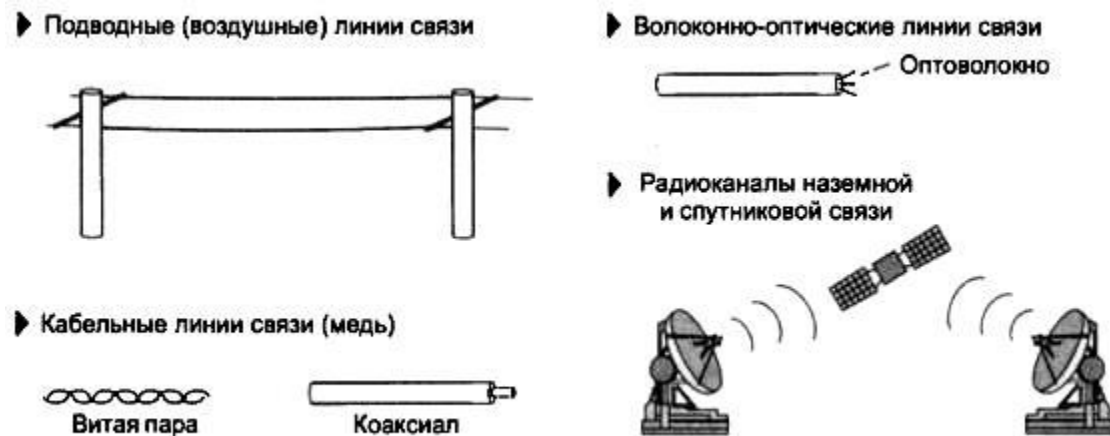


Рис. 1. Типы сред передачи данных

Проводные (воздушные) линии связи представляют собой провода без каких-либо изолирующих или экранирующих оплеток, проложенные между столбами и висящие в воздухе. Еще в недалеком прошлом такие линии связи были основными для передачи телефонных или телеграфных сигналов. Сегодня проводные линии связи быстро вытесняются кабельными. Но кое-где они все еще сохранились и при отсутствии других возможностей продолжают использоваться, в частности, и для передачи компьютерных данных. Скоростные качества и помехозащищенность этих линий оставляют желать много лучшего.

Классификация линий связи

Физическая среда передачи данных

Кабельные линии имеют достаточно сложную конструкцию. Кабель состоит из проводников, заключенных в несколько слоев изоляции: электрической, электромагнитной, механической и, возможно, климатической. Кроме того, кабель может быть оснащен разъемами, позволяющими быстро выполнять присоединение к нему различного оборудования. В компьютерных (и телекоммуникационных) сетях применяются три основных типа кабеля: кабели на основе скрученных пар медных проводов — неэкранированная витая пара (Unshielded Twisted Pair, UTP) и экранированная витая пара (Shielded Twisted Pair, STP), коаксиальные кабели с медной жилой, волоконно-оптические кабели. Первые два типа кабелей называют также медными кабелями.

Радиоканалы наземной и спутниковой связи образуются с помощью передатчика и приемника радиоволн. Существует большое разнообразие типов радиоканалов, отличающихся как используемым частотным диапазоном, так и дальностью канала. Диапазоны широковещательного радио (длинных, средних и коротких волн), называемые также АМ-диапазонами, или диапазонами амплитудной модуляции (Amplitude Modulation, АМ), обеспечивают дальнюю связь, но при невысокой скорости передачи данных. Более скоростными являются каналы, использующие диапазоны очень высоких частот (Very High Frequency, VHF), для которых применяется частотная модуляция (Frequency Modulation, FM). Для передачи данных также используются диапазоны ультравысоких частот (Ultra High Frequency, UHF), называемые еще диапазонами микроволн (свыше 300 МГц). При частоте свыше 30 МГц сигналы уже не отражаются ионосферой Земли, и для устойчивой связи требуется наличие прямой видимости между передатчиком и приемником. Поэтому указанные частоты используются в спутниковых или радиорелейных каналах либо в таких локальных или мобильных сетях, в которых это условие выполняется.

Классификация линий связи

Физическая среда передачи данных

В компьютерных сетях сегодня применяются практически все описанные типы физических сред передачи данных. Хорошие возможности предоставляют волоконно-оптические кабели, обладающие широкой полосой пропускания и низкой чувствительностью к помехам. На них сегодня строятся как магистрали крупных территориальных и городских сетей, так и высокоскоростные локальные сети. Популярной средой является также витая пара, которая характеризуется отличным отношением качества к стоимости, а также простотой монтажа. Беспроводные каналы используются чаще всего в тех случаях, когда кабельные линии связи применить нельзя, например при прохождении канала через малонаселенную местность или же для связи с мобильными пользователями сети. Обеспечение мобильности затронуло в первую очередь телефонные сети, компьютерные сети в этом отношении пока отстают. Тем не менее построение компьютерных сетей на основе беспроводных технологий, например Radio Ethernet, считаются сегодня одним из самых перспективных направлений телекоммуникаций.

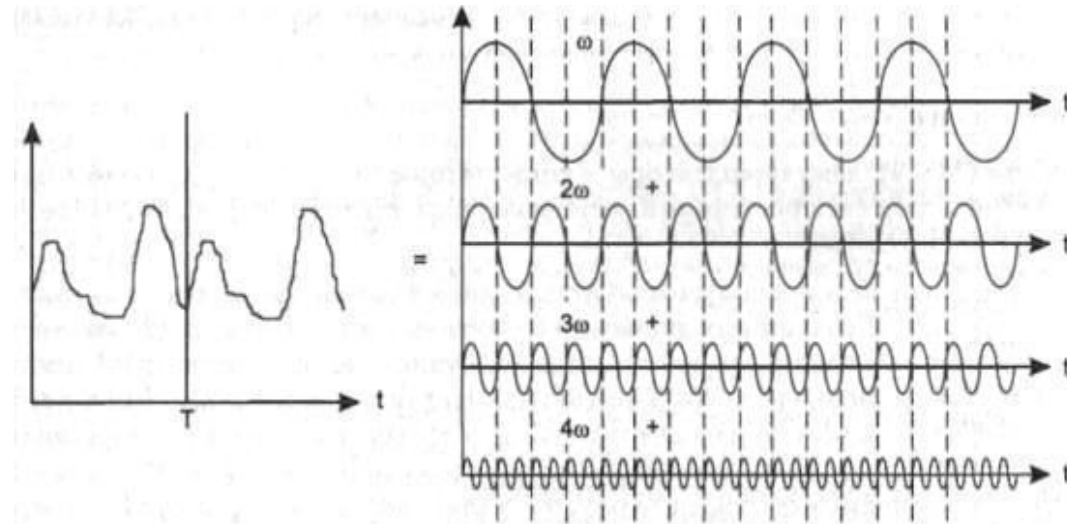
Стандарт WiMAX 3.0 (IEEE 802.16n), призванный прийти на смену только принятому стандарту WiMAX 2, будет достаточно быстрым и универсальным, для построения беспроводных компьютерных сетей. Пропускная способность сетей на его основе должна стать в десять раз больше, чем у самых современных действующих сетей.

Характеристики линий связи

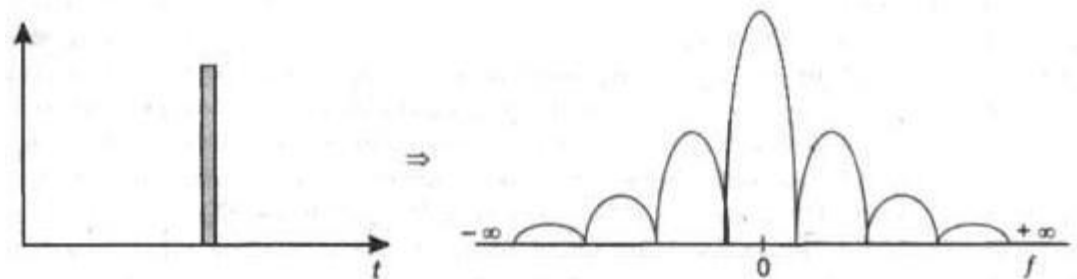
Спектральный анализ сигналов на линиях связи

Важная роль при определении параметров линий связи отводится спектральному разложению передаваемого по этой линии сигнала. Из теории гармонического анализа известно, что любой периодический процесс можно представить в виде суммы синусоидальных колебаний различных частот и различных амплитуд (рис. 1).

Каждая составляющая синусоида называется также гармоникой, а набор всех гармоник называют спектральным разложением, или спектром, исходного сигнала. Под шириной спектра сигнала понимается разность между максимальной и минимальной частотами того набора синусоид, которые в сумме дают исходный сигнал.



Непериодические сигналы можно представить в виде интеграла синусоидальных сигналов с непрерывным спектром частот. В частности, спектральное разложение идеального импульса δ (единичной мощности и нулевой длительности) имеет составляющие всего спектра частот, от $-\infty$ до $+\infty$ (рис. 2).



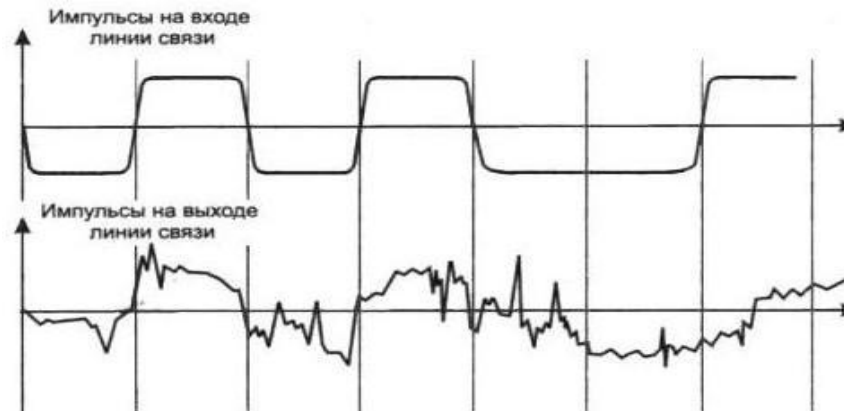
Характеристики линий связи

Спектральный анализ сигналов на линиях связи

Техника нахождения спектра любого исходного сигнала хорошо известна. Для некоторых сигналов, которые описываются аналитически (например, для последовательности прямоугольных импульсов одинаковой длительности и амплитуды), спектр легко вычисляется на основании формул Фурье.

Для сигналов произвольной формы, встречающихся на практике, спектр можно найти с помощью специальных приборов — спектральных анализаторов, которые измеряют спектр реального сигнала и отображают амплитуды составляющих гармоник на экране, распечатывают их на принтере или передают для обработки и хранения в компьютер.

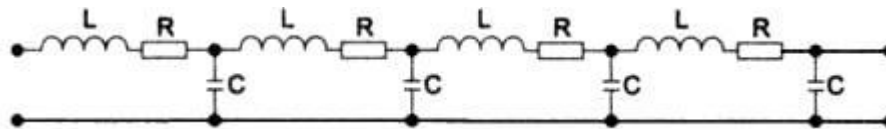
Искажение передающей линией связи синусоиды какой-либо частоты приводит, в конечном счете, к искажению амплитуды и формы передаваемого сигнала любого вида. Искажения формы проявляются в том случае, когда синусоиды различных частот искажаются неодинаково. Если это аналоговый сигнал, передающий речь, то изменяется тембр голоса за счет искажения обертонов — боковых частот. При передаче импульсных сигналов, характерных для компьютерных сетей, искажаются низкочастотные и высокочастотные гармоники, в результате фронты импульсов теряют свою прямоугольную форму (рис. 3), и сигналы могут плохо распознаваться на приемном конце линии.



Характеристики линий связи

Спектральный анализ сигналов на линиях связи

Передаваемые сигналы искажаются из-за несовершенства линий связи. Идеальная передающая среда, не вносящая никаких помех в передаваемый сигнал, должна, по меньшей мере, иметь нулевые значения сопротивления, емкости и индуктивности. Однако на практике медные провода, например, всегда представляют собой некоторую распределенную по длине комбинацию активного сопротивления, емкостной и индуктивной нагрузок (рис. 4). В результате синусоиды различных частот передаются этими линиями по-разному.



Помимо искажений сигналов, возникающих из-за не идеальных физических параметров линии связи, существуют и внешние помехи, которые вносят свой вклад в искажение формы сигналов на выходе линии. Эти помехи создаются различными электрическими двигателями, электронными устройствами, атмосферными явлениями и т. д. Несмотря на защитные меры, предпринимаемые разработчиками кабелей, и наличие усилительной и коммутирующей аппаратуры, полностью компенсировать влияние внешних помех не удастся. Помимо внешних помех в кабеле существуют и внутренние помехи — так называемые наводки одной пары проводников на другую. В результате сигналы на выходе линии связи могут иметь искаженную форму (как это и показано на рис. 3).



Характеристики линий связи

Затухание и волновое сопротивление

Степень искажения синусоидальных сигналов линиями связи оценивается такими характеристиками, как затухание и полоса пропускания.

Затухание показывает, насколько уменьшается мощность эталонного синусоидального сигнала на выходе линии связи по отношению к мощности сигнала на входе этой линии. Затухание (Л) обычно измеряется в децибелах (дБ) и вычисляется по следующей формуле:

$$A = 10 \lg P_{\text{out}} / P_{\text{in}}$$

Здесь P_{out} — мощность сигнала на выходе линии, P_{in} — мощность сигнала на входе линии. Так как затухание зависит от длины линии связи, то в качестве характеристики линии связи используется так называемое погонное затухание, то есть затухание на линии связи определенной длины. Для кабелей локальных сетей в качестве такой длины обычно используют 100 м, так как это значение является максимальной длиной кабеля для многих технологий LAN. Для территориальных линий связи погонное затухание измеряют для расстояния в 1 км.

Обычно затуханием характеризуют пассивные участки линии связи, состоящие из кабелей и кроссовых секций, без усилителей и регенераторов. Так как мощность выходного сигнала кабеля без промежуточных усилителей меньше, чем мощность входного, затухание кабеля всегда является отрицательной величиной.

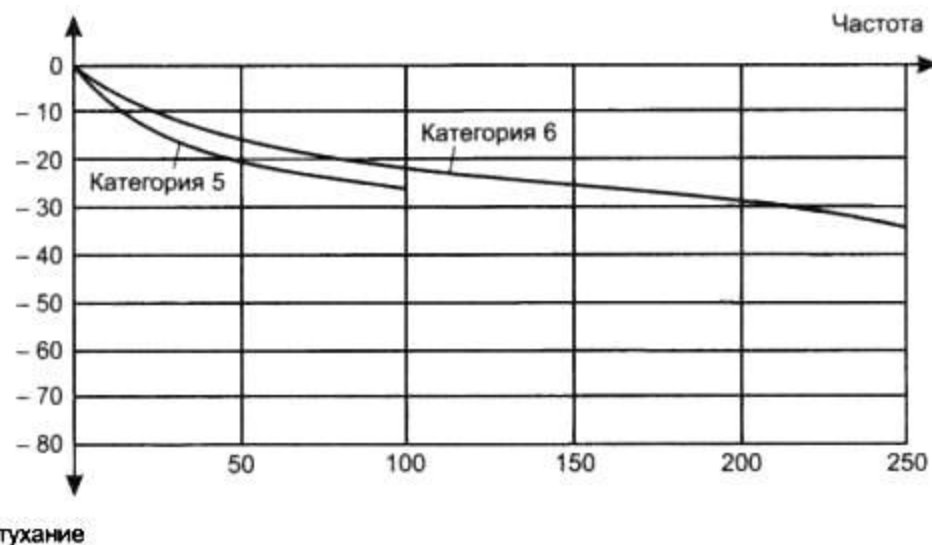
Характеристики линий связи

Затухание и волновое сопротивление

Степень затухания мощности синусоидального сигнала зависит от частоты синусоиды, и эта зависимость также характеризует линию связи (рис. 1).

Чаще всего при описании параметров линии связи приводятся значения затухания всего для нескольких значений частот. Это объясняется, с одной стороны, стремлением упростить измерения при проверке качества линии. С другой стороны, на практике часто заранее известна основная частота передаваемого сигнала, то есть та частота, гармоника которой имеет наибольшую амплитуду и мощность. Поэтому достаточно знать затухание на этой частоте, чтобы оценить искажения передаваемых по линии сигналов.

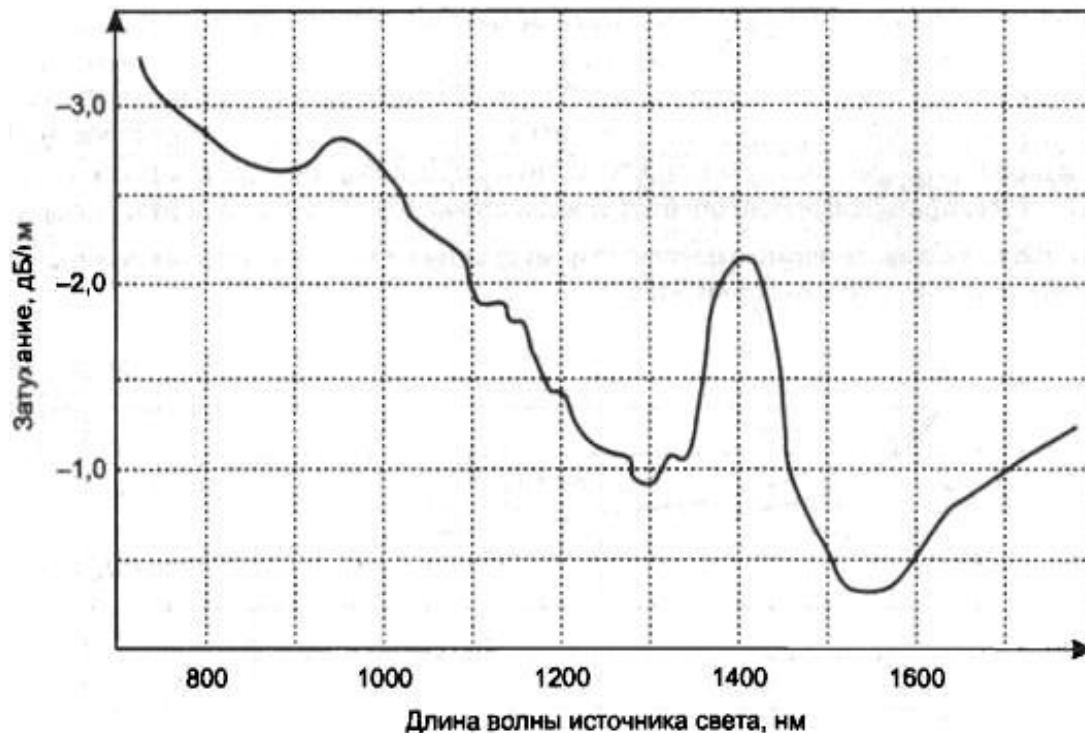
На рис. 2 показаны типовые зависимости затухания от частоты для кабелей на неэкранированной витой паре категорий 5 и 6.



Характеристики линий связи

Затухание и волновое сопротивление

Оптический кабель имеет существенно меньшие (по абсолютной величине) величины затухания, обычно в диапазоне от $-0,2$ до -3 дБ при длине кабеля в 1000 м, а значит, является более качественным, чем кабель на витой паре. Практически все оптические волокна имеют сложную зависимость затухания от длины волны, которая имеет три так называемых окна прозрачности. На рис. 3 показана характерная зависимость затухания для оптического волокна. Из рисунка видно, что область эффективного использования современных волокон ограничена волнами длин 850 нм, 1300 нм и 1550 нм (соответственно частотами 35 ТГц, 23 ТГц и 19,4 ТГц). Окно 1550 нм обеспечивает наименьшие потери, а значит, максимальную дальность при фиксированной мощности передатчика и фиксированной чувствительности приемника.



Характеристики линий связи

Затухание и волновое сопротивление

В качестве характеристики мощности сигнала используются абсолютный и относительный уровни мощности. **Абсолютный уровень мощности** измеряется в ваттах, **относительный уровень мощности**, как и затухание, измеряется в децибелах.

Существует также и другая абсолютная единица измерения мощности — так называемая **опорная мощность**, измеряемая в децибелах на милливатт (дБм).

При определении опорной мощности также используется логарифм отношения мощностей, но значение мощности, к которой выполняется отношение, *фиксируется*. Опорный уровень мощности, к которой относится измеряемая мощность, принимается равным 1 мВт, что и отражается в названии этой единицы мощности.

Опорная мощность p вычисляется по формуле:

$$p = 10 \lg P/1\text{мВт} \text{ [дБм]}$$

Здесь P — абсолютная мощность сигнала в милливаттах.

Несмотря на использование отношения в определении опорной мощности, эта единица измерения является, абсолютной, а не относительной, так как однозначно преобразует абсолютную мощность сигнала в ваттах в некоторое значение, которое никак не зависит от значения мощности другого сигнала, как это имеет место при определении децибела. Так, нетрудно вычислить соответствие некоторых значений мощности сигнала, выраженные в ваттах и децибелах на милливатт:

$$1 \text{ мВ} = 0 \text{ дБм};$$

$$10 \text{ мВ} = 10 \text{ дБм};$$

$$1 \text{ В} = 30 \text{ дБм};$$

$$100 \text{ кВ} = 80 \text{ дБм}.$$

Опорные значения мощности удобно использовать при расчетах энергетического бюджет *ЛИНИЙ СВЯЗИ*.



Характеристики линий связи Затухание и волновое сопротивление

Порог чувствительности приемника \mathbf{y} представляет собой минимальную опорную мощность сигнала на входе приемника, при котором он способен корректно распознавать дискретную информацию, содержащуюся в сигнале. Очевидно, что для нормальной работы линии связи необходимо, чтобы минимальная опорная мощность сигнала передатчика \mathbf{x} [дБм], даже ослабленная затуханием линии связи равным \mathbf{A} [мВт], превосходила порог чувствительности приемника: $\mathbf{x} - \mathbf{A} > \mathbf{y}$. Проверка этого условия и является сутью расчета энергетического бюджета линии.

Важным параметром медной линии связи является ее **волновое сопротивление**, представляющее собой полное (комплексное) сопротивление, которое встречает электромагнитная волна определенной частоты при распространении вдоль однородной цепи. Волновое сопротивление измеряется в Ом -ах и зависит от таких параметров линии связи, как активное сопротивление, погонная индуктивность и погонная емкость, а также от частоты самого сигнала. Выходное сопротивление передатчика должно быть согласовано с волновым сопротивлением линии, иначе затухание сигнала будет чрезмерно большим.

Характеристики линий связи

Помехоустойчивость и достоверность

Помехоустойчивость линии, как и следует из названия, определяет способность линии противостоять влиянию помех, создаваемых во внешней среде или на внутренних проводниках самого кабеля. Помехоустойчивость линии зависит от типа используемой физической среды, а также от средств экранирования и подавления помех самой линии. Наименее помехоустойчивыми являются радиолинии, хорошей устойчивостью обладают кабельные линии и отличной — волоконно-оптические линии, мало чувствительные к внешнему электромагнитному излучению. Обычно для уменьшения помех, создаваемых внешними электромагнитными полями, проводники экранируют и/или скручивают.

Электрическая и магнитная связь — это параметры медного кабеля, также являющиеся результатом помех. **Электрическая связь** определяется отношением наведенного тока в подверженной влиянию цепи к напряжению, действующему во влияющей цепи. **Магнитная связь** — это отношение электродвижущей силы, наведенной в подверженной влиянию цепи, к току во влияющей цепи. Результатом электрической и магнитной связи являются **наведенные сигналы** (наводки) в цепи, подверженной влиянию. Существует несколько различных параметров, характеризующих устойчивость кабеля к наводкам.

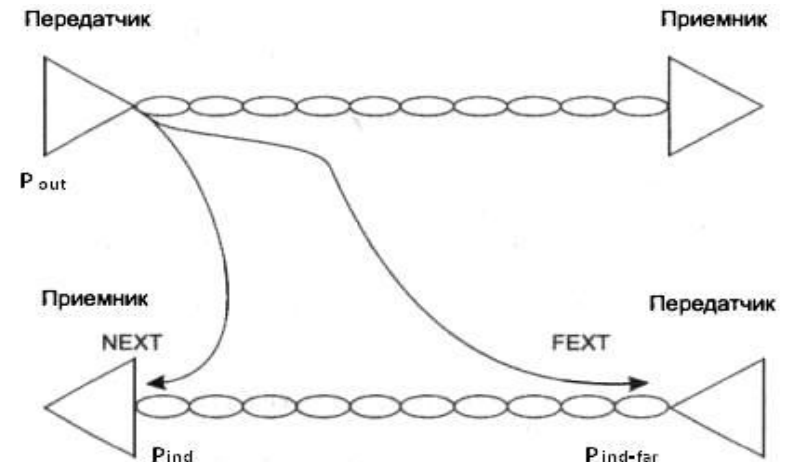
Характеристики линий связи

Помехоустойчивость и достоверность

Перекрестные наводки на ближнем конце (Near End Cross Talk, NEXT) определяют устойчивость кабеля в том случае, когда наводка образуется в результате действия сигнала, генерируемого передатчиком, подключенным к одной из соседних пар на том же конце кабеля, на котором работает подключенный к подверженной влиянию паре приемник (рис. 1). Показатель NEXT, выраженный в децибелах, равен $10\lg P_{out}/P_{ind}$ где P_{out} — мощность выходного сигнала, P_{ind} — мощность наведенного сигнала

Чем меньше значение NEXT, тем лучше кабель. Так, для витой пары категории 5 показатель NEXT должен быть меньше -27 дБ на частоте 100 МГц.

Перекрестные наводки на дальнем конце (Far End Cross Talk, FEXT) позволяют оценить устойчивость кабеля к наводкам для случая, когда передатчик и приемник подключены к разным концам кабеля. Очевидно, что этот показатель должен быть лучше, чем NEXT, так как до дальнего конца кабеля сигнал приходит ослабленный затуханием каждой пары.



Показатели NEXT и FEXT обычно применяются к кабелю, состоящему из нескольких витых пар, так как в этом случае взаимные наводки одной пары на другую могут достигать значительных величин. Для одинарного **коаксиального кабеля** (то есть состоящего из одной экранированной жилы) этот показатель не имеет смысла, а для двойного коаксиального кабеля он также не применяется вследствие высокой степени защищенности каждой жилы.

Оптические волокна тоже не создают сколько-нибудь заметных взаимных помех.

Характеристики линий связи Помехоустойчивость и достоверность

В связи с тем, что в некоторых новых технологиях данные передаются одновременно по нескольким витым парам, в последнее время стали применяться также показатели перекрестных наводок с приставкой PS (Power SUM — объединенная наводка), такие как PS NEXT и PS FEXT. Эти показатели отражают устойчивость кабеля к суммарной мощности перекрестных наводок на одну из пар кабеля от всех остальных передающих пар (рис. 2.).

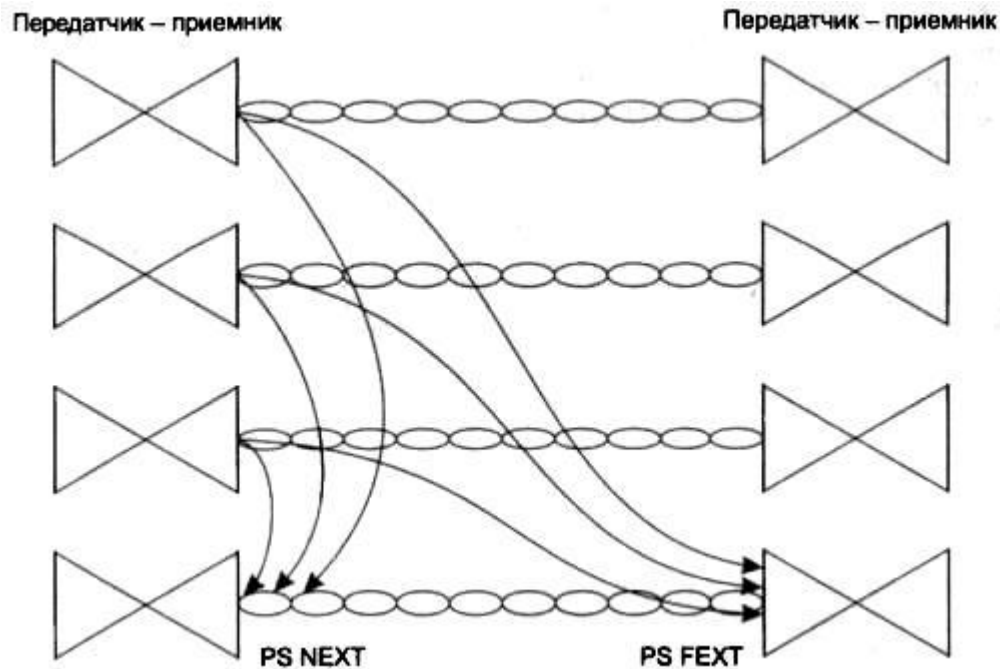
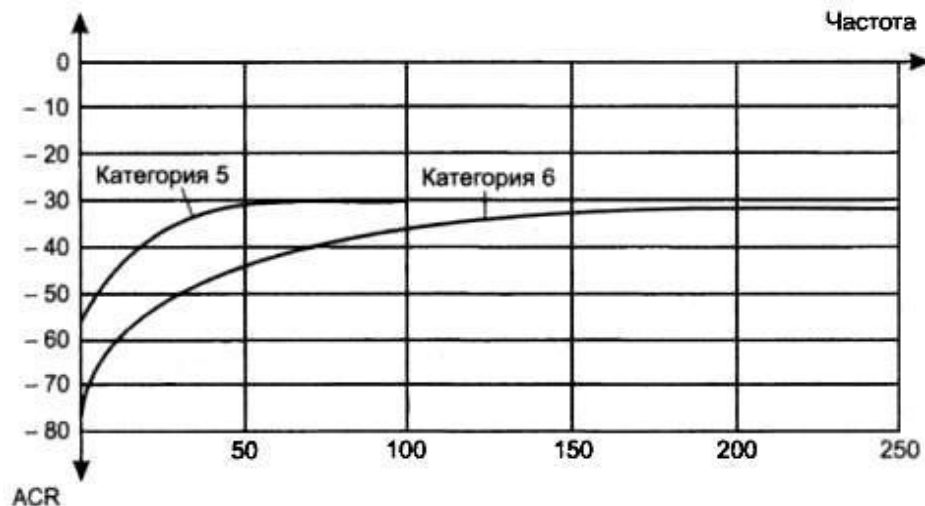


Рис. 2. Суммарное переходное затухание

Характеристики линий связи Помехоустойчивость и достоверность

Еще одним практически важным показателем является защищенность кабеля (Attenuation/Crosstalk Ratio, ACR). Защищенность определяется как разность между уровнями полезного сигнала и помех. Чем больше значение защищенности кабеля, тем в соответствии с формулой Шеннона данные можно передавать по этому кабелю с потенциально более высокой скоростью. На рис. 3 показана типичная характеристика зависимости защищенности кабеля на неэкранированной витой паре от частоты сигнала.



Достоверность передачи данных характеризует вероятность искажения каждого передаваемого бита данных. Иногда этот же показатель называют интенсивностью битовых ошибок (Bit Error Rate, BER). Величина BER для линий связи без дополнительных средств защиты от ошибок (например, самокорректирующихся кодов или протоколов с повторной передачей искаженных кадров) составляет, как правило, от 10^4 до 10^6 , в оптоволоконных линиях связи — 10^9 . Например, значение достоверности передачи данных в 10^4 говорит о том, что в среднем из 10 000 бит искажается значение одного бита.

Характеристики линий связи

Полоса пропускания и пропускная способность

Полоса пропускания — это непрерывный диапазон частот, для которого затухание не превышает некоторый заранее заданный предел. То есть полоса пропускания определяет диапазон частот синусоидального сигнала, при которых этот сигнал передается по линии связи без значительных искажений.

Часто граничными частотами считаются частоты, на которых мощность выходного сигнала уменьшается в два раза по отношению к входному, что соответствует затуханию в - 3 дБ.

Как мы увидим далее, ширина полосы пропускания в наибольшей степени влияет на максимально возможную скорость передачи информации по линии связи. Полоса пропускания зависит от типа линии и ее протяженности. На рис. 1 показаны полосы пропускания линий связи различных типов, а также наиболее часто используемые в технике связи частотные диапазоны.

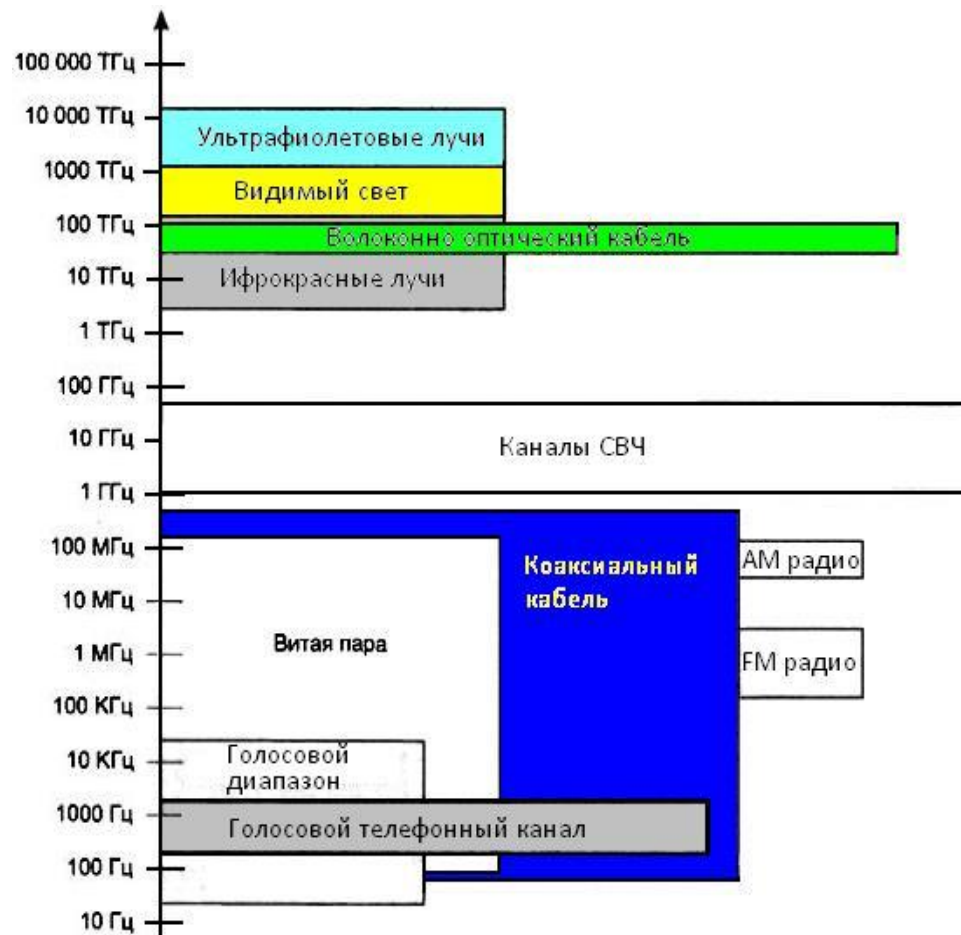
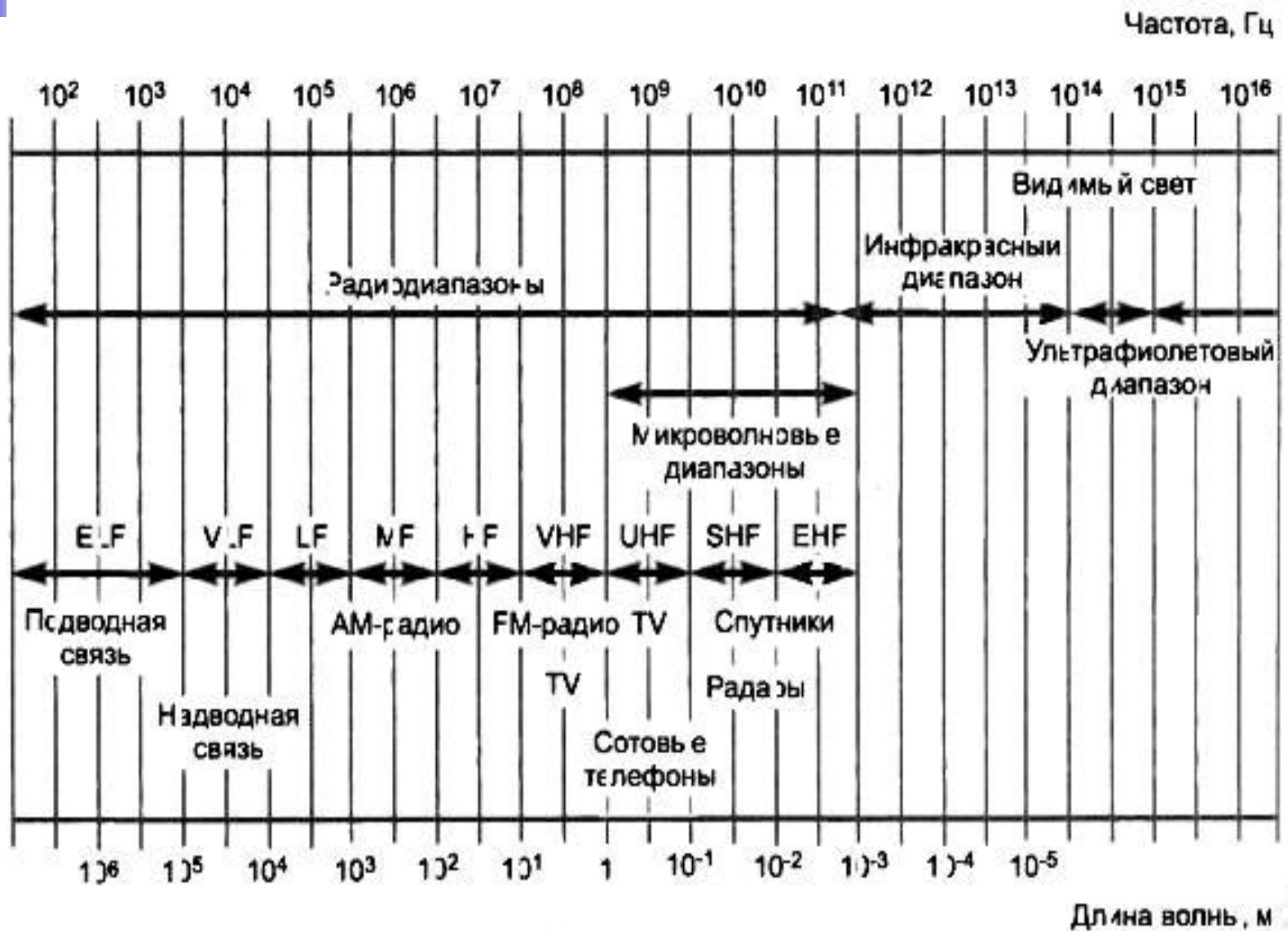
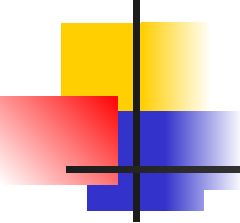


Рис. 1. Полосы пропускания линий связи и популярные частотные диапазоны



Пропускная способность линии характеризует максимально возможную скорость передачи данных, которая может быть достигнута на этой линии. Особенностью пропускной способности является то, что, с одной стороны, эта характеристика зависит от параметров физической среды, а с другой — определяется способом передачи данных. Следовательно, нельзя говорить о пропускной способности линии связи до того, как для нее определен протокол физического уровня.

Например, поскольку для цифровых линий всегда определен протокол физического уровня, задающий битовую скорость передачи данных, то для них всегда известна и пропускная способность — 64 Кбит/с, 2 Мбит/с и т. п.

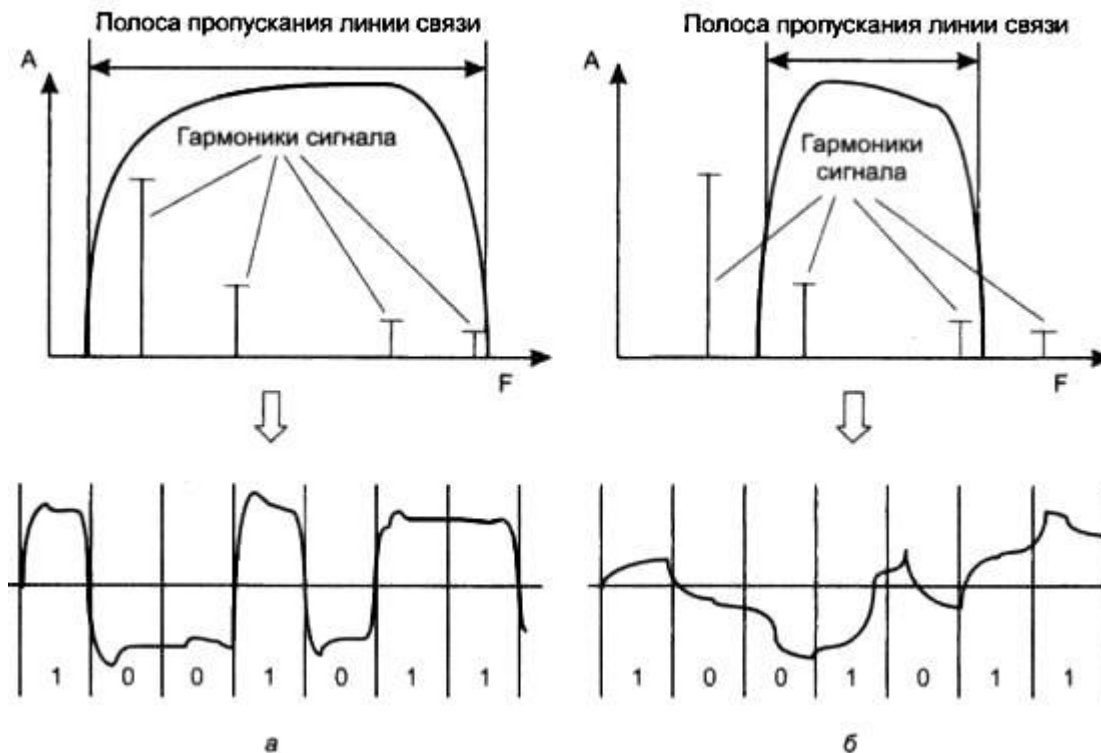
В тех же случаях, когда только предстоит выбрать, какой из множества существующих протоколов использовать на данной линии, очень важными являются остальные характеристики линии, такие как полоса пропускания, перекрестные наводки, помехоустойчивость и др.

Пропускная способность, как и скорость передачи данных, измеряется в битах в секунду (бит/с), а также в производных единицах, таких как килобиты в секунду (Кбит/с) и т. д.

Характеристики линий связи

Полоса пропускания и пропускная способность

Пропускная способность линии связи зависит не только от ее характеристик, таких как затухание и полоса пропускания, но и от спектра передаваемых сигналов. Если значимые гармоники сигнала (то есть те гармоники, амплитуды которых вносят основной вклад в результирующий сигнал) попадают в полосу пропускания линии, то такой сигнал будет хорошо передаваться данной линией связи, и приемник сможет правильно распознать информацию, отправленную по линии передатчиком (рис. 2 а). Если же значимые гармоники выходят за границы полосы пропускания линии связи, то сигнал начнет значительно искажаться, и приемник будет ошибаться при распознавании информации (рис. 2 б).



Характеристики линий связи

Биты и боды

Выбор способа представления дискретной информации в виде сигналов, подаваемых на линию связи, называется физическим, или **линейным, кодированием**. От выбранного способа кодирования зависит спектр сигналов и, соответственно, пропускная способность линии.

Таким образом, для одного способа кодирования линия может обладать одной пропускной способностью, а для другого — другой. Например, витая пара категории 3 может передавать данные с пропускной способностью 10 Мбит/с при способе кодирования стандарта физического уровня 10Base-T и 33 Мбит/с при способе кодирования стандарта 100Base-T4.

В большинстве способов кодирования используется изменение какого-либо параметра периодического сигнала — частоты, амплитуды и фазы синусоиды или же знака потенциала последовательности импульсов. Периодический сигнал, параметры которого подвергаются изменениям, называют несущим сигналом, а его частоту, если сигнал синусоидальный, — несущей частотой. Процесс изменения параметров несущего сигнала в соответствии с передаваемой информацией называется *модуляцией*.

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 различимых состояний, то любое его изменение будет нести *несколько битов* информации.

Характеристики линий связи

Биты и боды

Передача дискретной информации в телекоммуникационных сетях осуществляется тактировано, то есть изменение сигнала происходит через фиксированный интервал времени, называемый тактом. Приемник информации считает, что в начале каждого такта на его вход поступает новая информация. При этом независимо от того, повторяет ли сигнал состояние предыдущего такта или же он имеет состояние, отличное от предыдущего, приемник получает новую информацию от передатчика. Например, если такт равен 0,3 с, а сигнал имеет два состояния и 1 кодируется потенциалом 5 вольт, то присутствие на входе приемника сигнала величиной 5 вольт в течение 3 секунд означает получение информации, представленной двоичным числом 111111111.

Количество изменений информационного параметра несущего периодического сигнала в секунду измеряется в бодах. 1 бод равен одному изменению информационного параметра в секунду. Например, если такт передачи информации равен 0,1 секунды, то сигнал изменяется со скоростью 10 бод. Таким образом, скорость в бодах целиком определяется величиной такта.

Информационная скорость измеряется в битах в секунду и в общем случае не совпадает со скоростью в бодах. Она может быть как выше, так и ниже скорости изменения информационного параметра, измеряемого в бодах. Это соотношение зависит от числа состояний сигнала. Например, если сигнал имеет более двух различных состояний, то при равных тактах и соответствующем методе кодирования информационная скорость в битах в секунду может быть выше, чем скорость изменения информационного сигнала в бодах.

Характеристики линий связи

Биты и боды

Пусть информационными параметрами являются фаза и амплитуда синусоиды, причем различаются 4 состояния фазы в $0, 90, 180$ и 270° и два значения амплитуды сигнала — тогда информационный сигнал может иметь 8 различных состояний. Это означает, что любое состояние этого сигнала несет информацию в 3 бит. В этом случае модем, работающий со скоростью 2400 бод (меняющий информационный сигнал 2400 раз в секунду), передает информацию со скоростью 7200 бит/с, так как при одном изменении сигнала передается 3 бита информации.

Если сигнал имеет два состояния (то есть несет информацию в 1 бит), то информационная скорость обычно совпадает с количеством бодов. Однако может наблюдаться и обратная картина, когда информационная скорость оказывается ниже скорости изменения информационного сигнала в бодах. Это происходит в тех случаях, когда для надежного распознавания приемником пользовательской информации каждый бит в последовательности кодируется несколькими изменениями информационного параметра несущего сигнала.

Например, при кодировании единичного значения бита импульсом положительной полярности, а нулевого значения бита импульсом отрицательной полярности физический сигнал дважды изменяет свое состояние при передаче каждого бита. При таком кодировании скорость линии в битах в секунду *в два раза ниже*, чем в бодах.

Чем выше **частота несущего периодического сигнала**, тем выше может быть частота модуляции и тем выше может быть пропускная способность линии связи.

Но с увеличением частоты увеличивается и ширина спектра этого сигнала. Линия передает этот спектр синусоид с теми искажениями, которые определяются ее полосой пропускания. Чем больше несоответствие между полосой пропускания линии и шириной спектра передаваемых информационных сигналов, тем больше сигналы искажаются и тем вероятнее ошибки в распознавании информации принимающей стороной, а значит, возможная скорость передачи информации оказывается меньше.

Характеристики линий связи

Соотношение полосы пропускания и пропускной способности

Связь между полосой пропускания линии и ее пропускной способностью вне зависимости от принятого способа физического кодирования установил Клод Шеннон:

$$C = F \log_2 (1 + P_c / P_{\text{ш}})$$

Здесь C — пропускная способность линии в битах в секунду, F — ширина полосы пропускания линии в герцах, P_c — мощность сигнала, $P_{\text{ш}}$ — мощность шума.

Из этого соотношения следует, что теоретического предела пропускной способности линии с фиксированной полосой пропускания не существует. Однако на практике такой предел имеется. Действительно, повысить пропускную способность линии можно за счет увеличения мощности передатчика или же уменьшения мощности шума (помех) в линии связи.

Обе эти составляющие поддаются изменению с большим трудом. Повышение мощности передатчика ведет к значительному увеличению его габаритов и стоимости. Снижение уровня шума требует применения специальных кабелей с хорошими защитными экранами, что весьма дорого, а также снижения шума в передатчике и промежуточной аппаратуре, чего достичь весьма не просто. К тому же влияние мощностей полезного сигнала и шума на пропускную способность ограничено логарифмической зависимостью, которая растет далеко не так быстро, как прямо-пропорциональная. Так, при достаточно типичном исходном отношении мощности сигнала к мощности шума в 100 раз повышение мощности передатчика в 2 раза даст только 15 % увеличения пропускной способности линии.

Характеристики линий связи

Соотношение полосы пропускания и пропускной способности

Близким по сути к формуле Шеннона является другое соотношение, полученное Найквистом, которое также определяет максимально возможную пропускную способность линии связи, но без учета шума в линии:

$$C = 2F \log_2 M$$

Здесь M — количество различных состояний информационного параметра.

Если сигнал имеет два различных состояния, то пропускная способность равна удвоенному значению ширины полосы пропускания линии связи (рис. 1 а). Если же в передатчике используется более двух устойчивых состояний сигнала для кодирования данных, то пропускная способность линии повышается, так как за один такт работы передатчик передает несколько битов исходных данных, например 2 бита при наличии четырех различных состояний сигнала (рис. 1 б).

Хотя в формуле Найквиста наличие шума в явном виде не учитывается, косвенно его влияние отражается в выборе количества состояний информационного сигнала. Для повышения пропускной способности линии связи следовало бы увеличивать количество состояний, но на практике этому препятствует шум на линии. Например, пропускную способность линии, сигнал которой показан на рис. 1 б, можно увеличить еще в два раза, применив для кодирования данных не 4, а 16 уровней.

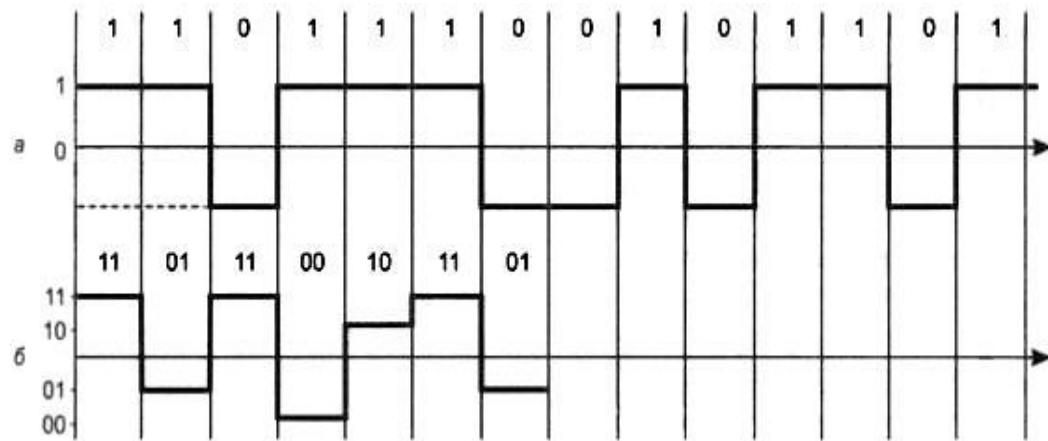


Рис. 1. Повышение скорости передачи за счет дополнительных состояний сигналов



Характеристики линий связи

Соотношение полосы пропускания и пропускной способности

Однако если амплитуда шума время от времени превышает разницу между соседними уровнями, то приемник не сможет устойчиво распознавать передаваемые данные. Поэтому количество возможных состояний сигнала фактически ограничивается соотношением мощности сигнала и шума, а формула Найквиста определяет предельную скорость передачи данных в том случае, когда количество состояний уже выбрано с учетом возможностей устойчивого распознавания приемником.

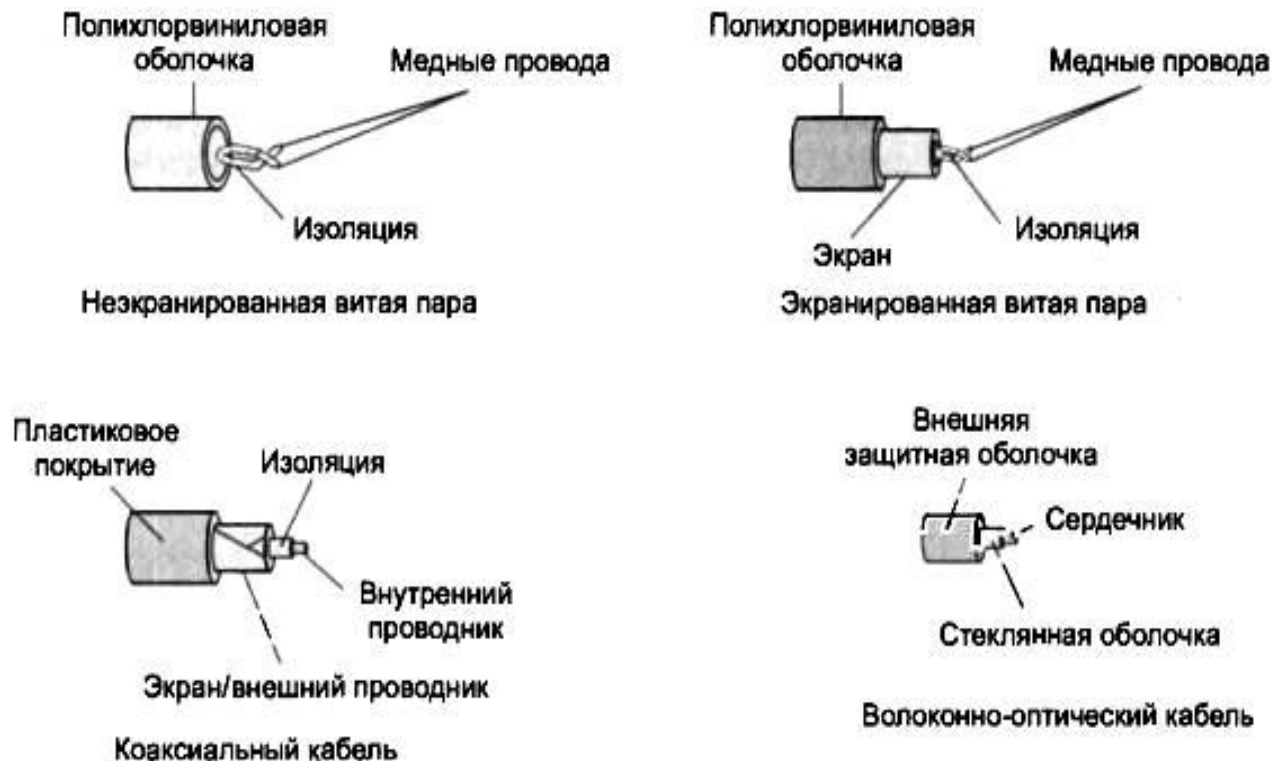
Типы кабелей

Экранированная и неэкранированная витая пара

Витой парой называется скрученная пара проводов. Этот вид среды передачи данных очень популярен и составляет основу большого количества как внутренних, так и внешних кабелей. Кабель может состоять из нескольких скрученных пар (внешние кабели иногда содержат до нескольких десятков таких пар).

Скручивание проводов снижает влияние внешних и взаимных помех на полезные сигналы, передаваемые по кабелю.

Основные особенности конструкции кабелей схематично показаны на рис. 1.



Кабели на основе витой пары являются симметричными, то есть они состоят из двух одинаковых в конструктивном отношении проводников. Симметричный кабель на основе витой пары может быть как экранированным, так и неэкранированным.

Нужно отличать электрическую изоляцию проводящих жил, которая имеется в любом кабеле, от электромагнитной изоляции. Первая состоит из непроводящего диэлектрического слоя — бумаги или полимера, например поливинилхлорида или полистирола. Во втором случае помимо электрической изоляции проводящие жилы помещаются также внутрь электромагнитного экрана, в качестве которого чаще всего применяется проводящая медная оплетка.

Кабель на основе **неэкранированной витой пары**, используемый для проводки внутри здания, разделяется в международных стандартах на *категории* (от 1 до 7).

- ❑ Кабели категории 1 применяются там, где требования к скорости передачи минимальны. Обычно это кабель для цифровой и аналоговой передачи голоса и низкоскоростной (до 20 Кбит/с) передачи данных. До 1983 года это был основной тип кабеля для телефонной разводки.
- ❑ Кабели категории 2 были впервые применены фирмой IBM при построении собственной кабельной системы. Главное требование к кабелям этой категории — способность передавать сигналы со спектром до 1 МГц (*ТПП с полосой 1,1 МГц для ADSL модемов*).
- ❑ Кабели категории 3 были стандартизованы в 1991 году. Стандарт EIA-568 определил электрические характеристики кабелей для частот в диапазоне до 16 МГц. Кабели категории 3, предназначенные как для передачи данных, так и для передачи голоса, составляют сейчас основу многих кабельных систем зданий.

- ❑ Кабели категории 4 представляют собой несколько улучшенный вариант кабелей категории 3. Кабели категории 4 обязаны выдерживать тесты на частоте передачи сигнала 20 МГц и обеспечивать повышенную помехоустойчивость и низкие потери сигнала. На практике используются редко.
- ❑ Кабели категории 5 были специально разработаны для поддержки высокоскоростных протоколов. Их характеристики определяются в диапазоне до 100 МГц. Большинство высокоскоростных технологий (FDDI, Fast Ethernet, ATM и Gigabit Ethernet) ориентировано на использование витой пары категории 5. Кабель категории 5 пришел на замену кабелю категории 3, и сегодня все новые кабельные системы крупных зданий строятся именно на этом типе кабеля (в сочетании с волоконно-оптическим).
- ❑ Особое место занимают кабели категорий 6 и 7, которые промышленность начала выпускать сравнительно недавно. Для кабеля категории 6 характеристики определяются до частоты 250 МГц, а для кабелей категории 7 — до 600 МГц. Кабели категории 7 обязательно экранируются, причем как каждая пара, так и весь кабель в целом. Кабель категории 6 может быть как экранированным, так и неэкранированным. Основное назначение этих кабелей — поддержка высокоскоростных протоколов на отрезках кабеля большей длины, чем кабель UTP категории 5.

Все кабели UTP независимо от их категории выпускаются в 4-парном исполнении. Каждая из четырех пар кабеля имеет определенный цвет и шаг скрутки. Обычно две пары предназначены для передачи данных, две — для передачи голоса.

Экранированная витая пара хорошо защищает передаваемые сигналы от внешних помех, а также меньше излучает электромагнитные колебания вовне, что, в свою очередь, защищает пользователей сетей от вредного для здоровья излучения. Наличие заземляемого экрана удорожает кабель и усложняет его прокладку.

Основным стандартом, определяющим параметры экранированной витой пары для применения внутри зданий, является фирменный стандарт IBM. В этом стандарте кабели делятся не на категории, а на *типы* от 1 до 9 включительно.

Рассмотрим для примера кабель типа 1 стандарта IBM. Он состоит из 2-х пар скрученных проводов, экранированных проводящей оплеткой, которая заземляется. Электрические параметры кабеля типа 1 примерно соответствуют параметрам кабеля UTP категории 5. Однако волновое сопротивление кабеля типа 1, равное 150 Ом, значительно выше волнового сопротивления UTP категории 5 (100 Ом), поэтому невозможно «улучшение» кабельной проводки сети путем простой замены неэкранированной пары экранированной парой типа 1. Передатчики, рассчитанные на работу с кабелем, имеющим волновое сопротивление 100 Ом, будут плохо работать на волновое сопротивление 150 Ом.

Типы кабелей

Коаксиальный кабель

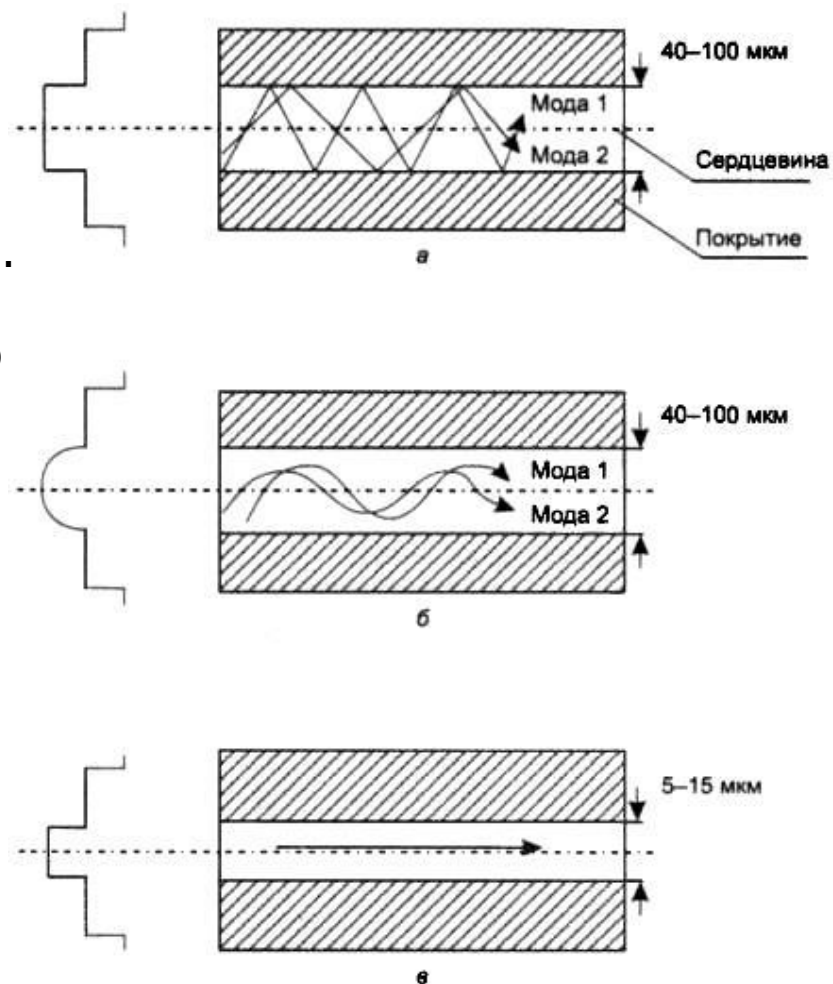
Коаксиальный кабель состоит из несимметричных пар проводников. Каждая пара представляет собой внутреннюю медную жилу и соосную с ней внешнюю жилу, которая может быть полый медной трубой или оплеткой, отделенной от внутренней жилы диэлектрической изоляцией. Внешняя жила играет двойную роль — по ней передаются информационные сигналы и она является экраном, защищающим внутреннюю жилу от внешних электромагнитных полей. Существует несколько типов коаксиального кабеля, отличающихся характеристиками и областями применения: для локальных компьютерных сетей, для глобальных телекоммуникационных сетей, для кабельного телевидения и т. п.

- ❑ «Толстый» коаксиальный кабель разработан для сетей Ethernet 10Base-5 с волновым сопротивлением 50 Ом и внешним диаметром около 12 мм. Этот кабель имеет достаточно толстый внутренний проводник диаметром 2,17 мм, который обеспечивает хорошие механические и электрические характеристики (затухание на частоте 10 МГц — не хуже 18 дБ/км). Зато этот кабель сложно монтировать — он плохо гнется.
- ❑ «Тонкий» коаксиальный кабель предназначен для сетей Ethernet 10Base-2. Обладая внешним диаметром около 5 мм и тонким внутренним проводником 0,89 мм, этот кабель не так прочен, как «толстый» коаксиал, зато обладает гораздо большей гибкостью, что удобно при монтаже. «Тонкий» коаксиальный кабель также имеет волновое сопротивление 50 Ом, но его механические и электрические характеристики хуже, чем у «толстого» коаксиального кабеля. Затухание в этом типе кабеля выше, чем в «толстом» коаксиальном кабеле, что приводит к необходимости уменьшать длину кабеля для получения одинакового затухания в сегменте.
- ❑ Телевизионный кабель с волновым сопротивлением 75 Ом широко применяется в кабельном телевидении. Существуют стандарты локальных сетей, позволяющие использовать такой кабель для передачи данных.

Волоконно-оптический кабель состоит из тонких (5-60 микрон) гибких стеклянных волокон (волоконных световодов), по которым распространяются световые сигналы. Это наиболее качественный тип кабеля — он обеспечивает передачу данных с очень высокой скоростью (до 10 Гбит/с и выше) и к тому же лучше других типов передающей среды обеспечивает защиту данных от внешних помех (в силу особенностей распространения света такие сигналы легко экранировать).

Каждый световод состоит из центрального проводника света (сердцевины) — стеклянного волокна, и стеклянной оболочки, обладающей меньшим показателем преломления, чем сердцевина. Распространяясь по сердцевине, лучи света не выходят за ее пределы, отражаясь от покрывающего слоя оболочки. В зависимости от распределения показателя преломления и величины диаметра сердечника различают:

- многомодовое волокно со ступенчатым изменением показателя преломления (рис. 1, а);
- многомодовое волокно с плавным изменением показателя преломления (рис. 1, б)
- одномодовое волокно (рис. 1, в).



Понятие «мода» описывает режим распространения световых лучей в сердцевине кабеля. В одномодовом кабеле (Single Mode Fiber, SMF) используется центральный проводник очень малого диаметра, соизмеримого с длиной волны света — от 5 до 10 мкм. При этом практически все лучи света распространяются вдоль оптической оси световода, не отражаясь от внешнего проводника. Изготовление сверхтонких качественных волокон для одномодового кабеля представляет собой сложный технологический процесс, что делает одномодовый кабель достаточно дорогим. Кроме того, в волокно такого маленького диаметра достаточно сложно направить пучок света, не потеряв при этом значительную часть его энергии.

В многомодовых кабелях (Multi Mode Fiber, MMF) используются более широкие внутренние сердечники, которые легче изготовить технологически. В многомодовых кабелях во внутреннем проводнике одновременно существует несколько световых лучей, отражающихся от внешнего проводника под разными углами. Угол отражения луча называется модой луча. В многомодовых кабелях с плавным изменением коэффициента преломления режим отражения лучей имеет сложный характер. Возникающая при этом интерференция ухудшает качество передаваемого сигнала, что приводит к искажениям передаваемых импульсов в многомодовом оптическом волокне. По этой причине технические характеристики многомодовых кабелей хуже, чем одномодовых.

Учитывая это, многомодовые кабели применяют в основном для передачи данных на скоростях не более 1 Гбит/с на небольшие расстояния (до 300-2000 м), а одномодовые — для передач и данных со сверхвысокими скоростями в несколько десятков гигабитов в секунду (а при использовании технологии DWDM — до нескольких терабитов в секунду) на расстояния до нескольких десятков и даже сотен километров (дальняя связь).

В качестве источников света в волоконно-оптических кабелях применяются:

- светодиоды, или светоизлучающие диоды (Light Emitted Diode, LED);
- полупроводниковые лазеры, или лазерные диоды.

Для одномодовых кабелей применяются только лазерные диоды, так как при таком малом диаметре оптического волокна световой поток, создаваемый светодиодом, невозможно без больших потерь направить в волокно — он имеет чересчур широкую диаграмму направленности излучения, в то время как лазерный диод — узкую. Более дешевые светодиодные излучатели используются только для многомодовых кабелей.

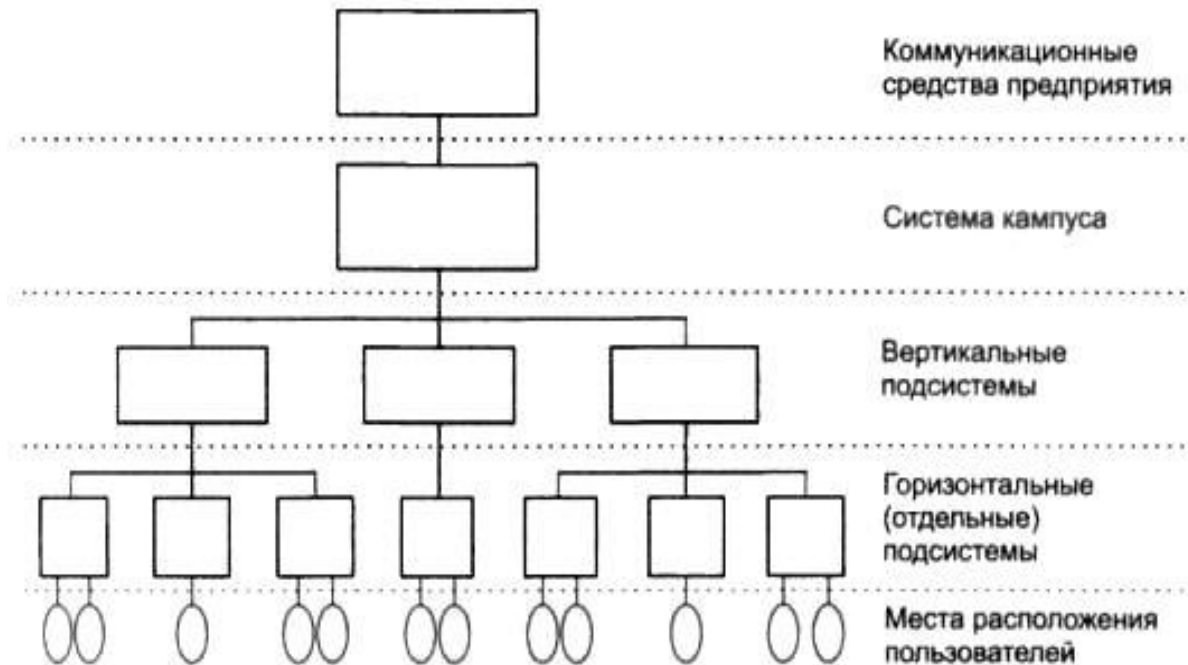
Стоимость волоконно-оптических кабелей ненамного превышает стоимость кабелей на витой паре, но проведение монтажных работ с оптоволокном обходится намного дороже из-за трудоемкости операций и высокой стоимости применяемого монтажного оборудования.

Структурированная кабельная система (Structured Cabling System, SCS) здания — это набор коммутационных элементов (кабелей, разъемов, коннекторов, кроссовых панелей и шкафов), а также методика их совместного использования, которая позволяет создавать регулярные, легко расширяемые структуры связей в вычислительных сетях. Здание само по себе представляет собой достаточно регулярную структуру — оно состоит из этажей, а каждый этаж, в свою очередь, состоит из определенного количества комнат, соединенных коридорами. Структура здания предопределяет структуру его кабельной системы.

Структурированная кабельная система здания представляет собой своего рода «конструктор», с помощью которого проектировщик сети строит нужную ему конфигурацию из стандартных кабелей, соединенных стандартными разъемами и коммутируемых на стандартных кроссовых панелях. При необходимости конфигурацию связей можно легко изменить — добавить компьютер, сегмент, коммутатор, изъять ненужное оборудование, поменять соединение между компьютером и концентратором.

Наиболее детально на сегодня разработаны стандарты кабельных систем зданий, при этом иерархический подход к процессу создания такой кабельной системы позволяет назвать ее структурированной. На основе SCS здания работает одна или несколько локальных сетей организаций или подразделений одной организации, размещенной в этом здании.

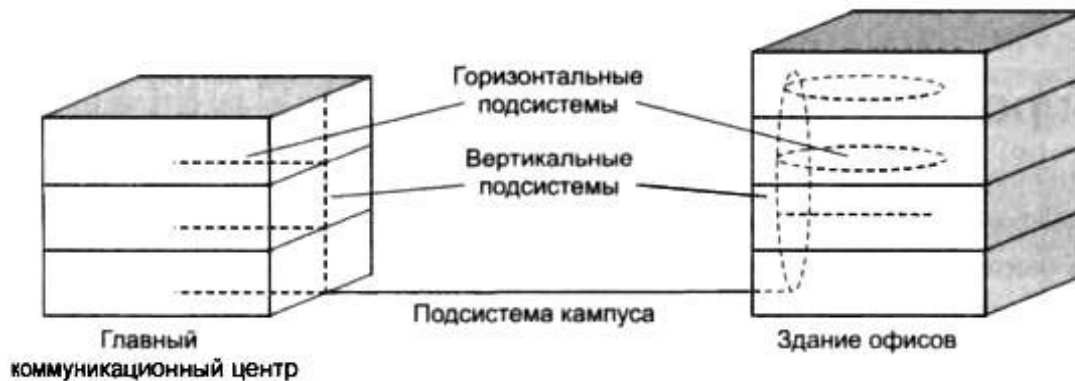
SCS планируется и строится иерархически с главной магистралью и многочисленными ответвлениями от нее.



Типы кабелей

Структурированная кабельная система зданий

Типичная иерархия SCS включает:



- ❑ горизонтальные подсистемы, соответствующие этажам здания — они соединяют кроссовые шкафы этажа с розетками пользователей;
- ❑ вертикальные подсистемы, соединяющие кроссовые шкафы каждого этажа с центральной аппаратной здания;
- ❑ подсистема кампуса, объединяющая несколько зданий с главной аппаратной всего кампуса (эта часть кабельной системы обычно называется магистралью).

Использование структурированной кабельной системы вместо хаотически проложенных кабелей дает предприятию много преимуществ. Система SCS при продуманной организации может стать универсальной средой для передачи компьютерных данных в локальной вычислительной сети, организации локальной телефонной сети, передачи видеoinформации и даже для передачи сигналов от датчиков пожарной безопасности и т.п.

Подобная универсализация позволяет автоматизировать многие процессы контроля, мониторинга и управления хозяйственными службами и системами жизнеобеспечения предприятия и обеспечивает *экономичное добавление* новых пользователей и изменение их мест размещения.