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**)[1].

В **цифровых линиях** связи передаваемые сигналы имеют конечное число состояний, то есть являются дискретными. 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 цифровая аппаратура мультиплексирования и коммутации первичных сетей работает по принципу **временного мультиплексирования каналов** (Time Division Multiplexing, **TDM**).

Характеристики линий связи

Спектральное представление сигнала

Качество передачи данных по линиям связи определяется как характеристиками передаваемых сигналов (мощность, способ кодирования и др.), так и характеристиками линий связи, к которым относятся: затухание; ограниченность полосы пропускания; помехозащищенность и др. При изучении характеристик линий связи важную роль играет спектральное представление сигналов.

Как известно, процессы могут описываться аналоговыми и дискретными, периодическими и непериодическими функциями (рис. 6.3).

Частным, но фундаментальным случаем аналоговой периодической функции является синусоида.

Синусоида — волнообразная плоская кривая, которая является графиком периодической тригонометрической функции $y = \sin x$, где y равен отношению противолежащего катета к гипотенузе угла x. Период функции равен 2π, поскольку значение функции $y = \sin x$ при любом x совпадает с ее значением при $x+2\pi$. Фундаментальное значение этой функции состоит в том, что многие природные процессы описываются этой функцией, например, изменение высоты маятника в зависимости от времени, высота волны в жидкости, уровень напряжения в электрической сети.

---

[1] Частотное и временное мультиплексирование рассматриваются в главах 7, 8 и 9.

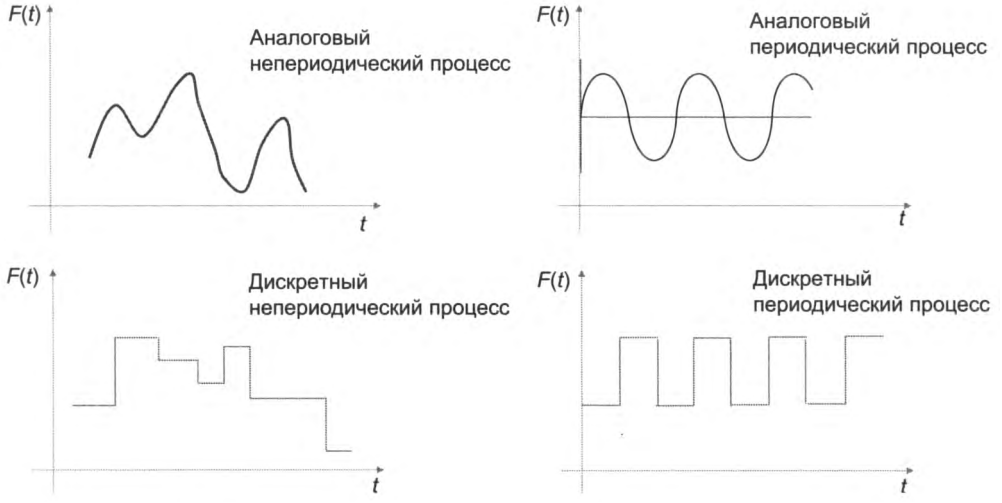

Рис. 6.3. Аналоговые и дискретные, периодические и непериодические функции

В общем случае синусоида как *функция от времени* $y(t) = A \sin(2\pi f t + \varphi)$ имеет следующие параметры (рис. 6.4):

Амплитуда (A) — максимальное значение функции; например, для модулированного сигнала, передаваемого по линии связи, амплитуда равна максимальному уровню напряжения этого сигнала.

Период (T) — время, в течение которого функция выполняет один цикл, $y(t) = y(t + T)$.

Частота (f) — величина, обратная периоду $f = 1/T$. Она также называется *циклической* частотой. Частота определяет, сколько полных колебаний синусоиды происходит за единицу времени, измеряется в 1/с или в герцах. Коэффициент $2\pi f$ при аргументе t носит специальное название **круговой** или **радианной частоты,** обозначается ω, его можно также выразить через T: $\omega = 2\pi/T$.

Фаза — относительное значение аргумента t в пределах одного периода. Фаза колебания показывает, какая часть периода t/T прошла с момента прохождения синусоидой начальной точки, за которую часто принимают последнее прохождение синусоиды через нуль, при движении из отрицательной в положительную область. Фазу также удобно использовать для описания относительного расположения двух синусоид. Разность фаз двух синусоид называется *сдвигом фаз.* **Начальное значение фазы** φ показывает сдвиг синусоиды относительно начала точки отсчета времени, влево — при положительном значении фазы и вправо — при отрицательном.

Выше мы рассматривали синусоиду как функцию времени $y(t)$ в некоторой фиксированной точке пространства. Однако можно использовать другое представление синусоидальной функции $y(x)$, когда ее значения изменяются в зависимости от расстояния x от некоторой точки. В реальной жизни мы часто сталкиваемся именно с такой природой колебательных процессов, когда колебания способны перемещаться, удаляясь от места возникновения. Синусоида как функция времени составляет единое целое с синусоидой функции расстояния, то есть является функцией двух переменных $y(t, x)$, что отражает взаимосвязь временной и пространственной периодичности.

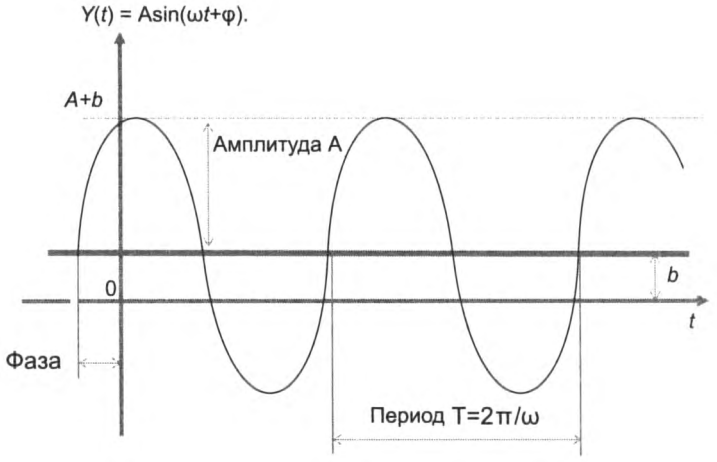

Рис. 6.4. Синусоида

У синусоиды $y(x)$ имеется параметр — длина волны, который является аналогом периода синусоиды $y(t)$. **Длина волны** (λ) определяется как расстояние, на которое перемещается волна за время, равное периоду T, и, таким образом, скорость распространения волны υ в данной среде равна $\upsilon = \lambda/T$. В вакууме все электромагнитные волны распространяются со скоростью, равной 300 000 км/с, независимо от их частоты. Эта скорость c (си) называется **скоростью света**. Таким образом, для вакуума справедливо фундаментальное соотношение $c = \lambda/T$ или $c = \lambda f$.

Синусоидальные функции обладают многими свойствами, делающими их эффективным инструментом изучения сигналов и линий связи. Одной из таких особенностей, например, является связанный с ними развитый математический аппарат. Поэтому такую важность приобретает факт, что процесс, описываемый *произвольной, не обязательно синусоидальной* функцией, может быть представлен в виде некоторого набора синусоидальных функций.

Из теории гармонического анализа Фурье известно, что любой периодический процесс можно представить в виде суммы бесконечного набора синусоидальных колебаний различных частот и различных амплитуд. Этот набор называют **спектральным разложением, разложением Фурье** или **спектром**, а синусоидальное колебание определенной частоты — **гармоникой**.

На рис. 6.5 показаны первые четыре гармоники спектрального разложения периодической аналоговой функции. Для восстановления исходного периодического сигнала по его спектру необходимо просуммировать *все* гармоники его разложения. Однако обычно во внимание принимается только несколько первых, так называемых **значимых гармоник**, потому что амплитуды последующих гармоник быстро убывают и вносят незначительный вклад в форму исходного сигнала. Самая первая частота спектра называется **основной гармоникой**.

Разность между максимальной и минимальной частотами значимого набора синусоид, которым представлен исходный сигнал, называется **шириной спектра сигнала**.

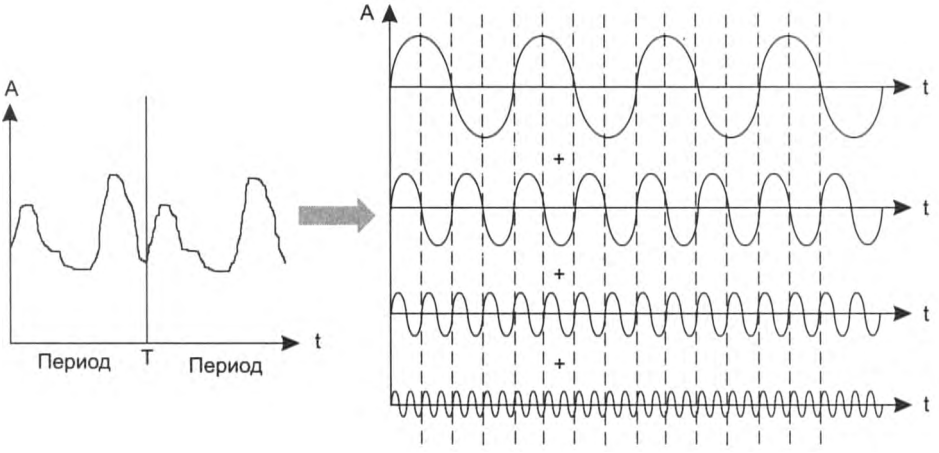

Рис. 6.5. Представление периодического аналогового сигнала суммой синусоид

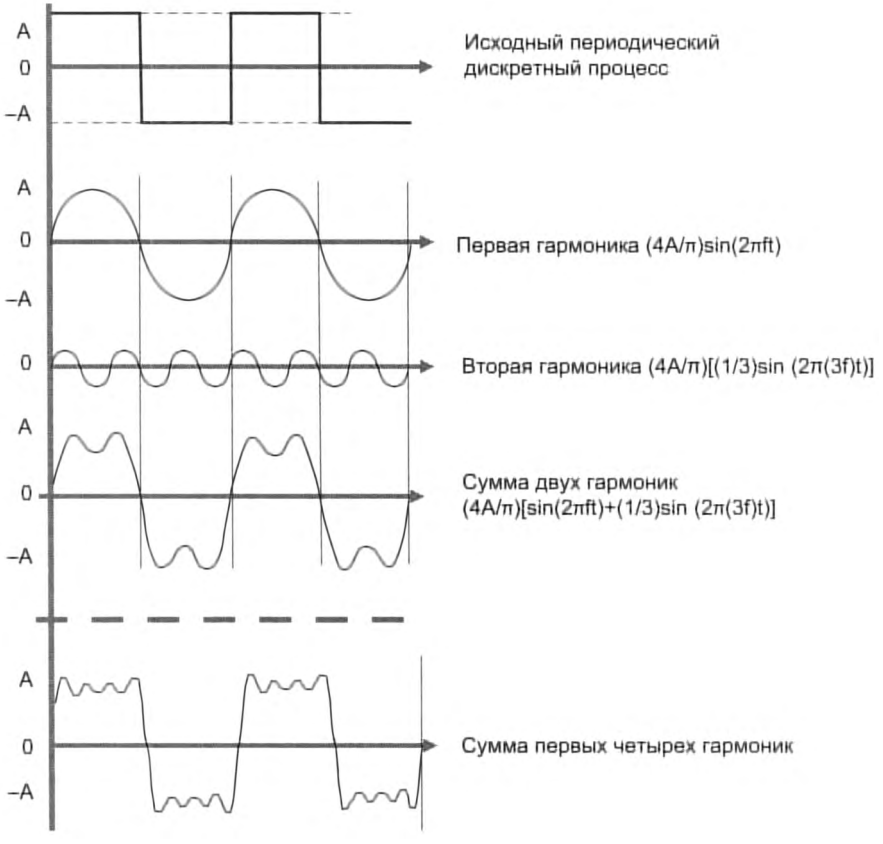

Рис. 6.6. Разложение и восстановление прямоугольных импульсов на основе спектрального представления

Импульсные сигналы, наряду с другими способами кодирования дискретных компьютерных данных, часто используются в каналах связи, поэтому их спектральное разложение представляет для нас особый интерес. На рис. 6.6 показан периодический дискретный сигнал — последовательность прямоугольных импульсов. Этот сигнал может быть представлен суммой бесконечного числа синусоид, причем каждая из последующих имеет меньшую амплитуду и период. На рисунке мы видим две первые гармоники. Если их просуммировать, то в результате можно увидеть последовательность искаженных, но вполне распознаваемых прямоугольных импульсов. Еще ближе к исходному сигналу результат суммирования первых четырех гармоник.

Отдельные гармоники можно представлять либо в виде *синусоидальных функций* от времени/расстояния, как это показано на рис. 6.6, либо в виде *точек* в координатах «частота — амплитуда», как на рис. 6.7 (здесь также изображен спектр последовательности прямоугольных импульсов).

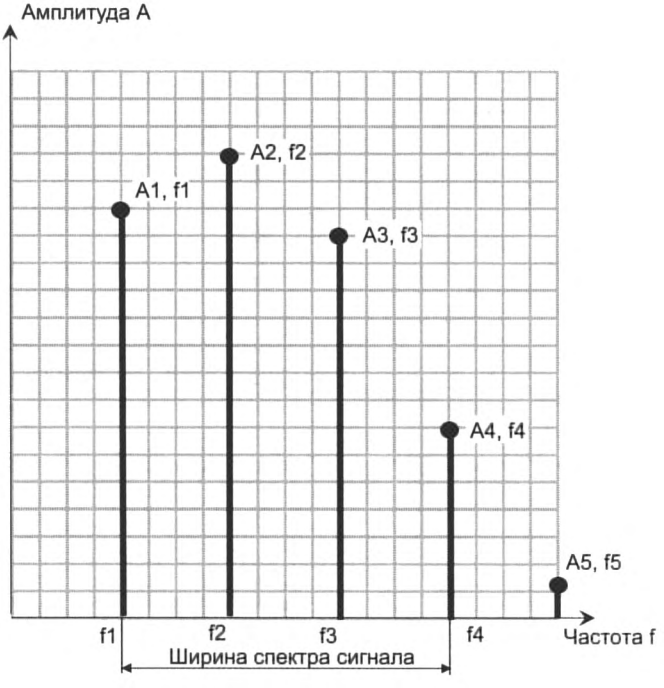

Рис. 6.7. Точечный спектр периодической последовательности прямоугольных импульсов

Непериодические процессы также можно представить в виде бесконечного ряда синусоидальных сигналов. 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 (рис. 6.8), распечатывают их на принтере или передают для обработки и хранения в компьютер в оцифрованном виде.

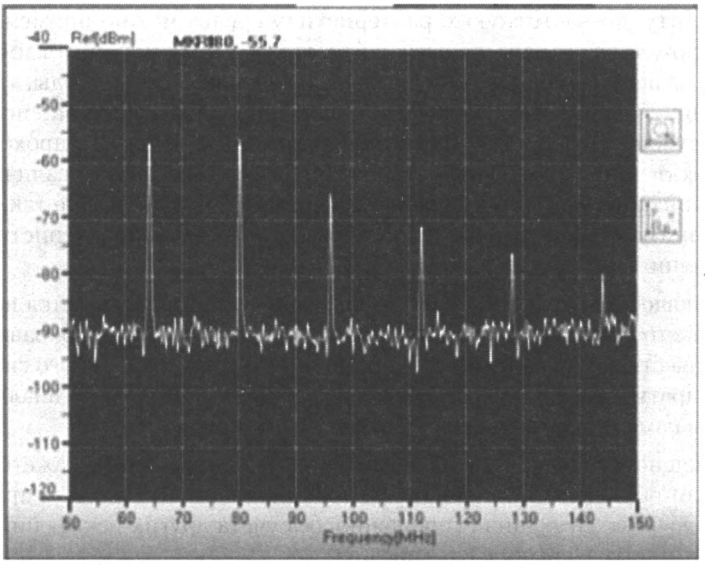

Рис. 6.8. Спектр сигнала, найденного спектральным анализатором

Затухание и опорная мощность

Разложение произвольного информационного сигнала на гармоники дает нам возможность теоретически *предсказать* его изменение (искажение) при прохождении среды передачи данных, а это очень важно при проектировании линий связи, в процессе которого нужно выбрать передающую среду (например, медный проводник, оптическое волокно или радиоволны), способ кодирования информации, мощность передатчика, чувствительность приемника.

Это предсказание основывается на следующем замечательном свойстве синусоидального сигнала — *при прохождении через однородную распределенную в пространстве среду он сохраняет свою синусоидальную форму и частоту, а изменяются только его амплитуда и фаза.*

Следовательно, если мы будем знать, как некоторая среда передает синусоиды различной частоты, то сможем предсказать, как эта среда передаст любой периодический сигнал. Таким образом, не придется тестировать некоторую среду каждый раз, когда мы решим применить сигнал некоторой новой формы — достаточно будет найти разложение Фурье для нового сигнала и, зная, как среда передает гармоники, просуммировать или проинтегрировать их, получив результирующий сигнал на выходе среды. Вывод: зависимость амплитуды передаваемых гармоник от частоты для определенной среды должна быть найдена только один раз, а затем ее можно применять для анализа передачи различных типов сигналов этой средой.

Для нахождения этой зависимости необходимо протестировать данную среду набором *эталонных синусоидальных сигналов* заданной амплитуды, но различной частоты, изменяя ее с некоторым шагом. Генерация синусоидального сигнала не представляет собой трудности, поскольку, как замечено, он присущ многим физическим процессам, например, переменному электрическому току или звуковым или световым волнам. Найденная зависимость изменения амплитуды сигнала после прохождения среды для ряда последовательных частот называется **амплитудно-частотной характеристикой среды**.

Построив амплитудно-частотную характеристику среды, можно применить ее к спектральному разложению сигнала, то есть найти, какую амплитуду будет иметь каждая из составляющих нашего периодического сигнала после прохождения среды, а затем сложить все составляющие (гармоники), получив результирующий выходной сигнал. Заметим, что в этом рассуждении не учтено изменение фазы сигнала при его прохождении через среду. Это, естественно, упрощение, которое допустимо, если фазы различных гармоник изменяются одинаково, что часто бывает на практике. Если же это не так, то изменение фаз нужно принимать во внимание и знать фазо-частотную характеристику среды для анализа искажений сигнала.

На практике в качестве характеристики линии связи чаще используется не зависимость амплитуды от частоты, а зависимость *мощности* сигнала от частоты. Обе зависимости дают одну и ту же качественную картину, так как мощность синусоидального сигнала пропорциональна квадрату его амплитуды, но существующие спектральные анализаторы более приспособлены измерять не амплитуду сигнала, а его мощность.

Уменьшение мощности сигнала на пути от источника к приемнику кажется интуитивно понятным. Если обратиться к интересующим нас типам сигналов — прямоугольным импульсам, то эффект затухания (упрощенно, без учета других искажений) выражается в уменьшении амплитуды импульсов (рис. 6.9).

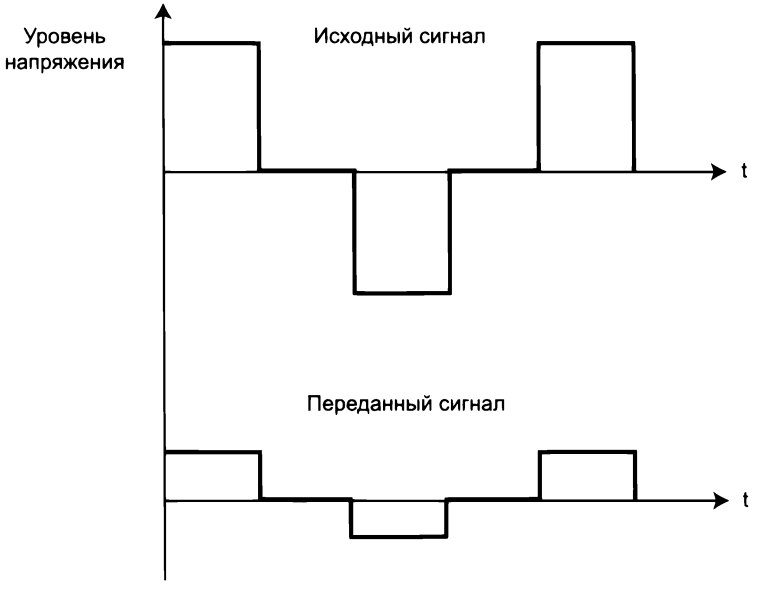

Рис. 6.9. Влияние затухания на форму прямоугольного импульса

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

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

Здесь P_{out} — мощность сигнала на выходе линии, P_{in} — мощность сигнала на входе линии, измеряемые в ваттах.

Знание затухания линии очень важно — оно позволяет оценить необходимую мощность передатчика и чувствительность приемника (то есть минимальную мощность сигнала, которую приемник устойчиво распознает).

Затухание зависит от длины линии связи, поэтому 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 — 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*.

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 приблизительно оценить искажения передаваемых по линии сигналов.

ВНИМАНИЕ

Как уже отмечалось, затухание всегда имеет отрицательное значение, однако знак минус часто опускают, из-за чего иногда возникает путаница. Совершенно корректно утверждение, что качество линии связи тем выше, чем больше (с учетом знака) затухание. Если же игнорировать знак, то есть иметь в виду абсолютное значение затухания, то у более качественной линии затухание меньше, и это наиболее распространенная форма интерпретации этого термина.

На рис. 6.10 показаны типовые зависимости затухания от частоты для кабелей длиной 100 м на неэкранированной витой паре категорий 5 и 6. Чем выше категория кабеля, тем он качественнее, что отражают графики затухания. Так, кабель категории 5 имеет на частоте 100 МГц затухание –23,6 дБ, а у более качественного кабеля категории 6 на этой же частоте затухание равно –20,6 дБ. Из графиков также видно, что с повышением частоты сигнала затухание увеличивается. Отсюда проистекают проблемы передачи дискретных данных с высокой скоростью: как мы увидим далее, при возрастании скорости передачи сигнала его частота увеличивается, что приводит к росту затухания.

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 для всех оптических волокон типична сложная зависимость затухания от длины волны, которая имеет три так называемых **окна прозрачности**. На рис. 6.11 показана характерная зависимость затухания для оптического волокна (в оптике принято игнорировать знак затухания, поэтому ось величины затухания идет вверх). Из рисунка видно, что область эффективного использования современных волокон ограничена волнами длин 850 нм, 1310 нм и 1550 нм, каждое окно шириной примерно 100 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.

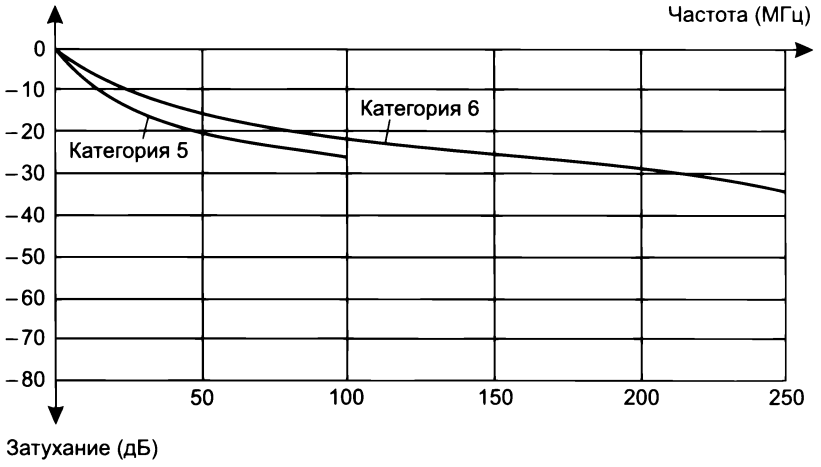

Рис. 6.10. Затухание неэкранированного кабеля на витой паре

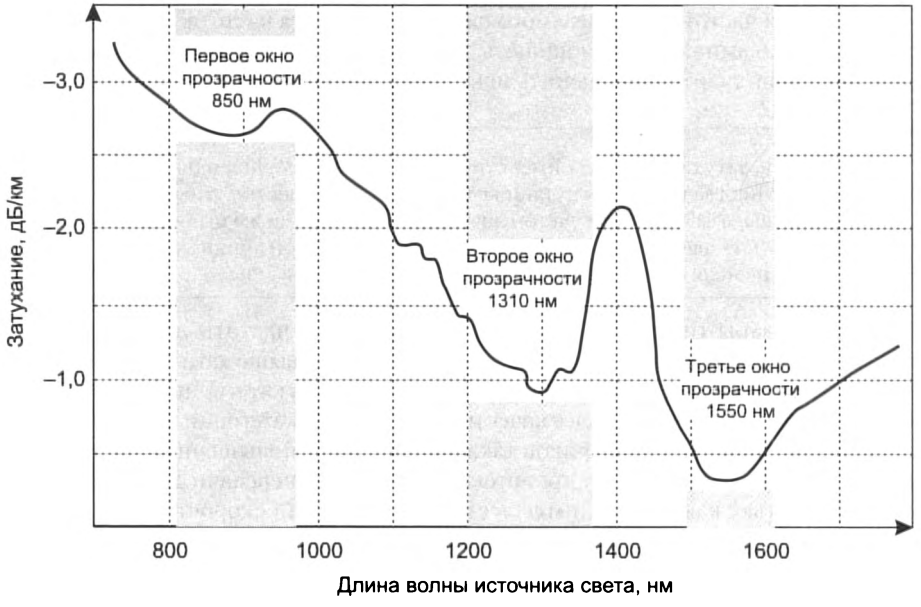

Рис. 6.11. Окна прозрачности оптического волокна

В качестве характеристики мощности сигнала используются абсолютный и относительный уровни мощности. **Абсолютная мощность** измеряется в ваттах, **относительная мощность** — в децибелах. Мощность сигнала рассчитывается по той же формуле, что и затухание. Такая величина, как относительная мощность, используется при сравнении двух сигналов, например, сигнала помехи и информационного сигнала. Затухание также является примером относительной мощности — в этом случае мы сравниваем мощность сигнала на выходе и входе линии связи.

Частным случаем относительной мощности является **опорная мощность**. При расчете опорной мощности уровень, на который делится измеряемая мощность, принимается равным 1 мВт, что и отражается в названии этой единицы мощности, *децибел-милливатт*, дБм.

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, выраженных в ваттах и дБм:

1 мВ = 0 дБм, 10 мВ = 10 дБм, 1 В = 30 дБм, 100 кВ = 80 дБм.

Опорные значения мощности удобно использовать при *расчетах энергетического бюджета линий связи*.

Пример

Пусть требуется определить минимальную опорную мощность x (дБм) передатчика, достаточную для того, чтобы на выходе линии опорная мощность сигнала была не ниже некоторого порогового значения y (дБм). Затухание линии известно и равно A. Пусть X и Y — это абсолютные значения мощности сигнала, заданные в милливаттах на входе и выходе линии соответственно.

По определению $A = 10 \lg X/Y$. Используя свойства логарифмов, приходим к следующему:

$$A = 10 \lg X/Y = 10\lg(X/1)/(Y/1) = 10 \lg X/1 \text{ мВт} - 10 \lg Y/1 \text{ мВт}.$$

Заметим, два последних члена уравнения по определению являются опорными значениями мощности сигналов на выходе и входе, поэтому приходим к простому соотношению $A = x - y$, где x — опорная мощность входного сигнала, а y — опорная мощность выходного сигнала.

Из последнего соотношения следует, что минимальная требуемая мощность передатчика может быть определена как сумма затухания и опорной мощности сигнала на выходе: $x = A + y$.

Величина опорной мощности y выходного сигнала, являющаяся минимальной опорной мощностью сигнала на входе приемника, при котором он еще способен корректно распознавать дискретную информацию, содержащуюся в сигнале, называется **порогом чувствительности приемника**. Очевидно, что для нормальной работы линии связи минимальная опорная мощность сигнала передатчика, даже ослабленная затуханием линии связи, должна превосходить порог чувствительности приемника: $x - A > y$. Проверка этого условия и является сутью расчета энергетического бюджета линии.

Полоса пропускания

На форму сигнала, передаваемого по линии связи, влияет ограниченность ее полосы пропускания.

Полоса пропускания (bandwidth) — 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. Полоса пропускания измеряется в герцах (Гц).

ПРИМЕЧАНИЕ

Термин «полоса пропускания» иногда используется как синоним термина «пропускная способность» и измеряется в битах в секунду. Конечно, лучше было бы применять разные термины для описания различных характеристик, но существуют традиции, которые изменить трудно. В таких случаях приходится различать значения термина по контексту.

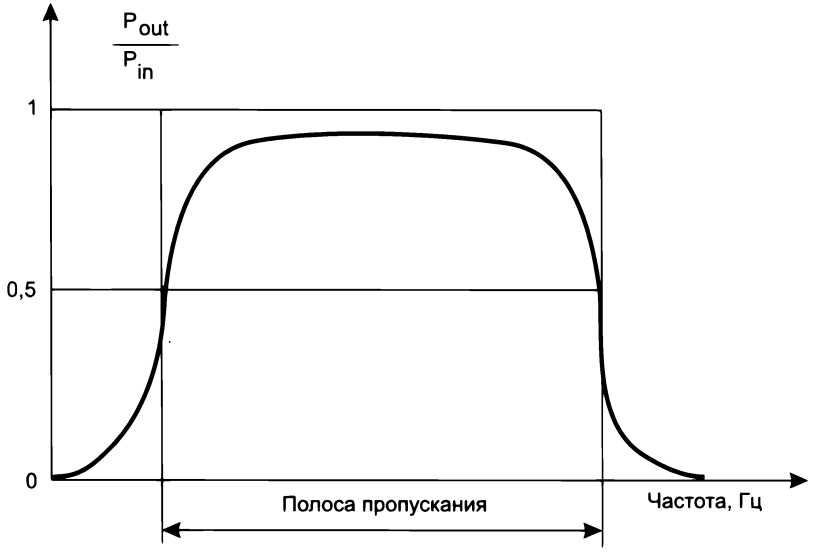

Рис. 6.12. Зависимость затухания от частоты

Степень затухания мощности синусоидального сигнала зависит от частоты синусоиды, и эта зависимость также характеризует линию связи (рис. 6.12).

Часто граничными частотами полосы пропускания 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.

Искажение передающей линией связи синусоиды какой-либо частоты приводит, в конечном счете, к искажению амплитуды и формы передаваемого сигнала, так как гармоники различных частот искажаются *не одинаково*. 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. 6.13), и сигналы могут плохо распознаваться на приемном конце линии.

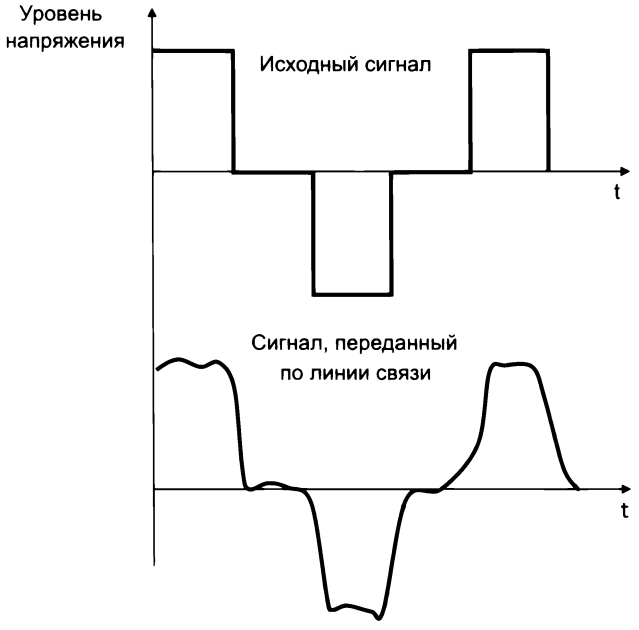

Рис. 6.13. Влияние ограниченности полосы пропускания на форму прямоугольного импульса

Помехи

Передаваемые сигналы искажаются из-за несовершенства линий связи, а также из-за внешних и внутренних помех.

Для электрических сигналов *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. 6.14). В результате синусоиды различных частот передаются этими линиями по-разному.

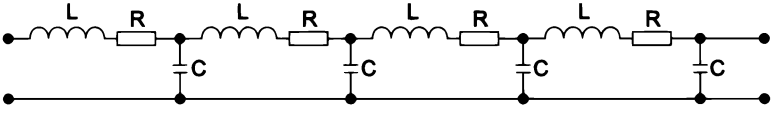

Рис. 6.14. Представление медной линии как распределенной индуктивно-емкостной нагрузки

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 со-

противление измеряется в омах 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 неприемлемым.

Помимо искажений сигналов, возникающих из-за неидеальных физических параметров линии связи, свой вклад в искажение формы сигналов на выходе линии вносят помехи.

Электромагнитная помеха — это нежелательное воздействие на передаваемый сигнал, ухудшающее возможность его распознавания при приеме.

В результате помех сигналы на выходе линии связи могут иметь искаженную форму (рис. 6.15). Источник помех может находиться вне или внутри линии связи.

Внешние помехи создаются различными электрическими двигателями, электронными устройствами, атмосферными явлениями и т. д. **Внутренние помехи** — это результат взаимного влияния электрических процессов в проводниках линии связи, так называемые перекрестные **наводки** одной пары проводников на другую.

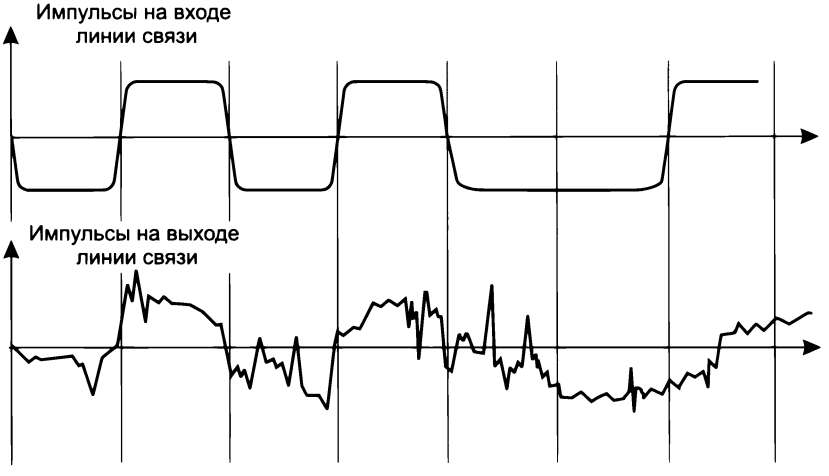

Рис. 6.15. Искажение импульсов в линии связи

Помеха может быть как *регулярной*, так и *случайной* величиной. В первом случае она может быть достаточно легко устранена. Например, наводка от силовой линии переменного тока может быть компенсирована соответствующим противофазным сигналом, а помеха от определенной радиостанции известной частоты может быть заблокирована фильтром, не пропускающим эту частоту. Сложнее обстоит дело со случайной помехой, которую нельзя заранее предсказать и скорректировать. Несмотря на защитные меры, предпринимаемые разработчиками кабелей, наличие усилительной и коммутирующей аппаратуры, полностью компенсировать влияние случайных внешних помех не удается.

Разные виды помех могут по-разному воздействовать на исходный сигнал. В том случае, когда результирующий сигнал может быть представлен в виде суммы исходного сигнала и помехи, помеху называют **аддитивной помехой** или **шумом** (рис. 6.16).

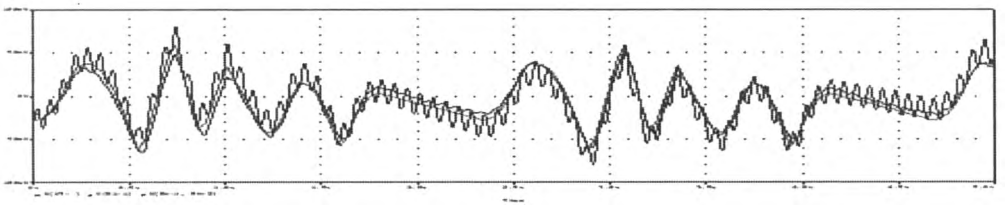

Рис. 6.16. Влияние аддитивной помехи на исходный сигнал

Важнейшим параметром, характеризующим работу линии связи в условиях аддитивных помех, является отношение **«сигнал/шум»** (signal-to-noise ratio — **SNR**), равное отношению средней мощности исходного сигнала к средней мощности шума $P_c/P_ш$. Чем меньше это значение, тем более сложным должно быть устройство приемника, чтобы он мог компенсировать помехи. Как мы увидим далее, это соотношение занимает центральное место в формуле Шеннона, описывающей связь между пропускной способностью и полосой пропускания.

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, малочувствительные 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, характеризующие воздействие на него помех. **Электрическая связь** определяется отношением наведенного тока в цепи, подверженной влиянию, 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.

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. 6.17). 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 добирается сигнал, 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

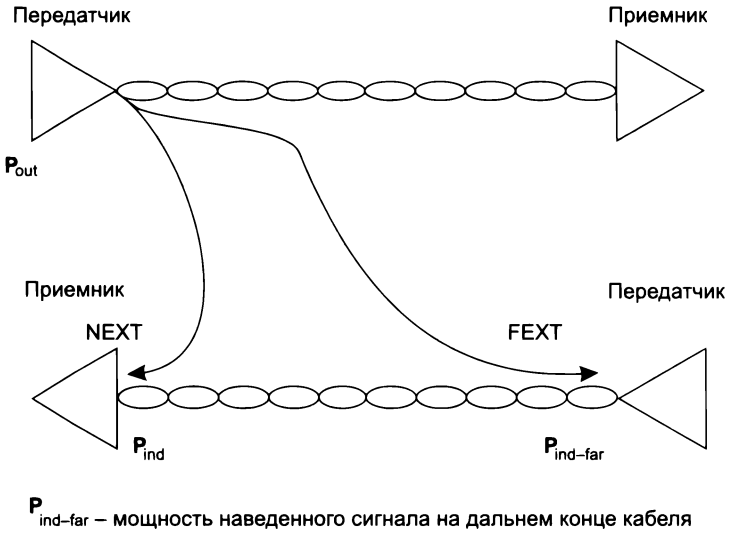

Рис. 6.17. Переходное затухание

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.

Еще одной характеристикой линии связи является **достоверность передачи данных**. Она 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, 10^{-4}–10^{-6}, в оптоволоконных линиях связи — 10^{-9}. Значение достоверности передачи данных в 10^{-4}, к примеру, говорит о том, что в среднем из 10 000 бит искажается значение одного бита.

Пропускная способность

Пропускная способность, называемая также **емкостью** линии связи (capacity), характеризует максимальную скорость передачи данных, которая может быть достигнута на этой линии.

Особенностью пропускной способности является то, что, с одной стороны, она зависит от характеристик *физической среды* (затухания и полосы пропускания), а с другой — *способа передачи данных* (кодирования). Следовательно, нельзя говорить о пропускной способности линии связи до того, как для нее определен протокол физического уровня.

Например, если для линии связи определен протокол физического уровня, задающий фиксированную **битовую скорость передачи данных** (bit rate of transmitter), то для нее известна и соответствующая пропускная способность — например, 2 Мбит/с, 100 Мбит/с, 1 Гбит/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: 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.

ВНИМАНИЕ

Пропускная способность линий связи и коммуникационного сетевого оборудования традиционно измеряется в битах в секунду, а не в байтах в секунду. Это связано с тем, что данные в сетях передаются последовательно, то есть побитно, а не параллельно, байтами, как это происходит между устройствами внутри компьютера. Такие единицы измерения, как килобит, мегабит или гигабит, в сетевых технологиях строго соответствуют степеням десяти (то есть килобит — это 1000 бит, а мегабит — это 1 000 000 бит), как это принято во всех отраслях науки и техники, а не близким к этим числам степеням двойки, как это принято в программировании, где приставка «кило» равна 2^{10} = 1024, а «мега» — 2^{20} = 1 048 576.

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. 6.18, *а*). Если же значимые гармоники выходят за границы полосы пропускания линии связи, то сигнал будет значительно искажаться, что усложнит приемнику распознавание информации (рис. 6.18, *б*).

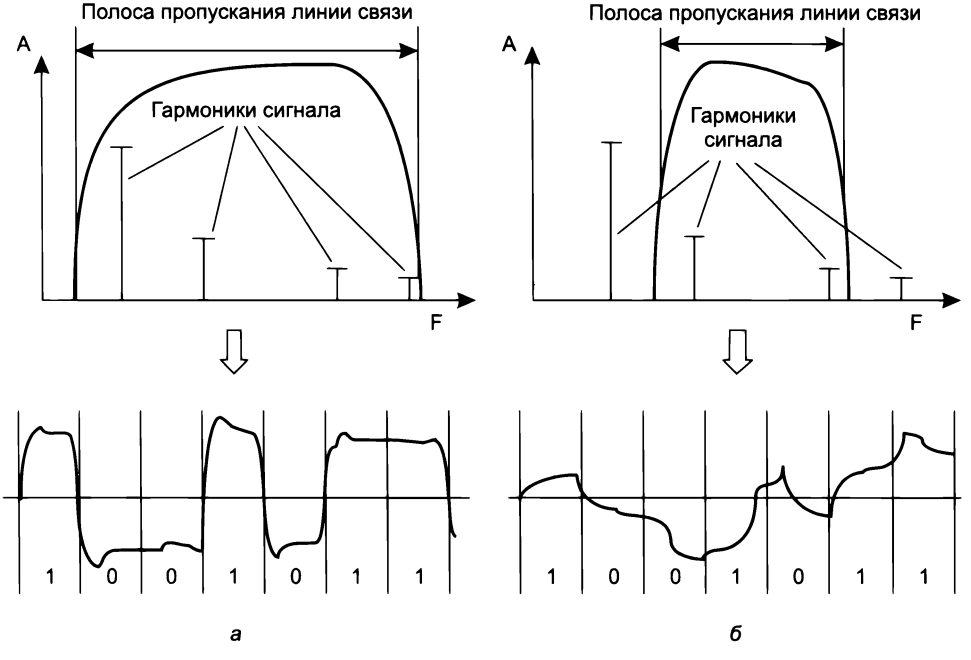

Рис. 6.18. Соответствие между полосой пропускания линии связи и спектром сигнала

Влияние способа кодирования на пропускную способность

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 5 может передавать данные с пропускной способностью 100 Мбит/с при способе кодирования стандарта физического уровня 100Base-T, и 1 Гбит/с при способе кодирования стандарта 1000Base-T.

В соответствии с основным постулатом теории информации *любое различимое непредсказуемое* изменение принимаемого сигнала несет в себе информацию. Отсюда следует, что синусоида, у которой амплитуда, фаза и частота остаются неизменными, информации не несет, так как изменение сигнала хотя и происходит, но является абсолютно предсказуемым. Аналогично, не несут в себе информации импульсы на тактовой шине компьютера, так как их изменения тоже постоянны во времени. А вот импульсы на шине данных предсказать заранее нельзя, что и делает их информационными — они переносят информацию между отдельными блоками или устройствами компьютера.

В большинстве способов кодирования используется изменение одного или нескольких параметров периодического электрического сигнала — частоты, амплитуды и фазы синусоиды или же уровня напряжения/тока последовательности импульсов. Эти параметры называют **информационными параметрами сигнала**. Периодический сигнал, параметры которого подвергаются изменениям, называют **несущим сигналом**. Процесс изменения информационных параметров несущего сигнала в соответствии с передаваемой информацией называется **кодированием** или **модуляцией**. Измененный в результате кодирования несущий сигнал называют **информационным сигналом.**

Если информационный 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*. Например, для сигнала с четырьмя состояниями одно изменение несет два бита: 00, 01, 10, 11.

Передача дискретной информации в телекоммуникационных сетях осуществляется тактированно, то есть изменение информационного параметра сигнала происходит через фиксированный интервал времени, называемый **тактом**. Величина, обратная значению такта, является **тактовой частотой** линии. Передатчик может отдельно от информационных сигналов передавать тактовые сигналы, например, электрические импульсы по отдельной линии связи, для того чтобы приемнику было легче распознавать начало каждого такта. Возможна также схема работы приемника и передатчика без передачи отдельного тактового сигнала — в этом случае приемник должен обладать очень точным таймером, а также возможностью иногда подстраивать свой таймер под таймер передатчика за счет анализа информационного сигнала, например, если информационный сигнал является прямоугольным импульсом, то подстройка может выполняться при приходе переднего фронта импульса.