

Часть I

# **ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ**

**Глава 2. Основы передачи**

**Глава 3. Сети связи**

**Глава 4. Протоколы и набор TCP/IP**



# ГЛАВА 2

## ОСНОВЫ ПЕРЕДАЧИ

### **2.1. Сигналы для передачи информации**

Основные понятия временного представления сигнала

Основные понятия частотного представления сигнала

Связь между скоростью передачи данных и шириной полосы

### **2.2. Аналоговая и цифровая передача данных**

Аналоговые и цифровые данные

Аналоговые и цифровые сигналы

Аналоговая и цифровая передача

### **2.3. Пропускная способность канала**

Ширина полосы по Найквисту

Формула Шеннона для пропускной способности

### **2.4. Передающие среды**

Наземная связь с использованием СВЧ

Спутниковая связь с использованием СВЧ

Широковещательное радио

Связь в инфракрасном диапазоне

### **2.5. Уплотнение**

### **2.6. Рекомендуемая литература**

### **2.7. Термины, вопросы и задачи**

### **Приложение 2А. Децибелы и интенсивность сигнала**

**Ц**ель этой главы — сделать данную книгу исчерпывающим руководством для читателя, имеющего малую подготовку в области передачи данных или вообще не имеющего ее. Читатели, заинтересованные в освоении дополнительного материала, могут найти в конце главы ссылки на литературу.

## 2.1. СИГНАЛЫ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

В данной книге мы рассматриваем электромагнитные сигналы, используемые как средство передачи информации. Электромагнитный сигнал является функцией времени, хотя он также может быть выражен и как функция частоты; т.е. сигнал состоит из компонентов, имеющих различные частоты. Это приводит нас к мысли о том, что для понимания передачи данных рассмотрение сигнала с точки зрения *частотного представления* значительно важнее, чем с точки зрения *временного*. Ниже описываются оба упомянутых подхода.

### Основные понятия временного представления сигнала

Если рассматривать сигнал как функцию времени, то он может быть либо аналоговым, либо цифровым. **Аналоговым** называется сигнал, интенсивность которого во времени изменяется постепенно. Другими словами, в сигнале не имеется пауз или разрывов<sup>1</sup>. **Цифровым** называется сигнал, интенсивность которого в течение некоторого периода поддерживается на постоянном уровне, а затем изменяется также на постоянную величину. На рис. 2.1 приведены примеры сигналов обоих типов. Аналоговый сигнал может представлять речь, а цифровой — набор двоичных единиц и нулей.

Простейшим типом сигнала является **периодический сигнал**, в котором некоторая структура периодически повторяется во времени. На рис. 2.2 приведен пример периодического аналогового сигнала (синусоида) и периодического цифрового сигнала (прямоугольный сигнал, или меандр). Математическое определение: сигнал  $s(t)$  является периодическим тогда и только тогда, когда

$$s(t + T) = s(t) \quad -\infty < t < +\infty,$$

где постоянная  $T$  является периодом сигнала ( $T$  — наименьшая величина, удовлетворяющая этому уравнению). Если невозможно найти  $T$ , удовлетворяющее уравнению, сигнал называется **аперiodическим**.

---

<sup>1</sup> Это определение идеализировано. На самом деле переход от одного уровня напряжения к другому не может быть моментальным, а происходит в течение некоторого переходного периода. Тем не менее на практике цифровые сигналы являются хорошим приближением к идеальной модели с постоянными уровнями напряжения и мгновенными переходами.

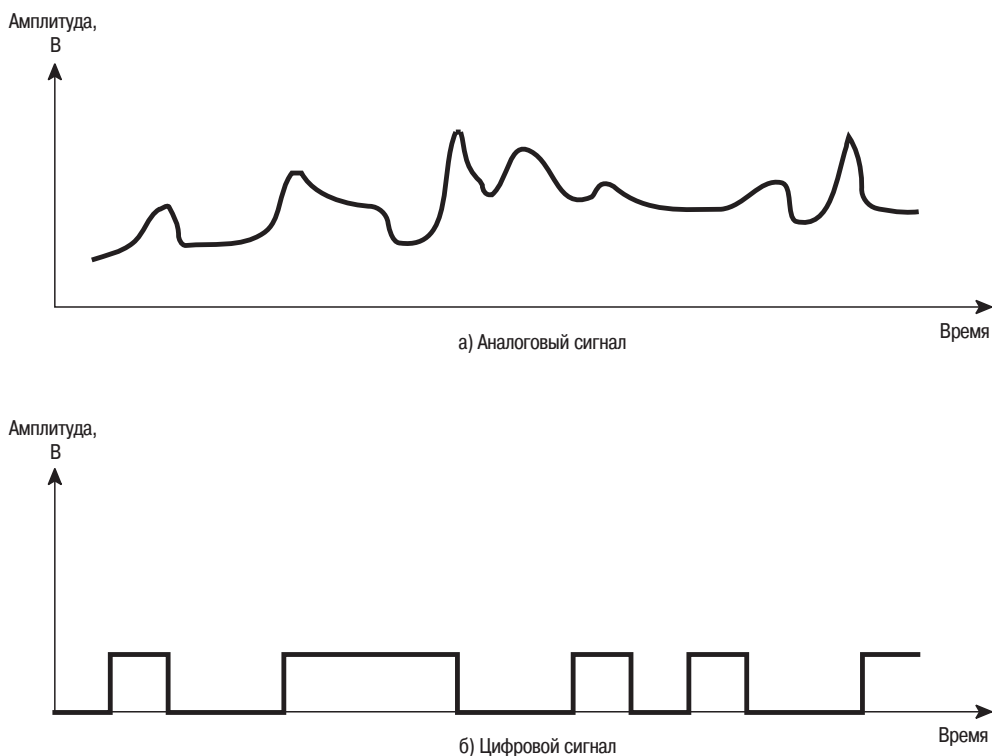


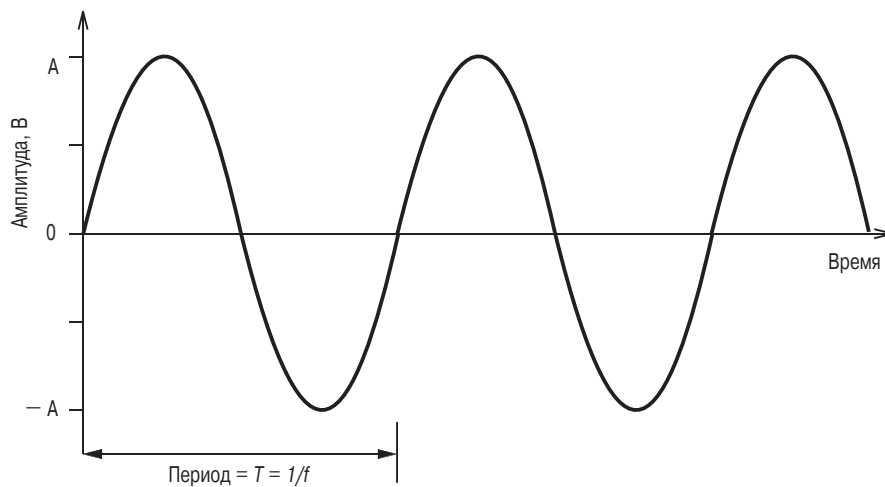
Рис. 2.1. Аналоговый и цифровой сигналы

Фундаментальным аналоговым сигналом является синусоида. В общем случае такой сигнал можно определить тремя параметрами: максимальной амплитудой  $A$ , частотой  $f$  и фазой  $\phi$ . **Максимальной амплитудой** называется максимальное значение или интенсивность сигнала во времени; измеряется максимальная амплитуда, как правило, в вольтах. **Частотой** называется темп повторения сигналов (в периодах за секунду, или герцах). Эквивалентным параметром является **период** сигнала  $T$ , представляющий собой время, за которое происходит повторение сигнала; следовательно,  $T = 1/f$ . **Фаза** является мерой относительного сдвига по времени в пределах отдельного периода сигнала (данный термин будет проиллюстрирован несколько ниже).

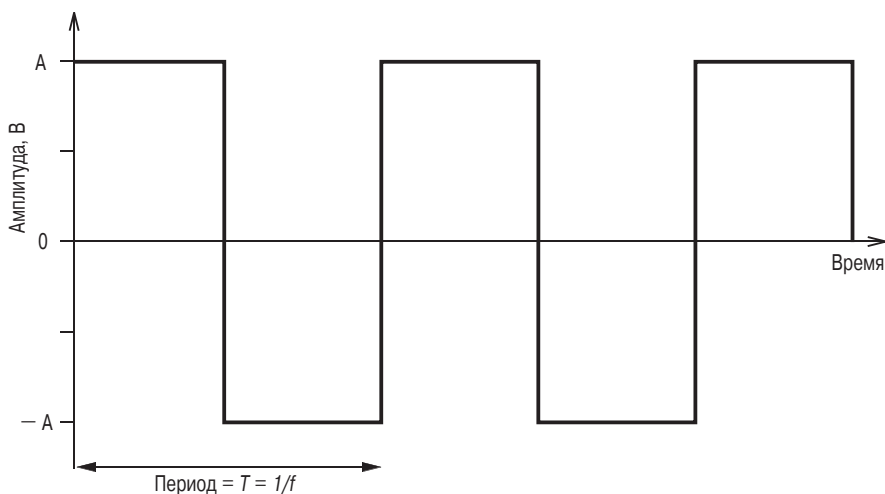
В общем случае синусоидальный сигнал можно представить в следующем виде:

$$s(t) = A \sin(2\pi f t + \phi).$$

Влияние изменения каждого из трех параметров показано на рис. 2.3. На рис. 2.3, *а* частота составляет 1 Гц; следовательно, период  $T$  равен 1 с. На рис. 2.3, *б* частота и фаза те же, но амплитуда уменьшена в два раза. На рис. 2.3, *в* частота  $f = 2$ , что эквивалентно периоду  $T = 1/2$ . Наконец, на рис. 2.3, *г* показано влияние сдвига фазы на  $\pi/4$  радиан, что составляет  $45^\circ$  ( $2\pi$  радиан =  $360^\circ = 1$  период).



а) Синусоидальный сигнал



б) Прямоугольный сигнал

*Рис. 2.2. Периодические сигналы*

По горизонтальной оси на рис. 2.3 отложено время; на самом же графике показана зависимость от времени величины сигнала в данной точке пространства. Подобные графики (с точностью до изменения масштаба) можно получить, если отложить на горизонтальной оси расстояние. В этом случае на графике будет изображена интенсивность сигнала в данный момент времени в зависимости от расстояния. Например, при передаче синусоидальной волны (если рассмотреть электромагнитную волну на некотором расстоянии от антенны или звук на некотором расстоянии от громкоговорителя) в отдельный момент времени интенсивность сигнала изменяется по гармоническому закону как функция расстояния от источника.

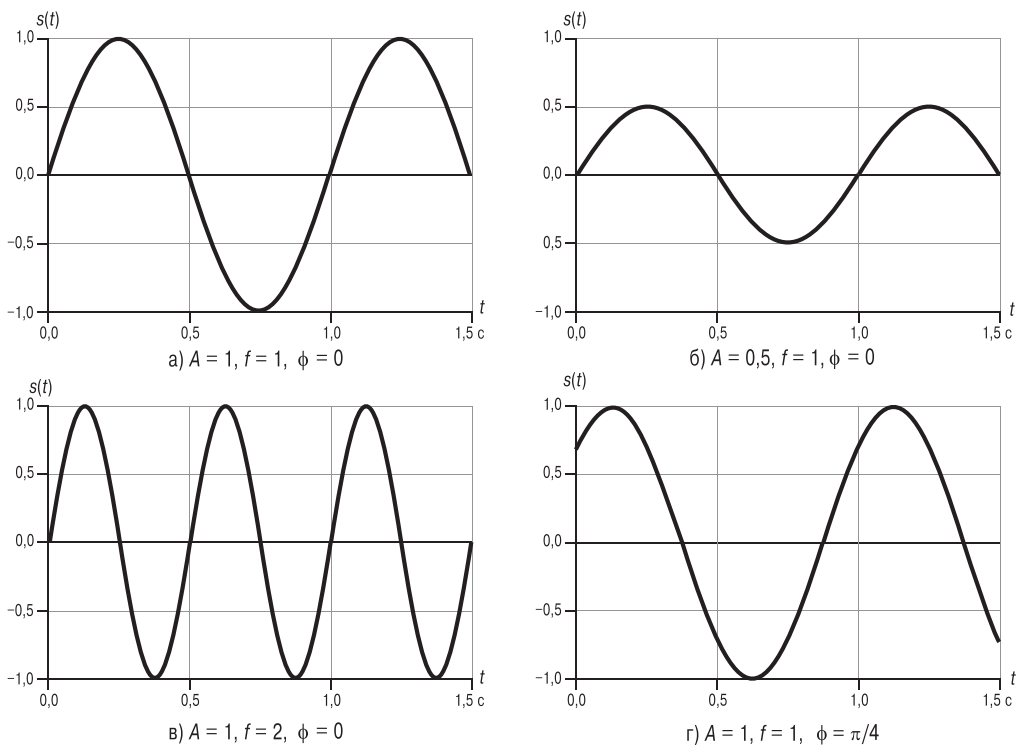


Рис. 2.3.  $s(t) = A \sin(2\pi ft + \phi)$

Существует простое соотношение между двумя синусоидальными сигналами, один из которых изменяется во времени, а другой — в пространстве. Определим **длину волны** сигнала  $\lambda$  как расстояние, занимаемое одним периодом или, иными словами, как расстояние между двумя точками равных фаз двух последовательных циклов. Предположим, что сигнал распространяется со скоростью  $v$ . Тогда длина волны связана с периодом следующим соотношением:  $\lambda = vT$ , что равносильно  $\lambda f = v$ . Особое значение для нашего изложения имеет случай  $v = c$ , где  $c$  — скорость света в вакууме, приблизительно равная  $3 \times 10^8$  м/с.

### Основные понятия частотного представления сигнала

Реальный электромагнитный сигнал составлен из многих частот. Рассмотрим, например, сигнал, показанный на рис. 2.4, в.

$$s(t) = (4/\pi) \times [\sin(2\pi ft) + (1/3) \sin(2\pi(3f)t)]$$

Он состоит из простых синусоидальных сигналов с частотами  $f$  и  $3f$ , показанных соответственно на рис. 2.4, а и б. Отметим два интересных момента, связанных с этим рисунком.

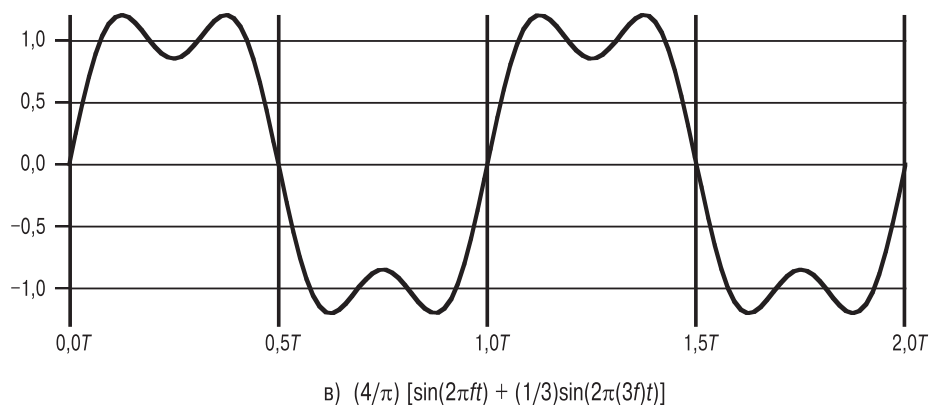
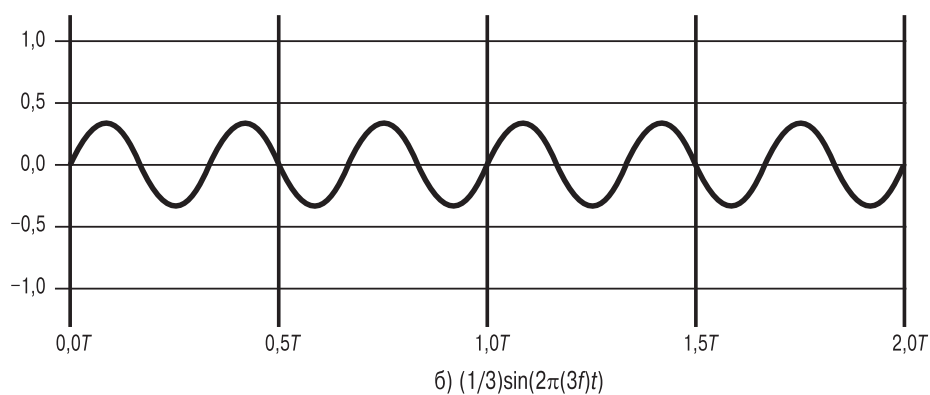
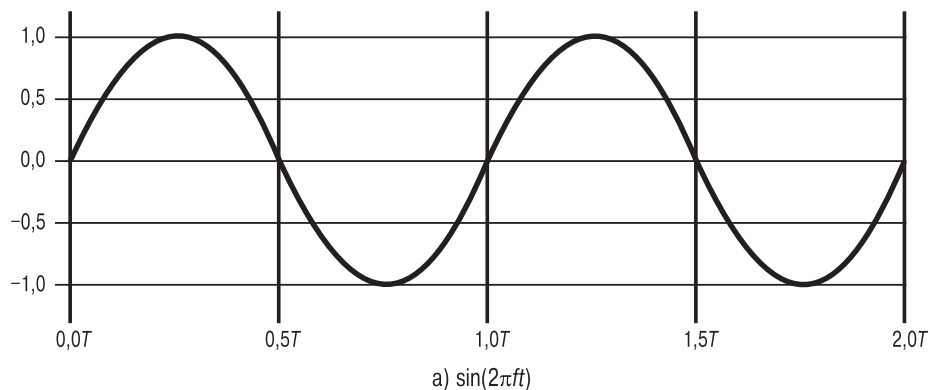


Рис. 2.4. Сложение частотных составляющих ( $T = 1/f$ )

- Вторая частота кратна первой. Если все частотные составляющие сигнала кратны одной частоте, то последняя называется **собственной частотой**.
- Период суммарного сигнала равен периоду сигнала собственной частоты. Период составляющей  $\sin(2\pi ft)$  равен  $T = 1/f$ , и, как можно увидеть на рис. 2.4, в, период сигнала  $s(t)$  также равен  $T$ .



Можно показать, применив для этой цели методику, известную как анализ Фурье, что любой сигнал складывается из синусоидальных составляющих с разными частотами. Сложив вместе достаточное количество синусоидальных сигналов с соответствующими амплитудами, частотами и фазами, можно получить электромагнитный сигнал любой формы. Аналогично, любой электромагнитный сигнал рассматривается как совокупность периодических аналоговых (синусоидальных) сигналов с разными амплитудами, частотами и фазами. Далее по ходу изложения мы увидим, как важно иметь возможность рассмотреть сигнал не как процесс изменения во времени (временное представление), а как функцию частоты (частотное представление). Для читателя, интересующегося анализом Фурье, в приложении В приводятся основы этого метода.

**Спектр** сигнала называется область частот, составляющих данный сигнал. Для сигнала, приведенного на рис. 2.4, *в*, спектр простирается от  $f$  до  $3f$ . **Абсолютной шириной полосы** сигнала называется ширина его спектра. В рассматриваемом случае (рис. 2.4, *в*) ширина полосы составляет  $3f - f = 2f$ . Многие сигналы имеют бесконечную ширину полосы, но большая часть их энергии сосредоточена в относительно узкой полосе частот, называемой **эффективной полосой**, или просто **полосой**.

## Связь между скоростью передачи данных и шириной полосы

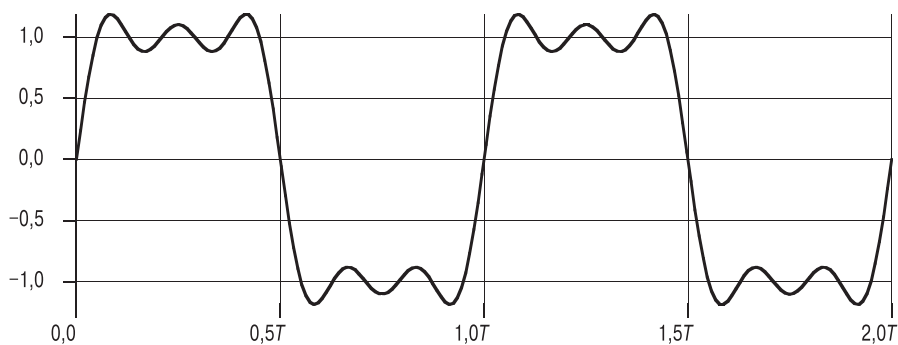
Существует прямая связь между информационной емкостью сигнала и шириной его полосы: чем шире полоса, тем больше информации может нести сигнал. Рассмотрим очень простой пример, воспользовавшись сигналом, показанным на рис. 2.2, *б*. Предположим, что положительный импульс представляет двоичный ноль, а отрицательный — двоичную единицу. Следовательно, данный сигнал представляет двоичный поток 0101... . Длительность каждого импульса равна  $1/2f$ ; следовательно, скорость передачи данных составляет  $2f$  битов в секунду (бит/с). Каковы частотные составляющие этого сигнала? Чтобы ответить на этот вопрос, вновь обратимся к рис. 2.4. При сложении синусоид с частотами  $f$  и  $3f$  мы получаем сигнал, форма которого начинает походить на форму исходного прямоугольного сигнала. Продолжим этот процесс и добавим синусоидальный сигнал с частотой  $5f$  (результат показан на рис. 2.5, *а*), а затем сигнал с частотой  $7f$  (рис. 2.5, *б*). Продолжая добавлять составляющие с нечетными частотами, кратными  $f$ , и надлежащим образом выбранными амплитудами, мы увидим, что результирующий сигнал все больше и больше приближается к прямоугольной форме.

Действительно, можно показать, что составляющие прямоугольного сигнала с амплитудами  $A$  и  $-A$  можно выразить следующим образом:

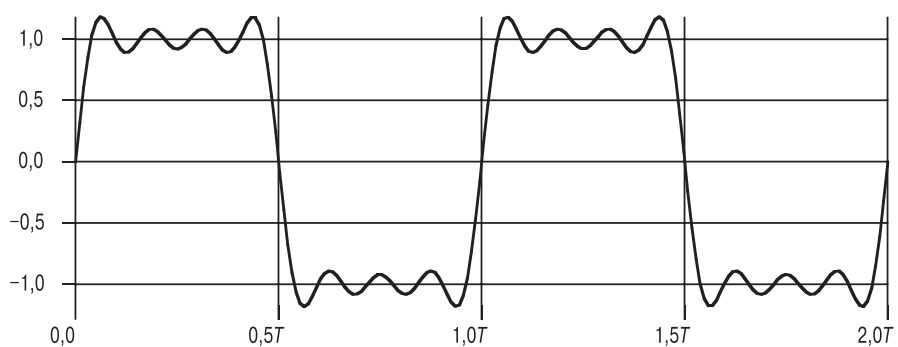
$$s(t) = A \times \frac{4}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin(2\pi kft)}{k}.$$

Этот сигнал содержит бесконечное число частотных составляющих и, следовательно, имеет бесконечную ширину полосы. Впрочем, максимальная амплитуда  $k$ -й составляющей с частотой  $kf$  равна всего лишь  $1/k$ , поэтому большая часть энергии данного сигнала приходится на несколько первых состав-

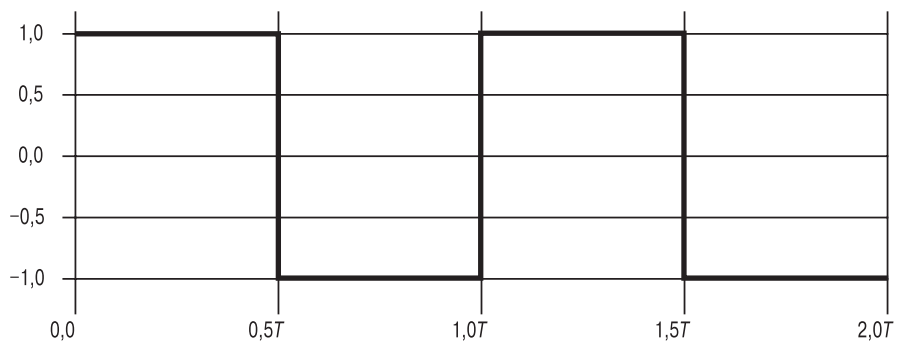
ляющих. Что произойдет, если мы ограничим полосу только первыми тремя частотными составляющими? Ответ мы уже видели, он приведен на рис. 2.5, а. Здесь форма результирующего сигнала достаточно близка к форме исходного прямоугольного сигнала.



$$a) \frac{4}{\pi} [\sin(2\pi ft) + (1/3)\sin(2\pi(3f)t) + (1/5)\sin(2\pi(5f)t)]$$



$$б) \frac{4}{\pi} [\sin(2\pi ft) + (1/3)\sin(2\pi(3f)t) + (1/5)\sin(2\pi(5f)t) + (1/7)\sin(2\pi(7f)t)]$$



$$в) \frac{4}{\pi} \sum (1/k)\sin(2\pi(kf)t), \quad \text{для нечетных } k$$

Рис. 2.5. Частотные составляющие прямоугольного сигнала ( $T = 1/f$ )

Рисунки 2.4 и 2.5 можно использовать для иллюстрации связи между скоростью передачи данных и шириной полосы. Предположим, что мы ис-

пользуем цифровую систему, способную передавать сигналы с шириной полосы 4 МГц. Попытаемся передать последовательность чередующихся нулей и единиц в виде сигнала прямоугольной формы, приведенного на рис. 2.5, в. Какой скорости передачи данных мы сможем при этом добиться? Рассмотрим три случая.

**Случай 1.** Аппроксимируем наш прямоугольный сигнал формой, показанной на рис. 2.5, а. Хотя эта форма представляет “искаженный” прямоугольный сигнал, она достаточно близка к нему, чтобы приемник мог отличить двоичный нуль от двоичной единицы. Если мы производим  $10^6$  циклов в секунду, что дает частоту  $f = 1$  МГц, то ширина полосы сигнала

$$s(t) = \frac{4}{\pi} \times \left[ \sin((2\pi \times 10^6)t) + \frac{1}{3} \sin((2\pi \times 3 \times 10^6)t) + \frac{1}{5} \sin((2\pi \times 5 \times 10^6)t) \right]$$

равна  $(5 \times 10^6) - 10^6 = 4$  МГц. Отметим, что для частоты  $f = 1$  МГц период собственной частоты равен  $T = 1/10^6 = 10^{-6} = 1$  мкс. Если мы будем рассматривать данный сигнал как поток двоичных нулей и единиц, то каждые 0,5 мкс будет передаваться один бит при скорости передачи данных  $2 \times 10^6 = 2$  Мбит/с. Следовательно, при ширине полосы 4 МГц достигается скорость передачи данных 2 Мбит/с.

**Случай 2.** Предположим теперь, что ширина полосы равна 8 МГц. Вернемся к рис. 2.5, а, подразумевая теперь частоту  $f = 2$  МГц. Используя ту же цепочку рассуждений, получим следующую ширину полосы сигнала:  $(5 \times 2 \times 10^6) - (2 \times 10^6) = 8$  МГц. Но в этом случае период  $T$  равен уже  $1/f = 0,5$  мкс. В результате один бит будет передаваться каждые 0,25 мкс при скорости передачи данных 4 Мбит/с. Следовательно, при равных других параметрах, удвоение ширины полосы приводит к удвоению возможной скорости передачи данных.

**Случай 3.** Предположим теперь, что форма сигнала, приведенная на рис. 2.4, в, достаточно для аппроксимации прямоугольного сигнала. Иначе говоря, различия между положительным и отрицательным импульсом на рис. 2.4, в достаточно, чтобы успешно использовать этот сигнал для представления последовательности нулей и единиц. Предположим, как и в случае 2, что частота  $f$  равна 2 МГц, а период  $T = 1/f = 0,5$  мкс; таким образом, один бит передается каждые 0,25 мкс, а ширина полосы сигнала составляет  $(3 \times 2 \times 10^6) - (2 \times 10^6) = 4$  МГц. Следовательно, при данной ширине полосы могут поддерживаться различные скорости передачи данных, а зависит эта скорость от способности приемника различать 0 и 1 при наличии помех и других искажений сигнала.

Подытожим наши рассуждения.

- **Случай 1:** ширина полосы — 4 МГц; скорость передачи данных — 2 Мбит/с.
- **Случай 2:** ширина полосы — 8 МГц; скорость передачи данных — 4 Мбит/с.
- **Случай 3:** ширина полосы — 4 МГц; скорость передачи данных — 4 Мбит/с.

Из приведенного выше изложения можем сделать следующие выводы. В общем случае любой цифровой сигнал имеет бесконечную ширину полосы. Если мы попы-

таемся передать этот сигнал через какую-то среду, передающая система наложит ограничения на ширину полосы, которую можно передать. Более того, для каждой конкретной среды справедливо следующее: чем больше передаваемая полоса, тем больше стоимость передачи. Поэтому, с одной стороны, по экономическим и практическим соображениям следует аппроксимировать цифровую информацию сигналом с ограниченной шириной полосы. С другой стороны, при ограничении ширины полосы возникают искажения, затрудняющие интерпретацию принимаемого сигнала. Чем больше ограничена полоса, тем больше искажение сигнала и тем больше потенциальная возможность возникновения ошибок при приеме.

## 2.2. АНАЛОГОВАЯ И ЦИФРОВАЯ ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ

Термины *аналоговый* и *цифровой* приблизительно соответствуют терминам *непрерывный* и *дискретный*. В сфере передачи данных эти два термина часто используются по меньшей мере в трех контекстах: при рассмотрении данных, сигналов и передачи.

Определим **данные** как объекты, передающие смысл, или информацию. **Сигналы** — это электрическое или электромагнитное представление данных. **Передача** — процесс перемещения данных путем распространения сигналов по передающей среде и их обработки. Далее мы попытаемся прояснить эти абстрактные понятия, используя термины *аналоговый* и *цифровой* применительно к данным, сигналам и передаче.

### Аналоговые и цифровые данные

Понятия *аналоговые* и *цифровые данные* достаточно просты. Аналоговые данные принимают непрерывные значения из некоторого диапазона. Например, звуковые сигналы и видеосигналы представляют собой непрерывно изменяющиеся величины. Многие данные, собираемые с помощью датчиков, такие, как температура и давление, также принимают непрерывные значения. Цифровые данные, напротив, принимают только дискретные значения; примеры — текст и целые числа.

Самым привычным примером аналоговых данных является **звук**, который, в форме акустических волн, люди могут воспринимать непосредственно. На рис. 2.6 показан акустический спектр человеческой речи и музыки. Частотные составляющие обычной речи лежат в диапазоне приблизительно между 100 Гц и 7 кГц. Хотя значительная часть энергии речевого сигнала сосредоточена в области низких частот, исследования показали, что частоты ниже 600–700 Гц слабо влияют на улучшение разборчивости сигнала для человеческого уха. Динамический диапазон обычной речи составляет примерно 25 дБ<sup>2</sup>; т.е. мощность самого громкого крика в 300 раз больше, чем самого тихого шепота. Помимо речи, на рис. 2.6 также показаны акустический спектр и динамический диапазон музыки.

---

<sup>2</sup> О децибелах рассказано в приложении 2А.

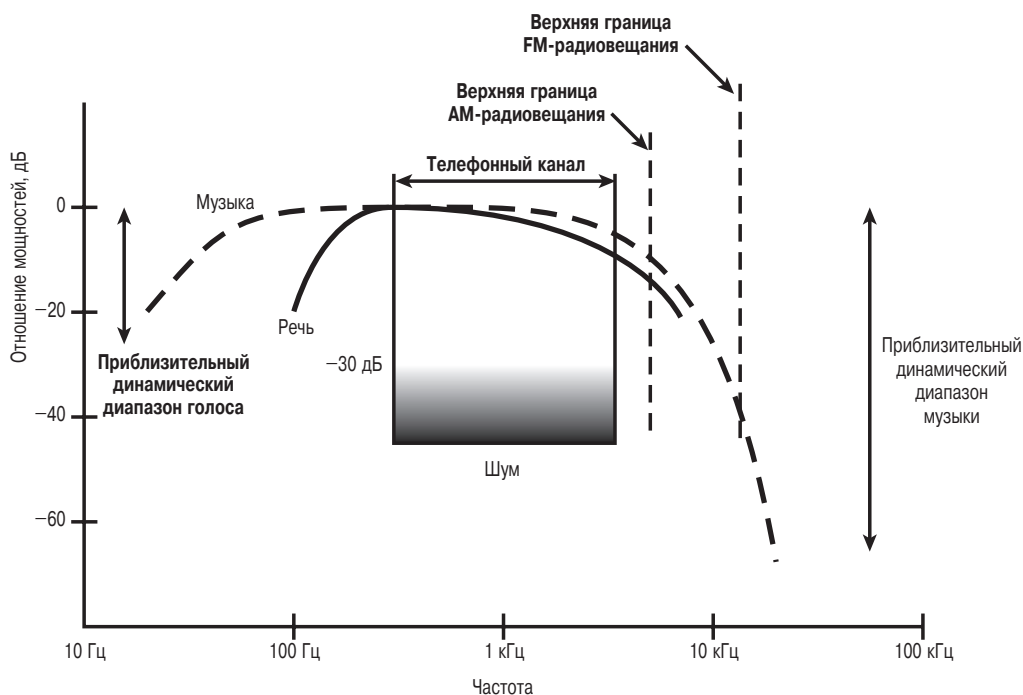


Рис. 2.6. Акустический спектр речи и музыки [CARN99]

## Аналоговые и цифровые сигналы

В системе связи информация распространяется от одной точки к другой посредством электрических сигналов. **Аналоговый сигнал** представляет собой непрерывно изменяющуюся электромагнитную волну, которая может распространяться через множество сред, в зависимости от частоты; в качестве примеров таких сред можно назвать проводные линии, такие, как витая пара и коаксиальный кабель, оптоволокно; этот сигнал может также распространяться через атмосферу или космическое пространство. **Цифровой сигнал** представляет собой последовательность импульсов напряжения, которые могут передаваться по проводной линии; при этом постоянный положительный уровень напряжения может использоваться для представления двоичного нуля, а постоянный отрицательный уровень — для представления двоичной единицы.

Основное преимущество цифровых сигналов состоит в том, что их передача в общем случае дешевле и менее восприимчива к помехам, чем передача аналоговых сигналов. Основной недостаток — цифровым сигналам затухание вредит больше, чем аналоговым. На рис. 2.7 показаны исходная последовательность импульсов напряжения, генерируемых источником, и эти же импульсы, прошедшие некоторое расстояние по передающей среде. Из-за затухания, или ослабления, мощности сигнала на высоких частотах импульсы становятся более сглаженными и низкими. Ясно, что это затухание довольно быстро может привести к потере информации, содержащейся в передаваемом сигнале.

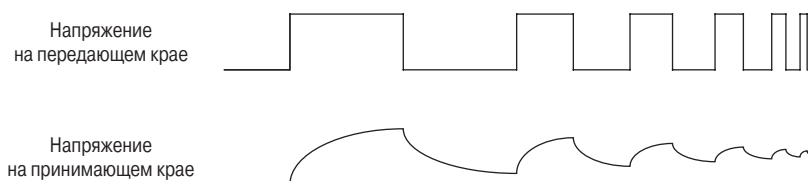


Рис. 2.7. Ослабление цифровых сигналов

И аналоговые, и цифровые данные могут быть представлены, а следовательно, и переданы, в форме как аналоговых, так и цифровых сигналов. Это показано на рис. 2.8. В общем случае аналоговые данные являются функцией времени и занимают ограниченный спектр частот. Такие данные можно непосредственно представить электромагнитным сигналом, имеющим аналогичный спектр. Наиболее наглядный пример — передача речи. Речь, представляя собой звуковые волны, содержит частотные составляющие в области 20 Гц – 20 кГц. Однако большая часть энергии речи находится в намного более узком диапазоне. Стандартный спектр речевых сигналов — 300–3400 Гц, и этого диапазона вполне хватает для разборчивой и четкой передачи речи. Именно такой диапазон обрабатывает телефонный аппарат. Все поступающие звуковые колебания в диапазоне 300–3400 Гц преобразуются в электромагнитный сигнал с подобными амплитудами и частотами. В другом аппарате выполняется обратный процесс: электромагнитная энергия преобразуется в звук.

Цифровые данные также можно представить аналоговыми сигналами, применив с этой целью модем (модулятор/демодулятор). Модем преобразует последовательность двоичных (принимающих два значения) импульсов напряжения в аналоговый сигнал, модулируя их несущей частотой. Получившийся в результате сигнал занимает определенный спектр частот с центром на несущей частоте и может распространяться в среде, подходящей для этой несущей частоты. Наиболее распространенные модемы представляют цифровые данные в спектре частот, совпадающем со спектром речи, позволяя, таким образом, передавать эти данные по обычным телефонным линиям. На другом конце линии другой модем демодулирует сигнал и восстанавливает исходные данные.

С использованием очень похожего способа аналоговые данные могут представляться и цифровыми сигналами. Устройство, выполняющее функцию передачи речевой информации, называется кодеком (кодером/декодером). По существу кодек принимает аналоговый сигнал, непосредственно представляющий речевую информацию, и аппроксимирует этот сигнал потоком битов. Приемник, со своей стороны, использует этот поток битов для воспроизведения аналоговых данных. В дальнейшем мы вернемся к этой теме.

Наконец, цифровые данные могут быть представлены непосредственно в двоичной форме, двумя уровнями напряжения. Однако для улучшения характеристик распространения двоичные данные часто перекодируются в цифровой сигнал более сложной формы, как будет показано далее.

Каждая из четырех возможных комбинаций (они представлены в табл. 2.1, а) находит широкое применение. Причины выбора какой-либо конкретной комбинации различны. Ниже мы постарались перечислить наиболее типичные из них.

- **Цифровые данные, цифровой сигнал.** В общем случае оборудование для кодирования цифровых данных цифровым сигналом дешевле и проще, чем оборудование для модулирования цифровых данных аналоговым сигналом.
- **Аналоговые данные, цифровой сигнал.** Преобразование аналоговых данных в цифровую форму позволяет использовать современное цифровое оборудование передачи и коммутации.

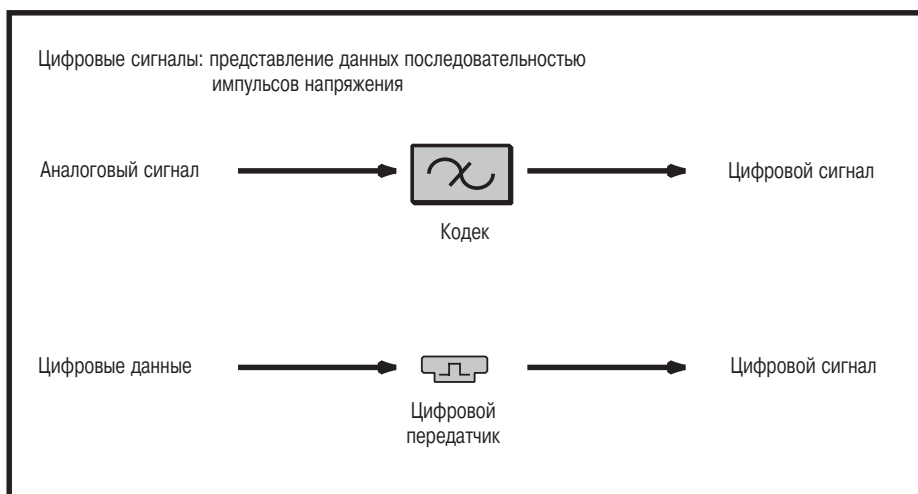
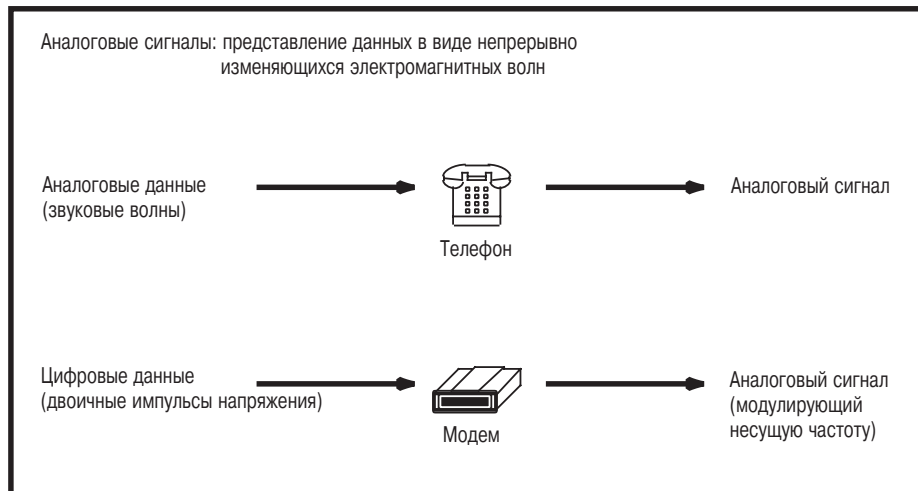


Рис. 2.8. Аналоговая и цифровая передача аналоговых и цифровых данных

- **Цифровые данные, аналоговый сигнал.** По некоторым передающим средам, таким, как оптоволокно и ненаправляемые среды, могут распространяться только аналоговые сигналы.
- **Аналоговые данные, аналоговый сигнал.** Аналоговые данные легко поддаются преобразованию в аналоговый сигнал.

**Таблица 2.1. Аналоговая и цифровая передача**

а) Данные и сигналы		
	Аналоговый сигнал	Цифровой сигнал
<b>Аналоговые данные</b>	Два варианта: 1) сигнал имеет тот же спектр, что и аналоговые данные; 2) аналоговые данные кодируются с целью получения сигнала в другой области спектра	Аналоговые данные кодируются с использованием кодека для создания потока битов
<b>Цифровые данные</b>	Цифровые данные кодируются с использованием модема для создания аналогового сигнала	Два варианта: 1) сигнал состоит из двух уровней напряжения, представляющих два двоичных значения; 2) цифровые данные кодируются для создания цифрового сигнала с желаемыми свойствами
б) Обращение с сигналами		
	Аналоговая передача	Цифровая передача
<b>Аналоговый сигнал</b>	Передается через усилители; такой же подход, если сигнал используется для представления аналоговых или цифровых данных	Предполагает использование аналогового сигнала для представления цифровых данных. Сигнал передается через ретрансляторы, на каждом из которых цифровые данные восстанавливаются из поступающего сигнала и используются для создания нового отправляемого аналогового сигнала
<b>Цифровой сигнал</b>	Не используется	Цифровые данные являются потоком нулей и единиц, которые могут представлять цифровые данные или быть закодированными аналоговыми данными. Сигнал передается через ретрансляторы, на каждом из которых поток нулей и единиц восстанавливается из поступающего сигнала и используется для создания нового отправляемого цифрового сигнала

## Аналоговая и цифровая передача

Как аналоговые, так и цифровые сигналы могут распространяться в соответствующих передающих средах. Но конкретный способ обращения с этими сигналами является функцией передающей системы. Существующие методы передачи данных обобщены в табл. 2.1, б. **Аналоговая передача** — это средство передачи аналоговых сигналов, причем передаваемые данные не конкретизируются: сигнал может представлять как аналоговые (например, речь), так и цифровые данные (например, двоичные данные, проходящие через модем). В любом случае аналоговый сигнал испытывает затухание (ослабляется), что ограничивает длину линии передачи. Чтобы сигнал можно было передавать на большие расстояния, в аналоговые передающие системы вводятся усилители, повышающие энергию сигнала. К сожалению, усилители также усиливают и шумовые составляющие сигнала. С каждым усилителем, последовательно расположенным на пути следования сигнала, этот сигнал становится все более искаженным. Для аналоговых



данных, таких, как речь, небольшое искажение не существенно, и данные остаются понятными, чего нельзя сказать о цифровых данных: в них последовательные усилители вносят ошибки.

**Цифровая передача** данных, наоборот, связана с содержанием сигнала. Мы уже говорили, что цифровой сигнал можно передать только на ограниченное расстояние, пока затухание не нарушит целостности данных. Для передачи цифровых данных на большие расстояния используются ретрансляторы, которые принимают цифровой сигнал, восстанавливают закодированную комбинацию нулей и единиц и передают новый сигнал. Таким образом происходит компенсация затухания.

Тот же метод может использоваться и при передаче аналогового сигнала, если он переносит цифровую информацию. Для этого в расположенных соответствующим образом точках передающей системы помещаются не усилители, а ретрансляторы. Такой ретранслятор восстанавливает цифровую информацию из аналогового сигнала и создает новый, чистый аналоговый сигнал, препятствуя, таким образом, накоплению помех.

## 2.3. ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ КАНАЛА

Существует множество факторов, способных исказить или повредить сигнал. Наиболее распространенные из них — помехи или шумы, представляющие собой любой нежелательный сигнал, который смешивается с сигналом, предназначенным для передачи или приема, и искажает его. Помехи и другие искажения рассматриваются в главе 5. Для цифровых данных возникает вопрос: насколько эти искажения ограничивают возможную скорость передачи данных. Максимально возможная при определенных условиях скорость, при которой информация может передаваться по конкретному тракту связи, или каналу, называется **пропускной способностью канала**.

Существуют четыре понятия, которые мы попытаемся связать воедино.

- **Скорость передачи данных.** Это скорость в битах в секунду (бит/с), с которой могут передаваться данные.
- **Ширина полосы.** Это ширина полосы передаваемого сигнала, ограничиваемая передатчиком и природой передающей среды. Выражается в периодах в секунду, или герцах (Гц).
- **Шум.** Средний уровень шума в канале связи.
- **Уровень ошибок.** Частота появления ошибок. Ошибкой считается прием 1 при переданном 0 и наоборот.

Проблема, стоящая перед нами, заключается в следующем: средства связи недешевы и, в общем случае, чем шире их полоса, тем дороже они стоят. Более того, все каналы передачи, представляющие практический интерес, имеют ограниченную ширину полосы. Ограничения обусловлены физическими свойствами передающей среды или преднамеренными ограничениями ширины полосы в самом передатчике, сделанными для предотвращения интерференции с другими источниками. Естественно, нам хотелось бы максимально эффективно использовать имеющуюся полосу. Для цифровых данных это означает, что для определенной полосы желательно получить максимально возможную при существую-

щем уровне ошибок скорость передачи данных. Главным ограничением при достижении такой эффективности являются помехи.

## Ширина полосы по Найквисту

Рассмотрим вначале канал в отсутствие шумов. В таких условиях ограничения на скорость передачи данных накладывает только ширина полосы сигнала. По Найквисту это ограничение формулируется следующим образом: если скорость передачи сигнала равна  $2B$ , то с этой скоростью могут передаваться сигналы с частотами, не превышающими  $B$ . Справедливо и обратное: для сигнала с шириной полосы  $B$  наивысшая скорость передачи составляет  $2B$ . Это ограничение возникает вследствие эффекта межсимвольной интерференции, такой, как интерференция при искажении, вызванном запаздыванием.<sup>3</sup> В приложении 6А выводится одно из следствий этого факта, полезное при разработке схем кодирования цифровых объектов в аналоговые.

Отметим, что в предыдущем абзаце мы упоминали о скорости передачи сигнала. Если передаваемый сигнал является двоичным (т.е. имеет два уровня напряжения), то скорость передачи данных, которая может поддерживаться при полосе  $B$  Гц, равна  $2B$  бит/с. В качестве примера рассмотрим телефонный канал, который используется для передачи цифровых данных с помощью модема. Предположим, что ширина полосы равна 3100 Гц. В этом случае пропускная способность  $C$  канала составляет  $2B = 6200$  бит/с. Впрочем, как будет показано в главе 6, можно применять сигналы более чем с двумя уровнями напряжения; т.е. каждая сигнальная посылка может представлять несколько битов. Если, например, в качестве сигналов используются четыре возможных уровня напряжения, то каждая сигнальная посылка может представлять два бита. При многоуровневой передаче данных формула Найквиста принимает следующий вид:

$$C = 2B \log_2 M,$$

где  $M$  — количество дискретных сигналов или уровней напряжения. Следовательно, для  $M = 8$ , как в некоторых модемах, пропускная способность равна 18 600 бит/с.

Итак, при заданной ширине полосы скорость передачи данных может быть увеличена за счет увеличения количества различных элементов сигнала. Впрочем, при таком подходе на приемник ложится дополнительная нагрузка: в каждый момент приемник должен распознавать уже не два, а  $M$  возможных элементов сигнала. Кроме того, на практике величину  $M$  ограничивают помехи и прочие искажения сигнала, возникающие в линии передачи.

## Формула Шеннона для пропускной способности

Из формулы Найквиста видно, что при неизменных остальных параметрах удвоение ширины полосы удваивает скорость передачи данных. Рассмотрим теперь связь между скоростью передачи данных, шумом и уровнем ошибок. Наличие шума может привести к повреждению одного или нескольких битов. При увеличении скорости

---

<sup>3</sup> Искажение, вызванное запаздыванием, возникает, когда задержка распространения сигнала по передающей среде неодинакова для различных частотных составляющих этого сигнала.

передачи данных биты становятся “короче”, поэтому при данном шуме поражается уже большее количество битов. Следовательно, чем выше скорость передачи данных при определенном уровне шума, тем выше уровень ошибок.

Пример воздействия шума на цифровой сигнал показан на рис. 2.9. Здесь шум складывается из фоновых помех относительно умеренного уровня и случайных всплесков импульсных помех. Цифровую информацию можно восстановить из сигнала путем дискретизации полученной формы сигнала, т.е. ее измерения через определенные промежутки времени. Как легко увидеть, случайного шума достаточно для изменения 1 на 0 или 0 на 1.

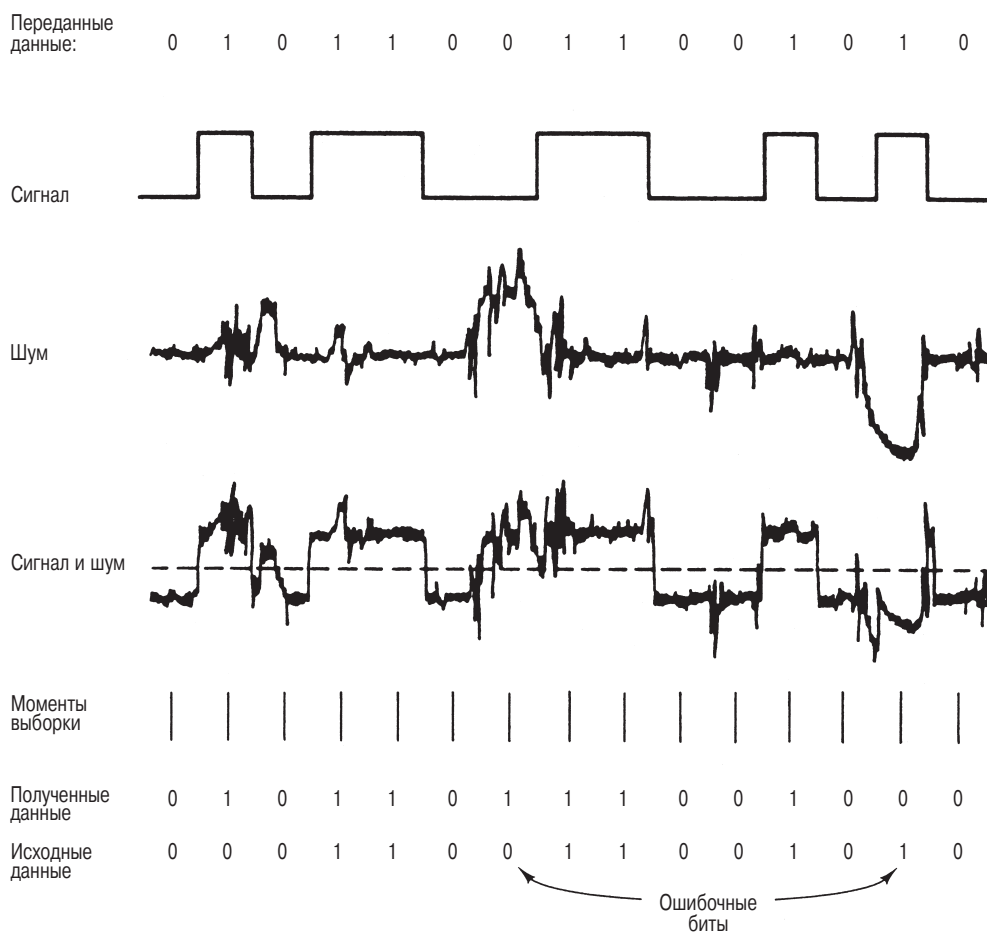


Рис. 2.9. Воздействие шума на цифровой сигнал

Все упомянутые выше понятия можно явно связать формулой, выведенной математиком Клодом Шенноном (Claude Shannon). Как мы только что показали, чем выше скорость передачи данных, тем больший ущерб может нанести нежелательный шум. При данном уровне шума следует ожидать, что сигнал большей интенсивности имеет больше шансов прибыть по назначению неповрежденным. Ключевым параметром, присутствующим в этих рассуждениях, является отно-

шение сигнал/шум (signal-to-noise ratio — SNR или S/N<sup>4</sup>). Оно представляет собой отношение мощности сигнала к мощности шума, присутствующего в определенный момент передачи. Как правило, данное отношение измеряется в приемнике, поскольку именно в этой точке предпринимается попытка обработать сигнал и устранить нежелательный шум. Для удобства это отношение часто представляется в децибелах:

$$\text{SNR}_{\text{дб}} = 10 \lg \frac{\text{мощность сигнала}}{\text{мощность шума}}.$$

Данная формула в децибелах выражает превышение уровня сигнала над уровнем шума. Большое значение этого отношения свидетельствует о высоком качестве сигнала и, следовательно, необходимости введения меньшего числа промежуточных ретрансляторов.

Отношение сигнал/шум довольно важно при передаче цифровых данных, поскольку оно задает верхнюю границу возможной скорости передачи. Для максимальной пропускной способности канала Шенноном был получен следующий результат:

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

где  $C$  — пропускная способность канала в битах в секунду, а  $B$  — ширина полосы канала в герцах. Сама формула Шеннона дает теоретически достижимый максимум. На практике, однако, достигаются значительно меньшие скорости передачи данных. Одной из причин этого является то, что в формуле учитывается только белый шум (т.е. тепловой) и не учитываются импульсные помехи, амплитудные искажения или искажения, вызванные запаздыванием.

Пропускная способность, выведенная в предыдущей формуле, называется *безошибочной*. Шеннон доказал, что если действительная скорость передачи данных по каналу меньше безошибочной пропускной способности, то при использовании соответствующих сигнальных кодов теоретически можно добиться безошибочной передачи данных по каналу. К сожалению, теорема Шеннона не дает способа нахождения таких кодов, но она дает критерий измерения производительности реальных схем связи.

Приведем несколько поучительных наблюдений, касающихся данной формулы. Кажется, что при фиксированном уровне шума скорость передачи данных можно увеличить за счет увеличения ширины полосы или интенсивности сигнала. Стоит отметить, впрочем, что при увеличении интенсивности сигнала в системе возникают нелинейные эффекты, приводящие к увеличению интермодуляционных помех. Кроме того, поскольку шум считается белым, то более широкая полоса предполагает введение в систему большего шума. Поэтому при увеличении ширины полосы  $B$  отношение сигнал/шум уменьшается, а не увеличивается.

---

<sup>4</sup> В некоторых источниках используется обозначение SNR, а в других — S/N. Кроме того, в отдельных случаях такая величина, если она безразмерна, обозначается SNR или S/N, а если выражена в децибелах — SNR<sub>дб</sub> или S/N<sub>дб</sub>. Иногда обозначение SNR или S/N применяется и для величины в децибелах. В данной книге мы будем использовать SNR и SNR<sub>дб</sub>.

**Пример.** Рассмотрим пример, относящийся к формулам и Найквиста, и Шеннона. Предположим, что спектр канала простирается от 3 до 4 МГц, а отношение сигнал/шум (SNR) составляет 24 дБ. Тогда

$$\begin{aligned}B &= 4 \text{ МГц} - 3 \text{ МГц} = 1 \text{ МГц}, \\ \text{SNR}_{\text{дБ}} &= 24 \text{ дБ} = 10 \lg (\text{SNR}), \\ \text{SNR} &= 251.\end{aligned}$$

Используем формулу Шеннона

$$C = 10^6 \times \log_2 (1 + 251) \approx 10^6 \times 8 = 8 \text{ Мбит/с}.$$

Это теоретический предел и, как уже говорилось, достичь его нереально. Предположим, впрочем, что мы его достигли. Сколько, по формуле Найквиста, для этого потребуется уровней сигнала? Получаем

$$\begin{aligned}C &= 2B \log_2 M, \\ 8 \times 10^6 &= 2 \times (10^6) \times \log_2 M, \\ 4 &= \log_2 M, \\ M &= 16.\end{aligned}$$

## 2.4. ПЕРЕДАЮЩИЕ СРЕДЫ

В системе передачи данных **передающая среда** является физическим путем между передатчиком и приемником. Передающие среды можно разделить на направляемые и ненаправляемые. В обоих случаях связь принимает форму распространения электромагнитных волн. В **направляемых средах** волны направляются по твердым проводникам, например, по медным витым парам, медным коаксиальным кабелям и оптическим волокнам. Атмосфера и открытый космос представляют собой примеры уже **ненаправляемых сред**, предоставляющих средства передачи электромагнитных сигналов, но не направляющих их; используемая в этом случае форма передачи обычно называется **беспроводной**.

Характеристики и качество передачи данных определяются как характеристиками среды, так и характеристиками сигнала. В направляемой среде более важным фактором, накладывающим ограничения на передачу, является сама среда. При определении характеристик передачи в ненаправляемой среде более важным фактором является не сама среда, а ширина полосы сигнала, генерируемого передающей антенной. Одной из ключевых характеристик сигналов, передаваемых антенной, является их направленность. В общем случае сигналы низких частот являются ненаправленными, т.е. сигнал распространяется во всех направлениях от антенны. Сигналы высоких частот, наоборот, можно сфокусировать в направленный луч.

На рис. 2.10 изображен спектр электромагнитных волн и обозначены частоты, на которых функционируют различные направляемые среды, и указаны методы ненаправленной передачи.<sup>5</sup> В остальной части этого раздела мы дадим краткий обзор ненаправляемых или беспроводных сред.

---

<sup>5</sup> Обратите внимание на логарифмический масштаб. Базовые сведения об этом масштабе приводятся в обзоре основных разделов математики на Web-сайте ресурсов для студентов компьютерных специальностей по адресу: [WilliamStallings.com/StudentSupport.html](http://WilliamStallings.com/StudentSupport.html).

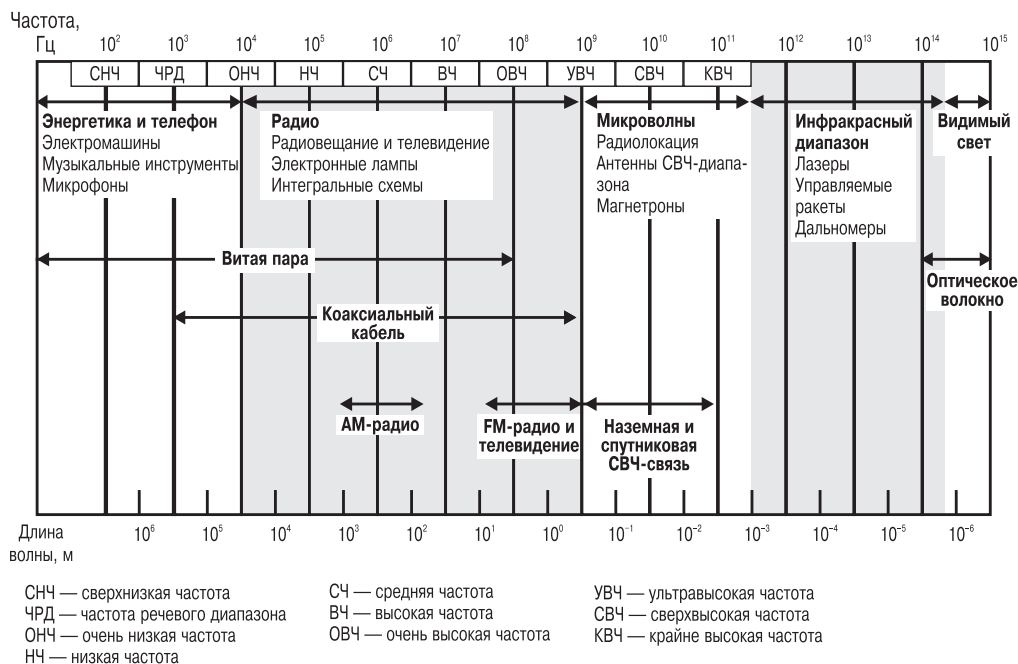


Рис. 2.10. Электромагнитный спектр телекоммуникационных технологий

В ненаправляемых средах передача и прием производятся с помощью антенны. При передаче антенна излучает электромагнитную энергию в среду (обычно воздух), а при приеме антенна улавливает электромагнитные волны из окружающей среды. Существуют, по сути, две формы беспроводной передачи: направленная и ненаправленная. При направленной передаче передающая антенна излучает сфокусированный электромагнитный луч; следовательно, передающая и приемная антенны должны быть тщательно нацелены. При ненаправленной передаче передаваемый сигнал распространяется во всех направлениях и может быть принят множеством антенн. Вообще чем выше частота сигнала, тем легче его сфокусировать в направленный луч.

Для нас представляют интерес три основных диапазона частот, в которых можно вести беспроводную передачу. Частоты в диапазоне от 2 ГГц (1 ГГц =  $10^9$  Гц) до 40 ГГц называются **сверхвысокими частотами (СВЧ)**. На этих частотах возможно создание узконаправленных лучей, сверхвысокие частоты также вполне подходят для двухточечной передачи и используются в спутниковой связи. Для ненаправленной связи удобно использовать частоты из диапазона 30 МГц–1 ГГц. Этот диапазон частот мы будем называть диапазоном широковещательного радио.

Еще один важный для ближней связи диапазон частот — инфракрасная часть спектра. Она охватывает частоты приблизительно от  $3 \times 10^{11}$  до  $2 \times 10^{14}$  Гц. Передача в инфракрасном диапазоне полезна в приложениях ближней двухточечной и многоточечной связи в замкнутом пространстве, например комнате.

## Наземная связь с использованием СВЧ

### Физическое описание

Самым распространенным типом антенны СВЧ-диапазона является параболическая антенна. Ее диаметр обычно составляет около 3 м. Антенна жестко фиксируется и фокусирует узкий луч для передачи на приемную антенну, которая находится на расстоянии прямой видимости. Чтобы увеличить расстояние между антеннами СВЧ-диапазона, их обычно располагают на значительной высоте над землей. Такое расположение также способствует передаче сигнала над промежуточными препятствиями. Для передачи на дальние расстояния используется цепочка ретрансляционных вышек, а двухточечные СВЧ-каналы в пределах желаемого расстояния связываются в единые пучки.

### Применение

Основной отраслью применения систем наземной СВЧ-связи является служба дальней телекоммуникации, где системы этого типа представляют альтернативу использованию коаксиального кабеля или оптоволокна. При передаче на одинаковое расстояние средства СВЧ-связи требуют значительно меньшего числа усилителей или ретрансляторов, чем коаксиальный кабель, но, в то же время, эти средства позволяют передавать сигнал лишь на расстояние прямой видимости. СВЧ обычно используются как для передачи речи, так и для передачи телевизионного изображения.

Все интенсивнее СВЧ-связь начинает применяться еще в одной области, а именно — для создания коротких двухточечных каналов связи между зданиями. Такие каналы используются в локальных системах телевидения или для связи между локальными сетями. СВЧ-связь ближнего действия также может применяться в так называемых обходных приложениях: фирма может, например, установить СВЧ-канал для сообщения со средствами дальней связи в обход местной телефонной компании.

Существует еще две важных сферы применения СВЧ: сотовые системы и системы стационарного радиодоступа. О них речь пойдет в части III.

### Характеристики передачи

Передача в СВЧ-диапазоне покрывает значительную часть электромагнитного спектра. Для передачи обычно используются частоты от 2 до 40 ГГц. Чем выше используемая частота, тем шире возможная полоса и тем выше потенциальная скорость передачи данных. В табл. 2.2 показана ширина полос и скорость передачи данных нескольких типичных систем.

Таблица 2.2. Производительность типичных цифровых систем СВЧ-связи

Диапазон, ГГц	Ширина полосы, МГц	Скорость передачи данных, Мбит/с
2	7	12
6	30	90
11	40	135
18	220	274

Основным источником потерь в системах СВЧ-связи, как и в любых других передающих системах, является затухание. Для СВЧ (и радиочастот) величина потерь может быть выражена в следующем виде:

$$L = 10 \lg \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \text{ дБ}, \quad (2.1)$$

где  $d$  — расстояние,  $\lambda$  — длина волны, измеряемые в одних единицах. Следовательно, потери зависят от квадрата расстояния. В отличие от применения витой пары и коаксиального кабеля потери зависят от расстояния логарифмически (в децибелах — линейно). Следовательно, при использовании систем СВЧ-связи ретрансляторы или усилители могут располагаться реже, среднее расстояние между ними обычно равно 10–100 км. Другим источником искажений является интерференция. В связи с растущей популярностью СВЧ-связи зоны передачи перекрываются, и интерференция становится постоянной опасностью. По этой причине распределение частотных диапазонов строго регулируется.

Самым распространенным диапазоном систем дальней связи, является полоса частот от 4 до 6 ГГц. Вследствие увеличения загрузки этих частот начинает использоваться диапазон 11 ГГц. Следующий диапазон, 12 ГГц, применяется как составляющая систем кабельного телевидения. Каналы СВЧ-связи используются для доставки телесигналов к местным объектам абонентского телевидения; после чего сигналы распределяются по отдельным абонентам посредством коаксиального кабеля. Самые высокие частоты, входящие в СВЧ-диапазон, применяются в коротких двухточечных каналах связи между зданиями; как правило, с этой целью используется диапазон 22 ГГц. Высокие частоты менее пригодны для передачи на большие расстояния, так как подвержены значительному затуханию, но вполне подходят для передачи на короткие расстояния. Кроме того, на более высоких частотах можно обойтись меньшими и более дешевыми антеннами.

## Спутниковая связь с использованием СВЧ

### Физическое описание

Спутник связи является, по сути, ретрансляционной станцией волн СВЧ-диапазона. Он используется для соединения двух или большего числа наземных СВЧ-приемников/передатчиков, называемых наземными станциями. Спутник принимает передачи в одном частотном диапазоне (восходящий канал), усиливает или повторяет этот сигнал и передает его на другой частоте (нисходящий канал). Каждый орбитальный спутник работает с несколькими диапазонами частот, называемыми *транспондерными каналами*, или просто *транспондерами*.

### Применение

Спутниковую связь можно считать таким же важным технологическим прорывом, как и оптоволоконную связь. Перечислим важнейшие сферы применения спутниковой связи.

- Телевещание.
- Международное телефонное сообщение.
- Частные сети.



Широковещательная спутниковая связь великолепно подходит для распространения телевизионных сигналов и с этой целью широко используется в США и во всем мире. Телевизионная сеть, в ее традиционном понимании, предусматривает централизованное распространение программ. Программы передаются на спутник, а затем транслируются на станции, которые распространяют их индивидуальным абонентам. Одна из трансляционных сетей США, PBS (Public Broadcasting Service), распространяет свои телевизионные программы практически исключительно по спутниковым каналам. Другие коммерческие компании также в значительной степени используют спутники, кроме того, в системах кабельного телевидения постоянно растет количество программ, получаемых со спутников. Новейшим применением спутниковой технологии в телевидении являются спутники непосредственного вещания (Direct Broadcast Satellite — DBS), в которых видеосигналы со спутника передаются непосредственно конечному пользователю. Снижение цен и размеров приемных антенн сделало использование спутников непосредственного вещания экономически оправданным, значительное количество каналов, использующих такие спутники, уже эксплуатируется или находится в стадии планирования.

Передача через спутник также используется для создания двухточечных магистралей между телефонными станциями в общедоступных телефонных сетях. Эта среда является оптимальной для загруженных магистралей и соперничает с наземными системами во многих протяженных международных каналах связи.

Наконец, спутники могут использоваться и в коммерческих целях. Поставщик спутника может распределить его пропускную способность на несколько каналов и сдать эти каналы в аренду отдельным коммерческим пользователям. Пользователь, имеющий антенны в определенных городах, создает частную сеть на основе спутникового канала. Такое применение спутников достаточно дорого и доступно только крупным организациям, которым требуется передавать большие объемы информации.

### **Характеристики передачи**

Для спутниковой передачи оптимален диапазон частот от 1 до 10 ГГц. На частотах меньше 1 ГГц имеются значительные помехи от естественных источников, в том числе помехи космического происхождения, солнечные, атмосферные, а также помехи со стороны различных электронных устройств. На частоте выше 10 ГГц велико поглощение сигнала атмосферой и атмосферными осадками.

Большинство современных спутников, предоставляющих услуги двухточечной связи, использует при передаче с земли на спутник (восходящий канал) полосу частот от 5,925 до 6,425 ГГц, а при передаче со спутника на землю (нисходящий канал) полосу частот от 3,7 до 4,2 ГГц. Эта комбинация носит общее название диапазона 4/6 ГГц. Отметим, что частоты, используемые в восходящем и нисходящем каналах, различны. Чтобы обеспечить продолжительную работу без интерференции, частоты приема и передачи должны быть разными. Поэтому сигналы, полученные с наземной станции на одной частоте, должны возвращаться уже на другой частоте.

Диапазон 4/6 ГГц входит в оптимальную зону от 1 до 10 ГГц, но этот диапазон уже переполнен. Вследствие наличия источников помех, действующих на остальных частотах оптимальной зоны (особенно это относится к наземным станциям, использующим СВЧ), использование этих частот невозможно. Поэтому был разработан

диапазон 12/14 ГГц (восходящий канал: 14–14,5 ГГц; нисходящий канал: 11,7–12,2 ГГц). В данном диапазоне частот требуется преодолевать проблемы затухания. Впрочем, можно использовать меньшие и более дешевые наземные приемники. Ввиду возможного заполнения и этого диапазона планируется использовать диапазон 19/29 ГГц (восходящий канал: 27,5–31,0 ГГц; нисходящий канал: 17,7–21,2 ГГц). В указанном диапазоне частот затухание увеличивается, но при этом имеется возможность использовать более широкую полосу (2500 МГц, а не 500 МГц), а также меньшие и более дешевые приемники.

Следует отметить некоторые особенности спутниковой связи. Во-первых, поскольку задействованы большие расстояния, то при передаче от одной наземной станции к другой возникает задержка распространения, составляющая около четверти секунды. Эта задержка заметна даже в обычных телефонных разговорах. Она также порождает проблемы в сферах защиты от ошибок и управления потоком данных, которые будут рассматриваться в последующих главах. Во-вторых, спутниковая связь с использованием СВЧ обеспечивает возможность широко вещания. Многие станции могут передавать на спутник, и передача со спутника может приниматься многими станциями.

## Широковещательное радио

### Физическое описание

Принципиальным различием между широковещательным радио и передачей с использованием СВЧ является то, что первое является ненаправленным, а последняя — направленной. Следовательно, широковещательное радио обходится без параболических антенн, а используемые антенны не требуется точно ориентировать.

### Применение

Термин *радио* используется для обозначения частот, входящих в диапазон от 3 кГц до 300 ГГц. При использовании нами неофициального термина *широковещательное радио* имеются в виду частоты метрового диапазона и часть диапазона ультравысоких частот: от 30 МГц до 1 ГГц. На этих частотах работают FM-радио, а также телевидение метрового и дециметрового диапазонов. Данный диапазон также используется в некоторых приложениях сетей передачи данных.

### Характеристики передачи

Для широковещательной связи эффективным является диапазон частот от 30 МГц до 1 ГГц. В отличие от распространения электромагнитных волн низкой частоты, ионосфера прозрачна для радиоволн с частотой выше 30 МГц. Поэтому передача на этих волнах ограничена расстоянием прямой видимости, и удаленные передатчики не будут интерферировать с другими из-за отражения сигнала от атмосферы. Отметим также, что в отличие от СВЧ волны широковещательного радио менее чувствительны к поглощению дождем.

Как и при СВЧ, зависимость поглощения от расстояния для радиоволн выражается формулой (2.1) и составляет  $10 \lg \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$ . Поскольку длина волны ра-

диапазона больше, чем в предыдущем случае, то, соответственно, затухание будет меньше.

Основным источником искажений при широкополосной связи является многолучевая интерференция. Вследствие отражения от поверхности земли, воды, а также естественных или искусственных объектов создаются разные пути прохождения сигнала между антеннами. Этот эффект часто наблюдается при появлении на экране телевизора множественных изображений, вызванных прохождением самолета.

## Связь в инфракрасном диапазоне

Для связи в инфракрасном диапазоне используются приемники/передатчики (трансиверы), модулирующие некогерентный инфракрасный свет. Трансиверы либо должны сами находиться в пределах прямой видимости, либо должно использоваться отражение от светлоокрашенной поверхности, например потолка комнаты.

Одним из важных различий связи в инфракрасном диапазоне и СВЧ-диапазоне является то, что лучи, используемые в первом случае, не проникают сквозь стены. Следовательно, интерференция и проблемы конфиденциальности, имеющиеся в СВЧ-системах, в данном случае отсутствуют. Более того, с инфракрасным диапазоном не связаны проблемы, касающиеся выделения частот, так как для использования этого диапазона лицензии не требуется.

## 2.5. УПЛОТНЕНИЕ

Как при локальной, так и при дальней связи почти всегда оказывается, что пропускная способность передающей среды больше, чем необходимо для передачи отдельного сигнала. Для повышения эффективности системы среде следовало бы передавать несколько сигналов. Такое совместное использование передающей среды называется *уплотнением*.

На рис. 2.11 показана функция уплотнения в ее простейшей форме. Мультиплексор (устройство уплотнения) имеет  $n$  входов. Далее мультиплексор соединяется одним каналом связи с демультиплексором (устройством разуплотнения). Канал связи может содержать  $n$  отдельных информационных каналов. Мультиплексор объединяет (уплотняет) данные из  $n$  входных линий и передает их по каналу связи высокой емкости. Демультиплексор принимает уплотненный поток данных, распределяет (разуплотняет) данные по информационным каналам и доставляет их на соответствующие выходные линии.

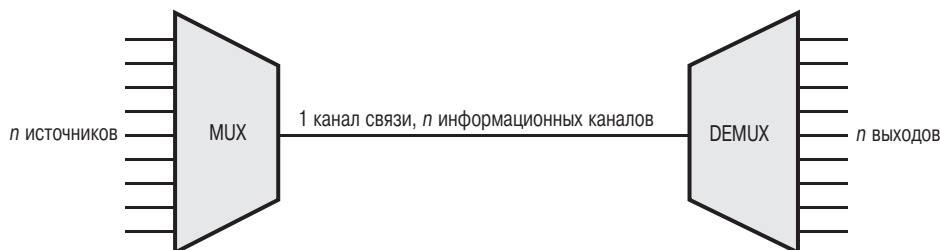


Рис. 2.11. Уплотнение

Широкое использование уплотнения в технологиях передачи данных можно объяснить наличием следующих преимуществ.

1. Более высокая скорость передачи данных, более рентабельное использование средства связи. Иначе говоря, для данной системы и на данном расстоянии стоимость передачи 1 Кбит/с снижается с увеличением скорости передачи средства связи. Соответственно, снижается стоимость аппаратуры передачи-приема с увеличением скорости передачи данных.
2. Большинству отдельных устройств передачи данных требуется поддержание относительно невысокой скорости передачи. Например, для многих терминальных и компьютерных приложений обычно более чем достаточно скорости передачи данных 64 Кбит/с.

Вышеизложенное сформулировано для устройств передачи цифровой информации, но приведенные утверждения относятся и к средствам передачи речи. Иначе говоря, чем выше пропускная способность средства связи (для телефонных каналов), тем ниже стоимость отдельного канала, а пропускная способность, необходимая отдельному телефонному каналу, незначительна.

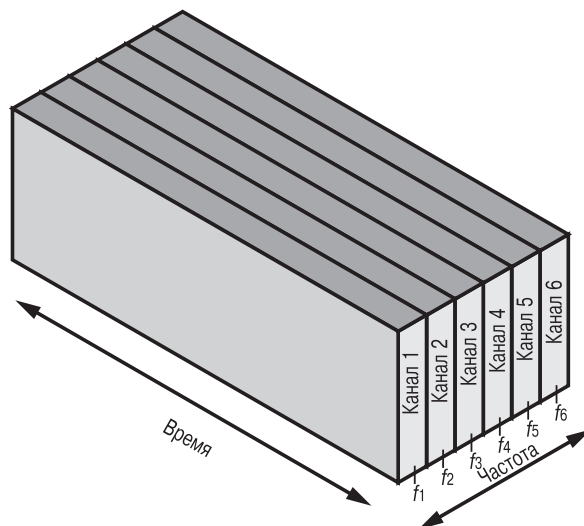
В сфере телекоммуникации широко распространены два метода уплотнения: **уплотнение с частотным разделением** (Frequency-Division Multiplexing — FDM) и **уплотнение с временным разделением** (Time-Division Multiplexing — TDM).

Уплотнение с частотным разделением, или просто частотное уплотнение, возможно в том случае, если полезная ширина полосы пропускания передающей среды превышает ширину полосы данного сигнала. Если все сигналы будут модулированы разными несущими частотами, достаточно удаленными друг от друга, так, чтобы полосы сигналов не перекрывались, можно будет передавать несколько сигналов одновременно. Простой пример такой передачи показан на рис. 2.12, а. Сигналы от шести различных источников подаются в мультиплексор, где они модулируются на шести различных несущих частотах ( $f_1, \dots, f_6$ ). Каждый модулированный сигнал требует определенной полосы, centered на несущей частоте (такая полоса называется **каналом**). Для предотвращения интерференции каналы разделяются **защитными полосами** частот — неиспользуемыми участками спектра. На рисунке эти полосы не показаны.

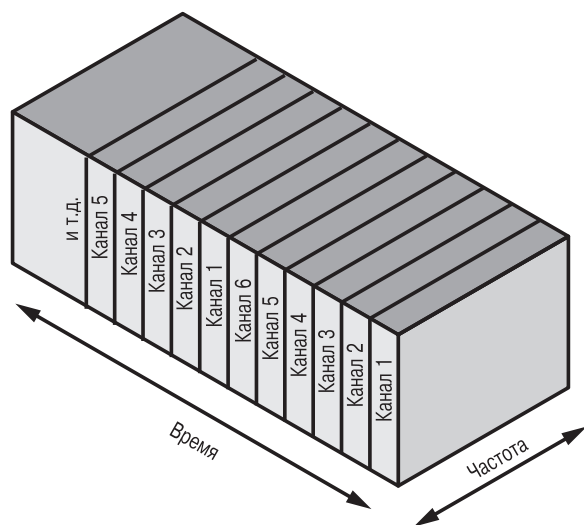
В качестве примера можно привести уплотнение речевых сигналов для телефонной связи. Мы уже указывали, что полезный спектр речи — от 300 до 3400 Гц. Таким образом, в полосе шириной 4 кГц помещается речевой сигнал и достаточная защитная полоса. Как в Северной Америке (стандарт Bell Systems), так и во всем мире (стандарт ITU-T) стандартная схема уплотнения речевых сигналов — двенадцать телефонных каналов по 4 кГц каждый, занимающих частоты от 60 до 108 кГц. Для каналов связи более высокой емкости обоими стандартами определяются дальнейшие уровни группирования каналов по 4 кГц.

Уплотнение с временным разделением возможно в том случае, если доступная скорость передачи данных (иногда ошибочно называемая шириной полосы) передающей среды превышает требуемую скорость передачи цифровых сигналов. Чередую фрагменты отдельных сигналов во времени, можно передавать по одному каналу много цифровых сигналов. Чередувание может быть побитовым, или же чередоваться могут целые блоки байтов. Например, мультиплексор, изображенный на рис. 2.12, б, имеет шесть входов, на каждый из которых подается информация со скоростью, скажем, 9,6 Кбит/с.

В этом случае для передачи данных от всех шести источников необходим канал с пропускной способностью не менее 57,6 Кбит/с. Как и при частотном уплотнении, последовательность временных интервалов, выделенная для отдельного источника, называется каналом. Цикл временных интервалов (по одному на каждый источник) называется кадром.



а) Уплотнение с частотным разделением



б) Уплотнение с временным разделением

Рис. 2.12. Частотное и временное уплотнение

Схема временного уплотнения, показанная на рис. 2.12, б, называется также синхронным временным уплотнением, поскольку временные интервалы установлены заранее и фиксированы. Асинхронное временное уплотнение, напротив, позволяет динамически изменять распределение времени между разными источниками. Далее, если явно не указано иное, под временным уплотнением мы будем подразумевать именно синхронное временное уплотнение.

Общее описание системы с синхронным временным уплотнением приведено на рис. 2.13. Требуется уплотнить в одной передающей среде набор сигналов  $[m_i(t), i = 1, n]$ . Эти сигналы — носители цифровой информации, и, в общем случае, они являются цифровыми. Данные, поступающие из каждого источника, временно заносятся в буфер. Размер каждого буфера равен, как правило, одному биту или одному символу. Буфера последовательно просматриваются, и из их содержимого формируется составной цифровой поток данных  $m_c(t)$ . Данная операция производится достаточно быстро, чтобы каждый буфер мог очиститься перед поступлением последующих данных. Следовательно, скорость передачи данных  $m_c(t)$  должна быть не меньше суммы скоростей передачи источников  $m_i(t)$ . Цифровой сигнал  $m_c(t)$  может быть либо передан в исходном виде, либо пропущен через модем и преобразован в аналоговую форму. В любом случае передача обычно является синхронной.

Формат переданных данных может быть подобен формату, представленному на рис. 2.13, б. Данные сгруппированы в кадры, каждый из которых содержит цикл временных интервалов, или слотов. В каждом кадре каждому источнику данных выделяется один или несколько слотов. Последовательность слотов различных кадров, относящихся к одному источнику, называется каналом. Размер слота равен размеру буфера передатчика и составляет, как правило, один бит или байт (символ).

При наличии асинхронных источников можно использовать метод чередования битов. Каждый временной интервал содержит один информационный символ. Обычно стартовый и стоповый биты каждого символа удаляются перед передачей и повторно вводятся в приемнике (это делается для повышения эффективности). Технология чередования битов используется как с синхронными, так и с асинхронными источниками. В этом случае каждый временной интервал содержит один бит.

В приемнике чередующиеся данные разуплотняются и направляются в соответствующий буфер назначения. Каждому входному источнику  $m_i(t)$  соответствует собственный выходной источник, принимающий данные с той же скоростью, с которой они генерировались.

Синхронное временное уплотнение называется синхронным не потому, что используется синхронная передача, а потому, что распределение временных интервалов по источникам является заранее установленным и фиксированным. Временные интервалы, соответствующие каждому источнику, передаются вне зависимости от того, есть ли у этого источника данные для передачи. Разумеется, это происходит и при использовании частотного уплотнения. В обоих случаях пропускная способность канала связи используется не полностью, зато мы выигрываем с точки зрения простоты реализации. Впрочем, даже при фиксированном распределении слотов устройства с синхронным временным уплотнением могут работать с источниками, имеющими разные скорости передачи данных.