Глава 3

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

3.1. СИГНАЛЫ

3.1.1. Понятие сигнала

Любая сетевая технология должна обеспечить надежную и быструю передачу дискретных данных по линиям связи. И хотя между технологиями имеются большие различия, они базируются на общих принципах передачи данных. Эти принципы находят свое воплощение в методах представления двоичных единиц и нулей с помощью сигналов в линиях связи различной физической природы, методах обнаружения и коррекции ошибок, методах коммутации и т.д.

Понятие «сигнал» имеет неоднозначное толкование. **В широком смысле** слова под **сигналом** понимают материальный носитель информации. Понятие «сигнал», если это не оговорено специально, будет использоваться **в узком смысле** как **сигнал**, специально создаваемый для передачи сообщения в информационной системе. Основу сигнала составляет какой-либо физический объект или процесс, называемый **носителем** (переносчиком) информации (сообщения). Носитель становится сигналом в процессе модуляции. Параметры носителя, изменяемые во времени в соответствии с передаваемым сообщением, называют **информативными**.

3.1.2. Формы представления детерминированных сигналов

В зависимости от структуры информационных параметров сигналы подразделяют на дискретные, непрерывные и дискретно-непрерывные.

Сигнал считают **дискретным** по данному параметру, если число значений, которое может принимать этот параметр, конечно (или счетно). Если множество возможных значений параметра образует континиум, то сигнал считают **непрерывным** по данному параметру. Сигнал, дискретный по одному параметру и непрерывный — по другому, называют **дискретно-непрерывным**.

В соответствии с этим существуют следующие разновидности **математических представлений (моделей) детерминированного сигнала**:

- непрерывная функция непрерывного аргумента, например непрерывная функция времени (рис. 3.1, *а*);

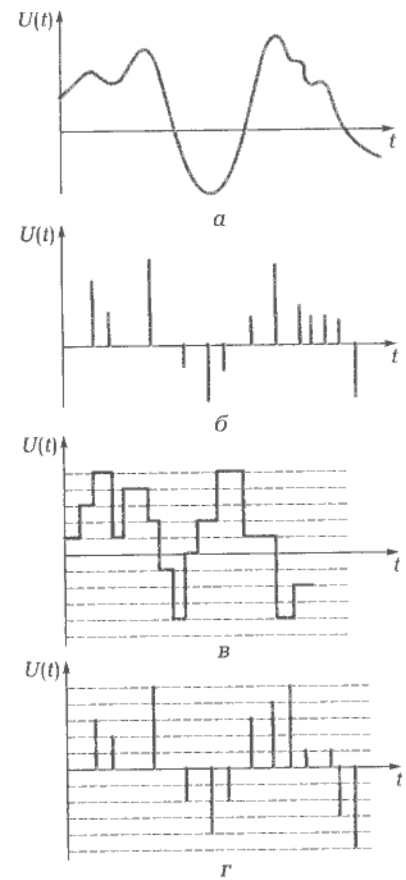

Рис. 3.1. Разновидности представлений детерминированного сигнала

- непрерывная функция дискретного аргумента, например функция, значения которой отсчитывают только в определенные моменты времени (рис. 3.1, *б*);
- дискретная функция непрерывного аргумента, например функция времени, квантованная по уровню (рис. 3.1, *в*);
- дискретная функция дискретного аргумента, например функция, принимающая одно из конечного множества возможных значений (уровней) в определенные моменты времени (рис. 3.1, *г*).

3.1.3. Классификация сигналов

Сигнал — физический процесс, адекватно отображающий передаваемое сообщение.

Физической величиной, определяющей сигнал, выступает напряжение или ток.

С информационной точки зрения сигналы разделяют на детерминированные и случайные. **Детерминированным** называется сигнал, значение которого в любой момент времени можно предсказать с вероятностью, равной единице. **Случайным** называется сигнал, мгновенные значения которого заранее неизвестны и могут быть предсказаны с вероятностью меньше единицы. Любой сигнал, несущий информацию, должен рассматриваться как случайный. С другой стороны, к случайным сигналам относятся помехи и шумы.

Как детерминированные, так и случайные сигналы могут быть непрерывными и дискретными. **Непрерывным** называется сигнал, существующий в каждой точке некоторого временно́го интервала, произвольный по величине и непрерывный во времени. Поскольку такой сигнал аналогичен передаваемому сообщению, эти сигналы называют также **аналоговыми**. Аналоговые сигналы могут быть импульсными. **Импульсным** называется сигнал, отличный от нуля на некотором временном интервале и равный нулю вне этого интервала.

Иллюстрацией аналоговых сигналов являются видеоимпульс (ВИ) и радиоимпульс (РИ) с высокочастотным (ВЧ) заполнением (рис. 3.2):

$$u(t) = S(t)\cos(\omega_н t + \varphi_0),$$

где $S(t)$ — огибающая радиоимпульса; $\omega_н = 2\pi f_н$ — частота несущего колебания.

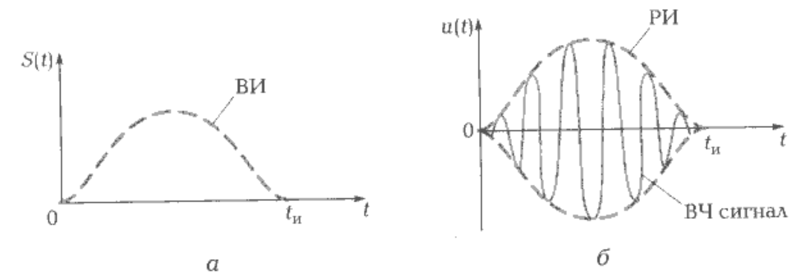

Рис. 3.2. Иллюстрация аналоговых сигналов:
а — видеоимпульс; *б* — радиоимпульс

Огибающая — геометрическое место точек, в которых мгновенные значения сигналов принимают экстремальные значения.

Дискретным называется сигнал, существующий только в фиксированные моменты времени, т.е. заданный в определенном множестве временны́х точек. Для других значений времени этот сигнал не определен. Любое значение дискретного сигнала называется отсчетом, или выборкой,

$$S = \{S(t_1), S(t_2), S(t_3), \ldots\}.$$

Значения дискретного сигнала в моменты t_1, t_2 и т.д. совпадают со значением исходного сигнала (рис. 3.3).

Цифровой сигнал — сигнал, дискретный во времени и квантованный по уровню.

Амплитуда цифрового сигнала может принимать в фиксированный момент времени одно значение из множества допустимых уровней. Число этих уровней (уровней квантования) определяется разрядностью цифрового устройства, обрабатывающего цифровой сигнал.

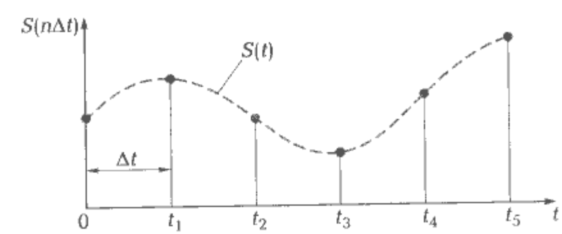

Рис. 3.3. Значения дискретного сигнала (отсчеты)

3.1.4. Динамическое представление сигналов

Для того чтобы сделать сигнал предметом теоретического исследования, необходимо указать способ математического описания, т.е. требуется создать математическую модель сигнала. В общем случае в качестве **математической модели сигнала** может выступать любая функциональная зависимость, аргументом которой является **время**.

Наиболее часто при составлении математической модели используется **динамическое представление сигналов**. Сущность этого метода состоит в том, чтобы реальный сигнал представить в виде суммы элементарных функций, возникающих в последовательные моменты времени.

Возможны **два способа динамического представления**:

1) представление сигнала в виде суммы элементарных ступенчатых функций (рис. 3.4). Высота «ступеньки» совпадает с приращением сигнала за время Δt;

2) представление сигнала в виде суммы элементарных импульсов прямоугольной формы (рис. 3.5).

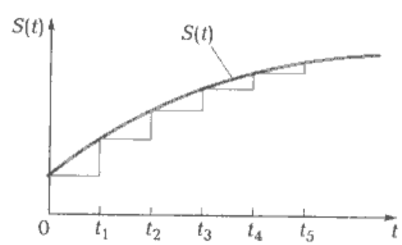

Рис. 3.4. Представление сигнала в виде суммы элементарных ступенчатых функций

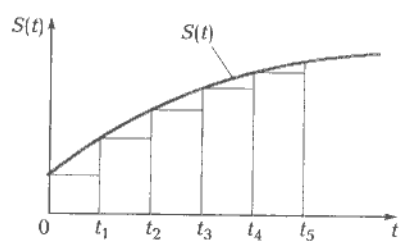

Рис. 3.5. Представление сигнала в виде суммы элементарных импульсов прямоугольной формы

Рассмотрим первый способ динамического представления сигналов. Он основан на использовании функции включения (единичной функции, функции Хевисайда)

$$1(t) = \sigma(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 1, & t \geq 0. \end{cases}$$

Единичная функция может быть задана со смещением относительно начала отсчета (рис. 3.6):

$$\sigma(t - t_0) = \begin{cases} 0, & t < t_0, \\ 1, & t \geq t_0. \end{cases}$$

На основе функции включения довольно просто описываются импульсные **сигналы прямоугольной формы**.

Сигнал произвольной формы может быть представлен с помощью следующего выражения:

$$S(t) = S(0)\sigma(t) + \int_{-\infty}^{t} S'(\tau)\sigma(t - \tau)d\tau.$$

Второй способ динамического представления основан на понятии δ-функции (функции Дирака), которая выглядит так:

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ \infty, & t = 0, \\ 0, & t > 0. \end{cases}$$

Смещенная δ-функция (рис. 3.7) имеет следующий вид:

$$\delta(t - t_0) = \begin{cases} 0, & t < t_0, \\ \infty, & t = t_0, \\ 0, & t > t_0. \end{cases}$$

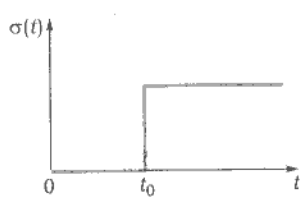

Рис. 3.6. Единичная функция со смещением относительно начала отсчета

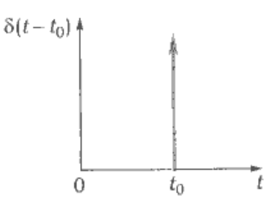

Рис. 3.7. Смещенная δ-функция

Таким образом, δ-функция всегда равна нулю, за исключением точки $t = t_0$, при которой ее значение становится равным ∞.

Рассмотрим **свойства δ-функции**.

1. Площадь под δ-функцией равна единице:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t)dt = 1.$$

Если произвольную функцию $S(t)$ умножить на $\delta(t)$ и результат проинтегрировать, то значение интеграла будет равно значению функции $S(t)$ в той точке, где сосредоточен δ-импульс:

$$\int_{-\infty}^{\infty} S(t)\delta(t)dt = S(0), \quad \int_{-\infty}^{\infty} S(t)\delta(t-t_0)dt = S(t_0).$$

В этом состоит фильтрующее свойство δ-функции.

2. Размерность δ-функции совпадает с размерностью частоты [1/c] = [Гц].

3.1.5. Модуляция

Сигналы, поступающие от источника сообщения, не могут быть переданы по каналу. Основная причина заключается в их низкочастотности. Для эффективного излучения электромагнитных волн требуются высокочастотные колебания.

Высокочастотное колебание, которое переносит полезный сигнал, — это **несущее колебание**.

Процесс изменения параметров несущего колебания по закону передаваемого сообщения называется **модуляцией**, а устройство, выполняющее эту функцию, — **модулятором**.

В качестве несущего колебания используется **гармоническое колебание.**

В общем виде модулированный сигнал может быть представлен в следующем виде:

$$u(t) = A(t)\cos\left[\omega t + \varphi(t)\right],$$

где $A(t)$ — амплитуда сигнала, дБ; ω — частота сигнала, Гц; $\varphi(t)$ — фаза сигнала. Эти величины являются основными параметрами сигнала. Если при неизменных частоте и фазе переменной оказывается амплитуда сигнала $A(t)$, то получается **амплитудно-модулированное** (АМ) колебание. Если при неизменных амплитуде и фазе

переменной оказывается частота сигнала ω, то получается **частотно-модулированное** (ЧМ) колебание. Если при неизменных амплитуде и частоте переменной оказывается фаза сигнала $\varphi(t)$, то получается **фазомодулированное** (ФМ) колебание.

Виды модуляции бывают непрерывные и дискретные. При **дискретной** модуляции различают амплитудно-, фазо- и частотно-модулированные сигналы.

3.1.6. Преимущества цифровой формы представления сигналов. Равномерная дискретизация. Теорема Котельникова

В связи с широким внедрением цифровой техники непрерывные сигналы, как правило, преобразуются в дискретные. С этой целью каждый непрерывный сигнал подвергается операциям дискретизации по времени и уровню.

Дискретизация — преобразование функции непрерывного времени в функцию дискретного времени, представляемую совокупностью величин, которые называют координатами и по значениям которых исходная непрерывная функция может быть восстановлена с заданной точностью.

Роль координат выполняют мгновенные значения функции, отсчитанные в определенные моменты времени.

Квантование — преобразование некоторой величины с непрерывной шкалой значений в величину, имеющую дискретную шкалу значений. Оно сводится к замене любого мгновенного значения одним из конечного множества разрешенных значений, называемых **уровнями квантования**.

Изменение вида сигнала $u(t)$ (рис. 3.8, *а*) в результате проведения операции дискретизации показано на рис. 3.8, *б*, а в результате совместного проведения операций дискретизации и квантования — на рис. 3.8, *в*. Число уровней квантования на рис. 3.8, *в* равно восьми. Обычно их значительно больше. Передача такого множества различных по уровню импульсов даже на небольшие расстояния применяется редко. Если провести нумерацию уровней, то их передача сведется к передаче чисел. Выразив эти числа в какой-либо системе счисления, можно обойтись меньшим множеством передаваемых сигналов. Как правило, дискретный сигнал преобразуется в последовательность чисел, выраженных в двоичном коде. Каждое дискретное значение сигнала представляется в этом случае последовательностью сигналов двух уровней. Наличие

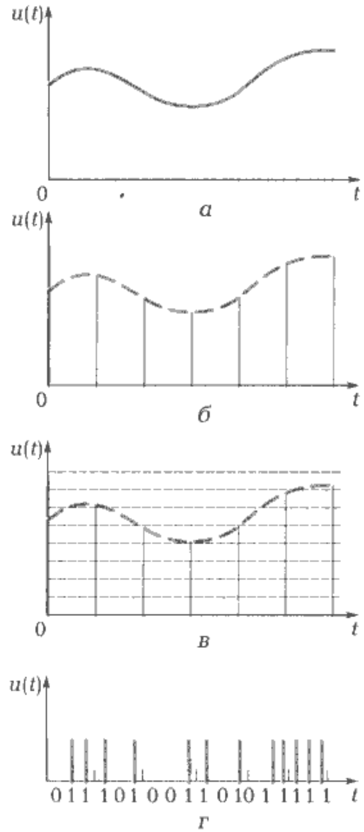

Рис. 3.8. Изменение вида сигнала $u(t)$ в результате проведения операции дискретизации

или отсутствие импульса на определенном месте интерпретируется единицей или нулем в соответствующем разряде двоичного числа.

Цифровая форма представления сигнала $u(t)$ (см. рис. 3.8, *а*) показана на рис. 3.8, *г*. Для восьми уровней достаточно трех двоичных разрядов.

При передаче и обработке информации в цифровой технике существует принципиальная возможность снижения вероятности получения ошибочного результата до весьма малых значений. Она возникает потому, что при использовании дискретных сигналов, во-первых, применимы такие методы кодирования, которые обеспечивают обнаружение и исправление ошибок, а во-вторых,

можно избежать свойственного аналоговым сигналам эффекта накопления искажений в процессе их передачи и обработки, поскольку квантованный сигнал легко восстановить до первоначального уровня всякий раз, когда величина накопленных искажений приблизится к половине кванта. Практическая реализация указанных методов наиболее эффективна при минимальном числе уровней, равном двум.

Широкое распространение получили методы дискретизации, при которых сигнал $u(t)$ заменяется совокупностью его мгновенных значений $u(t_j)$, взятых в определенные моменты времени t_j (j = 1, 2, ..., N) и называемых выборками или отсчетами. Отрезок времени $\Delta t_j = t_j - t_{j-1}$ между соседними выборками называют **шагом дискретизации**. Если он выдерживается постоянным во всем диапазоне преобразования, дискретизация считается равномерной, в противном случае — неравномерной.

При использовании метода дискретизации необходимо сформулировать критерий выбора отсчетов, установить процедуру восстановления по ним исходного сигнала и определить возникающую при этом погрешность. Решение указанных задач возможно лишь на базе выбора определенной математической модели дискретизируемого сигнала.

В вопросе определения величины шага при равномерной дискретизации известно несколько подходов, отличающихся тем, каким параметром характеризуются динамические свойства сигнала.

В теоретических исследованиях наибольшее распространение получила **модель сигналов в виде процесса**, каждая реализация которого представляет функцию с ограниченным спектром. Величина шага дискретизации в этом случае ставится в зависимость от наивысшей частоты спектра. Такой критерий выбора отсчетов принято называть **частотным**.

Правило выбора предельного шага при равномерной дискретизации с использованием модели сигнала с ограниченным спектром в наиболее четкой форме сформулировал и доказал В. А. Котельников в виде теоремы. Теорема устанавливает принципиальную возможность полного восстановления детерминированной функции с ограниченным спектром по ее отсчетам и указывает предельное значение интервала времени между отсчетами, при котором такое восстановление еще возможно.

Теорема Котельникова: функция $u(t)$, допускающая преобразование Фурье и имеющая непрерывный спектр, ограниченный полосой частот от 0 до $F_в = \omega_в/(2\pi)$, полностью определяется дискретным рядом своих мгновенных значений, отсчитанных через интервалы времени $\Delta t = 1/(2F_в)$.

Физическая основа теоремы выявляется при рассмотрении связи между формой функции и шириной ее спектра. Только тогда, когда спектр функции безграничен, ее значения в сколь угодно близкие моменты времени могут изменяться произвольно (корреляционная связь между ними отсутствует). Сокращение высокочастотной части спектра до граничной частоты равнозначно устранению из временной функции выбросов, которые могли быть сформированы этими высокочастотными составляющими. При меньших граничных частотах имеем более сглаженные функции времени. Поскольку значения этих функций в моменты времени $u(t_1)$ и $u(t_1+\Delta t)$ в пределах некоторого интервала Δt не могут изменяться существенно, можно ограничиться значениями функции, взятыми через интервалы Δt (отсчетами).

Таким образом, функция $u(t)$ может быть выражена через ее дискретные значения, взятые в моменты времени $t_n = n\Delta t = n\pi/\omega_в$:

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} u(n\Delta t)\frac{\sin\omega_в(t-n\Delta t)}{\omega_в(t-n\Delta t)},$$

где функции вида $\psi_n(t) = \dfrac{\sin\omega_в(t-n\Delta t)}{\omega_в(t-n\Delta t)}$ являются базисными и называются **функциями отсчетов**.

Так как при любых целых k и n справедливы соотношения

$$\omega_в(k\Delta t - n\Delta t) = (k-n)\omega_в\Delta t = (k-n)\pi,$$

то

$$\frac{\sin\omega_в(t-n\Delta t)}{\omega_в(t-n\Delta t)} = \begin{cases} 1 & \text{при } t = n\Delta t, \\ 0 & \text{при } t = k\Delta t, \quad k \neq n. \end{cases}$$

Благодаря этому свойству значения функции $u(k)$ в моменты времени $t_n = n\Delta t$ представляют собой не что иное, как ее отсчеты.

3.1.7. Теоретические и практические аспекты использования теоремы Котельникова

Процедура теоретического восстановления конкретной реализации $u(t)$ по ее отсчетам сводится к следующему.

На передающей стороне в исходной непрерывной функции $u(t)$ через интервалы времени Δt определяются мгновенные значения

$u(n\Delta t)$ и передаются в канал связи в виде δ-импульсов с амплитудами A_n и бесконечно малой длительностью τ, имеющих площади $A_n\tau$, равные $u(n\Delta t)$. На приемной стороне такая последовательность импульсов пропускается через идеальный фильтр нижних частот, у которого частота среза равна $F_в$. При длительной передаче сигнал на выходе фильтра будет точно воспроизводить переданный непрерывный сигнал $u(t)$.

При этом возникает ряд принципиальных трудностей. Во-первых, реальный сигнал имеет конечную длительность T и, следовательно, при представлении его в частотной области обладает неограниченным спектром. Однако в силу свойств реальных источников сигналов и ограниченности полосы пропускания реальных каналов спектр сигнала с той или иной степенью точности можно считать ограниченным некоторой предельной частотой $F_в$. Обычно она определяется на основе энергетического критерия. Спектр ограничивается областью частот от 0 до $F_в$, в которой сосредоточена подавляющая часть энергии сигнала (80...99 %). Такое ограничение спектра, естественно, приводит к искажению сигнала. Относительная точность воспроизведения сигнала γ может быть определена из соотношения

$$\gamma = \frac{\int_{\omega_в}^{\infty} S^2(\omega)d\omega}{\int_0^{\infty} S^2(\omega)d\omega} = \frac{P_е(\omega)}{P_с(\omega)},$$

где $P_е$ — энергия отброшенных высокочастотных составляющих сигнала; $P_с$ — полная энергия сигнала.

Таким образом, восстановление ограниченного во времени сигнала по отсчетам, полученным по теореме Котельникова при условии принудительного ограничения спектра сигнала, возможно только в приближенном виде.

Ошибка возникает не только за счет принудительного ограничения спектра, но и за счет конечного числа отсчетов в интервале времени T, которых в соответствии с теоремой Котельникова будет $2F_вT$. Эта составляющая является следствием пренебрежения вкладом бесконечного числа функций отсчета, соответствующих выборкам за пределами интервала T, и погрешностью восстановления исходной функции на интервале T по ограниченному числу членов ряда Котельникова.

Модель сигнала с ограниченным спектром имеет еще одно теоретическое неудобство: она не может отображать основное свойство сигнала — способность нести информацию. Причина — возможность теоретического предсказания поведения функции с ограниченным спектром на всей оси времени, если она точно известна на сколь угодно малом отрезке времени.

Указанные принципиальные трудности устраняются, если рассматривать теорему Котельникова как приближенную для функций с неограниченным спектром.

Вместе с тем предполагаемая процедура восстановления вносит весьма существенную дополнительную погрешность. Она возникает потому, что невозможно обеспечить создание импульсов бесконечно малой длительности, как невозможно осуществить их передачу по реальным каналам связи. Кроме того, максимум выходного сигнала, соответствующего реакции идеального фильтра низких частот на дельта-импульс, запаздывает на время, равное бесконечности. За конечное время T каждая функция отсчета, а следовательно, и их сумма, представляющая собой исходный непрерывный сигнал, будут сформированы лишь приближенно и тем грубее, чем меньше T.

3.1.8. Квантование сигналов. Шум квантования

Поскольку математической моделью непрерывного сигнала является случайный процесс $u(t)$, мгновенное значение сигнала $u = u(t_i)$ представляет собой случайную величину. Диапазон ее изменения, называемый **непрерывной шкалой мгновенных значений сигнала**, ограничен значениями $u_{\min}$ и $u_{\max}$, что отражает условие физической реализуемости сигнала.

Непрерывную шкалу мгновенных значений $u_n = u_{\max} - u_{\min}$ сигнала разбивают на n интервалов, называемых **шагами квантования**. Границами шагов квантования являются значения $u_0 = u_{\min}$, u_i, ..., u_{n-1}, $u_n = u_{\max}$. Из множества мгновенных значений, принадлежащих i-му шагу квантования ($u_{i-1} \le u < u_i$), только одно значение u_i' является разрешенным (i-й уровень квантования). Любое другое из указанного множества значений округляется до u_i'. Совокупность величин u_i' ($i = 1, 2, ..., n$) образует дискретную шкалу уровней квантования.

Если эта шкала равномерна, т.е. разность значений $\Delta u_i' = u_i' - u_{i-1}'$ постоянна на всем протяжении непрерывной шкалы мгновенных значений сигнала u, квантование называют **равномерным**. Если постоянство значений $\Delta u_i'$ не выдерживается, то квантование

неравномерное. Благодаря простоте технической реализации равномерное квантование получило наиболее широкое распространение.

В результате замены мгновенного значения сигнала u соответствующим уровнем квантования u_i' возникает погрешность $\delta_i = u - u_i'$, которую называют **ошибкой квантования**. Эта погрешность является случайной величиной. Чаще всего вызывает интерес ее максимальное значение $\delta_{\max} = \max|\delta_i|$ и среднеквадратическое отклонение σ для всего диапазона изменения мгновенных значений сигнала.

С позиций минимизации наибольшей возможной ошибки квантования непрерывную шкалу мгновенных значений сигнала целесообразно разбить на n одинаковых шагов квантования $\Delta = (u_{\max} - u_{\min})/n$ и уровни квантования разместить в середине каждого шага. При этом максимальная ошибка квантования не превышает $0{,}5\Delta$. Если каждый уровень квантования выбран равным нижней (верхней) границе шага квантования, максимальная ошибка квантования возрастает до величины Δ.

При квантовании сигнала по уровню случайный процесс заменяется ступенчатой зависимостью $u'(t)$. Изменяющуюся во времени ошибку квантования $\delta(t)$, также представляющую собой случайный процесс, называют **шумом квантования**:

$$\delta(t) = u(t) - u'(t).$$

Сохраняя ранее введенные предположения (о малости шага квантования и равномерности распределения в нем мгновенных значений сигнала) и считая случайные процессы $u(t)$ и $\delta(t)$ эргодическими, среднеквадратическую ошибку равномерного квантования σ можно определить по реализации $\delta(t)$. В пределах каждого шага квантования Δ зависимость $\delta(t)$ заменяется прямой $t\,\mathrm{tg}\beta$, где β — переменный угол наклона прямой. При размещении уровней квантования в середине каждого шага математическое ожидание ошибки квантования равно нулю, а ее среднеквадратическое значение определяется выражением

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} (t\,\mathrm{tg}\beta)^2\, dt}.$$

Так как $\mathrm{tg}\beta = \Delta/T$, то $\sigma = \Delta/2\sqrt{3}$.

При заданной допустимой среднеквадратической ошибке квантования и отсутствии помех число уровней квантования находится из соотношения

$$n = (u_{\max} - u_{\min}) / (2\sqrt{3}\sigma).$$

Однако при неравномерном законе распределения мгновенных значений сигнала квантование с постоянным шагом не является оптимальным по критерию минимума среднеквадратической ошибки σ.

3.2. МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ОТ ОШИБОК

3.2.1. Помехоустойчивое кодирование

При передаче данных по каналам связи существует вероятность появления ошибок. Причины могут быть самыми разными, но результатами являются искажение данных и невозможность их использования для дальнейшей обработки. Как правило, вероятность искажения бита в потоке передаваемой информации на уровне физического канала находится в пределах $10^{-6}...10^{-2}$. В то же время со стороны пользователей и многих прикладных процессов часто выдвигается требование к вероятности ошибок в принимаемых данных не хуже $10^{-12}...10^{-6}$. Борьба с возникающими ошибками ведется на разных уровнях семиуровневой модели OSI (в основном на физическом, канальном, сетевом и транспортном).

Известно много способов защиты информации от ошибок. Одним из путей решения данной задачи является использование специальных процедур, основанных на применении помехоустойчивых кодов.

Помехоустойчивые коды — коды, позволяющие обнаруживать и (или) исправлять ошибки в кодовых словах, которые возникают при передаче информации по каналам связи.

Для удобства ориентации в корректирующих кодах на рис. 3.9 приведена их **классификация**.

Помехоустойчивый код называется **блоковым**, если каждая его комбинация имеет ограниченную длину, и **непрерывным**, если его комбинация имеет неограниченную, а точнее, полубесконечную длину. Различия блоковых и непрерывных кодов связаны с принципиально различными способами их образования. В случае блоковых кодов процедура кодирования заключается в сопоставле-

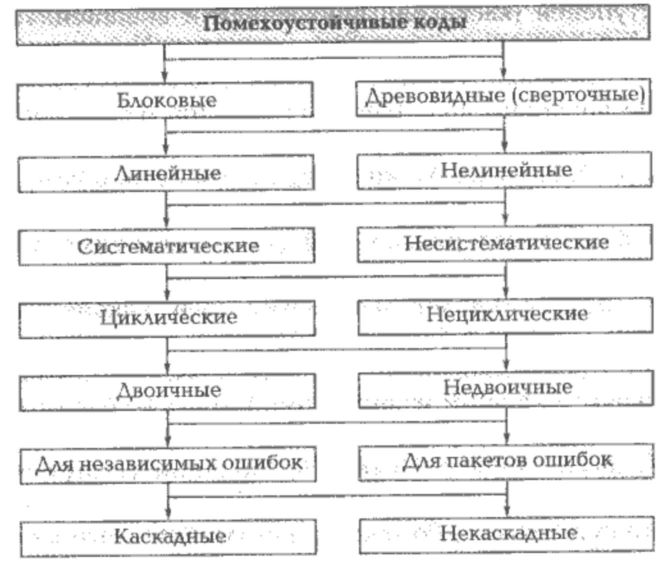

Рис. 3.9. Классификация помехоустойчивых кодов

нии каждой букве сообщения (или последовательности из k символов, соответствующей этой букве) блока из n символов. В операциях по преобразованию принимают участие только указанные k символов, и выходная последовательность не зависит от других символов в передаваемом сообщении. При образовании непрерывного кода устанавливается взаимно однозначное соответствие между достаточно длинными последовательностями информационных символов (без их деления на отрезки) и другими, более длинными последовательностями, которые и передаются по каналу. В случае непрерывных кодов введение избыточных символов в кодируемую последовательность информационных символов осуществляется непрерывно, без разделения ее на независимые блоки. И блоковые, и непрерывные коды делятся на разделимые и неразделимые.

Разделимыми называются коды, в каждой кодовой комбинации которых (ограниченной или неограниченной) можно указать позиции, занимаемые информационными и проверочными символами. **Неразделимыми** являются коды, в комбинациях которых символы нельзя разделить на информационные и проверочные.

Среди составных кодов особое значение имеют каскадные коды и коды произведения. **Каскадный код**, как правило, состоит из двух ступеней (каскадов): внутренней и внешней. По линии связи сигналы передают внутренним кодом $n_{\text{внутр}}$, символьные слова которого являются символами внешнего кода длины $n_{\text{внешн}}$. Основание внешнего кода равно $q^k_{\text{внешн}}$. При формировании каскадного кода входную информационную последовательность символов разбивают на блоки по $k_{\text{внутр}}$ символов в каждом, каждый блок сопоставляют с информационным символом внешнего кода из алфавита, содержащего $q^k_{\text{внутр}}$ значений символов. Затем $k_{\text{внешн}}$ информационных символов внешнего кода преобразуют в блоки из $n_{\text{внешн}}$ символов внешнего кода и, наконец, блоки из $k_{\text{внутр}}$ информационных символов внутреннего кода преобразуют в блоки из $n_{\text{внутр}}$ символов внутреннего кода. Возможны различные варианты: внешний и внутренний коды — блочные; внешний — блочный, а внутренний — сверточный; внешний — сверточный, а внутренний — блочный; внешний и внутренний — сверточные. **Коды произведения** строят в виде матрицы, в которой строки суть слова одного кода, а столбцы — того же или другого кода. Один из наиболее распространенных методов формирования кода произведения заключается в последовательной записи по k_1 символов входной информационной последовательности в k_2 строк матрицы, добавлении избыточных символов по $n_1 - k_1$ в каждую строку и по $n_2 - k_2$ в каждый столбец, после чего последовательность символов кода считывают по строкам или столбцам из матрицы.

Производные коды строят на основе некоторого исходного кода, либо к нему добавляют символы (расширенный код), либо сокращают часть информационных символов (укороченный код), либо выбрасывают (выкалывают) некоторые символы (перфорированный код).

Формально деление кодов на двоичные и недвоичные носит искусственный характер. По аналогии следует выделять троичные, четверичные и другие коды большего основания. Оправдывается такое деление усложнением алгоритмов построения, кодирования и декодирования недвоичных кодов.

Линейные коды отличаются от нелинейных замкнутостью кодового множества относительно некоторого линейного оператора, например сложения или умножения слов кода. Линейность кода упрощает его построение и реализацию. Как линейные, так и нелинейные коды образуют обширные классы. Среди линейных блочных кодов наибольшее значение имеют коды с одной проверкой на четность, M-коды, ортогональные, биортогональные, Хэмминга, Боуза—Чоудхури—Хоквингема, Голея, квадратично-вычетные, Рида—Соломона. К **нелинейным** относят коды с контрольной суммой, инверсные, Нордстрома—Робинсона, с постоянным весом.

При прочих равных условиях желательно, чтобы информационные и избыточные символы располагались отдельно. В систематических кодах это условие выполняется, в несистематических не выполняется.

В циклических кодах каждое слово содержит все свои циклические перестановки, т.е. если $(x_{n-1}, x_{n-2}, ..., x_1, x_0)$ — слово кода, то и $(x_{n-2}, ..., x_1, x_0, x_{n-1}), ..., (x_0, x_{n-1}, x_{n-2}, ..., x_1)$ — слова кода. Все n циклических перестановок образуют цикл. В квазициклических кодах цикл образуется на числе символов $n - 1$ или $n - 2$.

Ошибки в каналах связи имеют самое различное распределение, однако для выбора помехоустойчивого кода целесообразно разделить все возможные конфигурации ошибок на независимые (некоррелированные) и пакеты (коррелированные). Под **коррелированными** подразумевают коды, обладающие хорошими корреляционными свойствами, важными при передаче сигналов, для повышения защищенности от некоторых типов помех.

Особый класс образуют **частотно-компактные коды**, предназначенные для сосредоточения энергии сигнала в возможно более узкой полосе частот. Построение частотно-компактных кодов существенно зависит от метода модуляции.

Арифметические коды служат для борьбы с ошибками при выполнении арифметических операций в процессоре ЭВМ.

Рассмотрим **основные характеристики** корректирующих кодов.

1. Разрядность кода.

Под **разрядностью** помехоустойчивого кода понимают длину его кодовых комбинаций.

2. Число информационных символов.

3. Относительная скорость передачи.

Относительная скорость передачи характеризует степень использования в корректирующем коде информационных возможностей двоичных последовательностей длины n.

4. Избыточность кода.

Избыточность кода указывает степень удлинения кодовой комбинации для достижения определенной корректирующей способности.

5. Минимальное хеммингово расстояние кода.

Степень различия двух любых кодовых комбинаций характеризуется расстоянием между ними в смысле Хэмминга или просто кодовым расстоянием. Оно выражается числом символов, в которых комбинации отличаются одна от другой, и обозначается через d. Минимальное расстояние, взятое по всем парам кодовых разрешенных комбинаций кода, называют **минимальным кодовым расстоянием**.

6. Корректирующая способность кода.

Под **корректирующей способностью кода** понимают его способность обнаруживать или исправлять ошибки, возникающие в кодовых комбинациях. Корректирующая способность кода определяется только избыточностью кода. Коды, обеспечивающие заданную корректирующую способность при минимально возможной избыточности, называют **оптимальными**.

7. Верность передачи сообщения.

Под **верностью передачи сообщения** корректирующим кодом понимают степень соответствия между комбинацией на выходе устройства обнаружения и исправления ошибок и комбинацией на входе канала. Верность передачи сообщения характеризуется вероятностью обнаружения ошибки и вероятностью необнаружения ошибки.

Циклические коды из всех разновидностей помехоустойчивых кодов получили наибольшее распространение. Это обусловлено их высокими корректирующими свойствами и сравнительно простой реализацией кодирующих и декодирующих устройств, в которых они используются.

При описании свойств циклических кодов пользуются представлением кодовых комбинаций в виде многочленов от фиктивной переменной x, в которых цифры 0 и 1, составляющие кодовые комбинации, являются коэффициентами переменной. Если число элементов кодовой комбинации равно n, то соответствующий ей многочлен $F(x)$ имеет вид

$$F(x) = c_{n-1}x^{n-1} + c_{n-2}x^{n-2} + \ldots + c_2x^2 + c_1x + c_0,$$

где $c_i (i = 0, n-1)$ — коэффициенты, принимающие значения 0 или 1.

Например, кодовой комбинации 101100011 соответствует многочлен $F(x) = x^8 + x^6 + x^5 + x + 1$.

Циклическим кодом называют (n, k)-код, обладающий следующим свойством: для любой кодовой комбинации этого кода комбинация, полученная циклическим сдвигом элементов на единицу вправо, также принадлежит этому коду.

В циклическом (n, k)-коде каждый ненулевой кодовый полином должен иметь степень в пределах от $(n - k)$ до $(n - 1)$. Это определяется структурой циклических кодов, у которых первый информационный символ располагается всегда левее проверочных символов, а последний располагается в $(n-1)$-й позиции. Другими словами, минимальный ненулевой кодовый полином будет иметь степень x^{n-k}. Для любого циклического (n, k)-кода полином степени $(n - k)$ является единственным и имеет следующий вид:

$$g(x) = x^{n-k} + g_{n-k-1}x^{n-k-1} + \ldots + g_2x^2 + g_1x + 1.$$

В силу свойства цикличности каждый кодовый полином данного кода должен быть кратным минимальному ненулевому кодовому полиному $g(x)$, т.е. должно выполняться условие $F(x) = g(x)m(x)$. С другой стороны, любой кодовый полином степени $(n-k)$ может быть получен путем умножения полинома $g(x)$ на соответствующий полином $m(x)$. Полином $g(x)$ называется **порождающим**, или образующим, полиномом. Таким образом, любой циклический $(n-k)$-код полностью определяется его порождающим полиномом. В качестве образующих полиномов циклических кодов наибольшее распространение получили следующие:

- $g(x) = x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$ (CRC-16);
- $g(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$ (CRC-CCITT);
- $g(x) = x^{12} + x^{11} + x^3 + x^2 + x + 1$ (CRC-12);
- $g(x) = x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$ (CRC-32).

Существует три способа кодирования циклических кодов.

Первый способ: наиболее просто кодограммы циклического кода можно получить путем умножения многочлена, соответствующего исходной последовательности информационных символов, на образующий полином:

$$F(x) = m(x)g(x).$$

Крупным недостатком этого способа является то, что он приводит к неразделимому коду, в котором информационные и проверочные символы не занимают постоянных мест в кодограмме.

Второй способ образования кодограмм циклического кода заключается в умножении многочлена, соответствующего исходной последовательности информационных символов, на одночлен, соответствующий старшей степени образующего полинома, и добавлении к результату умножения остатка от деления этого произведения на образующий полином:

$$F(x) = x^{n-k}m(x) + r(x).$$

Третий способ кодирования основан на том, что циклический код является систематическим (линейным) и его проверочные и информационные символы связаны линейными соотношениями. Представив комбинацию циклического кода в виде $(c_{n-1}, ..., c_{n-k}, c_{n-k-1}, ..., c_1, c_0)$, где $(c_{n-1}, ..., c_{n-k})$ — информационные элементы; $(c_{n-k-1}, ..., c_1, c_0)$ — проверочные элементы, можно сказать, что j-й проверочный символ определяется соотношением

$$C_{n-k-j} = \sum_{i=0}^{k-1} c_{n-k-j} h_i,$$

где h_i — коэффициент проверочного многочлена

$$H(x) = (x^n + 1)/g(x) = h_k x^k + ... + h_1 x + h_0.$$

Таким образом, любой символ циклического кода является взвешенной суммой k других символов кода (суммирование выполняется по модулю 2).

Основной метод декодирования циклических кодов основан на свойствах делимости многочленов, описывающих кодограммы, на образующий многочлен. Декодирующее устройство осуществляет деление принятой кодограммы на образующий многочлен. Если остаток от деления нулевой, то это указывает на отсутствие ошибки. Если остаток имеет хотя бы один ненулевой коэффициент, то в принятой кодограмме имеют место ошибки. Исправление ошибок осуществляется путем анализа полученного остатка либо на основании проверки выполнения соотношений.

Кодирование и декодирование циклических кодов предусматривают наличие схем, осуществляющих умножение и деление многочленов.

3.2.2. Использование обратной связи

Для обеспечения высоких требований к достоверности информационного обмена в сетях ЭВМ необходимо применение специальных методов защиты информации от ошибок, которые можно подразделить на две группы: не использующие обратную связь и использующие ее.

В **первом случае** на передающей стороне передаваемые данные кодируются одним из известных кодов с исправлением ошибок. На приемной стороне, соответственно, производятся декодирование принимаемой информации и исправление обнаруженных ошибок. Исправляющая возможность применяемого кода зависит от числа избыточных битов, генерируемых кодером. Если вносимая избыточность невелика, то возникает опасность, что принимаемые данные будут содержать необнаруженные ошибки, которые могут привести к ошибкам в работе прикладного процесса. Если же использовать код с высокой исправляющей способностью (большой избыточностью), то это приведет к необоснованно низкой реальной скорости передачи данных.

Во **втором случае** дополнительно применяется обратный канал, по которому организуется обратная связь между передатчиком и приемником. При этом передающая станция на основе своего состояния и получаемых по обратному каналу сведений, а также в соответствии с алгоритмом передачи принимает решение о передаче очередного сообщения. В таком случае можно достичь очень низкой вероятности необнаруженной ошибки при незначительном уровне вводимой избыточности.

Известны три основных вида обратной связи: 1) решающая; 2) информационная; 3) комбинированная.

При использовании процедур с **решающей обратной связью** по каналу обратной связи передается информация о результате получения кадра приемной стороной. На приемной стороне на основе использования помехоустойчивого (n, k)-кода принимается решение о том, является ли принятая из канала n-последовательность кодовым словом или нет. Результат решения в виде подтверждения или запроса передается по обратному каналу на передающую сторону. В соответствии с результатами этих решений передающая сторона в рамках конкретного алгоритма передает новую информацию или повторяет ранее переданные n-последовательности.

При использовании **информационной обратной связи** по обратному каналу приемной стороной передается либо вся принятая n-последовательность, либо некоторое ее отображение (свертка). Решение о правильности восприятия n-последовательности принимается передающей стороной на основе анализа переданной n-последовательности и принятой из канала обратной связи разновидности сигнала информационной обратной связи.

Комбинированная обратная связь обладает чертами, присущими как решающей, так и информационной обратной связи.

Процедуры с решающей обратной связью получили наибольшее распространение в современных сетях обмена данными, поскольку при использовании наиболее массовых и употребляемых двусторонних каналов связи они позволяют сравнительно простыми средствами обеспечить устойчивый и эффективный обмен информацией на уровне канала данных.

Приведем примеры наиболее известных процедур передачи данных.

Процедура с остановкой и ожиданием получила свое название потому, что после передачи информационного блока (кадра) передающая сторона ожидает ответа (подтверждения). Если поступает отрицательное подтверждение (**NAK**), то кадр передается повторно. Повторная передача кадра производится также в случае истечения заданного времени ожидания ответа (тайм-аута). После получения положительного подтверждения (**ACK**) производится передача следующего кадра.

Процедура с возвращением на *N* кадров более эффективна, так как в этом случае кадры передаются без перерыва на ожидание подтверждения. На приемной стороне после обнаружения ошибок в принятом кадре последний стирается, производится блокировка приема следующих кадров и в обратном направлении передается отрицательное подтверждение с номером искаженного кадра. При получении отрицательного подтверждения или по истечении установленного времени ожидания искаженный или неподтвержденный кадр и все переданные за ним $N-1$ кадров передаются вновь, т.е. осуществляется возврат на N кадров назад.

Процедура с селективным повторением отличается от предыдущего алгоритма тем, что повторно передаются только те кадры, в которых обнаружены ошибки. Это повышает эффективность процедуры, однако на передающей стороне требуется буферный накопитель с перестроениями, позволяющий восстанавливать порядок следования кадров.

Эффективность алгоритмов передачи данных может оцениваться такими параметрами, как достоверность, относительная скорость передачи и время задержки.

Достоверность оценивается вероятностью выдачи получателю информации искаженного кадра. Этот параметр определяется вероятностью необнаруженных ошибок в блоке данных длиной n бит, которая зависит от свойств применяемого кода, обнаруживающего ошибки.

Относительная скорость передачи данных — отношение скорости передачи полезной информации (данных) R к скорости передачи двоичных элементов (пропускной способности канала) C, т.е. $R_0 = R/C$.

Иными словами, это отношение длины информационного сообщения (бит) к общему количеству двоичных элементов, переданных по каналу, для того чтобы на приемной стороне было безошибочно

восстановлено переданное сообщение. Среднее значение этого параметра определяется на достаточно больших временных интервалах.

Время задержки сообщения — случайная величина, которая характеризуется функцией распределения, равной вероятности задержки сообщения длиной n бит на время меньше t.

3.3. ПОНЯТИЕ КОММУТАЦИИ. СПОСОБЫ КОММУТАЦИИ

3.3.1. Процесс коммутации

Коммутация — процесс соединения различных абонентов коммуникационной сети через узлы коммутации.

Компьютерные сети должны обеспечивать связь своих абонентов между собой. Абонентами могут выступать ЭВМ, сегменты локальных сетей и т.д.

Рабочие станции подключаются к коммутаторам с помощью индивидуальных линий связи, каждая из которых используется

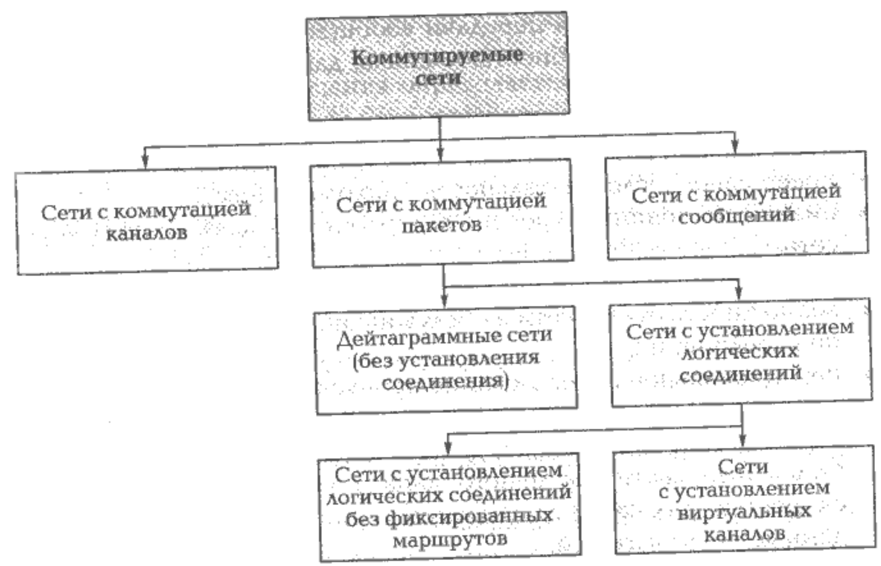

Рис. 3.10. Способы коммутации

в любой момент времени только одним, закрепленным за этой линией, абонентом.

Коммутаторы соединяются между собой с использованием разделяемых линий связи (используются совместно несколькими абонентами).

Рассмотрим три основных наиболее распространенных способа коммутации абонентов в сетях (рис. 3.10):

- коммутация каналов (circuit switching);
- коммутация пакетов (packet switching);
- коммутация сообщений (message switching).

3.3.2. Коммутация каналов

Коммутация каналов — образование непрерывного составного физического канала из последовательно соединенных отдельных канальных участков для прямой передачи данных между узлами.

Отдельные каналы соединяются между собой специальной аппаратурой — коммутаторами, которые могут устанавливать связи между любыми конечными узлами сети. В сети с коммутацией каналов перед передачей данных всегда необходимо выполнить процедуру установления соединения, в процессе которой и создается составной канал. Время передачи сообщения при этом определяется пропускной способностью канала, длиной связи и размером сообщения.

Достоинства коммутации каналов:

- постоянная и известная скорость передачи данных;
- правильная последовательность прихода данных;
- низкий постоянный уровень задержки передачи данных через сеть.

Недостатки коммутации каналов:

- возможность отказа сети в обслуживании запроса на установление соединения;
- нерациональное использование пропускной способности физических каналов, в частности невозможность применения пользовательской аппаратуры, работающей с разной скоростью. Отдельные части составного канала работают с одинаковой скоростью, так как сети с коммутацией каналов не буферизуют данные пользователей;
- обязательная задержка перед передачей данных из-за фазы установления соединения.

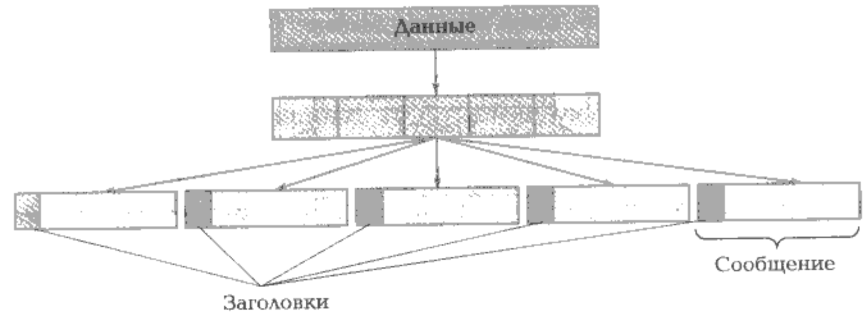

Рис. 3.11. Разбиение информации на сообщения

3.3.3. Коммутация сообщений

Коммутация сообщений — разбиение информации на сообщения (рис. 3.11), каждое из которых состоит из заголовка и информации.

Это способ взаимодействия, при котором создается логический канал, путем последовательной передачи сообщений через узлы связи по адресу, указанному в заголовке сообщения. При этом каждый узел принимает сообщение, записывает в память, обрабатывает заголовок, выбирает маршрут и выдает сообщение из памяти в следующий узел.

Время доставки сообщения определяется временем обработки в каждом узле, числом узлов и пропускной способностью сети. Когда заканчивается передача информации из узла *A* в узел связи *B*, то узел *A* становится свободным и может участвовать в организации другой связи между абонентами, поэтому канал связи используется более эффективно, но система управления маршрутизации будет сложной.

3.3.4. Коммутация пакетов

Коммутация пакетов — особый способ коммутации узлов сети, который специально создан для наилучшей передачи компьютерного трафика.

Опыты по разработке самых первых компьютерных сетей, в основе которых лежала техника коммутации каналов, показали, что этот вид коммутации не предоставляет возможности получить высокую пропускную способность вычислительной сети. Причина

Рис. 3.12. Разбиение сообщения на пакеты

крылась в пульсирующем характере трафика, который генерируют типичные сетевые приложения. При коммутации пакетов все передаваемые пользователем сети сообщения разбиваются в исходном узле на сравнительно небольшие части, называемые пакетами (рис. 3.12). Необходимо уточнить, что **сообщением** называется логически завершенная порция данных — запрос на передачу файла, ответ на этот запрос, содержащий весь файл, и т.д. Каждый пакет снабжается заголовком, в котором указывается адресная информация, необходимая для доставки пакета узлу назначения, а также номер пакета, который будет использоваться узлом назначения для сборки сообщения.

Недостатки коммутации пакетов:

- неопределенность скорости передачи данных между абонентами сети;
- переменная величина задержки пакетов данных;
- возможные потери данных из-за переполнения буферов;
- возможные нарушения последовательности прихода пакетов.

3.3.5. Способ передачи пакетов в сетях

Дейтаграммный способ — способ, при котором передача осуществляется как совокупность независимых пакетов. Каждый пакет двигается по сети по своему маршруту и поступает пользователю в произвольном порядке.

Достоинство: простота процесса передачи.

Недостатки: низкая надежность за счет возможности потери пакетов; необходимость программного обеспечения для сборки пакетов и восстановления сообщений.

Логический канал — передача последовательности связанных в цепочки пакетов, сопровождающаяся установкой предварительного соединения и подтверждением приема каждого пакета.

Если i-й пакет не принят, то все последующие пакеты не будут приняты.

Виртуальный канал — логический канал с передачей по фиксированному маршруту последовательности связанных в цепочки пакетов.

Достоинства: сохраняется естественная последовательность данных; устойчивые пути следования трафика; возможно резервирование ресурсов.

Недостаток: сложность аппаратной части.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение понятия «сигнал».
2. Раскройте классификацию сигналов.
3. Каковы способы представления сигналов?
4. Охарактеризуйте основные виды модуляции.
5. Сформулируйте теорему Котельникова.
6. Каковы виды квантования сигналов? Что такое шум квантования?
7. Каковы методы защиты информации от ошибок?
8. Охарактеризуйте помехоустойчивые коды. Изложите классификацию помехоустойчивых кодов.
9. Каковы характеристики помехоустойчивых кодов?
10. Дайте определение понятия кодового расстояния между двумя кодовыми комбинациями.
11. Что такое циклические коды? Каковы способы их построения?
12. Назовите виды обратной связи.
13. Приведите примеры процедур с решающей обратной связью.
14. Дайте определение понятия «коммутация». Каковы способы коммутации?
15. Что такое коммутация каналов?
16. Охарактеризуйте коммутацию сообщений.
17. Что такое коммутация пакетов?