

Предисловие

Учебное пособие состоит из трех томов: «Детерминированные сигналы», «Случайные сигналы» и «Модулированные сигналы».

Первый том является переработанным вариантом книги автора «Детерминированные сигналы», выпущенной издательством «Горячая линия – Телеком» в 2013 г.

В первом томе рассмотрены методы представления и описания детерминированных сигналов, показана связь соответствующего математического аппарата и прикладных задач.

Книга включает шесть глав и приложение.

В главе 1 «Основные сведения о системах электрической связи» рассмотрены основные понятия и определения теории электрической связи.

В главе 2 «Основные модели и характеристики детерминированных сигналов» приведены определение и классификация детерминированных сигналов, рассмотрены основные характеристики и методы геометрического представления сигналов.

В главе 3 «Спектральный анализ сигналов» рассмотрены вопросы спектрального анализа периодических и непериодических сигналов, свойства и методы вычисления преобразования Фурье, обсуждены вопросы прохождения детерминированных сигналов через линейные стационарные системы.

В главе 4 «Корреляционно-спектральный анализ сигналов» рассмотрены корреляционно-спектральные характеристики энергетических и периодических сигналов, приведены методы оценки эффективной ширины спектра и дано определение базы сигналов.

В главе 5 «Аналого-цифровое преобразование непрерывных сигналов» обсуждены процессы дискретизации непрерывных видеосигналов во времени, их квантования по уровню и кодирования квантованных сигналов.

В главе 6 «Узкополосные сигналы» введены понятия комплексного узкополосного сигнала и его комплексной огибающей, определено преобразование Гильберта во временной и в частотной области, рассмотрены аналитический сигнал и его основные

свойства, обсуждены вопросы прохождения узкополосных сигналов через узкополосные линейные стационарные системы.

В конце каждой главы приведен список литературы с замечаниями и ссылками.

В приложении представлены справочные формулы, определены единичная импульсная функция, единичная ступенчатая функция и функция знака, даны определения и свойства преобразований Фурье и Гильберта.

Приведено большое количество примеров, иллюстрирующих теоретический материал. Некоторая часть примеров предназначена также для того, чтобы ввести дополнительные понятия и определения. Для разграничения примеров и основного текста они завершаются символом ■.

В книге принята единая система обозначений: функции времени обозначены строчными латинскими буквами, а их спектры – соответствующими прописными буквами.

Глава 1

Основные сведения о системах электрической связи

1.1. Информация, сообщение, сигнал

Информация (лат. *informatio* – разъяснение, изложение) в широком смысле – это совокупность сведений о каких-либо событиях, явлениях или предметах. Информация является объектом хранения, передачи, преобразования или непосредственного использования.

Сообщение – это форма представления информации в виде условных символов. Этими символами могут быть буквы, цифры, знаки, изображения, формы колебаний и т. п. Так, при разговоре по телефону сообщением является изменение во времени звукового давления, отображающего голос человека. При передаче телеграмм сообщение – это последовательность букв и цифр. При телевизионной передаче сообщение представляет собой изменение во времени яркости и цветности элементов изображения.

Сообщение может быть функцией времени (например, речь при телефонном разговоре) или не являться функцией времени (текст, неподвижное изображение). Сообщение может быть как электрической, так и неэлектрической природы. Как правило, сообщение не может быть передано в системе электросвязи.

Сигнал (лат. *signum* – знак) – это физический процесс, однозначно отображающий сообщение и служащий для его передачи и регистрации. В современной технике электросвязи нашли применение электрические, электромагнитные и световые сигналы. Сигнал всегда является функцией времени, даже если сообщение таким не является.

Сообщение с помощью специальных устройств обычно преобразуется в электрическую величину $s(t)$ – так называемый первичный сигнал. В зависимости от области определения и области возможных значений различают следующие виды сигналов $s(t)$:

– непрерывный по уровню и во времени сигнал (рис. 1.1, *a*);

- непрерывный по уровню и дискретный во времени сигнал (рис. 1.1, б);
- дискретный (квантованный) по уровню и непрерывный во времени сигнал (рис. 1.1, в);
- квантованный по уровню и дискретный во времени сигнал (рис. 1.1, г).

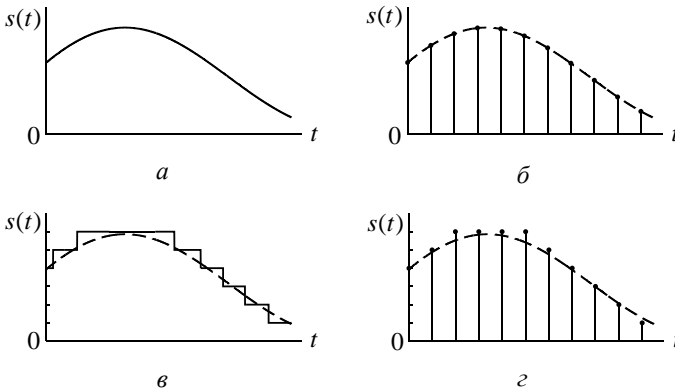


Рис. 1.1. Основные виды первичных сигналов:

- a – непрерывный по уровню и во времени; $б$ – непрерывный по уровню и дискретный во времени; $в$ – квантованный по уровню и непрерывный во времени; $г$ – квантованный по уровню и дискретный во времени

Сигнал первого вида (рис. 1.1, a) называется непрерывным сигналом – он задается на конечном или бесконечном временном интервале и в произвольные моменты времени может принимать любые значения в некотором диапазоне. В силу того, что такой сигнал обычно является электрической моделью некоторой физической величины, его часто называют аналоговым сигналом.

Сигнал второго вида (рис. 1.1, $б$) задается в определенные дискретные моменты времени и может принимать любые значения из некоторого диапазона. Такой сигнал можно получить в результате дискретизации непрерывного сигнала путем взятия его отсчетов в определенные моменты времени.

Сигнал третьего вида (рис. 1.1, $в$) задается на некотором временном интервале и принимает только определенные дискретные значения. Его можно получить из непрерывного сигнала,

применяя к нему операцию квантования по уровню, в результате чего исходный сигнал заменяется ступенчатой функцией.

Сигнал четвертого вида (рис. 1.1, *г*) называется дискретным – он задается в определенные дискретные моменты времени и принимает определенные дискретные значения. Поскольку представляющие параметры дискретного сигнала обычно выражаются в цифровой форме, его часто называют цифровым сигналом. Цифровой сигнал можно получить путем аналого-цифрового преобразования непрерывного сигнала, которое включает в себя дискретизацию во времени, квантование по уровню и кодирование отсчетов сигнала.

Сообщения, подлежащие передаче в системе связи, представляют собой множество символов или функций времени с вероятностной мерой, заданной на этом множестве. Другими словами, сообщения следует рассматривать как случайные величины или случайные процессы. Если бы сообщение было заранее известным с полной достоверностью (детерминированным), то передача его не имела бы никакого смысла. Такое детерминированное сообщение не содержит информации. Поэтому и первичный сигнал является случайной функцией времени. Детерминированный сигнал не может быть переносчиком информации.

Однако это совсем не означает, что детерминированные сигналы не должны рассматриваться в теории и технике связи. Детерминированные сигналы используются в качестве измерительных сигналов для испытаний систем связи или отдельных их элементов. Любая реализация случайного сигнала представляет собой детерминированный процесс. Наконец, рассмотрение детерминированных сигналов очень важно и с методической точки зрения, поскольку математический аппарат, используемый при описании характеристик этих сигналов, находит широкое применение при изучении случайных процессов.

1.2. Система электрической связи

Система электрической связи – это совокупность технических средств и среды распространения сигналов, обеспечивающих передачу сообщений от источника к получателю.

Обобщенная структурная схема простейшей системы электросвязи представлена на рис. 1.2. Рассмотрим назначение элементов этой системы.

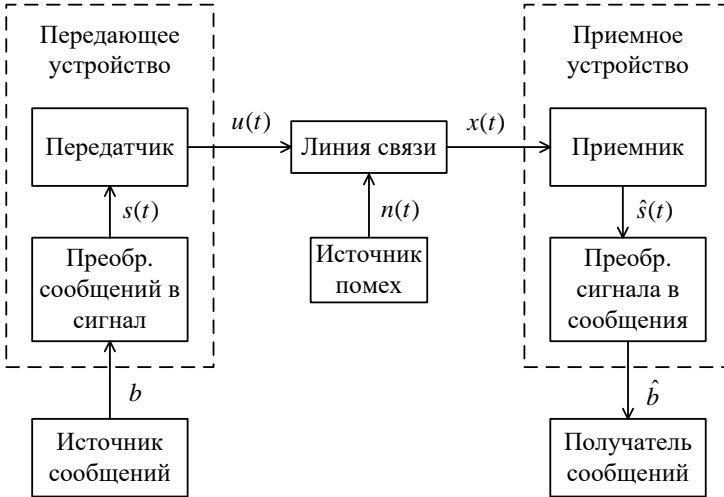


Рис. 1.2. Обобщенная структурная схема системы электросвязи

Источник сообщений – это физический объект, формирующий передаваемое сообщение b . В качестве такого источника может выступать человек, компьютер, дистанционное управляющее устройство и т. п.

Передающее устройство включает в себя преобразователь сообщений в сигнал и передатчик. Преобразователь сообщений в сигнал – это устройство, которое преобразует сообщение b в первичный электрический сигнал $s(t)$. В передатчике осуществляется преобразование первичного сигнала $s(t)$ во вторичный сигнал $u(t)$, удобный для передачи по линии связи (по форме, мощности, частоте и т. д.). В простейшем случае передатчик содержит только усилитель первичного сигнала или только фильтр, ограничивающий полосу передаваемых частот сигнала. В большинстве случаев наряду с частотно-избирательными и усилительными устройствами передатчик также содержит модулятор, осуществляющий перенос спектра сигнала в область высоких частот.

Линия связи – это совокупность физических цепей, имеющих общую среду распространения и служащих для передачи сигналов от передатчика к приемнику. Так, в системах проводной связи – это кабель, в системах радиосвязи – область пространства между антеннами передатчика и приемника.

Для каждого типа линии связи имеются сигналы, наиболее эффективно распространяющиеся по ней: например, по проводной линии – постоянный ток и переменные токи невысокой частоты (не более нескольких десятков килогерц), а по радиолинии – электромагнитные колебания высоких частот (от сотен килогерц до десятков тысяч мегагерц).

При прохождении по линии связи сигнал $u(t)$ значительно ослабляется (затухает) и подвергается мешающему воздействию помех $n(t)$. Для отображения воздействия помех на полезный сигнал в структурную схему системы связи обычно вводят условный, реально не существующий элемент – источник помех.

Приемник осуществляет селекцию по частоте, усиление и демодуляцию принимаемого сигнала $x(t)$. При демодуляции приемник на основе анализа колебания $x(t)$, искаженного помехами, должен определить, какой из первичных сигналов $s(t)$ передавался. Поэтому приемное устройство является одним из наиболее ответственных и сложных элементов системы электрической связи. Преобразователь сигнала в сообщении преобразует оценку $\hat{s}(t)$ первичного сигнала в оценку сообщения \hat{b} , воспринимаемого получателем.

Канал связи – это совокупность технических средств, обеспечивающих передачу сигнала от некоторой точки системы электрической связи до некоторой другой точки. В принципе эти точки могут быть выбраны произвольно, лишь бы между ними проходил сигнал. Как правило, канал связи задают либо между источником и получателем сообщений (между точками b и \hat{b} на схеме рис. 1.2), либо между преобразователем передаваемых сообщений в сигнал и преобразователем принимаемого сигнала в сообщения (между точками s и \hat{s}).

В зависимости от характера сигналов на входе и выходе канала различают:

- дискретные (по состояниям) каналы, на входе и выходе которых сигналы дискретны;
- непрерывные (по состояниям) каналы, на входе и выходе которых сигналы непрерывны;
- дискретно-непрерывные или полунепрерывные каналы, которые могут быть дискретными со стороны входа и непрерывными со стороны выхода или наоборот.

В любой системе связи всякий дискретный или полунепрерывный канал всегда содержит внутри себя непрерывный канал, задаваемый между выходом передатчика (точкой u) и входом приемника (точкой x) на схеме рис. 1.2.

Системы электрической связи характеризуются большим разнообразием видов передаваемых сообщений, принципов построения и режимов работы. Поэтому они могут быть классифицированы по различным признакам.

По виду передаваемых сообщений различают системы передачи дискретных и непрерывных сообщений.

По назначению передаваемых сообщений различают следующие типы систем:

- телефонные системы, предназначенные для передачи речевых сообщений;
- телеграфные системы, предназначенные для передачи текстовых сообщений;
- фототелеграфные системы, предназначенные для передачи неподвижных изображений;
- телевизионные системы, предназначенные для передачи подвижных изображений;
- телеметрические системы, предназначенные для передачи измерительной информации;
- системы телеуправления, предназначенные для передачи команд управления;
- системы передачи данных, предназначенные для обслуживания автоматизированных систем управления.

По числу каналов различают одноканальные и многоканальные системы. По наличию обратной связи различают системы без обратной связи и с обратной связью.

По режиму использования канала различают системы односторонней связи (симплексные), системы двусторонней связи

(дуплексные) и полудуплексные. В симплексных системах (лат. simplex – простой, прямой) передача осуществляется в одном направлении, в дуплексных системах (лат. duplex – двойной, двойственный) осуществляется одновременная передача в обоих направлениях, в полудуплексных системах возможна двусторонняя связь, но передача и прием ведутся поочередно.

1.3. Искажения и помехи

В реальном канале связи сигнал при передаче искажается, и сообщение воспроизводится с некоторой ошибкой. Причиной таких ошибок являются искажения, вносимые самим каналом, и помехи, воздействующие на сигнал.

Под искажениями понимают изменения формы переданного сигнала, обусловленные свойствами цепей и устройств, по которым проходит сигнал. Основной причиной искажений сигнала являются переходные процессы в линии связи, цепях передатчика и приемника. Различают линейные искажения, возникающие в линейных цепях из-за не идеальности их частотных и временных характеристик, и нелинейные, возникающие в нелинейных цепях. В общем случае искажения отрицательно влияют на качество воспроизведения сообщений и не должны превышать установленных норм. Если характеристики канала точно известны, линейные и нелинейные искажения в принципе могут быть устранены путем введения соответствующей коррекции.

В отличие от искажений, помехи всегда имеют случайный характер, и поэтому не могут быть полностью устранены.

Помеха – это постороннее мешающее электромагнитное колебание различного происхождения, вызывающее случайные искажения переданного сигнала.

Помехи классифицируются по ряду признаков.

По характеру воздействия на сигнал различают аддитивные и мультипликативные помехи.

Аддитивная помеха (лат. additio – сложение) – это помеха, мгновенные значения которой складываются с мгновенными значениями сигнала. Аддитивные помехи воздействуют на приемное устройство независимо от сигнала и имеют место даже тогда, когда полезный сигнал отсутствует.

Мультипликативная помеха (лат. *multiplicatio* – умножение) – это помеха, мгновенные значения которой перемножаются с мгновенными значениями сигнала. Мешающее действие мультипликативной помехи проявляется в виде изменения параметров полезного сигнала. Мультипликативные помехи непосредственно связаны с процессом прохождения сигнала по линии связи и поэтому имеют место только при наличии полезного сигнала. Как правило, мультипликативные помехи приводят к случайным изменениям амплитуды (замираниям) полезного сигнала.

По происхождению аддитивные помехи можно разделить на внутренние и внешние.

Внутренние помехи обусловлены хаотическим движением носителей зарядов в усилительных приборах, сопротивлениях и других элементах аппаратуры, входящей в канал связи. Это так называемые тепловые шумы.

Внешние помехи обусловлены влиянием внешних источников, находящихся вне канала связи и включают в себя:

- атмосферные помехи (грозовые разряды, полярные сияния дожди и др.), возникающие в результате электрических процессов в атмосфере;

- промышленные помехи, возникающие в электрических цепях электроустановок (электротранспорт, электрические двигатели, медицинские установки, линии электропередачи, системы зажигания двигателей и др.);

- космические помехи, связанные с электромагнитными процессами, происходящими на Солнце, звездах, в галактиках и других внеземных объектах;

- станционные помехи, обусловленные излучениями посторонних станций и каналов из-за различных нарушений режима их работы и свойств каналов.

По физическим свойствам (по форме и характеру изменения во времени) аддитивные помехи можно разделить на флуктуационные, импульсные и сосредоточенные.

Флуктуационные помехи (лат. *fluctuatio* – колебание) рождаются случайными отклонениями тех или иных физических величин от своих средних значений. Флуктуационная помеха представляет собой нормальный (гауссовский) стационарный

случайный процесс с нулевым средним значением и равномерным энергетическим спектром в очень широкой полосе частот.

Причиной внутренних флуктуационных помех в основном являются тепловые шумы аппаратуры. К внешним флуктуационным помехам принято относить помехи космического происхождения. В то же время сумма большого числа помех от различных источников также имеет характер флуктуационной помехи.

Мешающее воздействие флуктуационных помех зависит от характера передаваемого сообщения. В телефоне при речевом сигнале эта помеха прослушивается как звуковой шум. На экране телевизора флуктуационные помехи вызывают размытость контуров и понижение контрастности изображения. При телеграфной передаче и передаче данных влияние флуктуационных помех приводит к ошибочному приему символов.

Флуктуационные помехи наиболее изучены и представляют наибольший интерес, как в теоретическом, так и в практическом отношении. Характерной особенностью флуктуационных помех является то, что явления, порождающие эти помехи, лежат в физической природе вещей (дискретная природа вещества, дискретная природа электромагнитного поля) и принципиально не могут быть устранены. Поэтому такой вид помех практически имеет место во всех реальных каналах связи.

Импульсные (сосредоточенные во времени) помехи представляют собой последовательности коротких одиночных импульсов различной амплитуды и длительности, следующих один за другим через случайные, достаточно большие интервалы времени. К такому типу помех относятся атмосферные (грозовые разряды) и промышленные помехи (электротранспорт, линии электропередачи, системы зажигания двигателей).

Сосредоточенные по частоте (узкополосные) помехи – это квазигармонические колебания со случайно изменяющимися параметрами, спектральная плотность мощности которых занимает сравнительно узкую полосу частот, существенно меньшую полосы частот передаваемого сигнала. Это промышленные (генераторы высокой частоты различного назначения) и станционные помехи (излучения посторонних радиостанций, переходные помехи от соседних каналов многоканальных систем).

1.4. Модуляция и демодуляция

Первичные информационные сигналы, подлежащие передаче по линии связи, как правило, являются низкочастотными (сигналами звуковой частоты). Если такие сигналы способны распространяться в физической среде между передающим и приемным устройствами системы связи, то без дальнейших преобразований они в принципе могут служить переносчиками передаваемой информации.

Однако чаще первичные сигналы не могут распространяться в среде между передающим и приемным устройствами. Так, например, дискретные посылки постоянного тока не могут излучаться в виде радиоволн. Передача низкочастотных сигналов переменного тока в виде радиоволн хотя и возможна, но сопряжена со значительными техническими трудностями.

Поэтому первичные сигналы $s(t)$ с помощью специального колебания – несущей или переносчика $u_0(t)$ преобразуют в высокочастотные (радиочастотные) сигналы $u(t)$, параметры которых согласованы с параметрами линии связи. Такое преобразование переносчика называется модуляцией. Первичный сигнал $s(t)$ в этом случае называется модулирующим сигналом.



Рис. 1.3. Модулятор

Устройство, осуществляющее процесс модуляции, называется модулятором. Любой модулятор (рис. 1.3) имеет два входа – для модулирующего сигнала $s(t)$ и для несущего колебания $u_0(t)$, и один выход – для результирующего модулированного сигнала $u(t)$.

Модулированные сигналы различаются по виду несущей и по модулируемым параметрам. В роли несущей может быть использовано гармоническое колебание, периодическая последовательность импульсов, колебание специальной формы, узкополосный случайный процесс. Чаще всего в роли несущей используется гармоническое колебание

$$u_0(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1.1)$$

с определенной амплитудой U_0 , круговой частотой ω_0 и начальной фазой φ_0 .

Параметры несущего колебания, изменяющиеся под воздействием модулирующего сигнала, называются информационными. Для гармонической несущей (1.1) такими параметрами являются амплитуда, частота или начальная фаза.

На рис. 1.4, *a* показана временная диаграмма модулирующего сигнала, а на рис. 1.4, *б* – простейший вид модулированного сигнала – сигнал с амплитудной модуляцией. Поскольку модулирующий сигнал (рис. 1.4, *a*) является непрерывным, в данном случае модуляция называется непрерывной или аналоговой.

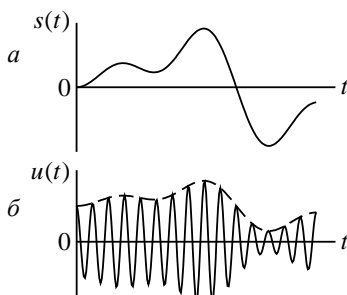


Рис. 1.4. Сигнал с амплитудной модуляцией:
a – модулирующий сигнал; *б* – модулированный сигнал

На рис. 1.5, *a* представлена временная диаграмма дискретного модулирующего сигнала в виде последовательности прямоугольных импульсов длительности T . Импульс положительной полярности соответствует передаче единичного символа дискретного двоичного сообщения, а отрицательной полярности – нулевого. Результирующий сигнал с амплитудной модуляцией показан на рис. 1.5, *б*. В данном случае модуляция называется дискретной или цифровой. Дискретную модуляцию называют еще манипуляцией. В рассматриваемом случае манипуляция является двоичной в силу того, что информационные параметры модулированного сигнала могут принимать только $M = 2$ значения и каждый элемент (символ) модулированного сигнала переносит один двоичный символ (бит) информационной последовательности.