

ПРЕДИСЛОВИЕ

Материал настоящего учебного пособия базируется на курсе лекций и практикумов по дисциплине «Радиотехнические цепи и сигналы», который читают студентам инженерно-технологического факультета Самарского государственного технического университета, обучающимся по программе подготовки бакалавров техники и технологии по направлению «Управление в технических системах», а также по программе специалитета по специальности «Боеприпасы и взрыватели».

Содержание книги полностью соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта нового поколения, отраженным в примерной программе дисциплины «Радиотехнические цепи и сигналы», входящей в образовательные программы по профилю подготовки бакалавров «Автономные информационные и управляющие системы» и инженеров по специальности «Боеприпасы и взрыватели». Учебное пособие может быть полезно студентам бакалавриата в рамках направлений «Радиотехника» и «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Включенный в пособие материал по существу является базовым для подготовки специалистов в области современной радиотехники. Его успешное изучение предполагает хорошее знание таких дисциплин, как математика, физика, электротехника, электроника, и служит необходимым фундаментом для освоения циклов специальных дисциплин соответствующих образовательных программ бакалавриата, специалитета и магистратуры.

В работе над пособием авторы стремились использовать достоинства классических учебников и задачников по дисциплине «Теоретические основы радиотехники» в части методических подходов к изложению материала. Наличие контрольных вопросов, списка задач для каждой главы, приложений, с информацией наиболее часто используемых зависимостей, по мнению авторов, существенно повысило методическую ценность книги.

Авторы признательны рецензентам пособия за полезные критические замечания и с благодарностью примут их от заинтересованного читателя.

ВВЕДЕНИЕ

С момента зарождения и по сегодняшний день радиотехника является важнейшей областью науки и техники, кардинально изменившей ход научно-технического прогресса в сторону автоматизации, информатизации, микроминиатюризации во всех отраслях промышленности, науки и техники, поэтому подчас бывает трудно вычленить и отделить радиотехнику от тесно связанных с ней смежных областей, таких, например, как радиоэлектроника. Но наиболее общим и основным назначением радиотехники является обеспечение передачи и приема информационных сообщений посредством электромагнитных колебаний, несущих информацию с использованием окружающего пространства как среды распространения радиоволн.

Любые системы связи предназначены для передачи информации посредством сигналов, причем сигналов, в подавляющем большинстве случаев, электрических. Если сигналы, несущие информацию, изначально имеют неэлектрическую природу, в состав системы связи вводят преобразователи, прямые и обратные сигналов неэлектрических в электрические и обратно. В общем случае функционирование любой системы связи сопровождается разнообразными преобразованиями сигналов, осуществляемых посредством соответствующих физических систем, линейных и нелинейных.

Для современной радиотехники одной из центральных задач является создание помехоустойчивых систем связи, наиболее действенное решение которой лежит в области применения и совершенствования методов модуляции, помехоустойчивого кодирования и цифровой обработки сигналов.

Ближайшие перспективы развития радиотехники связаны с бурным развитием микроэлектронной элементной базы СВЧ и КВЧ диапазона, а также квантовой электроники, которые обусловливают возможность перехода к принципиально новым быстродействующим цифровым способам преобразования и обработки радиотехнических сигналов.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ПОНЯТИЯ

Любая передача сообщения от отправителя к получателю представляет собой передачу сведений посредством сигнала, физическая природа которого позволяет это сделать в данных условиях. Сообщения на большие расстояния передаются *электромагнитными сигналами*, которые представляют собой изменяющиеся по закону сообщений электрические и магнитные величины, такие как ток, напряжение, электрический заряд, напряженность электрического и магнитного полей и другие. Преобразовать сообщение в электромагнитный сигнал можно различными путями. Например, значение температуры наблюдаемого объекта можно преобразовать в электрический сигнал с помощью резисторных термодатчиков или термопар, преобразовать мгновенное значение частоты вращения вала какой-либо машины или механизма в электрический сигнал позволяет тахогенератор и т.д.

Различают следующие виды электрической связи: телеграф, телефон, радиотелевещание, радиолокация, радионавигация и др. Эти типы связи различаются формой сообщений, составляющих информацию.

Радиотехника как наука изучает электромагнитные колебания в радиодиапазоне частот, методы их генерации, усиления, излучения, приёма и их использования. *Радиотехника* как отрасль техники осуществляет применение электромагнитных колебаний и волн радиодиапазона для передачи информации - в радиосвязи, радиовещании и телевидении, в радиолокации и радионавигации, при контроле и управлении машинами, механизмами и технологическими процессами, в разнообразных научных исследованиях и т.д. Радиодиапазон охватывает спектр электромагнитных волн длиной от нескольких десятков тысяч километров до десятых долей миллиметра [1].

Радиотехника базируется на таких научных дисциплинах, как теория поля, теория распространения радиоволн, радиофизика, математический анализ, теория функций, теория информации, теория кодов, теория автоматического управления и др. Знание этих дисциплин не только дает широкое представление о возможности использования радиотехники в различных отраслях промышленности, без них невозможно полноценное освоение данного раздела науки и техники.

Часть сложного слова «РАДИО...» определяет беспроводной способ передачи сообщений на расстояние посредством электромагнитных волн. Следовательно, сигналы должны однозначно соответство-

вать передаваемым сообщениям и обладать способностью распространяться по линии связи.

Линией связи называется совокупность технических устройств и физической среды, обеспечивающая распространение сигналов от передатчика к приёмнику. По аналогии с этим определением можем определить, что *передатчиком* называется техническое устройство, преобразующее сообщение в передаваемый сигнал, а обратное превращение сигнала в сообщение осуществляется *приемником*. В радиотехнике линию связи, по которой передаются электромагнитные колебания, также называют *радиолинией*. Система, состоящая из передатчика, приемника и части линии, используемая для связи одного отправителя и со своим получателем называется *каналом связи*.

Радиоволнами будем называть электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве без помощи проводов, и в частности, применяющиеся для передачи сигналов на расстоянии. Скорость их распространения в пространстве, не заполненном веществом равна $\approx 300\,000 \text{ км/с}$. Свет также относится к электромагнитным волнам, что весьма облегчает наглядное представление свойств радиоволн (преломление, отражение, затухание и т. д.).

Радиоволны чаще всего создаются в результате электромагнитного излучения какого-либо тела (обычно антенны), возбуждаемого источником колебаний (обычно генератором частоты). Они представляют собой изменение электромагнитного поля, в котором электрическое и магнитное поля тесно взаимосвязаны и любое изменение электрического поля приводит к изменению магнитного поля и наоборот.

Как и для любой волны, к радиоволнам применимы такие характеристики, как период, частота, амплитуда, фаза, длина волны и т. д.

Периодом принято называть промежуток времени, в течение которого совершаются какой-либо повторяющийся процесс; в радиотехнике – это время, за которое электрическая или магнитная величина совершает один полный цикл своего изменения. Величина, обратная по своему значению периоду, называется *частотой*. Частота электромагнитной волны определяется частотой возбуждающего источника и не изменяется в процессе распространения, если приемник и передатчик неподвижны относительно друг друга, в противном случае имеет место эффект Доплера (о данном эффекте пойдет речь позже). Частота измеряется в герцах [Гц], в честь немецкого ученого Генриха Рудольфа Герца, который считается первооткрывателем электромагнитного излучения. 1 Гц – это одно колебание в секунду.

Амплитудой гармонических колебаний называется максимальное отклонение значения величины от нулевого.

Фазой называют величину, которая характеризует состояние электромагнитного колебания в некоторый момент времени.

Наглядное представление о периоде (T), амплитуде (A) и фазе (Φ) простого синусоидального сигнала дано на рисунке 1.1.

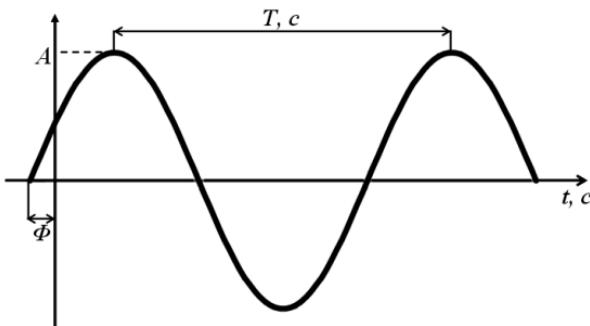


Рис. 1.1. Основные характеристики синусоидального колебания

Длиной волны называется расстояние, которое радиоволна проходит за один период колебаний электромагнитного поля и обозначается λ . Задаваясь скоростью распространения электромагнитной волны в пространстве, равной скорости света c и периодом колебания T , длина волны может быть рассчитана как:

$$\lambda = cT \quad (1.1)$$

или от частоты колебания f :

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (1.2)$$

Радиоволны классифицируют по международному регламенту радиосвязи в зависимости от их частоты и, соответственно, длины волны. Под радиоволнами чаще подразумевают электромагнитные колебания с частотами от 3 кГц до 300 ГГц, более подробная классификация приведена в таблице 1.1.

Деление этой полосы частот на поддиапазоны вызвано особенностями применения радиоволн каждого диапазона для разных типов задач, так же как и аппаратура, работающая на отдельно взятом поддиапазоне, имеет свои нюансы при эксплуатации. Так, например, основным преимуществом длинных волн является то, что сила сигнала

на линии связи мало меняется в течение суток и в течение года и не подвержена случайным изменениям, а также они (и особенно сверхдлинные) мало поглощаются при прохождении в толще суши или моря. Достаточную для приема силу электромагнитных колебаний можно обеспечить на расстоянии более 20 тысяч километров, но для этого требуются мощные передатчики и громоздкие антенны. Еще к неудобству использования длинных волн можно отнести невозможность передачи широкой полосы частот, необходимой для трансляции разговорной речи или музыки.

Преимуществом работы на более коротких волнах является то, что можно создать направленные малогабаритные антенны, однако, с повышением частоты сильно возрастает поглощение волн поверхностью Земли.

Таблица 1.1

Классификация радиочастот

Название	Частота	Длина волны	Где применяется
Сверхдлинные волны (СДВ)	3 кГц – 30 кГц	100 км – 10 км	Радиовещание, радиосвязь
Длинные волны (ДВ)	30 кГц – 300 кГц	10 км – 1 км	Радиовещание, радиосвязь
Средние волны (СВ)	300 кГц – 3 МГц	1 км – 100 м	Радиовещание, радиолюбители
Короткие волны (КВ)	3 МГц – 30 МГц	100 м – 10 м	Радиовещание, радиолюбители
Ультракороткие волны (УКВ1)	30 МГц – 300 МГц	10 м – 1 м	Качественное радио, телевидение, радиотелефоны, связь со спутниками, мобильные телефоны, радиолюбители ...
УКВ2	300 МГц – 3 ГГц	1 м – 10 см	Телевидение, радиотелефоны, связь со спутниками ...
УКВ3	3 ГГц – 30 ГГц	10 см – 1 см	Радиолокация, связь со спутниками, беспроводные компьютерные сети
УКВ4	30 ГГц – 300 ГГц	1 см – 1 мм	Радиоастрономия, высокоскоростная радиорелейная связь, медицина

Под *полосой частот* понимают часть спектра синусоидальных колебаний электромагнитных излучений, лежащую в определенных пределах. *Спектр сигнала*, в самом простом его понимании, можно

определить как совокупность простых гармонических колебаний, образующих этот сигнал.

Говоря о ширине полосы частот, часто имеют в виду сравнение данной полосы частот с речевой полосой. Если ширина полосы частот не превышает звуковую полосу, то говорят об узкой полосе частот, в противном случае – о широкой. Однако такое определение не совсем корректно, поскольку в ряде задач за широкую полосу частот принимают имеющийся (рабочий) диапазон, а при анализе сигнала его разбивают на более короткие частотные интервалы, которые называют узкополосными. Обычно широкая полоса включает в себя некоторое множество узких полос.

Для аналогового сигнала пропускная способность каналов выражается разностью максимальной и минимальной частот, которые может нести канал. Для дискретных каналов пропускная способность выражается количеством бит, передаваемых в 1 секунду.

Важным свойством радиоволн является постоянство скорости распространения в однородной среде. Как было уже сказано, скорость распространения радиоволн в вакууме составляет порядка $300\,000\text{ км/с}$. В пространстве, заполненном веществом, скорость распространения электромагнитных колебаний определяется относительной диэлектрической проницаемостью ϵ и магнитной проницаемостью μ вещества:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}}. \quad (1.3)$$

Если сигнал проходит через несколько сред с различными ярко выраженными электромагнитными свойствами, то скорость прохождения через них сигнала рассчитывается по отдельности для каждой, а при необходимости находится средняя скорость на всем пути. Эта задача актуальна в дальней радиолокации.

Следует понимать, что в природе не существует полностью однородных сред и, следовательно, формула (1.3) представляет собой лишь среднюю оценку скорости распространения радиоволны при учете некоторых допущений. Именно поэтому в задачах, решаемых на практике, важно знать значения как можно большего числа параметров, влияющих на распространение электромагнитных волн. Так, например, в задачах дальней радиолокации или радиоастрономии имеют большое значение электрическое и магнитное состояние атмосферы, тропосфера, ионосфера и т.п.

Если говорить об электромагнитных колебаниях, то следует иметь представление о напряженностях электрического (E) и магнитного (H) полей.

В системе СИ единица напряженности электрического поля измеряется в вольтах на метр [V/m], а напряженность магнитного поля в амперах на метр [A/m]. В воздушной среде напряженности полей связаны между собой соотношением

$$\frac{E}{H} = 120\pi \text{ } \Omega\text{m}, \quad (1.4)$$

которое называется *волновым сопротивлением свободного пространства*. Под свободным пространством будем понимать такую среду, где электромагнитная волна может свободно распространяться. В дальнейшем, под средой распространения радиоволн будем понимать именно свободное пространство.

Перенос электромагнитной энергии происходит в направлении распространения радиоволн и определяется как вектор Умова – Пойнтинга ρ . Наглядно его можно представить, задавшись векторным представлением напряженностей электрического и магнитного полей. Из курса радиофизики известно, что вектор напряженности электрического поля плоской волны перпендикулярен вектору напряженности магнитного поля, а вектор Умова – Пойнтинга перпендикулярен векторам напряженности (рисунок 1.2) и его направление определяется по правилу «буравчика». Плоской электромагнитной волной будем называть электромагнитное колебание, формируемое магнитным и электрическим полем, векторы направленности которых расположены в плоскости хода, перпендикулярно направлению распространения волны. Для удобства и наглядности в данном пособии будут рассматриваться, в основном, плоские электромагнитные волны.



Рис. 1.2. Расположение векторов напряженности электрического и магнитного полей при распространении плоских радиоволн в свободном пространстве

Величина вектора ρ определяет плотность потока электромагнитной энергии, т. е. показывает, какое количество энергии «проходит» за одну секунду сквозь площадку в один квадратный метр, расположенную перпендикулярно направлению распространения радиоволны и может быть рассчитана как:

$$\rho = E \cdot H = \frac{E^2}{120\pi}. \quad (1.5)$$

Говоря о распространении волн в среде необходимо дать понятие фронта радиоволны. *Фронтом радиоволны* называется поверхность, все точки которой имеют одинаковую фазу, т. е. поверхность, в каждую точку которой радиоволны, излученные в разных направлениях, приходят в одно и то же время. На рисунке 1.3 показан случай, когда антенна излучает энергию во всех направлениях в однородной среде, в связи с чем, за некоторый промежуток времени радиоволна, распространяясь с равной скоростью, «охватит» часть пространства, которое может быть ограничено сферической поверхностью.

На расстоянии от передающей антенны ненамного большем длины волны радиосигнала фронт волны имеет *сферический* вид (рисунок 1.3, а), что характерно в задачах ближней радиолокации, например, при подлете снаряда к цели.

На практике же наиболее часто приходится интересоваться фронтом радиоволны на очень больших расстояниях от передающей антенны, а также небольшим его участком, с которого происходит «съем» радиочастотной энергии приемной антенной. В этом случае фронт волны можно считать *плоским* (рисунок 1.3, б).

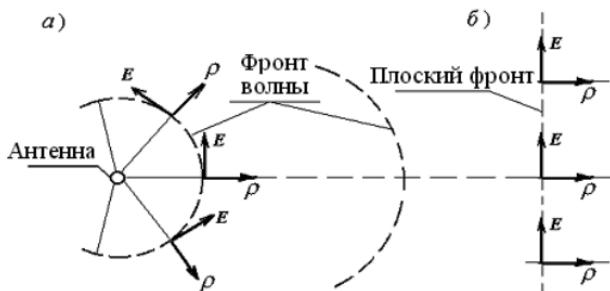


Рис. 1.3. Сферическое распространение радиоволн в однородном пространстве:
а) сферический фронт; б) плоский фронт

Одним из основных понятий в радиотехнике является антenna. Антенные являются неотъемлемой частью любой радиолинии [2]. *Антенной* называется устройство, осуществляющее преобразование электромагнитных колебаний, поступающих на нее, в радиоволны, и, наоборот, радиоволн, приходящих на нее, в электромагнитный сигнал. Проще говоря, антenna – это устройство, предназначенное для излучения и приема электромагнитных волн. Габариты антенн должны быть соизмеримы или многое больше длины волны принимаемых и передаваемых сигналов, в связи с чем, по своим габаритам она чаще всего больше других блоков радиотехнического устройства. Теоретическим описанием поведения электромагнитных полей в ближних и дальних зонах антенн и практическим применением антенн занимаются специалисты различных областей (радиофизики, специалисты по радиолокации, разработчики антенно-фидерных устройств и др.), поэтому в данном курсе будем обращаться к особенностям описания и конструкции антенн лишь по мере необходимости.

Схематично общий вид радиолинии можно представить, как показано на рисунке 1.4.

На рисунке 1.4 под 1 обозначен передатчик, формирующий по определенному закону в зависимости от входного сообщения X высокочастотные сигналы, которые поступают к передающей антенне 3 через фидер 2. *Фидером* в радиотехнике называют передающую линию или электрическое устройство, по которому осуществляется направленное распространение электромагнитных колебаний от источника к потребителю в системах их передачи и распределения. Иногда антenna может быть подключена к передатчику непосредственно, без

фидера. Окружающее пространство, по которому передаются радиоволны, обозначено как 4. Волны, исходящие от передающей антенны, довольно быстро теряют свою удельную энергию на единицу объема, поэтому приемной антенной 5 улавливается только небольшая доля излученной энергии. Принятые приемной антенной электромагнитные колебания поступают на вход приемника 7 через фидерное устройство 6. В приемнике полученные электромагнитные колебания усиливаются и проходят ряд преобразований, вследствие чего восстанавливается исходный сигнал X' .

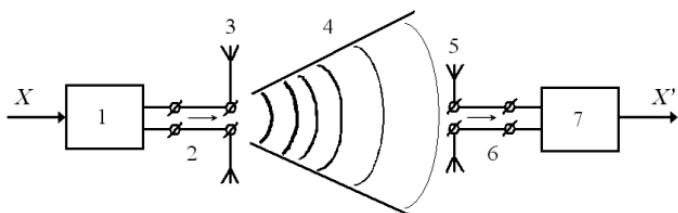


Рис. 1.4. Общий вид радиолинии

Одна и та же антenna может служить как приемной, так и передающей. В таких системах либо устанавливаются дополнительные устройства, позволяющие разделять входящий и исходящий сигналы, либо прием и передачу электромагнитных волн разделяют во времени. Такие системы применяются, например, в автомобилях в устройстве предупреждения столкновения автомобиля с препятствием, в наземных и бортовых радиолокационных станциях и др.

В технической литературе присутствует такой термин, как *тракт связи* или *тракт передачи*, имеющий в своем определении комплекс технического оборудования и линий связи, предназначенный для формирования каналов передачи информации [1,2,3]. Данный термин широко применяется при описании систем многоканальной связи.

Одним из важнейших свойств радиоволны (как и любой электромагнитной волны) является ее *отражение* при встрече с препятствием (самолетом, кораблем, зданием, космическим телом и т.п.) или со средой, имеющей резко различные от среды первоначального распространения электрические параметры (ионосферой, поверхностью океана и др.). Интенсивность отраженного сигнала растет при увеличении размеров отражающих объектов по сравнению с длиной волны. Явление отражения радиоволн лежит в основе радиолокации. Ин-

терференция (взаимное усиление или ослабление) радиоволн определяется взаимодействием в какой-либо точке пространства двух или более радиоволн, созданных одним источником, но прошедших различные пути и в связи с этим имеющих различные фазы. Если при этом взаимодействующие волны имеют близкие фазы, то в результате происходит усиление суммарного сигнала, если же фазы противоположны или близки к ним, то амплитуда суммарного сигнала может стать равной нулю или оказывается значительно слабее одиночного сигнала.

В этой главе приведены далеко не все основные понятия и определения, которыми оперирует радиотехника, поэтому в ходе рассмотрения отдельных разделов мы будем освещать дополнительные понятия и представления.

Вопросы

1. Что такое радиотехника?
2. Какими основными параметрами характеризуются гармонические электромагнитные колебания? Дайте их определение.
3. С чем связана необходимость классификации радиоволн?
4. В чем особенность работы на коротких и длинных радиоволнах?
5. Как изменяется скорость распространения радиоволны в зависимости от среды распространения?
6. Что называют волновым сопротивлением пространства?
7. Чем определяется плотность потока радиочастотной энергии?
8. Дайте определение фронта радиоволны.
9. Что включает в себя общая структура радиолинии?
10. Дайте определение тракта связи, поясните рисунком.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

При изучении любой дисциплины, когда приходится рассматривать множество объектов, следует проводить некоторую их классификацию по каким-либо общим признакам, разбить это множество на группы, внутри которых свойства этих объектов будут совпадать. В радиотехнике рассматриваемыми объектами являются радиосигналы.

Радиосигналы – это радиоволны, которые используются в системах связи для передачи информации через окружающую среду от передатчика к приемнику. Сигнал, подводимый к передающей антенне, как известно, характеризуется амплитудой, частотой и фазой, в изменении которых можно закодировать передаваемое информационное сообщение.

2.1. Одномерные и многомерные сигналы

В радиотехнических устройствах типовым электрическим сигналом является сигнал, полученный путем измерения напряжения на зажимах какой-либо цепи или тока в ветви. Такого вида сигналы описываются функцией времени и являются *одномерными* ($u(t)$, $i(t)$, и др.).

Однако в некоторых случаях, например, при обработке сигналов с радиогеодезического спутника или при обработке и передаче сигналов с нескольких датчиков, расположенных на различных участках технологической линии, удобно вводить в рассмотрение многомерные сигналы. *Многомерный* сигнал можно определить как упорядоченную совокупность одномерных сигналов:

$$\vec{V} = \{v_1(t), v_2(t), \dots, v_N(t)\}. \quad (2.1)$$

Пользуясь терминологией линейной алгебры, N называют раз мерностью такого многомерного сигнала. В общем случае сигналы с различным порядком следования компонент не равны друг другу $\{v_1(t), v_2(t), \dots, v_N(t)\} \neq \{v_N(t), \dots, v_2(t), v_1(t)\}$.

Многомерные сигналы бывают непрерывными, дискретными или смешанными. Подобно одномерным сигналам, здесь вводятся понятия дискретности и непрерывности. Смешанным сигналом называют многомерный сигнал, который представляется функцией некоторого числа непрерывных и дискретных переменных. В качестве примера смешанного сигнала можно привести систему выходных состояний,

получаемых в процессе измерения какой-либо непрерывной величины определенным числом датчиков с дискретной функцией опроса каждого. Формирование такого сигнала показано на рисунке 2.1, где под *a*) отражена структурная схема системы с непрерывными величинами от датчиков $x_i(t)$, возмущающими воздействиями h_i , их суммой $x'_i(t)$, дискретным оператором, определяющим функцию опроса каждого датчика, $A(nt)$ при ($n = 0, 1, 2, \dots$) и упорядоченной совокупностью одномерных сигналов \vec{V} . Рисунок 2.1 *б*) иллюстрирует действия дискретного оператора $A(nt)$.

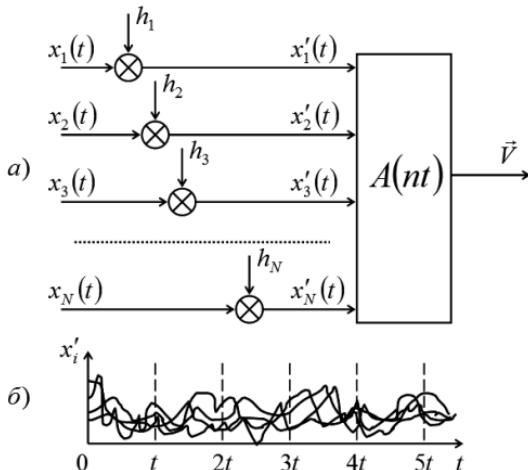


Рис. 2.1. Формирование смешанного сигнала

На практике очень часто имеют дело с двумерными сигналами, которые представляют собой функции, значения которых зависят от двух независимых переменных:

$$z = f(x, y). \quad (2.2)$$

Пример двумерного непрерывного сигнала представлен на рисунке 2.2. На нем изображена зависимость следующего вида:

$$z(x, y) = \frac{\sin[(x^2 + y^2)^2]}{(x^2 + y^2)^2}. \quad (2.3)$$

Такая зависимость характерна для распределения лепестков диаграммы направленности антенны, применяемой, например, в боеголовках самонаведения ракет.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru