

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Сибирский федеральный университет

С. П. Панько, Е. Н. Гарин, В. В. Сухотин

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Рекомендовано ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж) в качестве учебника для курсантов (студентов) учебных военных центров (военных кафедр, факультетов военного обучения) при высших учебных заведениях Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, обучающихся по специальностям: 11.05.01 – «Радиоэлектронные системы и комплексы», 11.05.02 – «Специальные радиотехнические системы» и 11.05.03 – «Применение и эксплуатация средств и систем специального мониторинга», рег. № 065 от 27 июня 2019 г.

Красноярск
СФУ
2019

УДК 621.39(07)

ББК 32.88я73

П168

Р е ц е н з е н т ы:

А. И. Перов, доктор технических наук, профессор;

И. Н. Ищук, доктор технических наук, доцент

Панько, С. П.

П168

Радиотехнические системы специального назначения. Системы связи : учебник / С. П. Панько, Е. Н. Гарин, В. В. Сухотин. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2019. – 340 с.

ISBN 978-5-7638-4014-8

В учебнике рассмотрены общие сведения о современных методах и системах передачи информации, основных тактико-технических характеристиках, сигналах и помехах, статистических методах обнаружения сигналов, вероятностях ошибок и протоколах передачи в спутниковой и беспроводной связи.

Предназначен для курсантов (студентов) учебных военных центров (военных кафедр, факультетов военного обучения) при высших учебных заведениях Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, обучающихся по специальностям: 11.05.01 – «Радиоэлектронные системы и комплексы», 11.05.02 – «Специальные радиотехнические системы» и 11.05.03 – «Применение и эксплуатация средств и систем специального мониторинга», а также может быть использован для изучения соответствующих дисциплин студентами радиотехнического направления в гражданских вузах и аспирантами, занимающимися научными исследованиями в области передачи информации.

Электронный вариант издания см.:

<http://catalog.sfu-kras.ru>

УДК 621.39(07)

ББК 32.88я73

ISBN 978-5-7638-4014-8

© Сибирский федеральный университет, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Краткий исторический очерк	5
Контрольные вопросы.....	10
Глава 2. Принцип действия систем передачи информации	11
2.1. Структуры систем передачи информации.....	11
2.2. Состав радиотехнических систем передачи информации	13
2.3. Основные тактико-технические характеристики радиотехнических систем передачи информации.....	16
2.4. Сигналы, используемые в радиотехнических системах, шумы и помехи.....	18
2.4.1. Немодулированные сигналы.....	18
2.4.2. Модулированные сигналы	20
2.4.3. Шумы и помехи.....	21
2.5. Основы теории усреднения	24
2.6. Регенерация сигналов.....	27
2.7. Помехи	28
2.8. Преимущества использования цифровых технологий	32
2.9. Линии и каналы связи	33
Контрольные вопросы.....	37
Глава 3. Модуляция / демодуляция	38
3.1. Модуляция.....	38
3.1.1. Характеристики амплитудно-модулированных сигналов. Импульсная модуляция	39
3.1.2. Радиосигналы с угловой модуляцией и манипуляцией. Угловая модуляция	42
3.1.3. Использование оконных (весовых) функций при манипуляции	49
3.2. Демодуляция	61
3.2.1. Принцип демодуляции (детектирования) сигналов с двухполосной амплитудной модуляцией	61
3.2.2. Демодуляция сигналов с угловой модуляцией.....	62
3.2.3. Структурные схемы приемников АТ сигналов при приеме на слух	67
3.2.4. Демодуляция сигналов с частотной телеграфией.....	68
3.2.5. Демодуляция сигналов фазовой телеграфии	70
3.2.6. Демодуляция сигналов с квадратудной амплитудной модуляцией	75
Контрольные вопросы.....	76

Глава 4. Преобразование и синтез частот.....	78
4.1. Синтезатор частот.....	78
4.2. Метод прямого синтеза частот.....	80
4.3. Структурные схемы синтезаторов непрямого синтеза.....	82
4.4. Прямой цифровой синтез (DDS).....	83
4.5. Преобразователь частот.....	90
Контрольные вопросы.....	95
Глава 5. Усилители мощности и малошумящие усилители.....	96
5.1. Радиопередающие устройства. Усилители мощности.....	96
5.2. Радиоприемные устройства. Малошумящие усилители.....	102
Контрольные вопросы.....	110
Глава 6. Методы передачи информации.....	111
6.1. Семиуровневая модель сетей передачи информации.....	111
6.2. Уплотнение сигналов в системах передачи информации.....	114
6.2.1. Частотное уплотнение сигналов.....	114
6.2.2. Уплотнение сигналов по времени.....	116
6.2.3. Кодовое уплотнение сигналов.....	120
6.2.4. Аналого-цифровое и цифроаналоговое преобразование.....	129
6.2.5. Цифровое преобразование речевых сигналов.....	135
6.3. Передача информации в пакетном режиме.....	144
6.3.1. Технология пакетной передачи информации.....	144
6.3.2. Форматы пакетов.....	147
6.3.3. Маршрутизация в пакетных сетях.....	150
6.3.4. Алгоритмы состояния канала и вектора расстояния.....	151
6.3.5. Таблицы маршрутизации.....	152
6.3.6. Протоколы динамической маршрутизации.....	154
6.3.7. Анализ состояния маршрутизатора и выбор маршрута.....	157
6.4. Компьютерные сети.....	162
6.4.1. Классификация компьютерных сетей.....	162
6.4.2. Топологии компьютерных сетей.....	165
6.4.2. Методы доступа в локальную вычислительную сеть и адаптеры....	167
6.3.4. Развитие технологии Ethernet.....	174
6.4.5. Протоколы передачи информации в цифровых каналах.....	177
Контрольные вопросы.....	206
Глава 7. Оптимальный прием сигналов.....	208
7.1. Задачи теории оптимального приема сигналов.....	208
7.2. Ошибки в каналах передачи цифровых сигналов.....	209
7.3. Обнаружение сигналов как статистическая задача.....	213
7.3.1. Одномерное оптимальное обнаружение известного сигнала.....	213
7.3.2. Отношение правдоподобия для сигнала с полностью известными параметрами.....	217
7.4. Корреляционный прием.....	219

7.4.1. Одноканальный корреляционный приемник	219
7.4.2. Дисперсия взвешенного шума	221
7.4.3. Дисперсия шума на выходе корреляционного приемника	223
7.4.4. Корреляционный прием при произвольной фазе сигнала.....	225
7.4.5. Обнаружение сигналов с помощью автокорреляции	226
7.4.6. Прием в целом	229
7.5. Согласованная фильтрация.....	232
7.6. Эффективность оптимального приема	236
7.7. Различение детерминированных сигналов	238
7.8. Пропускная способность канала передачи информации.....	245
7.9. Практическая реализация методик оптимального приема.....	250
Контрольные вопросы.....	257
Глава 8. Помехоустойчивое кодирование.....	259
8.1. Скремблирование и дифференциальное кодирование	259
8.2. Кодирование информации	262
8.2.1. Классификация кодов	262
8.2.2. Код Хемминга.....	268
8.2.3. Блочные и циклические коды	269
8.2.4. Сверточное кодирование.....	275
Контрольные вопросы.....	289
Глава 9. Сжатие информации	290
9.1. Основные направления сжатия данных	290
9.2. Сжатие длин серий	291
9.3. Сжатие разделением на пары данных	292
9.4. Сжатие по Хаффману	294
9.5. Сжатие почти периодических сигналов.....	297
Контрольные вопросы.....	300
Глава 10. Спутниковая связь	301
10.1. Архитектура систем спутниковой связи	302
10.2. Системы связи по схеме «Точка – точка».....	302
10.3. Зоновая (региональная) связь	304
10.4. Многозональная связь.....	307
10.5. Связь с использованием геостационарных искусственных спутников Земли	310
10.6. Связь с использованием низкоорбитальных искусственных спутников Земли.....	319
10.7. Командно-измерительная система.....	325
10.8. Защита командного канала	328
Контрольные вопросы.....	330
Заключение	331
Библиографический список	332
Список сокращений	334

Глава 1

КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Проблема передачи информации занимает умы человечества на всем пути его развития. В технологиях связи – это и знаменитые барабаны «там-там» в Африке, и цепочки костров – акустические и визуальные извещатели, и бегуны на длинные дистанции – доставщики сообщений.

Требования к системам передачи информации росли по мере развития науки и техники, однако, в сущности, они изменились только на количественном уровне. Это объем передаваемого сообщения, скорость передачи, достоверность передачи, дальность действия системы связи. Интересно отметить, что едва ли не всякое новшество, открытое учеными, исследовалось на предмет передачи сообщений. Например, вскоре после открытия Эрстедом в 1820 г. эффекта, который позднее назвали явлением магнитной индукции, были предложены различные системы для электрической телеграфии. Одна из них, не получившая коммерческого распространения, содержала на передающей стороне выключатели по числу букв в алфавите и источник питания, соединительные провода, а на приемной стороне компасы, также по количеству букв. Когда на передающей стороне замыкался один из выключателей, то на приемной стороне стрелка компаса, установленного возле одноименного провода, отклонялась, поскольку в проводнике протекал ток. Это позволяло передавать сообщения на большие расстояния с высокой по тем временам скоростью передачи.

Поистине революционным событием стало техническое решение, найденное А. С. Поповым и несколько позднее итальянцем Г. Маркони, позволяющее передавать информацию беспроводным путём на основе использования радиоволн. Приемник А. С. Попова («грозоотметчик», как он сам его называл, так как прибор реагировал на грозовые разряды) был основан на свойстве металлических порошков или опилок, которыми заполняется когерер, изменять сопротивление под воздействием высокочастотных электромагнитных колебаний (говорят, что опилки или частицы порошка «слипаются»).



Рис. 1.1. Александр Степанович Попов

когерер, изменять сопротивление под воздействием высокочастотных электромагнитных колебаний (говорят, что опилки или частицы порошка «слипаются»). (Попов, А. С. *О беспроводной телеграфии: сб. статей,*

докладов, писем и др. материалов / А. С. Попов; под ред. А. И. Берга. – М. : Физматгиз, 1959). Когда высокочастотный импульс проходит по цепи «антенна А – когерер – заземление З», то сопротивление когерера резко уменьшается и срабатывает реле 1. Через нормально разомкнутый контакт К реле 1 включается реле 2, функция которого сводится к извещению слушателя ударом молоточка М по звонку Зв и механическому встряхиванию когерера для подготовки к приему следующего сигнала. Питание приемника осуществляется от батареи Б. В процессе экспериментов по беспроводному радио А. С. Попов обнаружил еще одно явление: экранирование металлическим препятствием (кораблем) электрического сигнала, если препятствие оказывалось на пути распространения радиоволны.

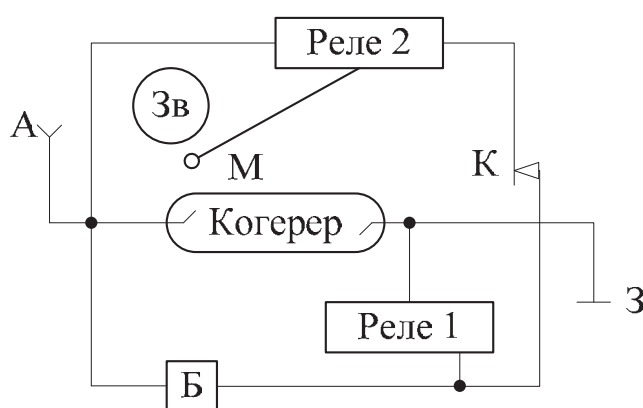


Рис. 1.2. Функциональная схема «Грозоотметчика» А. С. Попова

А. С. Попов докладывал о результатах своих исследований на заседании Русского физико-химического общества 7 мая 1895 года. В заключительном слове он сказал: «Могу выразить надежду, что мой прибор при дальнейшем его усовершенствовании может быть применен к передаче сигналов при помощи быстрых электрических колебаний, как только будет найден источник таких колебаний, обладающих достаточной энергией».

Приоритет открытия А. С. Попова подтверждается документами, однако ранняя смерть нашего соотечественника обеспечила Г. Маркони бесконкурентную работу и позволила добиться ошеломляющих успехов в этой области. За это Г. Маркони была присуждена Нобелевская премия в 1909 г. Можно не сомневаться, что продолжи А. С. Попов развивать радиоэлектронную сферу передачи информации, он также стал бы Нобелевским лауреатом. 7 мая 1945 года в ознаменование 50-летия со дня изобретения А. С. Попова и вклад радиотехнических войск в Великую Победу Верховный Совет СССР принял постановление, по которому 7 мая впредь должно было именоваться в нашей стране Днем радио.

Примерно до середины XX века телефонная связь строилась на основе воздушных проводных линий, для поддержки которых использовались специальные опоры (рис. 1.3). Понятно, что такие громоздкие конструкции не имели перспективы массового распространения. Позднее телефонные провода стали убирать в подземные коммуникации с использованием аппаратуры уплотнения.

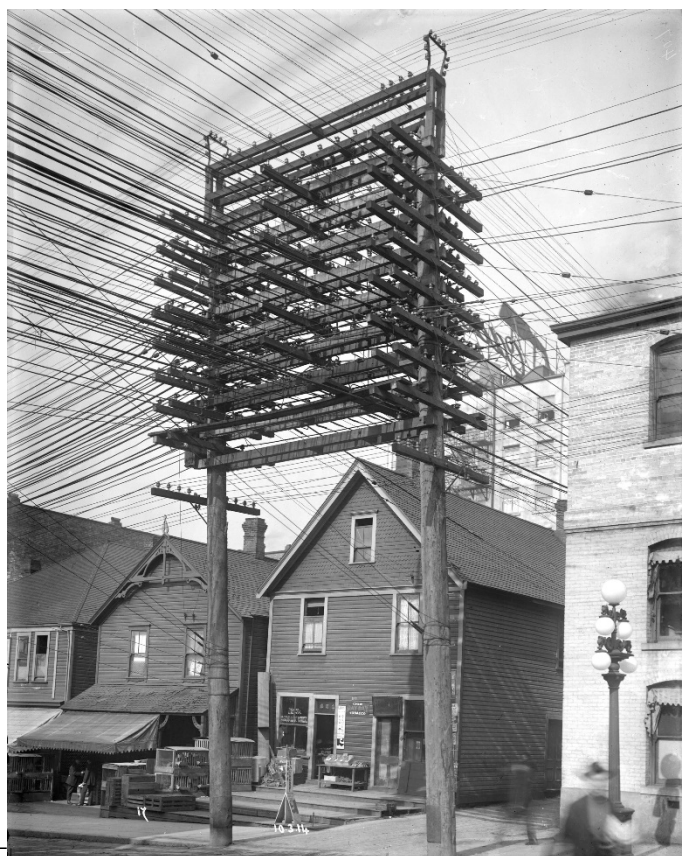


Рис. 1.3. Мачтовая конструкция с телефонными проводами

В основном ранние системы передачи строились по схеме «точка — точка», когда абонент обменивался информацией с другим, наперед заданным, корреспондентом. Осуществление связи с другим абонентом требовало перестройки синтезаторов частоты на обоих концах радиолинии. Появление так называемых «магистральных каналов» оказалось возможным благодаря развитию методов уплотнения сигналов. Наиболее ярко это проявилось в радиорелейной связи, когда система содержит несколько (до десятка и более) ретранслирующих станций, имеющих ответвления от магистрального потока информации в местах расположения станций для соединения с местной телефонной сетью. Для этого каждая ретрансляционная станция снабжается средствами вскрытия адресного поля каждого пакета.

Если адрес текущего пакета совпадает с адресным пространством текущего географического места, то этот пакет извлекается из магистрального потока, отправляется в местную сеть. Каждая из станций располагает антенной системой, размещаемой на мачте высотой до 20–30 и более метров на слабо пересеченной местности. Для гористых районов задача размещения ретранслирующих станций часто становится неразрешимой.

Спутниковая связь имеет конкретную дату своего рождения – 4 октября 1957 года, когда в СССР был успешно произведен запуск первого искусственного спутника Земли (ИСЗ), открывший для человечества космическую эру. Аппарат был выведен на орбиту с перигеем 228 км и апогеем 947 км. Время одного оборота составляло 96,2 мин. По всей стране была развернута сеть наблюдения за первым ИСЗ, включая не только визуальные технологии, но и прием радиосигналов. На борту спутника была установлена система терморегулирования, источники энергопитания, два радиопередатчика, работавших на двух длинах волн 7,5 и 15 м и четыре штыревые антенны. Аппарат подавал сигналы в виде импульсов с периодом 1 с.

Наиболее широко спутниковая связь применяется для передачи сигналов телевидения (ТВ) и радиовещательных станций, систем кабельного телевидения в интересах как провайдеров, так и непосредственно индивидуальных пользователей, а также и для персональных коммуникаций в режиме телефонных или компьютерных технологий. Другие области применения включают терминалы с очень малой апертурой (VSAT-терминалы) в сетях передачи высокоскоростных данных и сельской телефонии. Требования к скорости передачи информации по спутниковым каналам непрерывно растут.

В конце XX и начале XXI веков получили распространение технологии беспроводной передачи данных на небольших расстояниях – это сотовая связь в подвижном и фиксированном вариантах и радиочастотная идентификация. Одно из новейших направлений развития систем передачи информации – когнитивное радио, когда занятие частотного ресурса производится по мере его освобождения другой радиостанцией при минимизации взаимных помех, что обеспечивает максимально эффективное использование выделенной полосы частот.

Также в последней четверти XX века бурное развитие приобрели волоконно-оптические линии и системы передачи (ВОЛС), обеспечивающие скорость передачи до 40 ГГб и более с высокой защитой от несанкционированного вмешательства. К концу 2017 г. на территории России проложено более 50 тыс. км ВОЛС, доступных для передачи информации. В самой ближайшей перспективе, учитывая темпы технологического развития базы радиоэлектронного оборудования, следует ожидать массированного внедрения оптических технологий не только передачи, но и обработки инфор-

мации, что станет качественно новым этапом развития систем передачи информации.

Системы передачи радиолокационной информации играют существенную роль в противовоздушной обороне (ПВО): передается информация о состоянии воздушной обстановки, плановом движении воздушных судов, включая гражданскую принадлежность. Радиолокационная станция (РЛС), обеспечивающая контроль воздушного пространства, располагается, как правило, на удалении от командного пункта (КП), что приводит к необходимости передачи большого объема информации. Важной особенностью использования РЛС в автоматизированных системах управления воздушным движением является необходимость сопряжения с электронной вычислительной машиной (ЭВМ), размещаемой в центре управления воздушным движением (УВД) и удаленной от радиолокационных позиций на большое расстояние, вплоть до нескольких тысяч километров. Для этого необходимо извлечь полезную информацию из ответного радиолокационного сигнала, преобразовать эту информацию в цифровую форму и передать ее в центр УВД. Такие функции выполняют современные системы передачи цифровой информации, которые должны обеспечить высокую достоверность и уменьшить избыточность передаваемой информации. Системы передачи информации классифицируются по принадлежности: звено передачи речевых или автоматических команд к пилоту от диспетчера, а также обратного трафика от воздушного средства в центр УВД. Радиолокационная информация извлекается в полярной системе координат, в центре которой располагается местная РЛС и передается на узловую РЛС, затем к потребителям более высокого ранга, вплоть до КП ПВО страны. На каждом участке к системе передачи информации формулируются специфические требования. Задача передачи управленческой и радиолокационной информации приобретает особое значение при использовании подвижных пунктов управления воздушными средствами. Любая радиотехническая система передачи информации проектируется на основе технического задания (ТЗ), отвечающего техническим требованиям на систему. На разработчика возлагается задача по наилучшему проектированию не только с позиций выполнения пунктов ТЗ, но и системной оптимизации разрабатываемой структуры.

Большую роль в системах передачи играют методы количественного сжатия информации с целью снижения объема передаваемого трафика и кодирования, обеспечивающих повышение помехоустойчивости и закрытия канала связи от несанкционированного доступа и снятия передаваемой информации. Сжатие информации связано с устранением избыточности и косвенно служит закрытию канала связи, так как алгоритмы сжатия тщательно охраняются от использования непосвященными лицами.

Сжатие эффективно уменьшает затраты времени на передачу информации, однако в каждом конкретном случае эта задача требует более детального изучения. Методы сжатия информации продолжают развиваться несмотря на достигнутые результаты.

Диапазон частот, используемых в системах передачи информации, непрерывно расширяется. Если на заре развития радиотехники использовались в основном длинные и короткие волны, то в начале XXI века уже массово применяются радиоволны диапазонов ГигаГерц ($1 \text{ ГГц} = 10^9 \text{ Гц}$) и даже ТераГерц ($1 \text{ ТГц} = 10^{12} \text{ Гц}$) с длиной волны $0,001\text{--}0,3 \text{ см}$.

Контрольные вопросы

1. Перечислить и обосновать основные требования к системе передачи информации.
2. Цель процедуры сжатия информации.
3. Описать в общем виде систему передачи радиолокационной информации.
4. Описать работу радиоприемника А. С. Попова.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

2.1. Структуры систем передачи информации

Наиболее распространенный класс радиотехнических устройств и систем предназначен для передачи сообщений (информации) от источника к потребителю, находящимся, как правило, в различных точках пространства (рис. 2.1) [1].

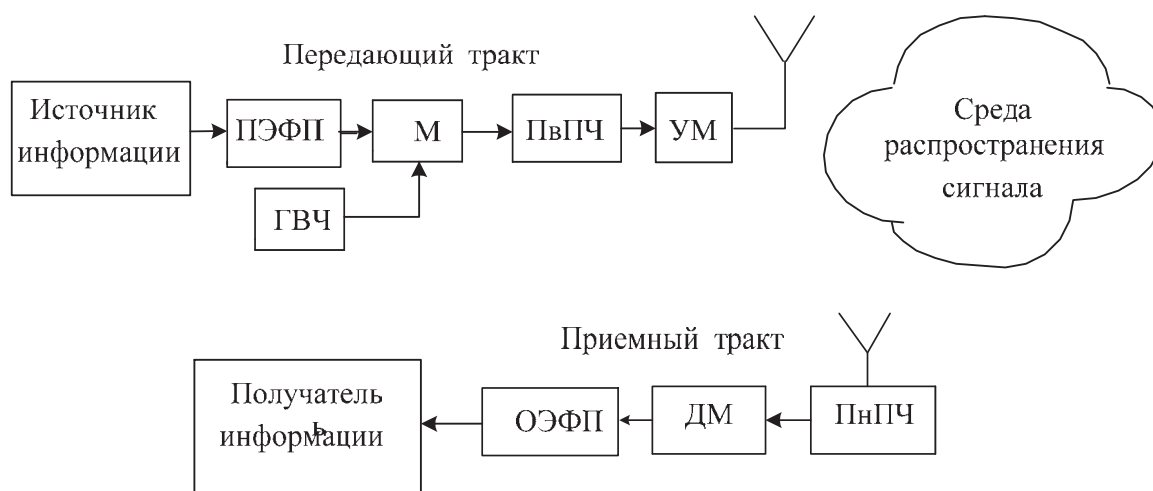


Рис. 2.1. Обобщенная структурная схема системы передачи информации [1]

Здесь ПЭФП – прямой электрофизический преобразователь – устройство для преобразования исходной информации в электрический сигнал; ОЭФП – обратный ЭФП. Примером прямого и обратного ЭФП могут служить микрофон и громкоговоритель, преобразующие акустический сигнал в электрический и обратно. М и ДМ – соответственно модулятор и демодулятор. С помощью модулятора электрический сигнал переносится на высокую частоту, формируемую ГВЧ – генератором высокой частоты. Демодулятор обеспечивает перенос сообщения с высокой частоты в необходимую низкочастотную область спектра, в случае бытового приемника – в звуковой диапазон. ПвПЧ – повышающий преобразователь частоты в передающем тракте обеспечивает перенос модулированного сигнала в участок спектра, выделенный для рассматриваемой радиолинии; УМ – усилитель мощности увеличивает значение мощности излучаемого сигнала для обеспечения эффективного приема с учетом потерь мощности сигнала при излучении, распространении и т. д. Среда распространения оказывает су-

ществленное влияние на сигнал в виде электромагнитной волны. В первую очередь это относится к потере мощности (ослаблению сигнала), связанной со сферической расходимостью радиоволны и поглощением в атмосфере; неравномерностью амплитудно-фазочастотных характеристик среды и другими факторами. ПнПЧ – понижающий преобразователь частоты обеспечивает перенос спектра в диапазон частот и усиление сигнала, пригодные для работы демодулятора (ДМ).

Системы передачи информации могут быть одно- и многоканальными, обеспечивающими передачу сигналов от нескольких источников к нескольким потребителям через общий высокочастотный тракт. Если исходная информация уже представлена электрическим сигналом и потребитель использует также электрический сигнал, то необходимость в блоках ЭФП и ОЭФП исчезает.

История передачи информации с помощью электрических средств начинается примерно со второй половины XIX века, когда впервые была осуществлена передача простейших сигналов в проводной системе. Практически до середины XX века для передачи использовались исключительно аналоговые (или непрерывные) сигналы. Для их передачи разработаны теоретически и практически методы модуляции по амплитуде, частоте или фазе несущего высокочастотного колебания. Эти методы позволили широко использовать уплотнение сигналов, когда в одном канале передается несколько информационных сообщений.

Со второй половины XX века значительно расширилось производство систем передачи информации на основе цифровой технологии. Сегодня во многих компонентах передающих таких разнородных систем, как ведомственные, районные и крупные узловые автоматические телефонные станции (АТС), мультиплексоры и коммутаторы, микропроцессоры и микроконтроллеры, используется цифровая обработка сигналов. В настоящее время цифровая технология вытеснила аналоговые методы передачи информации в радиотехнических системах передачи информации (рис. 2.2).

Сигнал с выхода прямого электрофизического преобразователя (ПЭФП) подвергается аналого-цифровому преобразованию в цифровую форму в аналого-цифровом преобразователе (АЦП). На выходе АЦП имеет место последовательность импульсов, постоянных как по длительности, так и по высоте. Каждый из этих импульсов называют «бит». Группа этих импульсов представляет собой цифровой эквивалент одной выборки аналогового сигнала. Количество битов, составляющих одну выборку, зависит от разрядности АЦП. Поскольку для восстановления сигнала на приемном конце необходимо анализировать указанную группу в целом, то необходимо ввести «биты синхронизации», что выполняется в блоке установки битов синхронизации (УБС). Связь АЦП с УБС (нижняя линия) указывает на то,

что биты синхронизации обрамляют группу импульсов (битов), снимаемых с АЦП. Затем битовая последовательность подвергается кодированию в кодере К. Это производится в основном с целью повышения помехоустойчивости за счет использования кодов, позволяющих не только обнаруживать ошибки, возникшие при распространении и в процессе обработки сигнала, но и исправлять их. Далее тракт внешне совпадает с трактом по рис. 2.1 за исключением того, что в ИМ – импульсном модуляторе – применяют именно импульсные, а не аналоговые методы модуляции. В приемном тракте после демодуляции в блоке происходит выделение битов синхронизации (ВБС), т. е. осуществляется синхронизация процесса восстановления с процессом преобразования сигнала на передающем конце. В цифроаналоговом преобразователе (ЦАП) происходит восстановление аналоговой формы сигнала. Затем восстановленный сигнал в фильтре Ф очищается от мешающих составляющих, неизбежно появляющихся в процессе АЦП и ЦАП, и следует обратное преобразование сигнала в форму, удобную получателю сообщения.

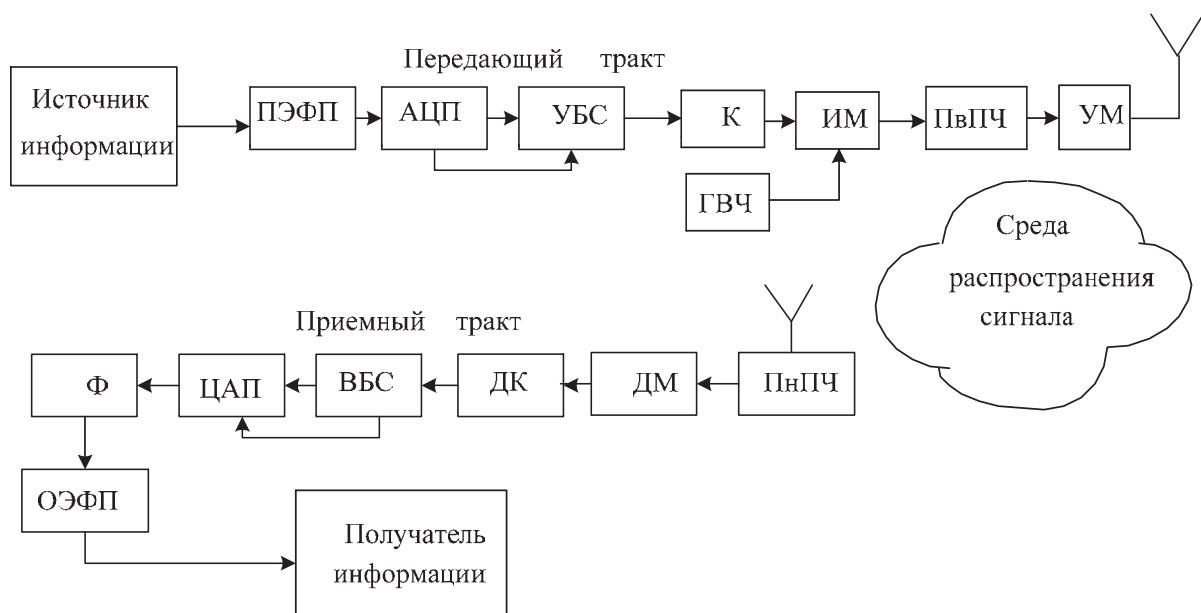


Рис. 2.2. Обобщенная структурная схема системы передачи цифровых сигналов

Разумеется, приведенные схемы лишь в самых общих чертах иллюстрируют процессы, проходящие в аналоговой и цифровой системах передачи информации.

2.2. Состав радиотехнических систем передачи информации

Любая радиотехническая система содержит в своем составе большое количество узлов и элементов, которые объединяются по функцио-

нальному признаку в следующие группы. Приведенное далее деление на группы является условным и зависит от назначения системы.

Антенно-фидерные устройства (АФУ)

Функционально наиболее крупная аппаратная группа радиотехнических узлов. Предназначены для преобразования в приемном тракте электромагнитной волны в электрический сигнал, обеспечения малошумящего усиления и понижающего преобразования частоты. В передающем тракте АФУ (при потребности) обеспечивают усиление мощности излучаемого сигнала, повышающее преобразование частоты, согласование выхода усилителя мощности с антенной. Кроме этого, специалисты в области АФУ разрабатывают собственно антенну, обеспечивающую необходимые характеристики излучения; все элементы СВЧ-тракта – фильтры, вентили, циркуляторы, волноводные элементы, фазовращатели, переходы от волновода к кабелю и др. Кроме того, специалисты-разработчики АФУ создают, если в этом есть необходимость, аппаратуру слежения антенной системой за перемещениями источника сигнала. Если средой распространения сигнала являются кабельные, волоконно-оптические или проводные линии связи, то антенные узлы в явном виде не используются, однако вопросы согласования приемо-передатчиков с линией остаются актуальными.

Следует подчеркнуть, что преобразование электромагнитной энергии в электрический сигнал с точки зрения теории цепей и сигналов описывается интегралом свертки, когда каждая спектральная составляющая сигнала умножается на значение комплексного коэффициента передачи антенны на этой частоте, а фаза смещается на фазовый сдвиг, вносимый трактом. Из этого следует, что невозможно устранить искажающее влияние антенны на сигнал с помощью линейной фильтрации.

Передающее устройство

Обеспечивает формирование сигнала для окончательного усиления мощности, достижения необходимой спектральной чистоты, уровня внеполосных излучений и паразитных модуляций. Входным является модулированный сигнал на промежуточной частоте с выхода модема.

Приемное устройство

Входным сигналом является, как правило, сигнал первой промежуточной частоты. Здесь обеспечивается основное усиление сигнала и оптимальное распределение ширины полосы каждого усилителя промежуточной частоты (в случае многокаскадного УПЧ). Выходной сигнал на второй (или третьей) промежуточной частоте является входным для модема.

Часть приемо-передающего устройства от модема до антенны (включительно) называют линейным трактом.

Модем

Модулятор/демодулятор (сокращенно – модем) современной системы связи обеспечивает следующие функции:

- Сопряжение с линейным трактом.
- Установка значения несущих частот на передачу и прием.
- Установка скорости передачи.
- Сопряжение со входом/выходом линии цифровой передачи для связи с источником/получателем информации или мультиплексором.
- Модуляция/демодуляция.
- Кодирование/декодирование цифровой информации с целью повышения помехоустойчивости или предохранения от несанкционированного доступа в канал связи [16].
- Установка уровня мощности излучаемого сигнала.
- Определение отношения сигнал/шум и формирование сигнала «потеря связи» при уменьшении отношения сигнал/шум ниже порогового уровня.

Мультиплексор

Содержит узлы аналого-цифрового и цифроаналогового преобразования для сопряжения с телефонными каналами. Обеспечивается мультиплексирование исходных потоков, поступающих с/на цифровые порты с преобразованными в цифровую форму речевыми сигналами. Обеспечивается перераспределение загрузки канала по заявкам на использование канала с целью оптимизации использования частотного ресурса станции связи.

Синтезатор частот (СЧ)

Обеспечивает формирование колебаний всех необходимых частот для работы линейного тракта (гетеродинные частоты, опорные частоты для повышающего преобразователя частоты, импульсные сигналы запуска узлов, например, АЦП и ЦАП, и т. д.) В состав СЧ входит высокостабильный опорный генератор или производится синхронизация от внешнего более стабильного генератора, чем достигается требуемая стабильность частоты излучаемого колебания.

Блок питания

Обеспечивает узлы и блоки изделия необходимыми питающими напряжениями требуемой мощности, формируемыми из напряжения первичной сети или от первичных источников, которыми могут быть дизель-электрические агрегаты, преобразователи энергии Солнца и ветра в электроэнергию. Блоки питания, использующие в своей основе атомные реакторы, в аппаратуре широкого применения распространения не получили.

2.3. Основные тактико-технические характеристики радиотехнических систем передачи информации

Дальность действия радиосистемы (ДД) – одна из наиболее важных ее характеристик. Различают *максимальную* и *минимальную* дальность действия. В любом варианте под дальностью действия понимается область пространства, в пределах которой радиосистема выполняет свое функциональное назначение в соответствии с тактико-техническими характеристиками. Максимальная ДД определяется в основном отношением мощности сигнала к мощности шума, которое влияет на достоверность передачи информации. Минимальная дальность действия зависит от предельно допустимой мощности принимаемого сигнала (динамического диапазона входного сигнала). В радиолокации свободного пространства максимальная дальность определяется вероятностями правильного обнаружения, ложной тревоги и другими характеристиками обнаружения цели.

Помехоустойчивость системы определяется устойчивостью ее работы в присутствии шумов или, если это оговаривается особо, иных помех. Под *шумом* понимается хаотическое измерение напряжения, вызванное в основном температурными явлениями в элементах и имеющее достаточно равномерную спектральную плотность. Помехи делят на *умышленные* и *неорганизованные*. *Умышленные* помехи излучают с целью подавить работоспособность радиоэлектронных средств передачи либо извлечь информацию. К *неорганизованным* помехам относятся радиоизлучения различных типов – соседних радиостанций, промышленных установок. *Естественными* помехами являются атмосферные помехи, излучения Солнца и других звезд, северные сияния и т. п. По характеру взаимодействия с радиосигналом помехи делят на *аддитивные*, т. е. образованные алгебраическим суммированием помехи и сигнала, и *мультипликативные*, когда результат проявляется в виде произведения сигнала и помехи. Следует понимать, что аддитивные составляющие могут быть разделены при линейной фильтрации, а мультипликативные – нет.

Помехоустойчивость системы определяется, как правило, вероятностью ошибки P_6 на 1 бит. Для межкомпьютерных коммуникаций характерно требование P_6 порядка $10^{-6} \dots 10^{-7}$ и лучше. Для цифровых линий передачи речевой информации достаточно P_6 порядка $10^{-3} \dots 10^{-4}$.

Разрешающая способность. В теории и практике радиосвязи существует класс задач, посвященных *разрешению* и *разделению* сигналов. Доказано, что линейной системой (фильтром) могут быть разделены без каких-либо искажений сигналы, удовлетворяющие условию линейной независимости. Этому условию отвечают *ортогональные сигналы*, к которым относятся сигналы:

- не перекрывающиеся по времени,
- не перекрывающиеся в частотной области,
- вида $U_1 \sin \omega t$ и $U_2 \cos \omega t$,
- описываемые ортогональными полиномами, например, Лежандра.

Близки к ортогональным и *шумоподобные* сигналы. Условие ортогональности сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$:

$$\int_{-\infty}^{\infty} s_1(t)s_2(t)dt = 0.$$

В радиолокации разрешающая способность по дальности – минимальное расстояние между двумя воздушными целями, находящимися на одном азимуте при условии, когда отраженные сигналы не перекрываются. Аналогично разрешающая способность по азимуту – минимальное угловое расстояние между двумя целями, находящимися на одной дальности, когда отраженные сигналы не перекрываются. Можно сформулировать подобное определение для разрешающей способности по угломестной координате или скорости движения цели.

Пропускной способностью системы называют максимальное количество информации, которое может быть передано или обработано системой в единицу времени. Этот параметр определяется качеством канала связи и отношением мощности сигнала к мощности шума. Часто используют термин *скорость передачи информации*, который выражается в количестве информационных битов, передаваемых за одну секунду.

Надежность, или среднее время безотказной работы. Это понятие определяет среднее время безотказной работы. Требование особенно актуально при проектировании аппаратуры, которая во время эксплуатации не обслуживается, как, например, радиотехническое оборудование космического аппарата. Надежность повышается путем резервирования, т. е. снабжения изделия одним или несколькими дополнительными комплектами, каждый из которых включается по очереди по мере выхода из строя рабочего комплекта.

Масса и габариты. При разработке стационарной аппаратуры, эксплуатируемой в помещении, этот параметр существенной роли не играет. Однако при разработке аппаратуры для ракетно-космического комплекса аппаратных средств или средств, переносимых оператором, это требование является весьма важным. Может сложиться мнение, что минимизация этого показателя аппаратуры достигается только за счет использования легких конструкционных материалов и надлежащей упаковки изделия. Это действительно так, но в работе специалистов-разработчиков достаточно часто находятся решения, в конечном счете приводящие к уменьшению массогабаритных показателей.

Стоимость аппаратуры определяется комплектующими изделиями и технологическими особенностями производства. Параметр имеет большое значение в условиях рыночных отношений, когда предпочтение может быть отдано более дешевой аппаратуре, пусть даже в чем-то проигрывающей в технических характеристиках.

2.4. Сигналы, используемые в радиотехнических системах, шумы и помехи

В системах передачи информации используют *немодулированные* и *модулированные* сигналы. К *немодулированным* относятся сигналы, не имеющие несущей частоты, т. е. сигналы, сформированные без использования модуляции как операции перемножения одного колебания (модулирующего) на колебание более высокой частоты – несущее колебание. Такими являются двоичные цифровые последовательности, включая сверхширокополосные сигналы [21]. В последнее десятилетие наметился интерес исследователей к использованию *хаотических* сигналов, отличающихся структурной устойчивостью. Справедливости ради следует подчеркнуть, что отсутствие в спектре сигнала несущей частоты, чем характеризуются балансные виды модуляции, не является признаком, по которому сигнал можно отнести к немодулированным.

Цифровые немодулированные сигналы имеют два и, гораздо реже, больше дискретных уровней. Такие сигналы являются переносчиками информации в пределах приборов, устройств и сетей, не связанной с работой на длинные линии передачи, включая свободное пространство.

При передаче информации по длинным линиям или свободному пространству используются *модулированные* сигналы. В процессе модуляции происходит перенос спектра модулирующего колебания в область высоких частот. Модулированные сигналы являются, как правило, узкополосными, у которых ширина занимаемой полосы частот много меньше несущей частоты. Узкополосные сигналы позволяют создавать антенны разумных габаритов, но эффективно излучающие мощность в среду распространения сигнала. На приемном конце необходима демодуляция сигнала, или, как говорят, снятие информации с высокочастотного сигнала.

2.4.1. Немодулированные сигналы

Некоторые распространенные формы двоичных сигналов показаны на рис. 2.3. Следует подчеркнуть, что в реальной жизни сигналы не имеют столь ярко выраженные крутые фронты. На рис. 2.3, *г* изображен реальный сигнал, однако степень «завала» фронтов зависит от многих факторов и не

всегда может быть такой, как указано на данном рисунке. По полярности используемого напряжения сигналы классифицируются на:

- униполярные, когда напряжение единичных битов только отрицательно либо, наоборот, положительно (т. е. знак не меняется, например, 0 В для логической 1 и 5 В для логического 0);
- полярные: сигнал имеет положительный и отрицательный потенциалы (противоположные знаки определяют логические состояния, например: ± 5 В);
- трехполярные: изменение сигнала происходит между тремя уровнями, включая 0 В.

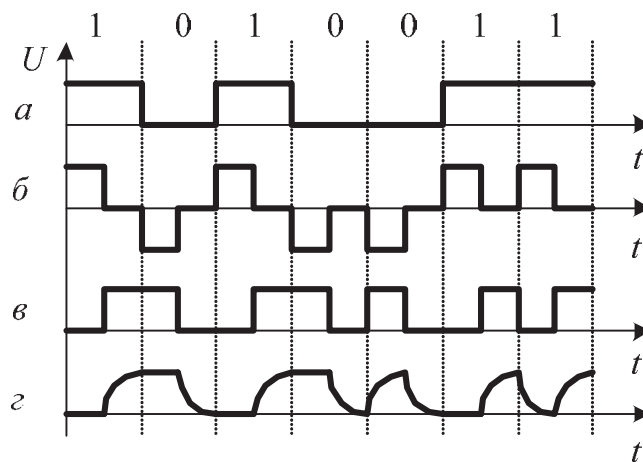


Рис. 2.3. Типичные цифровые сигналы

В строке рис. 2.3, *a* приведена произвольная последовательность единиц и нулей, как это бывает при реальной работе. Ниже показано, как кодируются эти символы в различных системах сигналов. Так, на рис. 2.3, *a* показан униполярный код с представлением каждого единичного бита высоким уровнем положительного напряжения и нулевого бита – нулем вольт. Отметим, что уровень сигнала одинаков для каждого одноименного бита. Часто для логического нуля используют высокий уровень напряжения, а для логической единицы – низкий. Этот код широко применяется в передаче данных вследствие своей относительной простоты и низкой стоимости аппаратной реализации. Он обеспечивает наиболее эффективное использование полосы частот. Недостатком сигнала является отсутствие способности самосинхронизации, поскольку длинные серии идущих подряд единиц и нулей не приводят к изменениям состояния сигнала в канале. Это может привести к рассогласованию (дрейфу) таймера приемника по отношению к поступающему сигналу и несвоевременному опросу линии. Передатчик и приемник могут фактически утратить взаимную синхронизацию.

Сигнал с возвращением к нулю (reset to zero, RZ, рис. 2.3, б) предусматривает, что в представлении каждого бита сигнал изменяется по меньшей мере один раз. Поскольку RZ-сигналы обеспечивают изменение состояния для каждого бита, они обладают очень хорошими свойствами синхронизации. Основным недостатком RZ-сигнала состоит в том, что он требует двух переходов (изменений) сигнала для каждого бита. Следовательно, RZ-сигналы требуют вдвое большей скорости передачи по сравнению с обычными сигналами, т. е. более широкой полосы пропускания трактов.

Рис. 2.3, в иллюстрирует еще один очень распространенный сигнал, используемый в настоящее время во многих системах передачи данных. Это манчестерский код. Он формируется путем изменения состояния при представлении каждого бита, независимо от его значения. Следовательно, это хороший синхронизирующий код. Однако, как и RZ-сигнал, он требует удвоенной скорости для передачи. Кроме того, интерфейсные устройства, используемые для обеспечения этой более высокой скорости, стоят значительно дороже по сравнению с аналогичными устройствами для униполярных сигналов. Манчестерский код обычно используется в технике записи на магнитную ленту, в оптоволоконных каналах, коаксиальных линиях и локальных сетях.

2.4.2. Модулированные сигналы

Эффективное излучение и прием электромагнитных волн в беспроводных системах передачи информации возможны лишь в диапазоне достаточно высоких радиочастот. Это связано с излучающей способностью антенны, которая сильно зависит от соотношения длины волны излучаемого колебания и размера антенны. Кроме того, в проводных и беспроводных системах широко используют методы уплотнения каналов. Решение этих задач может быть обеспечено с помощью модуляции высокочастотного колебания информационными сигналами. Технически модуляция производится путем перемножения в том или ином виде моделирующего сигнала и колебания несущей частоты. Процесс модуляции является составной частью общего процесса согласования сигнала с характеристиками канала, поэтому при проектировании системы передачи информации выбор метода модуляции является весьма ответственным. Выбор типа модуляции (или, как это принято в цифровых системах передачи, – манипуляции/телеграфирования) оказывает существенное влияние на технические характеристики системы передачи и на особенности построения оконечного оборудования данных.

В качестве сигнала, переносящего (несущего) информацию используют гармоническое колебание вида $s(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$, где A , ω , φ – ам-

плитуда, угловая частота и фаза несущего колебания. Воздействием на один из параметров несущего колебания (A , ω , φ) можно получить амплитудную, частотную или соответственно фазовую модуляцию. В цифровых системах используют дискретные виды модуляции и в этом случае принято говорить об амплитудной, частотной или фазовой телеграфии (или манипуляции): АТ, ЧТ или ФТ, когда модулируемый параметр сигнала может принимать одно или несколько фиксированных дискретных значений. На приемном конце используют соответственно амплитудный, частотный или фазовый детекторы или, другими словами, демодуляторы.

Процедуры модуляции/демодуляции и схемные решения подробно будут рассмотрены в гл. 3 настоящей работы.

2.4.3. Шумы и помехи

В системах передачи информации неизбежно присутствуют помехи, искажающие принимаемый сигнал, что снижает достоверность приема. Помехи могут возникать из-за:

- теплового шума аппаратных средств;
- посторонних излучений, в т. ч. естественного характера, часть спектра которых попадает в полосу пропускания приемных устройств;
- замирания сигнала, вызванного многолучевым распространением при тропосферном рассеянии, а также распространением в пределах городской застройки.

Аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ)

Во многих случаях, особенно в спутниковой связи, тепловой шум является самым распространенным источником помех, поэтому влияние шума на характеристики передачи, прежде всего на помехоустойчивость систем передачи информации, было исследовано достаточно глубоко. Основной причиной АБГШ является тепловое движение электронов во всех элементах и узлах приемного тракта – антенно-фидерных элементах, малошумящем усилителе и первом понижающем преобразователе частоты. Полезный сигнал, проходя тракт, суммируется со случайной составляющей, что отражено первым символом в аббревиатуре АБГШ (от англ. *addition* – добавление).

Плотность вероятности случайного процесса с нормальным распределением описывается выражением

$$P(n) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(n - M[n])^2}{2\sigma^2}\right].$$

Графическое представление $P(n)$ приведено на рис. 2.4 [15]. Здесь n – случайный сигнал со средним значением (математическим ожиданием) $M[n]$; $\sigma^2 = D$ – дисперсия (мощность) случайного процесса $n(t)$. Если $M[n] = 0$, то говорят, что процесс центрирован и плотность вероятностей симметрична относительно нуля (рис. 2.4).

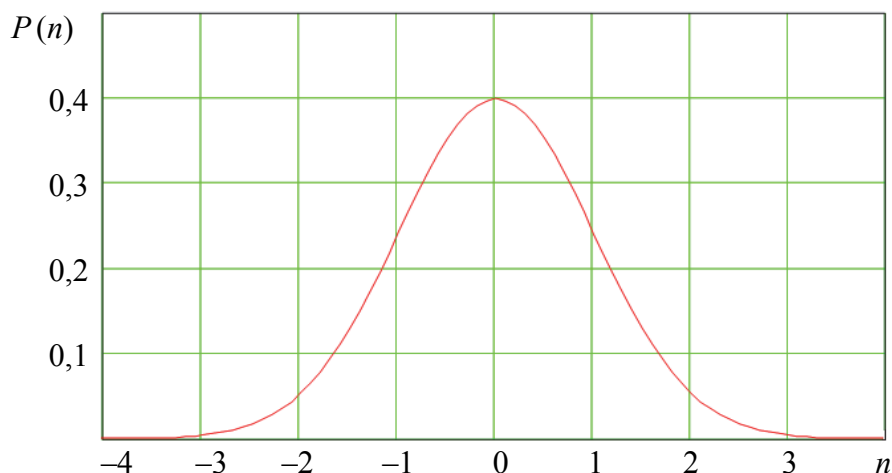


Рис. 2.4. График нормальной плотности вероятностей случайного процесса с нулевым средним значением и дисперсией $D = 1$ [23]

Распределение мгновенных значений шумового напряжения по нормальному закону отражено в аббревиатуре АБГШ «гауссовский»). Модель белого шума по аналогии с белым светом предполагает, что все спектральные компоненты одинаково интенсивны с равной мощностью на единицу полосы частот в диапазоне до очень высоких частот. Поэтому считается, что спектральная плотность мощности теплового шума (Вт/Гц) равномерна для всех частот [3]:

$$G(f) = \frac{N_0}{2}, \quad (2.1)$$

где $G(f)$ – двухсторонняя спектральная плотность мощности. Здесь $N_0 = kT_0$ – односторонняя спектральная плотность мощности шума (k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град (Вт · с); T_0 – температура в градусах Кельвина).

Автокорреляционная функция (АКФ) АБГШ $R(\tau)$ определяется обратным преобразованием Фурье от $G(f)$ и представляет собой δ -функцию (рис. 2.5):

$$R(\tau) = \frac{N_0}{2} \delta(\tau), \quad (2.2)$$

где $\delta(x)$ – дельта-функция (функция Дирака), $\delta(x) = \begin{cases} \infty & \text{для } x = 0 \\ 0 & \text{для } x \neq 0 \end{cases}$; N_0 – спектральная плотность мощности источника шума.

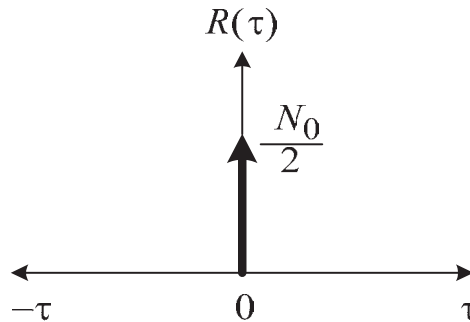


Рис. 2.5. Автокорреляционная функция АБГШ

В частном случае АБГШ $\delta(\tau)$ определяет автокорреляционную функцию выборок шума, из которой следует, что для $R(\tau) = 0$ для всех $\tau \neq 0$ любые выборки АБГШ не коррелированы. $R(\tau = 0) = D$ – дисперсии шума, Вт.

Автокорреляционная функция АБГШ есть математическое ожидание произведения двух любых отсчетов процесса $n(t)$:

$$R[n(\tau)] = M[n(t_1)n(t_2)] = \overline{n(t_1)n(t_2)} = \frac{N}{2} \delta(t_1 - t_2).$$

Здесь черта над произведением обозначает операцию усреднения. Дельта-функция обладает замечательным свойством, которое называют «фильтрующим свойством δ -функции» и которое широко используется при анализе прохождения АБГШ через различные цепи. Оно состоит в следующем:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t_1) \delta(t_1 - t_2) dt_2 = x(t_1). \quad (2.3)$$

Мощность АБГШ бесконечна, поскольку бесконечна ширина полосы частот. В формуле (2.3) по определению δ -функции $\delta(\tau = 0) = \infty$, что также доказывает, что дисперсия (мощность) АБГШ бесконечна. При уменьшении ширины полосы пропускания внеполосные составляющие шума отфильтровываются. Поэтому мощность отфильтрованного шума $P_{ш}$ (Вт) зависит от ширины полосы тракта ΔF :

$$P_{ш} = kT_0 \Delta F.$$

Известно много источников шума, например, обычный активный резистор R (Ом) является генератором шума (B^2):

$$U_{\text{ш}}^2 = 4kT_0 R \Delta F. \quad (2.4)$$

Произведение kT_0 характеризует интенсивность теплового движения электронов в проводнике, от которой зависят флуктуации напряжения шума. При расчетах обычно полагают, что аппаратура находится при комнатной температуре $+20^\circ\text{C}$. Тогда в формуле (2.4) следует подставлять значение $T_0 = 273 + 20 = 293 \approx 300$ К. Естественно, при работе аппаратуры в открытом космосе в условиях тени относительно Солнца следует использовать значение $T_0 = 0$ К.

Одним из важнейших показателей любой радиосистемы является отношение мощности сигнала к мощности шума: с/ш. В англоязычной литературе этот параметр называют SNR (*signal to noise ratio*, S/N или SNR). Отношение с/ш определяет помехоустойчивость системы, поскольку от него зависит вероятность ошибки. В цифровых радиотехнических системах (РТС) передачи информации (ПИ) этот показатель есть отношение энергии элемента сигнала (бита), к спектральной плотности мощности шума:

$$c/\text{ш} = \frac{E_{\text{б}}}{N_0} \left(\frac{\text{Дж}}{\text{Вт/Гц}} \right) = \frac{P_{\text{с}} T}{P_{\text{ш}} / \Delta F} \left(\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{Вт/Гц}} \right).$$

Здесь $P_{\text{с}}$, T – мощность сигнала и его длительность; $P_{\text{ш}}$ – мощность источника шума; ΔF – ширина полосы пропускания тракта или, как говорят, шумовая полоса.

2.5. Основы теории усреднения

Если исследователю доступно достаточно большое количество периодов сигнала, то наиболее эффективным средством борьбы с шумом является усреднение [19]. Пусть колебание на входе приемника

$$y(t) = x(t) + n(t)$$

является суммой периодического сигнала $x(t)$ и аддитивного белого гауссовского шума $n(t)$. Шум будем считать центрированным (математическое ожидание $M[n(t)] = 0$) стационарным процессом. Необходимым условием возможности явления усреднения считается требование постоянства и неизменности формы и периода сигнала. Поскольку $x(t)$ является периодической функцией с периодом T , то при любом целом k