

В. Ш. Берикашвили

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ: ОСНОВЫ ТЕОРИИ

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ
ДЛЯ АКАДЕМИЧЕСКОГО БАКАЛАВРИАТА**

2-е издание, исправленное и дополненное

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом высшего образования
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по инженерно-техническим направлениям*

**Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru**

Москва ■ Юрайт ■ 2018

УДК 621.37(075.8)
ББК 32.84я73
Б48

Автор:

Берикашвили Валерий Шалвович — профессор, доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и информационно-измерительных систем Института информационных технологий и автоматизированных систем управления Национального исследовательского технологического университета «МИСиС».

Рецензенты:

Чиркин А. С. — доктор физико-математических наук, профессор;
Шанин В. И. — доктор технических наук, профессор.

Берикашвили, В. Ш.

Б48 Радиотехнические системы: основы теории : учеб. пособие для академического бакалавриата / В. Ш. Берикашвили. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2018. — 105 с. — (Серия : Бакалавр. Академический курс).

ISBN 978-5-534-05542-9

В пособии рассматриваются основные типы радиотехнических систем (РТС), дается классификация РТС по используемым частотам (длинам волн), типу модуляции, назначению, методам обработки информации, функциональным особенностям. Детально разобраны вопросы помехоустойчивости, оптимального приема и распознавания сигналов на фоне помех. Уделено внимание последним достижениям в области спутниковой связи и навигации, тенденциям в развитии РТС. Книга подробно освещает роль разработчиков, конструкторов и технологов в создании и эксплуатации радиосистем.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям.

УДК 621.37(075.8)
ББК 32.84я73



Delphi Law Company

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

© Берикашвили В. Ш., 2007
© Берикашвили В. Ш., 2018,
с изменениями

ISBN 978-5-534-05542-9

© ООО «Издательство Юрайт», 2018

Оглавление

Список сокращений	6
Введение.....	7
Глава 1. Общие сведения о радиотехнических системах.....	9
1.1. Основные определения радиотехники и физические основы использования радиоволн	9
1.2. Системные методы и радиотехнические системы	11
1.3. Жизненный цикл РТС.....	12
1.4. Структурные и функциональные схемы РТС.....	13
Глава 2. Количество и характер используемой информации.....	16
2.1. Количественная оценка информации	16
2.2. Вероятностное описание процесса (сообщения)	18
2.3. Описание цифровых сообщений	20
2.4. Классификация РТС по характеру сообщений, циркулирующих в системе	21
2.5. Классификация РТС по используемым частотам	21
2.6. Классификация РТС по модулируемому параметру	22
2.7. Параметры, характеристики и показатели качества РТС.....	23
Глава 3. Радиоэлектронная аппаратура РТС.....	25
3.1. Системные методы и радиоэлектронная аппаратура	25
3.2. Схемотехническое деление РЭА.....	25
3.3. Экономическая эффективность РТС.....	27
3.4. Роль конструкторов и технологов в развитии РТС	27
3.5. Системный подход при проектировании РТС.....	28
3.6. Историческое развитие РТС	28
Глава 4. Искажения сообщений в РТС, помехоустойчивость и оптимальный прием	31
4.1. Источники помех и их фильтрация	31
4.2. Искажение информации на выходе фильтра	33
4.3. Искажения импульсных сигналов	35

4.4. Действие помех при приеме цифровых сигналов	35
4.5. Оптимизация выделения информации при действии помех ...	35
4.6. Оптимальное распознавание дискретных сигналов	36
4.7. Схема обнаружения сигнала на фоне помех	37
4.8. Схема обнаружения сигнала со случайной фазой	38
Глава 5. Согласованные фильтры	40
5.1. Свойства согласованных фильтров	40
5.2. Схемы согласованных фильтров	41
5.3. Реализация СФ и квазисогласованные фильтры	42
5.4. Ошибки при обнаружении и распознавании сигнала с известными параметрами.....	44
5.5. Ошибки обнаружения сигналов со случайной фазой	45
Глава 6. Оптимизация измерений параметров сигналов и выделения сообщений	47
6.1. Критерий максимального правдоподобия	47
6.2. Влияние помех на оценку параметра	48
6.3. Оптимизация выделения сообщения из сигнала и помех	49
6.4. Методы борьбы с источниками помех в РТС.....	50
Глава 7. Энергетические соотношения в РТС	52
7.1. Характеристики направленной антенны РТС	52
7.2. Мощности передачи и приема сигналов РТС	53
7.3. Расчет мощности передатчиков.....	54
Глава 8. Радиотехнические системы передачи информации.....	56
8.1. Назначение и особенности систем передачи информации	56
8.2. Модуляция и демодуляция радиосигнала.....	57
8.3. Многоканальные системы передачи информации	59
8.4. Временное уплотнение при цифровой передаче	60
8.5. Системы телевидения	62
8.6. Спутниковые многоканальные РТС передачи информации ..	64
8.7. Сотовая телефонная радиосвязь	65
Глава 9. Радиолокационные системы	67
9.1. Принципы работы РЛС и определения параметров объектов.....	67
9.2. Классификация РЛС по выполняемым задачам	68
9.3. Тактические характеристики РЛС	69
9.4. Сигналы и цели в РЛС.....	69

9.5. Общая характеристика зондирующих сигналов.....	71
9.6. Последовательности (пачки) импульсов в РЛС.....	71
9.7. Особенности отражения радиоволн от целей	72
Глава 10. Оптимальные приемники	
радиолокационных сигналов	75
10.1. Согласованная фильтрация ЛЧМ-сигналов	75
10.2. Цифровые согласованные фильтры	78
10.3. Накопители для пачек импульсных сигналов	79
10.4. Оптимальный приемник для некогерентной пачки радиоимпульсов.....	80
Глава 11. Вычисление координат и параметров	
движения в РЛС.....	82
11.1. Цифровые накопители (интеграторы)	82
11.2. Методы измерения координат и радиальной скорости целей в РЛС	83
11.3. Радиоизмерение дальности (импульсный, частотный и фазовый метод).....	84
11.4. Измерение радиальной скорости	87
11.5. Дальность действия РЛС.....	87
11.6. Влияние отражений от земной поверхности	89
11.7. Влияние затухания радиосигнала в атмосфере	90
11.8. Виды обзора в РЛС и их особенности.....	90
11.9. Фазированные антенные решетки (ФАР)	91
11.10. Типы РЛС по функциональному назначению	92
Глава 12. Радионавигационные системы и системы	
радиоуправления.....	93
12.1. Радионавигационные системы (РНС)	93
12.2. Подсистемы радионавигационных систем	94
12.3. Угломерные (амплитудные) РНС.....	94
12.4. Радионавигационные системы на основе ИСЗ	96
12.5. Системы радиоуправления	97
Заключение.....	101
Список рекомендуемой литературы.....	103
Новые издания по дисциплине «Основы	
радиотехники» и смежным дисциплинам.....	105

Список сокращений

АЧХ — амплитудно-частотная характеристика
АЦП — аналого-цифровой преобразователь
АМ — амплитудная модуляция
БК — бинарный квантователь
ВЧ — высокие частоты
ВШП — встречно-штыревой преобразователь
ГВЧ — генератор ВЧ
КВ — короткие волны
КВЧ — крайне высокие частоты
ЛЗ — линия задержки
ЛЧМ — линейно частотно модулированный
НЧ — низкие частоты
ОВЧ — особо высокие частоты (метровые волны)
ПАВ — поверхностные акустические волны
ПВО — противовоздушная оборона
ПВМ — персональная вычислительная машина
РЛС — радиолокационная система (станция)
РТС — радиотехническая система
СВЧ — сверхвысокие частоты (сантиметровые волны)
СДЦ — селекция движущихся целей
СМ — смеситель
СФ — согласованный фильтр
СЧ — средние частоты
ТЗ — техническое задание
УВЧ — ультра высокие частоты
УКВ — ультра короткие волны
УСУ — устройство селекции и усиления
ФГС — формирователь групп сигналов
ФМ — фазовая модуляция
ФЧХ — фазочастотная характеристика
ЦФ — цифровой фильтр
ЧМ — частотная модуляция
ЭВМ — электронно-вычислительная машина

Введение

Радиотехнические системы (РТС) представляют собой комплекс взаимодействующих между собой радиотехнических устройств, предназначенных для выполнения задач, связанных с передачей или извлечением информации.

Особенностью радиотехнических систем, в отличие от электронных комплексов (ЭВМ, видео и звукозаписывающая аппаратура), является наличие протяженной линии связи, в которой распространяются сигналы.

Это обстоятельство обуславливает напряженный энергетический режим, необходимость учета условий распространения сигналов в линии связи, подверженность внешним воздействиям (помехам), возможность утечки информации (открытость). При проектировании радиотехнических систем приходится сталкиваться с необходимостью учета многих факторов разнообразного характера.

Использование радиотехнических систем и сфера их действия быстро расширяются. Растет их сложность и удельная стоимость на объектах (60% стоимости самолета и 80% — искусственного спутника Земли). Возникают проблемы оптимизации сочетания технических, тактических и стоимостных характеристик. Роли разработчика радиотехнических систем, конструктора и технолога представляются в равной мере существенными, и специалисты данных направлений постоянно востребованы.

Конструкторы и технологи должны знать не только общие принципы работы РТС, но и факторы, влияющие на их качественные характеристики, предельные возможности и современные достижения.

Материал пособия дает представление о принципах построения, возможностях, параметрах и характеристиках современных РТС. Для изучения этой дисциплины необходимо изучить курсы: «Общая физика», «Теория вероятности», «Основы радиоэлектроники», «Конструкция экранов и СВЧ-устройств», «Волновые процессы».

В результате изучения материала, изложенного в пособии, студент должен:

знать

- классификацию радиотехнических систем, основы функционирования радиотехнических систем;
- основные методы анализа и синтеза устройств обнаружения, различения и разрешения, оценки и фильтрации радиосигналов;
- принципы определения координат и параметров движения объектов; основы теории информации и методы повышения помехоустойчивости при передаче информации;
- принципы и структуры построения систем управления подвижными объектами и организации командно-измерительных комплексов; методы борьбы с помехами;

уметь

- синтезировать структуры оптимальных устройств обработки сигналов;
- оценивать потенциальные характеристики таких устройств и эффективность системы в целом;
- пользоваться стандартами и справочниками при проектировании РТС;

владеть

- навыками анализа задач проектирования и эксплуатации радиотехнических систем различного профиля;
- способами пространственно-временной обработки сигналов;
- методами расчета в адаптивных системах;
- методами приема и обработки радиосигнала при неполной информации.

Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

О РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

1.1. Основные определения радиотехники и физические основы использования радиоволн

Радиотехника — это область науки и техники, использующая распространяющиеся в пространстве электромагнитные волны для передачи, извлечения и преобразования информации.

Информация — совокупность сообщений (сведений) о свойствах объектов, изменении их состояния, о протекании процессов в природе, обществе и т.п.

Информация (философское определение) — отражение объективных свойств материального мира.

В настоящее время информация играет все возрастающую роль в жизни человеческого общества. Происходит ускорение развития информационных потребностей человечества и средств их обеспечения (систем хранения и передачи информации). Большую роль в информационном обеспечении играет радиотехника.

Информация в радиотехнике представляется с помощью радиосигнала, распространяющегося в пространстве.

Радиосигнал — это электромагнитные колебания, как правило, синусоидальные с несущей частотой $\omega_{\text{с0}}$ и модулированные первичным электрическим сигналом (звуковыми колебаниями или видеосигналом).

Аналитически радиосигнал можно представить в следующем виде:

$$S_H(t) = A_S(t) \cos(\omega_{S0}t + \varphi_S(t)), \quad (1.1)$$

где A_S , ω_{S0} , φ_S — амплитуда, циклическая частота и фаза сигнала; t — время.

Информация в виде сообщения может содержаться в изменении любого из параметров A_S , ω_{S0} , φ .

Процесс отображения информации в параметрах сигнала называется модуляцией. Виды модуляции: амплитудная $A_S(t)$, частотная $\omega_S(t)$, фазовая $\varphi(t)$.

В электрических цепях радиосигнал появляется в виде изменения токов и напряжений. В пространстве — в виде электромагнитных волн.

Электромагнитные волны в диапазоне частот от 1 кГц до 3 ТГц называются радиоволнами.

Распространение радиоволн в пространстве

Уравнения распространяющейся волны можно представить в виде синусоидальных колебаний электрического E и магнитного H поля в пространстве z и времени t .

$$\begin{aligned} E(t, z) &= E_{S0}(z) \cos(\omega_{S0}t + \varphi_{S0} + \omega_{S0}z / c), \\ H(t, z) &= H_{S0}(z) \sin(\omega_{S0}t + \varphi_{S0} + \omega_{S0}z / c). \end{aligned} \quad (1.2)$$

Состояние E и H повторяется в пространстве z и времени через 2π , т.е.:

$$\begin{aligned} \omega_{S0}\lambda_S / c &= 2\pi, \quad \lambda_S = 2\pi c / \omega_{S0} = c / f_{S0}, \\ f_{S0} &= \omega_{S0} / 2\pi, \quad f_S = 1 / T_S. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Здесь, как и в формуле (1.1), ω_{S0} — несущая циклическая частота в радианах в секунду; f_S — частота в Герцах; T_S — период колебаний во времени; c — скорость света; λ_S — длина волны (период колебаний в пространстве).

Замечательные особенности радиоволн

Широкое использование радиотехники обусловлено следующими замечательными особенностями радиоволн, которые:

- 1) распространяются на большие расстояния (используют в радио и телевидении);
- 2) огибают препятствий и земной поверхности, отражение от ионосферы (дальняя радиосвязь);
- 3) проникают в глубь суши и воды (радиозондирование);
- 4) проходят через облака, туман, дождь и снег (всепогодность);

5) отражаются от металлических предметов (используют в радиолокации);

6) в разной степени отражаются от поверхности суши и воды (радиозондирование);

7) могут излучаться направленно (дальние радиорелейные линии и спутниковая радиосвязь);

8) обеспечивают высокую скорость передачи большого объема информации (спутниковая связь);

9) позволяют как генерировать сигналы большой мощности, так и выделять слабые сигналы (радиозондирование планет и радиоастрономия).

Современная радиоаппаратура очень надежна и позволяет устанавливать ее на стационарных и подвижных объектах. Технология производства ее отработана и совершенствуется.

1.2. Системные методы и радиотехнические системы

Система — это совокупность взаимосвязанных разнородных объектов (устройств, частей, подсистем), предназначенная для выполнения определенных функций в условиях взаимодействия с внешней средой, с учетом развития и противоречий.

Основные понятия:

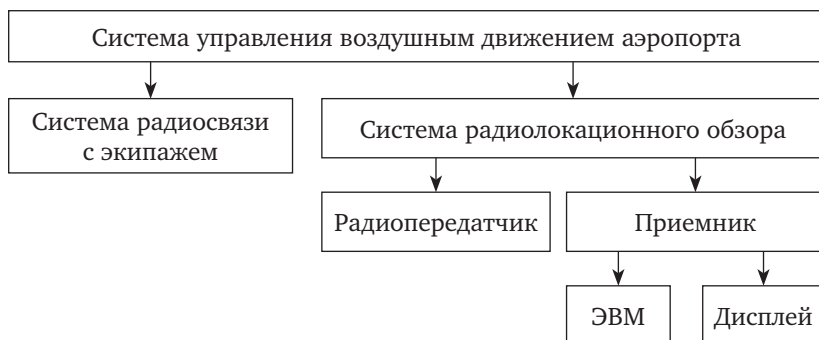
Подсистема — элемент «Сверхсистемы».

Системный подход к изучению объекта — разбиение на системы и подсистемы, выделение главного и второстепенного.

Структура — связь элементов в целое.

Иерархия — подчиненность систем.

Пример:



Радиотехническая система (РТС) — это комплекс взаимодействующих радиотехнических устройств, предназначенных для выполнения задач, связанных с извлечением, передачей и подавлением информации.

Примеры типов РТС по выполняемым функциям:

- 1) радиосвязь, радиовещание, телевидение, радиоуправление (передача информации);
- 2) радиолокация (извлечение информации);
- 3) радиоуправление (передача + извлечение информации);
- 4) радиопротиводействие (подавление информации).

1.3. Жизненный цикл РТС

Радиотехнические системы следует рассматривать в развитии изменения целей и задач, технических средств, функций, технологических решений.

При разработке и эксплуатации РТС выделяют несколько основных этапов.

1. *Замысел.* Функция РТС. На основе потребностей общественного развития. Принципы действия РТС, технико-экономические возможности, формирование целей и задач, составление технического задания (ТЗ) на проектирование.

2. *Исследования.* Теоретические и экспериментальные исследования. Поиск системотехнических решений, конструирования, изготовления и эксплуатации, макетное изготовление и исследование характеристик макета.

3. *Проектирование.* Составление ТЗ, определение параметров конструкции, характеристик, условий эксплуатации. Нормоконтроль документов по ЕСКД и ЕСТД. Изготовление опытного образца. Уточнение и исправление документации. Испытания образца.

4. *Производство.* Разработка комплекта технологической документации и рабочих чертежей. Изготовление опытно-промышленной серии (партии). Испытание. Уточнение документации. Серийное производство.

5. *Эксплуатация.* Работа системы, обслуживание, ремонт, профилактика, изготовление испытательных стендов и т.д.

6. *Модернизация.* Усовершенствование с использованием новых принципов и новой элементной базы.

7. *Утилизация.* Использование узлов и деталей, разделение, отбор цветных и драгоценных металлов.

В процессе разработки, изготовления и эксплуатации РТС происходит взаимодействие этапов. Каждый этап связан с предшествующим и последующим. Качество исполнения этапа влияет на качество РТС. На первых двух этапах основная роль играют разработчики (физики, расчетчики, радиотехники). На третьем и четвертом этапах основная роль принадлежит конструкторам и технологам. На пятом — инженерам и техникам по эксплуатации.

Таблица 1.1

Классификация РТС по назначению

Тип	Назначение
Передача информации	Местная (малоканальная); радиорелейная; спутниковая радиосвязь; радиовещательная и TV; телеметрия; передача команд; сотовая мобильная связь
Извлечение информации	Радиолокация (обнаружение и классификация целей, определение координат и параметров движения); радионавигация; радиоразведка ископаемых и составляющих поверхности земли; радиоастрономия; радиоразведка РТС противника
Радиоуправление	Управление ракетами; радиоуправление КА; подрыв боевых снарядов
Разрушение информации	Радиопротиводействие

1.4. Структурные и функциональные схемы РТС

Системы передачи информации

Современные радиорелейные и спутниковые системы передачи информации работают в микроволновом (СВЧ) диапазоне, обладают высокой информационной пропускной способностью и, как правило, многоканальны (рис. 1.1).

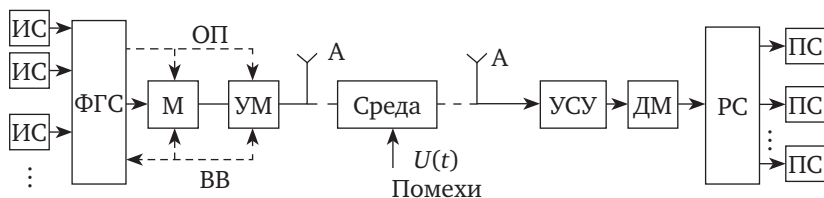


Рис. 1.1. Структурная схема многоканальной системы передачи информации:

ИС — источник сообщений; ФГС — формирователь групп сигнала;
 М — модулятор; УМ — усилитель мощности; А — антенны;
 УСУ — устройство селекции и усиления; ДМ — демодулятор;
 РС — разделитель сигналов; ПС — получатели сообщений;
 ВВ — внешнее воздействие; ОП — операторы

Системы извлечения информации

К РТС извлечения информации относятся, прежде всего, радиолокационные системы (РЛС). Структурная схема РЛС приведена на рис. 1.2.

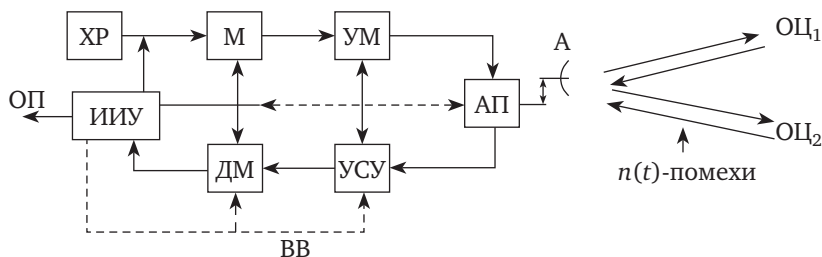


Рис. 1.2. Структурная схема РЛС:

ИИУ — измерительно-индикаторное устройство; ОЦ — объекты-цели;
 ХР — хронометрирующий генератор (синхронизатор);
 АП — антенный переключатель

Системы радиоуправления

Структурная схема системы радиоуправления зенитной ракетой приведена на рис. 1.3.

Примерно такая же схема управления использована при автоматической посадке космического корабля «Буран».

Системы радиопротиводействия

Системы радиопротиводействия предназначены для искажения информации или нарушения работы канала связи противника (рис. 1.4).

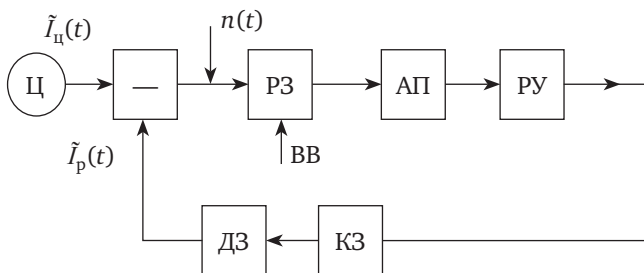


Рис. 1.3. Структурная схема системы радиоуправления зенитной ракетой:

Ц — движущаяся цель; «—» — командное устройство, выявляющее соотношение между пространственным положением и движением цели $\tilde{I}_ц(t)$ и ракеты $\tilde{I}_р(t)$ и выдающее команды через радиозвено (РЗ) на автопилот (АП), который управляет рулями (РУ); ДЗ — динамическое звено, отображающее реакцию ракеты на управляющее воздействие; КЗ — кинематическое звено, определяющее закономерности перехода положения ракеты и цели в пространстве и формирующее оптимальную траекторию полета ракеты

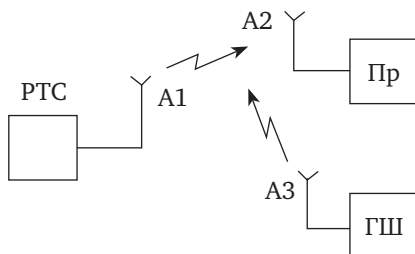


Рис. 1.4. Структурная схема системы радиопротиводействия:

РТС — передающая радиосистема; А1—А3 — антенны;
Пр — приемник; ГШ — генератор шума