

## ВВЕДЕНИЕ

**Р**адиотехнические системы (РТС) широко используются практически во всех сферах повседневной жизни. Отрасль активно развивается, и количество различных по виду и назначению радиотехнических систем непрерывно растет, поэтому изучение курса «Радиотехнические системы» является важным этапом подготовки радиоинженера.

Опыт работы с современными системами подтверждает необходимость всестороннего (системного) рассмотрения всей совокупности проблем, возникающих при разработке любой РТС. Разработчик должен четко представлять назначение и условия эксплуатации проектируемой системы, определяющих выбор принципа действия, тактико-технических характеристик и ее структуры. Кроме того, при разработке системы необходимо учитывать исторический опыт и перспективы развития систем не только рассматриваемого класса, но и конкурирующих с ним, о которых разработчик должен иметь достаточно глубокое представление. Это особенно важно при создании современных многофункциональных комплексов, включающих разнородные системы.

Рациональный выбор принципа действия и структуры системы не может быть сделан без глубокого знания существующей элементной базы и перспектив ее развития. Разработчик радиосистем должен внимательно следить за результатами фундаментальных исследований и учитывать их при решении радиотехнических задач. Использование

современных информационных технологий позволило существенно улучшить характеристики радиосистем.

На всех этапах проектирования должны также учитываться требования экономичности производства разрабатываемой радиоэлектронной аппаратуры, ее надежности и экономичности в эксплуатации.

Данное учебное пособие предлагает системный подход к анализу и проектированию радиоэлектронных систем. Особое внимание уделено радиолокационным (РЛС) и радионавигационным (РНС) системам.

В первом разделе «Общие сведения о радиотехнических системах» показана роль РТС в современном обществе, дана их классификация, рассмотрены параметры и характеристики, а также энергетические соотношения в РТС.

Второй раздел «Принципы и основы построения радиолокационных и радионавигационных систем» посвящен рассмотрению обобщенных структурных схем РТС различного назначения, основным технологиям, используемым в современных и перспективных системах. Изложены особенности обработки радиосигналов на фоне различных помех, методы определения координат и параметров движущихся объектов. Приведены основные тактико-технические характеристики (ТТХ) ряда современных РТС.

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

### 1.1. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Р**адиотехнические системы относятся к классу информационно-управляющих технических систем, осуществляющих *извлечение, передачу или разрушение информации* с помощью радиоволн. Отличительные признаки радиосистемы:

- наличие радиосигнала (одного или нескольких);
- среды, в которой распространяются радиоволны;
- приемника, извлекающего информацию путем соответствующей обработки радиоволн, достигающих его антенны.

Радиоволны, несущие ту или иную информацию, называются *радиосигналом*. Таким образом, характерным признаком радиосистемы является использование радиосигнала в качестве носителя информации.

#### Классификация РТС

**По назначению информации.** По этому признаку РТС можно подразделить на системы передачи информации, системы извлечения информации и системы разрушения информации, а также системы радиоуправления. В свою очередь, каждая из этих групп имеет свои разновидности, отличающиеся функциональным назначением системы.

Так, среди *систем передачи информации* различают системы радиосвязи (одноканальной, многоканальной, радиорелейной или через искусственные спутники Зем-

ли (ИСЗ)), телеметрии, передачи команд, радиовещания и телевидения.

К *системам извлечения информации* относятся радиолокационные и радионавигационные системы, системы радиоастрономии, радиоразведки радиотехнических средств.

*Системы разрушения информации* предназначены для создания условий, в которых работа радиосистем становится невозможной.

*Системы радиоуправления* служат для управления работой различных объектов с помощью радиосигналов.

**По виду применяемых сигналов.** По этому признаку различают непрерывные, импульсные и цифровые радиосистемы. В *непрерывных системах* информация отображается изменением параметров (амплитуды, частоты, фазы) непрерывного, обычно гармонического сигнала. В *импульсных системах* сигнал представляет собой последовательность радиоимпульсов, в которой информацию могут нести изменяющиеся параметры как отдельных импульсов (амплитуда, частота, фаза, длительность), так и всей последовательности (число импульсов в последовательности, интервал между ними). В *цифровых системах* передаваемый сигнал предварительно дискретизируется во времени и квантуется по уровню. Каждому уровню соответствует кодовая группа импульсов, которые и модулируют несущее колебание. Цифровые системы легко сопрягаются с ЭВМ, осуществляющими обработку и запоминание информации, воспроизводимой затем устройством отображения.

**По используемым частотам (диапазонам радиоволн).** Для создания радиосистем различного назначения используется практически весь диапазон радиоволн от метрических ( $\lambda = 10 \dots 100$  км) до миллиметровых ( $\lambda = 1 \dots 10$  мм); лазерные системы, тесно примыкающие по принципу действия и назначению к радиотехническим, работают в инфракрасном и видимом диапазонах электромагнитных волн. Таким образом, применяется почти весь спектр электромагнитных колебаний. Следует подчеркнуть, что использование того или иного диапазона радиочастот для

систем различного назначения регламентировано Международной комиссией распределения радиочастот (МКРР), так же как и ширина спектра частот, отводимого системе того или иного типа. Эти ограничения влияют на выбор вида радиосигнала и построение радиосистемы и, в конечном счете, сказываются на ее тактико-технических характеристиках.

## 1.2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ РТС

Чтобы описать свойства и возможности РТС, необходимо сформулировать ее параметры и характеристики. Под *параметром* будем понимать величину, описывающую количественно то или иное свойство РТС, например: потребляемую мощность, массу, стоимость и др. *Характеристикой* будем именовать описание свойства РТС в тех случаях, когда оно выражено более развернуто какой-либо зависимостью, графиком и т. п.

Обычно рассматриваются следующие параметры и характеристики РТС.

*Назначение* — выдаваемая информация, многофункциональность, информационные характеристики, количество и скорость выдачи информации, пропускная способность РТС.

*Точность (достоверность)* — степень искажения информации при определенных характеристиках сообщений, дальностях, условиях эксплуатации и помеховой обстановки.

*Разрешающая способность* — свойство РТС разделять и независимо воспринимать информацию при сдвиге радиосигналов по частоте, задержке, направлению прихода радиоволн.

*Дальность действия и направленность* при заданной точности.

*Помехоустойчивость* — способность РТС обеспечивать дальность действия и точность при действии различных помех.

*Диапазон частот*, занимаемых РТС.

*Электромагнитная совместимость (ЭМС)* — возможность совместного функционирования с другими радиосредствами и РТС.

*Устойчивость против внешних воздействий* (температуры, вибраций и т. п.) и *надежность аппаратуры*.

*Стоимость* — сложность, затраты на проектирование, изготовление и эксплуатацию.

*Масса, габариты, удобство* размещения и развертывания аппаратуры, *потребляемая мощность*.

*Скрытность действия* — способность РТС функционировать, не обнаруживая себя.

*Функциональная надежность* — вероятность обеспечения основных показателей качества при заданных условиях функционирования и использования.

*Перспективность* — способность к удовлетворению потребности общества в течение длительного времени.

Большая часть указанных параметров и характеристик РТС, вместе с тем, является и *показателями качества РТС*, т. е. показывает возможности в отношении дальности действия, точности, помехоустойчивости, скорости выдачи информации, разрешающей способности и др., и затраты, которыми сопровождается обеспечение этих возможностей (стоимость оборудования, масса, габариты, потребление энергии, занимаемый диапазон частот, количество и квалификация обслуживающего персонала и т. д.).

### **1.3. ОГРАНИЧЕНИЯ И ПРОТИВОРЕЧИВОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА РТС**

Рассматривая показатели качества и возможности РТС, необходимо считаться с объективными природными ограничениями, в качестве которых выступают ограниченный диапазон радиочастот, интенсивность помех, особенности распространения радиоволн разных частот, конечные размеры пространства, в условиях которого распространяются радиоволны различных РТС, создающие взаимные помехи, крайне ограниченная область размещения аппаратуры РТС на многих объектах (самолеты, ИСЗ,

корабли). Названные ограничения очень существенны и возрастают по мере развития радиотехники и РТС, увеличения числа и мощности одновременно действующих передающих устройств. Это привело к проблеме электромагнитной совместимости и к необходимости международной и государственной регламентации используемых радиочастот.

*Не допускаются произвольный выбор и использование радиочастот для РТС.*

Объективные ограничения связаны также с психофизиологическими возможностями человека-оператора, обеспечивающего использование РТС по назначению и техническое обслуживание аппаратуры; с необходимостью защиты организма от облучения электромагнитным полем; с эргономическими показателями и способностью человека к восприятию, обработке и накоплению информации, которые играют важную роль и в автоматически действующих системах при введении их в действие, при развертывании, контроле, диагностике и ремонте.

Для бортовой радиоэлектронной аппаратуры важнейшими ее показателями качества являются масса и габаритные размеры.

Между многими параметрами и характеристиками бортовых РТС наблюдаются противоречия, например пропускная способность и помехоустойчивость, габаритные размеры и теплостойкость и т. п.

Обобщая сказанное, отметим, что при создании РТС стремятся получить наилучшие характеристики при определенных условиях ее работы. Основные параметры РТС имеют вероятностный (статистический) характер, что связано с вероятностным характером радиосигналов, на которые в процессе формирования, распространения и обработки влияют многочисленные случайные факторы. Это обстоятельство предопределяет необходимость статистического подхода к анализу и синтезу РТС. Поэтому в дисциплине «Радиотехнические системы» отведено важное место изложению основ статистической теории РТС.

## 1.4. ОБЩАЯ МОДЕЛЬ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Как отмечалось в п. 1.1, терминами «радиотехнические» или «радиолокационные» обычно подчеркивают специфику тех информационных систем, в которых функции переносчиков сообщений между пространственно разнесенными пунктами выполняют электромагнитные волны радиодиапазона. В общем виде структурная схема любой РТС имеет вид (рис. 1.1).

Отправитель, в распоряжении которого имеется информация от первичного источника, «закодированная» в значениях конкретных физических величин (например, уровня и высоты звука в радиовещании, интенсивности и цвета элемента изображения в телевидении и др.), с помощью преобразователя «сообщение — волна» взаимно однозначно отображает сообщение первичного источника в значения параметров (интенсивности, частоты, фазы и т. п.) радиоволн, посылаемых в канал распространения. Названное преобразование может быть продуктом осознанных действий отправителя, как, например, в системах передачи информации, и тогда роль преобразователя «сообщение — волна» отводится передающему устройству, включающему в себя модулятор и передатчик. Возможен, однако, и такой вариант, когда сообщение «управляет» параметрами радио-

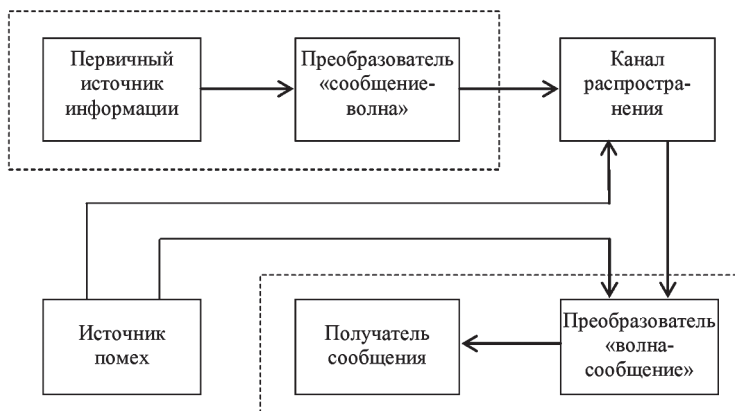


Рис. 1.1



волн независимо от волн отправителя, — так происходит, например, в радиолокации, где координаты лоцируемой цели автоматически преобразуются во время запаздывания и направление прихода отраженных от нее радиоволн.

Взаимно однозначная связь параметров волны с передаваемым сообщением позволяет на приемной стороне применить обратно преобразование «волна — сообщение», придав принятой информации ту конкретную форму, которая требуется получателю. Обычный набор элементов, из которых состоит преобразователь «волна — сообщение», это антенная система, приемник, демодулятор и др.

Наряду с радиоволнами, несущими полезную информацию, на преобразователь «волна — сообщение» реальной РТС воздействуют и помехи различной природы. Существуют виды помех, искажающие передаваемые электромагнитные волны уже в канале распространителя. К числу таковых относятся:

- *атмосферные помехи*, обусловленные грозовыми разрядами и изменчивостью физических свойств атмосферы;
- *индустриальные помехи*, связанные с эксплуатацией электроустановок различного назначения;
- *межсистемные помехи*, создаваемые посторонними радиосредствами;
- *преднамеренные помехи*, умышленно излучаемые объектами, противодействующими той или иной РТС.

Кроме того, помехи возникают и на самой приемной стороне, так как процессу преобразования волны в сообщение всегда сопутствуют шумы антенно-фидерного тракта и внутриприемные шумы.

Диалектика прогресса радиоэлектроники такова, что, сколь бы внушительными не выглядели достижения в нейтрализации помех путем непосредственного воздействия на их источники (разработка новых образцов малошумящей приемоусилительной аппаратуры, совершенствование мероприятий по регламентации радиосвязи и электромагнитной совместимости и пр.), требования к качеству передачи и извлечения информации в РТС растут опережающими темпами.

## 1.5. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛОВ И ПОМЕХ В РТС

Радиосигнал в РТС обычно представляет собой узкополосный процесс, который можно выразить в виде квазигармонического колебания

$$s(t) = S(t)\cos(\omega_0 t + \Phi(t)), \quad (1.1)$$

где  $S(t)$  и  $\Phi(t)$  — огибающая и фаза процесса, являющиеся медленно меняющимися, по сравнению с  $\cos(\omega_0 t)$  функциями времени и характеризующие амплитудную и угловую модуляции несущего колебания. Несущая круговая частота  $\omega_0$  определяет положение спектра сигнала на оси частот. Сообщение может содержаться в любом из параметров радиосигнала: в амплитуде, фазе, отклонении частоты от несущей.

В электрических цепях передатчика и приемника РТС радиосигналы действуют в виде токов и напряжений. В пространстве распространяются электромагнитные волны,

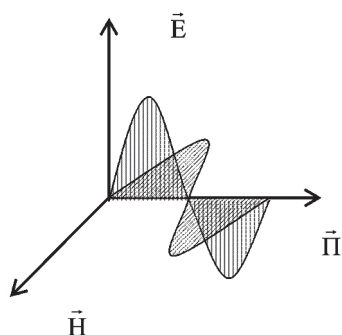


Рис. 1.2

которые характеризуются векторами электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей и вектором Пойтинга  $\vec{P}$  (рис. 1.2), определяющим направление распространения радиоволны и ее мощность, приходящуюся на единицу площади.

Кроме того, характеристиками радиоволны являются поляризация и частота (или длина волны).

Принятая приемной антенной радиоволна создает радиосигнал, из которого выделяется сообщение. В РТС извлечения информации параметры принимаемой радиоволны зависят от углов азимута  $\alpha$  и места  $\beta$  расположения цели, а также от пространственного запаздывания

$$\tau = \frac{2R}{c},$$

где  $R$  — расстояние до цели;  $c$  — скорость распространения радиоволны. Оценивая эти параметры, можно определить местонахождение цели в пространстве.

Рассмотрим характеристики радиосигнала, описываемого функцией времени (1.1). Если в параметрах радиосигнала содержатся сообщения, которые представляют реализации случайных процессов, то радиосигнал  $s(t)$  — также случайный процесс. Его реализация на интервале времени  $[0, T]$  характеризуется энергией  $E_c$ :

$$E_c = \int_0^T (s(t))^2 dt.$$

*База сигнала*  $B$  — это произведение его продолжительности  $T$  на ширину спектра  $F$ . Произведение базы  $B$  на среднюю мощность  $P_c = \frac{E_c}{T}$  определяет *объем* сигнала. Различают простые сигналы, у которых  $B \cong 1$ , и сложные (широкополосные, шумоподобные), у которых  $B = FT \gg 1$ . Расширение спектра сигнала при сохранении его продолжительности  $T$  (периода, если сигнал периодический) позволяет снизить спектральную плотность мощности, что существенно для повышения скорости РТС. Расширение спектра достигается за счет введения угловой модуляции несущей. Обычно используют дискретную фазовую или частотную модуляцию. При этом длительность элемента модулирующей последовательности  $\tau_\phi$  определяет ширину спектра сигнала. При фазовой манипуляции

$$B = \frac{T}{\tau_\phi} = N,$$

где  $N$  — число элементов манипулирующей последовательности, укладываемых в пределах периода  $T$  сигнала.

Наряду с непрерывными сигналами в РТС используются импульсные. Импульсные сигналы характеризуются скважностью

$$Q = \frac{T_\Pi}{\tau_\Pi \cdot T_\Pi},$$

где  $T_{\text{п}}$  — период повторения импульсов;  $\tau_{\text{и}}$  — длительность импульса. Сообщения, передаваемые в импульсных РТС передачи информации, отражаются в изменениях параметров импульсного потока, в импульсных радиолокационных системах — в изменениях временного положения импульсной последовательности отраженных от цели сигналов.

Как было показано выше, функционирование РТС сопровождается действием помех. В зависимости от полосы частот, занимаемой спектром, различают узкополосные и широкополосные помехи. *Узкополосные* помехи можно представить квазигармоническим колебанием, аналогичным выражению (1.1). *Широкополосные* помехи имеют полосу спектра, значительно превышающую полосу спектра сигнала РТС. По характеру действия различают непрерывные и импульсные помехи. Хаотические импульсные помехи (ХИП) имеют случайные амплитуду, длительность и период следования импульсов.

Для помех используют статистическое описание, включающее многомерные законы распределения. Часто достаточным является знание корреляционной функции помехи  $R_{\text{п}}(\tau)$  или спектральной плотности  $G_{\text{п}}(\omega)$ , которые связаны преобразованием Фурье

$$G_{\text{п}}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{\text{п}}(\tau) \exp(-j\omega\tau) d\tau. \quad (1.2)$$

Это выражение справедливо для помех, которые можно представить в виде стационарных случайных процессов.

Одномерную плотность распределения вероятностей мгновенных значений  $n(t)$  помехи очень часто полагают гауссовской

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{п}}} \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma_{\text{п}}^2}\right), \quad (1.3)$$

где  $\sigma_{\text{п}}^2$  — дисперсия помехи, равная средней мощности флуктуаций помехи. При постоянной спектральной плот-

ности шума  $N_0$  в пределах полосы от 0 до  $F$  дисперсия  $\sigma_{\Pi}^2 = N_0 F$ .

Шум, представляющий собой квазигармонический процесс с гауссовским законом распределения (1.3) мгновенных значений, имеет равномерный закон распределения начальных фаз на интервале  $[-\pi, \pi]$ , а огибающая  $A_{\Pi}(t)$  для фиксированного момента  $t$  подчиняется распределению Рэлея:

$$p(A_{\Pi}) = \frac{A_{\Pi}}{\sigma_{\Pi}^2} \exp\left(-\frac{A_{\Pi}^2}{\sigma_{\Pi}^2}\right), \quad A_{\Pi} \geq 0. \quad (1.4)$$

Статистическое описание помехи зависит от конкретной задачи.

## 1.6. ОСОБЕННОСТИ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ РТС

Сложность задач, решаемых современными РТС, разнообразие помеховой обстановки требуют разработки достаточно совершенных систем. Основой разработки таких систем могут служить методы оптимизации, базирующиеся на последних достижениях статистической теории.

*Оптимальным* называют приемник, для которого вызванные помехами искажения сообщения в определенном смысле минимальны. Критерии искажений зависят от назначения РТС. Оптимальный приемник обеспечивает минимальные искажения при заданных условиях приема и выбранном критерии. Минимальный уровень искажений при этом характеризуют *потенциальную помехоустойчивость*. Из сравнения помехоустойчивости реальных приемников с оптимальными выясняют степень технического совершенства и резервы улучшения реальных РТС. Сравнение помехоустойчивости приема для различных видов сигналов позволяет осуществить выбор наилучших сигналов, которые обеспечивают наибольшую помехоустойчивость для данной РТС.

Основные задачи, решаемые при приеме сигналов в РТС:

- оптимальное обнаружение и различение сигналов на фоне помех;
- оценка неизвестных параметров сигнала, действующего в смеси с помехой;
- разрешение нескольких сигналов;
- оптимальная фильтрация сообщений, содержащихся в принимаемых сигналах.

В задаче обнаружения сигнала неизвестен сам факт наличия или отсутствия сигнала  $s(t, \lambda)$  в принятом колебании  $\xi(t)$ . Сигнал представляет известную функцию времени и параметров  $\lambda$ . Колебание  $\xi(t)$  представляется в виде

$$\xi(t) = \lambda s(t, \lambda) + n(t), \quad t \in [0, T], \quad (1.5)$$

где  $\lambda$  — случайная величина, принимающая одно из двух значений  $\lambda = 0$  (сигнал отсутствует),  $\lambda = 1$  (сигнал присутствует). По принятой реализации  $\xi(t)$  на интервале  $[0, T]$  требуется наилучшим образом выработать решение о наличии или отсутствии сигнала. На основе выбранного критерия должно быть определено оптимальное правило (алгоритм) обнаружения, построена структурная схема и оценены качественные показатели обнаружения. Подобная задача типична для систем радиолокации.

В простейшей задаче различения сигналов предполагается наличие в смеси  $\xi(t)$  одного из двух сигналов  $s(t, \lambda_1)$  или  $s(t, \lambda_2)$ :

$$\xi(t) = \lambda s_1(t, \lambda_1) + (1 - \lambda) s_2(t, \lambda_2) + n(t), \quad t \in [0, T]. \quad (1.6)$$

Случайная величина  $\lambda$  по-прежнему принимает два значения  $\lambda = 0$  либо  $\lambda = 1$ . По принятой на интервале  $[0, T]$  реализации  $\xi(t)$  необходимо выработать оптимальное правило (алгоритм) решения о присутствии сигнала  $s_1(t, \lambda_1)$  или сигнала  $s_2(t, \lambda_2)$ . В частном случае при  $s_2(t, \lambda_2) = 0$ , задача сводится к обнаружению сигнала  $s_1(t, \lambda_1)$ . Различение двух сигналов — типичная задача для РТС передачи информации.

В задаче оценки параметров сигнала считается, что один из параметров  $\lambda_i$  сигнала  $s(t, \bar{\lambda})$  является случайной величиной, априорная плотность вероятности  $p_{pr}(\lambda_i)$  ко-

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)