ВЫСШЕЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Г. И. ХУДЯКОВ

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Учебное пособие
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению «Радиотехника»

ACADEMIA

Москва
Издательский центр «Академия»
2009

УДК 621.37(075.8)
ББК 22.317я73
Х982

Рецензенты:
действительный член РАЕН, зам. генерального директора
ОАО «Радар-ММС» по научной работе, д-р техн. наук, проф. *В. А. Сарычев*;
доц. СПб. ГУАП, канд. техн. наук *С. Н. Воробьев*

Худяков Г. И.
Х982 Статистическая теория радиотехнических систем : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Г. И. Худяков. — М. : Издательский центр «Академия», 2009. — 400 с.
ISBN 978-5-7695-4750-8

Кратко изложены математические основы статистической теории радиотехнических систем. Представлены основные вероятностные модели сигналов и помех в радиотехнических системах. Рассмотрены основы теории поиска, обнаружения и различения сигналов на фоне помех, статистической теории оптимального оценивания параметров сигналов, теории фильтрации и разрешения простых и сложных сигналов. Описаны основные методы расчета статистических характеристик пространственно-временны́х радиопомех, стохастических трасс распространения радиосигналов и эффективных площадей рассеяния радиолокационных целей.

Для студентов высших учебных заведений.

УДК 621.37(075.8)
ББК 22.317я73

Оригинал-макет данного издания является собственностью Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом без согласия правообладателя запрещается

© Худяков Г. И., 2009
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2009
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2009

ISBN 978-5-7695-4750-8

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СИМВОЛЫ

Общие правила обозначений

Прямые строчные латинские буквы (ln, cos, exp) — элементарные функции;

курсивные строчные латинские буквы (a, b, x, y, f, g) — действительные величины и переменные, скалярные функции;

полужирные курсивные строчные латинские буквы ($\boldsymbol{x}$, $\boldsymbol{y}$, $\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$, $\boldsymbol{f}$) — числовые векторы, векторы координат, вектор-столбцы, векторные функции;

полужирные прямые прописные латинские буквы ($\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{U}$, $\mathbf{F}$) — матрицы, множества;

курсивные прописные латинские буквы (A, S, M, J_n, P_n) — события, выделенные скалярные величины, специальные функции;

прямые строчные греческие буквы (ε, α, $\xi(t)$) — случайные события, действительные случайные величины и функции;

полужирные прямые строчные греческие буквы ($\boldsymbol{\alpha}$, $\boldsymbol{\xi}(t)$) — векторно-значные случайные величины и функции;

буквы с точкой сверху ($\dot{a}, \dot{\alpha}, \dot{\boldsymbol{\beta}}, \dot{R}_{\alpha\beta}, \dot{\xi}(t), \dot{\mathbf{A}}$) — комплекснозначные величины, векторы, функции и матрицы.

Список обозначений и символов

A, B, C — случайные события и соответствующие им множества

$\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ — матрицы действительных величин

$\dot{\mathbf{A}}$, $\dot{\mathbf{B}}$, $\dot{\mathbf{C}}$ — матрицы комплексных величин

$A \cup B$ — объединение (сумма, дизъюнкция) множеств A и B

$A \subset B$ — множество A содержится во множестве B как его подмножество

$A \cap B$ — пересечение (произведение, конъюнкция) множеств A и B

$\mathbf{A} = \|a_{ij};\ i, j = 1, 2, \ldots, n\|$ — квадратная матрица порядка n с элементами a_{ij} (краткая запись); развернутая запись:

$$\mathbf{A} = \begin{Vmatrix} a_{11} & a_{12} & \ldots & a_{1j} & \ldots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \ldots & a_{2j} & \ldots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \ldots & a_{ij} & \ldots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \ldots & a_{nj} & \ldots & a_{nn} \end{Vmatrix}$$

$\mathbf{A}^{\top}$, $\boldsymbol{x}^{\top}$ — транспонированная матрица, вектор-строка

$\dot{\mathbf{A}}^{\dagger}$ — транспонированная матрица комплексно-сопряженных величин: $\dot{\mathbf{A}}^{\dagger} \equiv \dot{\mathbf{A}}^{*\top}$

$\mathbf{A}^{-1} = \left\| \tilde{a}_{ij}; i, j = 1, 2, \ldots, n \right\|$ — квадратная матрица, обратная матрице $\mathbf{A}$ и имеющая в качестве элементов величины $\tilde{a}_{ij}$

$A(t,\ t')$ — ядро (интегрального) линейного преобразования в данном пространстве функций (функциональном пространстве)

$\mathbf{A} \in \mathbf{F}$ — множество $\mathbf{A}$ содержится во множестве $\mathbf{F}$ как его элемент

$\dot{B}_{\alpha\beta}$ — ковариация комплексных случайных величин $\dot{\alpha}$ и $\dot{\beta}$ $\left(\dot{B}_{\alpha\beta} = \overline{\tilde{\dot{\alpha}}\,\tilde{\dot{\beta}}} \right)$

$\dot{B}_{\xi}(t, s)$ — автоковариационная (вторая автокорреляционная) функция комплексного случайного процесса $\dot{\xi}(t)$

D_{α} — дисперсия случайной величины α

$E(f(\alpha))$ — математическое ожидание функции от действительной случайной величины α:

$$E\left(f(\alpha)\right) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) p_{\alpha}(x)\, dx$$

$\vec{\boldsymbol{E}}(\vec{\boldsymbol{r}})$, $\vec{\boldsymbol{H}}(\vec{\boldsymbol{r}})$ — векторы электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля в точке с радиусом-вектором $\vec{\boldsymbol{r}}$ в физическом пространстве $\mathrm{R}_3(\vec{\boldsymbol{r}})$

$\mathscr{E}$ — ЭДС источника тока; выделенная точка

$\mathscr{E}(x)$ — фундаментальное решение дифференциального оператора

$F_{\text{д}}$ — частота дискретизации сигнала

$F_{\text{дп}}$ — доплеровский сдвиг частоты несущей радиосигнала

$\mathscr{F}[f(x)]$ — интегральное преобразование Фурье функции $f(x)$

$\mathrm{H}(t - t')$ — функция Хевисайда (единичный скачок в точке $t = t'$)

$H_n^{(1)}(z)$, $H_n^{(2)}(z)$ — первая и вторая функции Ганкеля (функции Ханкеля, Бесселя III рода) порядка n

$I_n(z)$, $K_n(z)$ — модифицированные функции Бесселя соответственно I и II рода порядка n

$J_n(z)$ — функция Бесселя I рода порядка n

$\dot{K}(\omega)$ — комплексный коэффициент передачи стационарной линейной цепи

$\dot{P}_{\text{д}}$ — дипольный момент элементарного электрического диполя

$P(A)$ — вероятность случайного события A

P_i — вероятность i-го события

$P(A|B)$ — вероятность (условная) события A при условии реализации события B

$P_n(z)$ — полиномы Лежандра I рода n-й степени: $P_0(z) = 1$; $P_1(z) = z$ и т.д.

$P_n^m(z)$ — присоединенные полиномы Лежандра I рода степени n порядка m:
$P_1^1(z) = \sqrt{1-z^2}$; $P_2^1(z) = 3z\sqrt{1-z^2}$;
$P_2^2(z) = 3\left(1-z^2\right)$ и т.д.

$\mathbf{P} = \{P_j\}_1^N$ — совокупность (множество) элементов P_j, рассматриваемых как одно целое (краткая запись); развернутая запись:
$\mathbf{P} = \{P_1,\ P_2,\ \ldots,\ P_j,\ \ldots,\ P_N\}$

$\mathcal{P}\left(\dfrac{1}{x}\right)$ — главное значение обобщенной функции x^{-1}

$R_{\alpha\beta}$ — корреляция случайных величин α и β: $R_{\alpha\beta} = \overline{\tilde{\alpha}\tilde{\beta}}$;
$\dot{R}_{\alpha\beta} = \overline{\tilde{\dot{\alpha}}\tilde{\dot{\beta}}^*}$

$R_\xi(t,\ s)$ — автокорреляционная функция случайного процесса $\xi(t)$

$R_{\zeta\eta}(t,\ s)$ — взаимно корреляционная функция случайных процессов $\zeta(t)$ и $\eta(t)$

$\mathrm{R}_m(\boldsymbol{x})$ — m-мерное числовое евклидово пространство

$\mathrm{R}_2(\vec{\boldsymbol{r}}), \mathrm{R}_3(\vec{\boldsymbol{r}})$ — двух- и трехмерное векторные евклидовы пространства

$S_i^{(m)}$ — i-я последовательность элементарных событий длины m: $S_i^{(m)} = (\varepsilon_{i1},\ \varepsilon_{i2},\ \ldots,\ \varepsilon_{ik},\ \varepsilon_{im})$

$\boldsymbol{S}'(t)$ — класс обобщенных функций медленного роста аргумента t

$\{\mathbf{U},\ \mathbf{P},\ \mathbf{F}\}$ — совокупность множеств $\mathbf{U}$, $\mathbf{P}$ и $\mathbf{F}$, рассматриваемых как одно целое

$\mathbf{U}_\varepsilon$ — множество элементарных событий: $\mathbf{U}_\varepsilon = \{\varepsilon_j\}_1^N$

U — амплитуда гармонического колебания

$\dot{V}_\alpha$ — вариация комплексной случайной величины $\dot{\alpha}$: $\dot{V}_\alpha = \overline{\tilde{\dot{\alpha}}^2}$

$X = (x_1,\ x_2,\ \ldots,\ x_i,\ \ldots,\ x_n)$ — статистическая выборка объема n, последовательность из n элементов x_i, $i = 1,\ 2,\ \ldots,\ n$

$(a,\ b]$ — множество действительных чисел (промежуток) $a < x \le b$

$(a,\ b)$ — промежуток $a < x < b$

$a,\ b,\ c$ — действительные величины

$\dot{a},\ \dot{b},\ \dot{c}$ — комплексные величины:
$\dot{a} = \mathrm{Re}\, a + \boldsymbol{j}\,\mathrm{Im}\, a \equiv a' + \boldsymbol{j}a''$

$\det\mathbf{A},\ |\mathbf{A}|$ — определитель матрицы $\mathbf{A}$

$\vec{\boldsymbol{e}}_i$ — единичный вектор евклидова пространства $\mathrm{R}_m(\vec{\boldsymbol{r}})$

$\mathbf{e}^x = \exp(x)$ — экспонента (функция «$\mathbf{e}$ в степени икс»)

$\mathrm{erf}(z),\ \Phi(z)$ — интеграл вероятности, интеграл ошибок, функция Лапласа:

$$\mathrm{erf}(z) = \Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^z \exp(-x^2)dx$$

f — частота гармонических колебаний

$f(x)$ — скалярная функция действительного аргумента x

$h(t, s)$ — импульсная характеристика (нестационарной) линейной цепи

$i, j, k, l, m, n, K, L, M, N$ — целые числа или целочисленные переменные

$i, j, k,$ — целые нижние индексы — основные

$\vec{\boldsymbol{i}}, \vec{\boldsymbol{j}}, \vec{\boldsymbol{k}}$ — единичные орты физического пространства $\mathrm{R}_3(\vec{\boldsymbol{r}})$

$\boldsymbol{j}$ — мнимая единица: $\boldsymbol{j} = \sqrt{-1}$

$\boldsymbol{k} = \|k_1, k_2, k_3\|^\top$ — волновой вектор плоской гармонической волны

$p_\alpha(x)$ — плотность вероятности величины α как функция аргумента x

r, s — целые нижние индексы — вспомогательные

$r_{\alpha\beta}$ — статистическая оценка коэффициента корреляции $\rho_{\alpha\beta}$ случайных величин α и β: $r_{\alpha\beta} \equiv \hat{\rho}_{\alpha\beta}$

s_α^2 — статистическая оценка дисперсии D_α случайной величины α по ее выборке (эмпирическая дисперсия: $s_\alpha^2 \equiv \widehat{D}_\alpha$)

$\tilde{s}$ — огибающая высокочастотного сигнала

$\mathrm{sign}t$ — знаковая функция аргумента t: $\mathrm{sign}t = 1$ при $t > 0$, $\mathrm{sign}t = 0$ при $t \le 0$

$\mathrm{sinc}\,(\Omega t)$ — функция отсчетов: $\mathrm{sinc}\,(\Omega t) = \sin(\Omega t)/(\Omega t)$

$\mathrm{tr}\mathbf{A}$ — след матрицы $\mathbf{A}$: $\mathrm{tr}\mathbf{A} = a_{11} + a_{22} + \ldots + a_{nn}$

x, y, z — действительные переменные

$\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}, \boldsymbol{z}$ — векторные переменные, матрицы-столбцы, числовые векторы

$\vec{\boldsymbol{x}}, \vec{\boldsymbol{y}}, \vec{\boldsymbol{z}}$ — векторы физического пространства $\mathrm{R}_3(\vec{\boldsymbol{r}})$ или евклидовой плоскости $\mathrm{R}_2(\vec{\boldsymbol{r}})$: собственные векторы, или векторы в собственном смысле этого слова

$(-\infty < x < \infty)$ — действительная числовая ось как множество

$\Gamma(z)$ — гамма-функция (интеграл Эйлера II рода): $\Gamma = (\frac{1}{2}) = \sqrt{\pi}, \Gamma(0) = \Gamma(1) = 1, \Gamma(n+1) = n!$ и т.д.

$\Delta = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$ — оператор Лапласа

α, β, θ — действительные случайные величины

$\dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\theta}$ — комплексные случайные величины

$\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\theta}$ — векторные случайные величины

$\alpha(X), \beta(X)$ — ошибки принятия решения соответственно I (ложное срабатывание) и II (пропуск сигнала) рода как функции порога X

$\alpha_э, \beta_э$ — эффективные длительность и ширина спектра сигнала

$\dot{\alpha}^*$ — комплексно-сопряженная случайная величина:

$\dot{\alpha}^* = (\alpha' + \boldsymbol{j}\alpha'')^* = \alpha' - \boldsymbol{j}\alpha''$

γ, ψ, φ, ϑ — углы между векторами

$\delta(t)$ — дельта-функция Дирака

δ_{ij} — символ Кронекера: $\delta_{ij} = 1$ при $i = j$; $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$

ε_j — j-е элементарное событие

$\hat{\theta}$ — статистическая оценка параметра θ

λ — длина гармонической волны; интенсивность пуассоновского потока; спектральная переменная базисной функции $\varphi(x, \lambda)$

$\mu_{\alpha\beta}^{(mn)}$ — центрированный (центральный) момент порядка $(m + n)$ двух случайных величин α и β

ν_j — статистическая частотность появления события A_j в данной выборке $(u_1, u_2, \ldots, u_i, \ldots, u_n)$

$\xi(t)$ — действительная случайная функция переменной t (случайный процесс)

$\dot{\xi}(t)$ — комплексная случайная функция переменной t (комплексный случайный процесс)

$\xi(\boldsymbol{x})$ — действительная случайная функция векторной переменной $\boldsymbol{x}$ (скалярное случайное поле)

$\boldsymbol{\xi}(t)$ — векторно-значная случайная функция переменной t (векторный случайный процесс)

$\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{x})$ — векторно-значная случайная функция векторной переменной (векторное случайное поле)

$\tilde{\xi}(t)$ — отклонение случайной функции $\xi(t)$ (или случайной величины α) от ее среднего значения: $\tilde{\xi}(t) = \xi(t) - \bar{\xi}(t)$

$\rho_{\alpha\beta}$ — коэффициент корреляции случайных величин α и β

σ_α — среднеквадратическое отклонение (СКО) от среднего значения $\bar{\alpha}$ случайной величины α: $\sigma_\alpha = \sqrt{\overline{(\alpha - \bar{\alpha})^2}}$

$\varphi(t)$, φ_0 — текущая и начальная фазы гармонического колебания

$\varphi(t, \lambda)$ — базисная функция

ω — круговая частота: $\omega = 2\pi f$

$\overline{a\alpha + b}$ — усреднение выражения $(a\alpha + b)$ по ансамблю реализаций случайной величины α

$\int p_\alpha(x)\,dx$ — если пределы интегрирования не указаны, то интегрирование производится по всей оси $(-\infty < x < \infty)$

$\vec{\nabla} = \vec{\boldsymbol{i}}\,\partial/\partial x + \vec{\boldsymbol{j}}\,\partial/\partial y + \vec{\boldsymbol{k}}\,\partial/\partial z$ — набла-оператор Гамильтона

ПРЕДИСЛОВИЕ

При разработке методов расчета предельно достижимых эксплуатационно-технических характеристик различных радиотехнических систем (РТС) используются вероятностные подходы к постановке и решению задач анализа и синтеза оптимальных РТС. Потребности системотехнического проектирования оптимальных РТС привели к развитию двух взаимодополняющих научно-прикладных дисциплин: статистической радиотехники и статистической радиофизики. На основе этих дисциплин строится комплексная дисциплина «Статистическая теория радиотехнических систем».

Математический аппарат статистической теории РТС является весьма сложным. Его изучение выходит за рамки традиционной математической подготовки радиоинженеров. Поэтому выпускавшиеся ранее учебные пособия по статистической радиотехнике и статистической радиофизике предназначались в основном для аспирантов и опытных инженеров-системотехников. Тем не менее при изложении таких дисциплин, как «Радиотехнические цепи и сигналы», «Устройства приема и обработки сигналов», «Радиотехнические системы» и некоторых других, преподавателям радиотехнических специальностей вузов приходилось давать студентам минимально необходимые сведения по статистической теории РТС. Это приводило к недостаточно глубокому пониманию студентами существа методов статистической радиотехники и статистической радиофизики и основанных на них способов построения оптимальных радиотехнических систем. Разработчикам таких радиосистем приходилось доучиваться уже на производстве.

В 1990-х гг. достижения в сфере создания РТС военного назначения нашли широчайшее распространение в сфере радиоэлектронных систем массового гражданского применения. Понять структуру и функционирование таких радиосистем без знания основных положений статистической теории РТС невозможно. Поэтому в Государственном образовательном стандарте 2000 г. (ГОС—2000) предусмотрено изучение различных статистических аспектов построения и проектирования современных РТС в рамках отдельной специальной дисциплины.

Целью преподавания дисциплины «Статистическая теория радиотехнических систем» является овладение студентами методами анализа и синтеза оптимальных устройств обработки информации в современных РТС, функционирующих в условиях, при ко-

торых на радиосигналы воздействуют различные случайные факторы как в радиотехнических цепях и устройствах, так и на трассах распространения радиосигналов. Это дает возможность будущему радиоинженеру самостоятельно формулировать и решать конкретные вероятностные задачи, возникающие в ходе разработки перспективных РТС.

Автор настоящего учебного пособия не стремился привести как можно больше результатов, полученных за последние 60 лет в области статистической радиотехники и статистической радиофизики и опубликованных в многочисленных специальных изданиях, а постарался показать на достаточно простых математических моделях, каким образом эти результаты получаются и что они значат с точки зрения радиоинженера.

Учебное пособие подразделяется по своему содержанию на четыре части.

В первой части (гл. 1 и 2) представлены математические основы статистической теории РТС. На единой методической основе изложены элементы теории вероятностей и математической статистики.

Эта часть предназначена:

для объединения вероятностно-статистических знаний, полученных студентами ранее, в единую справочно-методологическую систему понятий и методов;

освоения студентами общей методики статистического анализа и синтеза различных вероятностных моделей;

введения единой системы математических обозначений.

Вторая часть (гл. 3 и 4) посвящена построению с единых методических позиций основных вероятностных моделей сигналов и помех, характерных для радиотехнических систем, в том числе векторных и пространственно-временны́х, а также их линейным преобразованиям и статистическому моделированию на ЦВМ.

В третьей части (гл. 5—8) на базе построенных вероятностных моделей изложены способы решения основных задач статистической радиотехники: поиск, обнаружение, различение и фильтрация сигналов, статистическое оценивание их параметров, разрешение простых и сложных сигналов.

Четвертая часть (гл. 9) содержит сведения по статистической радиофизике, необходимые для анализа и синтеза оптимальных РТС: вероятностные пространственно-временны́е модели внешних радиопомех и методы расчета статистических характеристик радиосигналов, прошедших стохастические (случайно-неоднородные) трассы распространения. Изложены также основные физико-статистические методы расчета эффективных площадей рассеяния радиолокационных целей.

В качестве приложения представлены основные понятия теории обобщенных функций медленного роста.

ВВЕДЕНИЕ

Радиотехническая система представляет собой совокупность технических средств, предназначенных для дистанционного извлечения (или разрушения) радиофизической информации, преобразования различных видов информации из одной формы в другую, передачи и приема информации с помощью радиоволн различных диапазонов.

Современные РТС являются сложными техническими системами, входящими в качестве подсистем в различные человеко-машинные (эрготехнические) информационно-управляющие системы.

Сложность РТС определяется не числом аппаратурных элементов, входящих в состав системы, а специфическими признаками сложности различных систем, наиболее существенными из которых для РТС являются: наличие средств обеспечения целостности системы, целенаправленность функционирования и слабая предсказуемость (стохастичность) поведения системы.

Под *системой* понимается целостная совокупность определенным образом взаимодействующих между собой функционально законченных элементов.

Эти элементы могут объединяться в более крупные составные части системы, называемые *подсистемами*. В то же время данная система может входить как составная часть в более крупную систему, называемую *надсистемой*.

Система обычно находится под воздействием различных объектов естественного и искусственного происхождения, не входящих в состав системы, но существенно влияющих на функционирование данной системы. Множество этих объектов составляет *окружающую обстановку* (*системную среду*).

Для обеспечения эффективного функционирования данной технической системы может создаваться совокупность вспомогательных технических средств, которые непосредственно не входят в состав системы, а образуют соответствующую *инфраструктуру системы*.

Состояние технической системы характеризуется упорядоченной совокупностью значений ее внутренних и внешних параметров, определяющих способ функционирования (*режим работы*) системы.

Целостность РТС характеризуется допустимым временем обнаружения нарушений в функционировании системы и донесения

информации о неисправности системы до ее пользователей и операторов.

Операторы (непосредственно обеспечивающие оперативную работу системы), пользователи и радиотехническая система в совокупности образуют антропотехническую (человеко-машинную) надсистему. Антропотехнические системы, в результате функционирования которых происходит целенаправленное изменение состояния материальных и (или) информационных объектов (прежде всего в пространстве и времени), называются *эрготехническими системами* (ЭТС). Например, автомобиль с водителем за рулем относится к подклассу транспортных ЭТС, в которых оператором является водитель, а результатом функционирования системы — перемещение груза или пассажиров в пространстве за определенное время. Надсистемой в этом случае является автотранспортное предприятие, инфрастуктурой — автодорожная система.

Эрготехнические системы, в которых производится преобразование и использование информации, относятся к подклассу информационных ЭТС.

Для эффективного функционирования этих систем существенным является человеческий фактор, т.е. работа человека-оператора. Поэтому при разработке технических подсистем ЭТС обязательно учитываются психофизиологические характеристики операторов и показатели выполнения ими различных элементарных операций.

Эффективная работа *автоматизированной ЭТС* обеспечивается соответствующей компьютеризованной информационно-управляющей технической подсистемой, имеющей искусственный интеллект (программно-математическое обеспечение) и эргономически эффективные средства взаимодействия с операторами эрготехнической системы (человеко-машинные интерфейсы).

Таким образом, радиотехнические системы являются техническими подсистемами информационных эрготехнических систем.

РТС можно разделить на следующие типы:

I. РТС обмена информацией;

II. Информационно-обеспечивающие РТС;

III. РТС формирования информации (радиоизмерительные системы);

IV. РТС, разрушающие информацию (системы радиопротиводействия и радиоподавления);

V. РТС автоматического радиоуправления.

Примерами РТС I типа являются современные сотовые радиотелефонные системы общего пользования, РТС II типа — радиосистемы глобальной, дальней и ближней навигации (радионавигационные системы — РНС), а также системы радиовещания, РТС III типа — радиолокационные системы (РЛС), РТС IV типа — автомобильные постановщики радиопомех для противодействия

определению работниками дорожно-патрульной службы скорости движения автомобиля с помощью радиоэлектронных устройств, РТС V типа — радиосистемы автоматического наведения ракеты на заданную оператором цель.

В настоящее время наиболее сложными и совершенными РТС массового гражданского применения являются территориальные сотовые системы сухопутной подвижной радиотелефонной связи общего пользования стандарта GSM (Global System for Mobile communication), а в ближайшей перспективе таковой станет всемирная сверхсистема сухопутной подвижной радиотелефонной связи общего пользования (Future Public Land Mobile Telephone System — FPLMTS, или иначе International Mobile Telecommunication system — IMT 2000). Создаваемая в Российской Федерации Взаимоувязанная сеть связи России (ВССР) будет сопряжена со сверхсистемой IMT 2000.

Современная радиосистема передачи и приема сообщений (РСППС) в общем случае состоит из трех подсистем (рис. В.1): формирования и генерирования сигналов (передатчика — ПРД), приема и обработки сигналов (приемника — ПРМ), а также синхронизации, обеспечения целостности и управления системой. С помощью антенно-фидерных устройств (*АФУ ПРД* — передатчика, *АФУ ПРМ* — приемника) эти подсистемы дистанционно взаимодействуют между собой посредством излучения и приема электромагнитных волн, проходящих различные трассы распространения радиосигналов.

Входной и выходной интерфейсы позволяют радиооператорам контролировать функционирование РСППС, задавать режимы ее работы и вводить в систему команды оперативного воздействия.

Источник сообщений *ИС* и получатель информации *ПИ* являются элементами эрготехнической надсистемы и взаимодействуют с РСППС посредством соответствующих интерфейсов.

Системную среду образуют различные конструкции, окружающие *АФУ ПРД* и *АФУ ПРМ*, подстилающая поверхность трассы распространения, местные предметы и сооружения, находящиеся недалеко от трассы распространения, приземный слой атмосферы (для спутниковых РСППС добавляются ионосферные слои и тропосфера, находящиеся на космических радиотрассах), источники естественных и искусственных радиопомех.

Инфраструктура РСППС включает в свой состав антенно-мачтовые сооружения, ретрансляторы радиосигналов *РТР*, базовые станции, подсистему стационарной связи базовых станций или ретрансляторов (например, базовых станций сотовой или транкинговой системы сухопутной подвижной радиосвязи с центрами коммутации, управления и обслуживания), подсистему управления и обслуживания РСППС, аппаратуру и помещения базовых станций и этих центров и т.д.

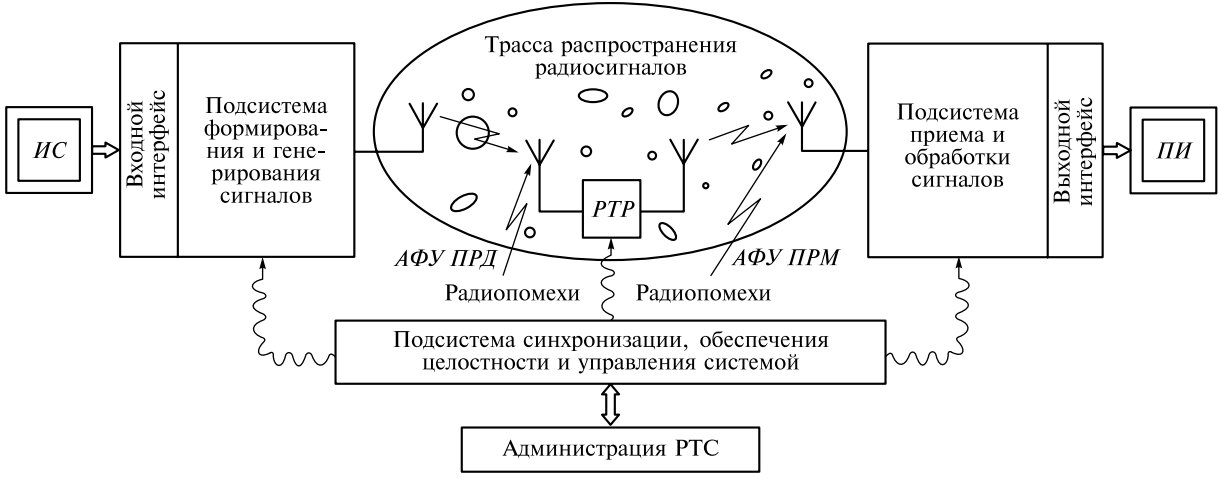

Рис. В.1. Обобщенная структура современной радиосистемы передачи и приема сообщений

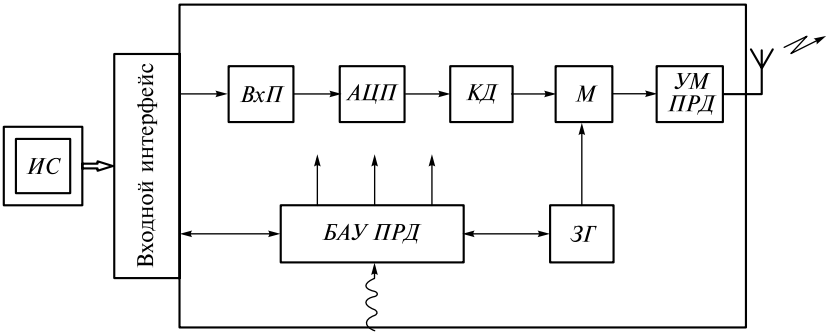

Рис. В.2. Обобщенная структура подсистемы формирования и генерирования сигналов РСППС

Современная РСППС функционирует в общем случае следующим образом. Передаваемые сообщения синхронно или асинхронно поступают в подсистему формирования и генерирования сигналов (рис. В.2) через входной преобразователь *ВхП*, который преобразует сообщения источника *ИС* в электрические сигналы. Эти сигналы либо поступают из *ВхП* в цифровом виде либо преобразуются в цифровую форму с помощью аналого-цифрового преобразователя *АЦП*. Цифровые сигналы кодируются кодером *КД* и поступают на модулятор *М*, который с помощью задающего генератора *ЗГ* передатчика превращает передаваемый электрический сигнал в высокочастотные колебания, несущие передаваемое сообщение. Эти электрические колебания усиливаются усилителем мощности передатчика *УМ ПРД* и с помощью его антенно-фидерного устройства *АФУ ПРД* (см. рис. В.1) излучаются в окружающее околоземное пространство в форме электромагнитных волн — радиосигналов. Блок автоматического управления передатчиком *БАУ ПРД* (см. рис. В.2), связанный с подсистемой синхронизации, обеспечения целостности и управления РСППС, осуществляет автоматическое управление работой всех элементов подсистемы формирования и генерирования сигналов в заданном режиме функционирования РСППС.

Излученные радиосигналы проходят по различным трассам распространения электромагнитных волн данного диапазона частот и поступают непосредственно или за счет переизлучения радиосигналов (активного, полуактивного или пассивного) ретранслятором *РТР* (см. рис. В.1) в место расположения подсистемы приема и обработки сигналов.

В подсистеме приема и обработки сигналов часть приходящей электромагнитной энергии посредством *АФУ ПРМ* улавливается и преобразуется в поступающие на вход приемника *ПРМ* (рис. В.3) высокочастотные электрические колебания, которые содержат

передаваемые от *ИС* сообщения. Приемник *ПРМ* отфильтровывает нужные высокочастотные колебания и подает их на демодулятор *ДМ*, который, используя высокочастотные колебания задающего генератора *ЗГ* приемника, выделяет ожидаемое сообщение в форме, например, цифровых электрических сигналов. Эти электросигналы поступают в декодер *ДКД*, устройство задержки *УЗ* и устройство обнаружения *УО*.

Если устройство *УО* обнаруживает в принятом электросигнале ожидаемый (полезный) сигнал, то оно пропускает электросигналы из декодера *ДКД* на цифроаналоговый преобразователь *ЦАП*, а из устройства задержки *УЗ* — на измеритель параметров сигналов *ИПС*. Аналоговые сигналы из *ЦАП* и цифровые электросигналы из *ИПС* поступают на выходной преобразователь *ВыхП*, который формирует приходящую информацию и преобразует ее к виду, удобному для восприятия получателем информации *ПИ*. Блок автоматического управления приемником *БАУ ПРМ* выполняет функции, аналогичные функциям *БАУ ПРД* (см. рис. В.2).

Подсистема синхронизации, обеспечения целостности и управления РСППС может использовать отдельный (выделенный) канал радиосвязи, либо один из рабочих радиоканалов РСППС, либо сигналы другой РТС.

При таком построении РСППС кажется возможным обеспечение полной детерминированности (определенности) функционирования системы. Например, при постепенном удалении приемника от места расположения передатчика блок *БАУ ПРД* может соответствующим образом повышать мощность передатчика *ПРД*,

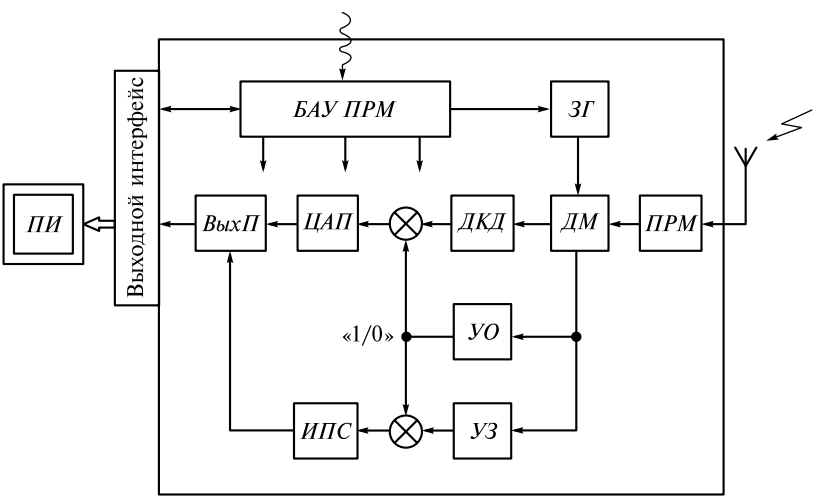

Рис. В.3. Обобщенная структура подсистемы приема и обработки сигналов РСППС