

Ю.Т. ЗЫРЯНОВ, О.А. БЕЛОУСОВ, П.А. ФЕДЮНИН

# ОСНОВЫ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ



• Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ» •

Учебное издание

ЗЫРЯНОВ Юрий Трифионович,  
БЕЛОУСОВ Олег Андреевич,  
ФЕДЮНИН Павел Александрович

# **ОСНОВЫ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Учебное пособие

Редактор Т.М. Г л и н к и н а  
Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Р ы ж к о в а

Подписано в печать 19.09.2011.  
Формат 60 × 84 / 16. 8,37 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 385

Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Тамбовский государственный технический университет»

Ю.Т. ЗЫРЯНОВ, О.А. БЕЛОУСОВ, П.А. ФЕДЮНИН

# ОСНОВЫ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением по образованию  
в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и  
автоматизации в качестве учебного пособия*



---

Тамбов  
Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
2011

УДК 621.396.96  
ББК 32  
3-976

**Р е ц е н з е н т ы:**

Доктор технических наук, профессор  
начальник кафедры «Радиотехнические системы  
(и обеспечение полетов)» ВАИУ (г. Воронеж),  
*И.В. Милосердов*

Доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
*А.В. Иванов*

**Зырянов, Ю.Т.**

3-976 Основы радиотехнических систем : учебное пособие / Ю.Т. Зырянов, О.А. Белоусов, П.А. Федюнин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – 144 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-1021-6.

Рассмотрены принципы построения и перспективы развития радиотехнических систем различного назначения. Изложены особенности обработки радиосигналов на фоне помех, методы определения координат и параметров объектов.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 210200 «Проектирование и технология РЭС», 211000 «Конструирование и технология электронных средств».

УДК 621.396.96  
ББК 32

**ISBN 978-5-8265-1021-6**

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2011

## ВВЕДЕНИЕ

---

---

Радиотехнические системы (РТС) широко используются практически во всех сферах повседневной жизнедеятельности. Их бурное развитие продолжается и в настоящее время. Однако, количество различных по виду и назначению радиотехнических систем непрерывно растёт. Поэтому изучение курса «Радиотехнические системы» является важным этапом подготовки радиоинженера.

Основные принципы построения для большинства РТС являются общими. Систематизируя и совершенствуя знания обучаемых, учебное пособие помогает формировать системный подход к анализу и проектированию радиоэлектронных систем. Особое внимание уделено радиолокационным (РЛС) и радионавигационным (РНС) системам.

Пособие состоит из введения, двух глав и заключения. Во введении рассмотрены задачи и структура учебной дисциплины, её связь с другими дисциплинами, даны методические указания и перечень основной литературы, необходимые для самостоятельного изучения дисциплины.

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

Вторая глава «Принципы и основы построения радиолокационных и радионавигационных систем» посвящена рассмотрению обобщённых 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 объектов. Приведены основные тактико-технические характеристики (ТТХ) ряда современных РТС.

В заключении рассмотрены перспективы развития РТС на основе использования современных информационных технологий.

# 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

---

---

## 1.1. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Радиотехнические системы** относятся к классу информационно-управляющих технических систем, осуществляющих *извлечение, передачу или разрушение информации* с помощью радиоволн. Отличительный признак радиосистемы:

- наличие радиосигнала (одного или нескольких), состоящего из источника радиоволн, являющихся носителем информации;
- наличие среды, в которой распространяются радиоволны;
- наличие приёмника, извлекающего информацию путём 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 Земли (ИСЗ)), телеметрии, передачи команд, радиовещания и телевидения.

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

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

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

- По виду применяемых сигналов 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 как изменяющиеся пара-

метры 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 дециметровых ( $\lambda = 10 \dots 100$  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 счёте, сказываются на её тактико-технических характеристиках.

## 1.2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ РТС

Чтобы описать свойства и возможности РТС, необходимо сформулировать её 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 развёрнуто, 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* – степень искажения информации при определённых характеристиках сообщений, дальностях, условиях эксплуатации и помеховой обстановке.

- *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 *надёжность 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 надёжность* – 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 (самолёты, 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 развёртывании, контроле, диагностике и ремонте.

Для бортовой радиоэлектронной аппаратуры важнейшими её показателями качества являются масса и габаритные размеры, так как её установка соответственно уменьшает массу топлива или количества вооружения самолёта, т.е. уменьшает дальность действия и боевые возможности летательного аппарата.

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 определённых условиях её 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 1.1, терминами «радиотехнические» или «радиолокационные» обычно подчёркивают специфику тех информационных систем, в которых функции переносчиков сообщений между пространственно разнесёнными пунктами выполняют электромагнитные волны радиодиапазона. В общем виде структурная схема любой РТС имеет вид, показанный на 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

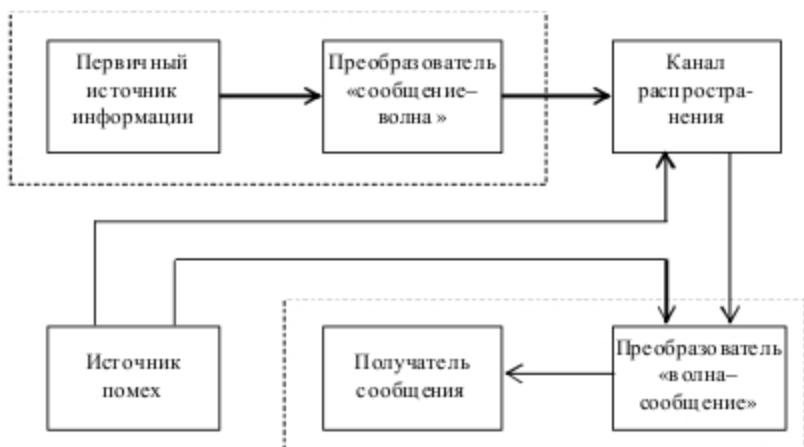


Рис. 1.1. Структурная схема РТС

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 радиоволны независимо от волн отправителя, – так происходит, например, в радиолокации, где координаты лоцируемой цели автоматически преобразуются во время запаздывания и направление прихода отражённых от неё радиоволн.

Взаимно однозначная связь параметров волны с передаваемым сообщением позволяет на приёмной 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, приёмник, 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 таких 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 приёмной стороне, так как процессу преобразования волны в сообщение всегда сопутствуют шумы антенно-фидерного тракта и внутриприёмные шумы.

Диалектика прогресса радиоэлектроники такова, что, сколь бы нишительными не выглядели достижения в нейтрализации помех путём непосредственного воздействия на их источники (разработка новых образцов малошумящей приёмоусилительной 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 модуляцию 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 приёмника РТС радиосигналы действуют в виде токов и напряжений. В пространстве распространяются электромагнитные волны, которые характеризуются векторами электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей и вектором Пойнтинга  $\vec{P}$  (рис. 1.2), определяющим направление распространения радиоволны и её мощность, приходящуюся на единицу площади.

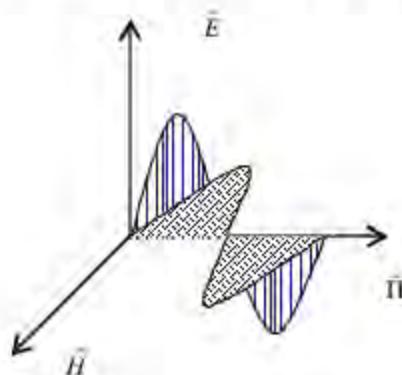


Рис. 1.2. Распространение радиоволны

Кроме того, характеристиками радиоволны являются поляризация и частота (или длина волны). Принятая приёмной антенной радиоволна создаёт 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  $\tau = 2R/c$ , 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  $P_c = E_c / T$  определяет объём 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 счёт введения угловой модуляции несущей. Обычно используют дискретную фазовую или частотную модуляцию. При этом длительность элемента модулирующей последовательности  $\tau$ , определяет ширину спектра сигнала. При фазовой манипуляции  $B = T / \tau = N$ , где  $N$  – число элементов модулирующей последовательности, укладывающихся в пределах периода  $T$  сигнала.

Наряду с непрерывными сигналами в РТС используются импульсные. Импульсные сигналы характеризуются скважностью  $Q = T_n / \tau_n$ , где  $T_n$  – период повторения импульсов;  $\tau_n$  – 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 отражённых 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  $R_n(\tau)$  или спектральной плотности  $G_n(\omega)$ , которые связаны преобразованием Фурье

$$G_n(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_n(\tau) \exp(-j\omega\tau) d\tau. \quad (1.2)$$

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

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

где  $\sigma_n^2$  – дисперсия помехи, равная средней мощности флуктуаций помехи. При постоянной спектральной плотности шума  $N_0$  в пределах полосы от 0 до  $F$  дисперсия  $\sigma_n^2 = N_0 F$ .

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  $A_n(t)$  для фиксированного момента  $t$  подчиняется распределению Рэлея:

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

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

Основные задачи, решаемые при приёме 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  $s_1(t, \lambda_1)$ . Различные двух сигналов – типичная задача для РТС передачи информации.

В задаче *оценки параметров сигнала* считается, что один из параметров  $\lambda_j$  сигнала  $s(t, \vec{\lambda})$  является случайной величиной, априорная плотность вероятности  $p_{pr}(\lambda_j)$  которого известна. Параметр  $\lambda_j$  представляет один из компонентов вектора  $\vec{\lambda} = \{\lambda_1, \dots, \lambda_j, \dots, \lambda_n\}$ . Задача оценки заключается в определении с минимальной погрешностью значения параметра  $\lambda_j$  по принятой на интервале  $[0, T]$  реализации  $\xi(t)$ . При зависимости сигнала от нескольких случайных информационных параметров может возникнуть задача совместного их оценивания. Подобные задачи типичны для систем радиолокации и радионавигации. На основе выработанных алгоритмов необходимо построить структурную схему оптимального измерителя параметров сигнала и определить точность оценивания.

*Задача фильтрации сообщений* возникает в случае, если сигнал  $s(t, \lambda)$  зависит от некоторого информационного параметра  $\lambda_j$ , представляющего собой случайную функцию времени  $\lambda_j(t)$  с известными статистическими характеристиками. На основании известных статистических характеристик помехи  $n(t)$  необходимо из принятой смеси  $\xi(t)$  выделить наилучшим образом сообщение  $\lambda_j(t)$ , т.е. получить оценку  $\hat{\lambda}_j(t)$  реализации информационного параметра. При малом изменении процесса  $\lambda_j(t)$  за время  $T$  задача фильтрации может быть сведена к задаче оценки параметра. Задачи фильтрации типичны для большинства РТС, где необходимо выделение непрерывных сообщений или измерение меняющихся во времени параметров сигнала.

В простейших задачах *разрешения сигналов* предполагается, что смесь  $\xi(t)$  представляет сумму помехи  $n(t)$  и двух налагающихся, возможно, сигналов  $s_1(t, \lambda_1, \lambda_2)$  и  $s_2(t, \lambda_1, \lambda_2)$ , зависящих, например, от двух параметров  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ :

$$\xi(t) = \lambda_1 s_1(t, \lambda_1, \lambda_2) + \lambda_2 s_2(t, \lambda_1, \lambda_2) + n(t), \quad t \in [0, T], \quad (1.7)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  – независимые случайные величины, которые могут принимать значения 0 и 1; параметр  $\lambda_1$  считается случайным.

При возможности одновременного наличия в смеси двух сигналов ставится задача их отдельного обнаружения или отдельно обнаружения с оценкой значений параметра  $\lambda_1$  в обоих сигналах. Первый сигнал считается разрешённым в смысле обнаружения (оценки параметра  $\lambda_1$ ), если показатели обнаружения (оценки параметра  $\lambda_1$ ) первого сигнала остаются выше допустимых в присутствии случайного второго сигнала. Если при этом разрешается и второй сигнал при наличии первого,

то говорят о взаимном разрешении в смысле обнаружения (оценки параметра  $\lambda_1$ ).

Рассмотренные типовые задачи оптимального приёма сигналов могут решаться в РТС раздельно и совместно. Подробно эти задачи рассматриваются ниже.

При решении отдельных задач оптимального приёма используют следующие модели радиосигналов:

1. *Сигнал с полностью известными параметрами*

$$s(t, \vec{\lambda}_0) \equiv s(t) = S_0(t - \tau_0) \cos(\omega_0 t + \hat{O}(t - \tau_0) + \Phi_0), \quad t \in [0, T], \quad (1.8)$$

где  $\vec{\lambda}_0$  – вектор параметров сигнала; индекс «ноль» означает, что эти параметры известны и функции  $S_0(t)$  и  $\Phi(t)$ , определяющие форму сигнала, также известны. Указанная модель применяется в задаче обнаружения, когда неизвестен лишь факт наличия или отсутствия сигнала в смеси с шумом.

2. *Сигнал со случайной начальной фазой*

$$s(t, \vec{\lambda}) = s(t, \Phi) = S_0(t - \tau_0) \cos(\omega_0 t + \hat{O}(t - \tau_0) + \Phi), \quad t \in [0, T]. \quad (1.9)$$

Здесь считается неизвестной начальная фаза  $\Phi$ , которая представляет случайную величину, равномерно распределённую на интервале  $[-\pi, \pi]$ .

3. *Сигнал со случайными амплитудой и начальной фазой*

$$s(t, \vec{\lambda}_0) = s(t, A, \Phi) = AS_0(t - \tau_0) \cos(\omega_0 t + \hat{O}(t - \tau_0) + \Phi), \quad t \in [0, T]. \quad (1.10)$$

Величины  $A$  и  $\Phi$  статистически независимы, причём случайная величина  $A$  распределена по закону Рэлея (однако это не обязательно), а начальная фаза  $\Phi$  равномерно распределена на интервале  $[-\pi, \pi]$ .

Для упрощения решения задач оптимального приёма в качестве модели помехи обычно используют *белый шум*. Спектральная плотность белого шума постоянна в неограниченной полосе частот и равна  $N_0/2$ . Односторонняя спектральная плотность в полосе частот от 0 до  $\infty$  равна  $N_0$  (рис. 1.3, а). Белый шум имеет корреляционную функцию (рис. 1.3, б)

$$R_n(\tau) = (N_0/2)\delta(\tau), \quad (1.11)$$

где  $\delta(\tau)$  – дельта-функция, равная нулю при  $\tau \neq 0$  и обращающаяся в бесконечность при  $\tau = 0$ . Корреляционной функции (1.11) соответствует спектральная плотность шума  $G_n(\omega) = N_0/2$ .

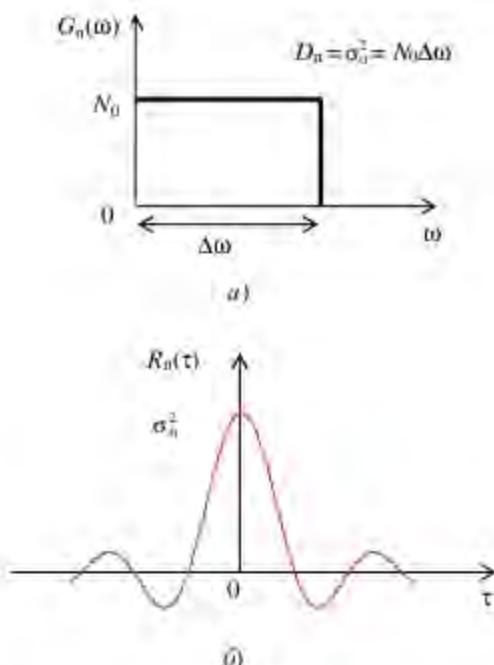


Рис. 1.3. Спектральная (а) и корреляционная функции (б) белого шума

Таким образом, при решении задач синтеза будем предполагать, что полезный сигнал  $s(t, \tilde{\lambda})$  принимается на фоне аддитивного белого шума  $n(t)$  со следующими характеристиками:

$$\langle n(t) \rangle = 0; R_n(t_1; t_2) = \langle n(t_1)n(t_2) \rangle = \frac{N_0}{2} \delta(t_1 - t_2), \quad (1.12)$$

где угловые скобки означают операцию вычисления математического ожидания.

Для гауссовского белого шума в качестве  $n$ -мерной плотности вероятности можно использовать функционал вида

$$\rho_n[x(t)] = k \exp \left[ -\frac{1}{N_0} \int_0^T x^2(t) dt \right]. \quad (1.13)$$

## 2. ПРИНЦИПЫ И ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

---

---

### 2.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

*Радиолокация* – обнаружение, определение местоположения и выявление свойств подвижных и неподвижных объектов с использованием радиоволн, отражённых или излучённых этими объектами. Радиолокацией называют также область науки и техники, охватывающую методы и средства решения указанных задач. Объекты радиолокации называют *радиолокационными целями*, информацию о радиолокационных целях – *радиолокационной информацией* (РЛИ), а технические средства получения РЛИ – *радиолокационными станциями или радиолокаторами*. Совокупность радиолокационных станций и вспомогательных технических средств, взаимосвязанных между собой и предназначенных для решения какой-либо тактической задачи радиолокации, называют *радиолокационной системой* (РЛС).

*Радионавигация* – определение местоположения объектов и обеспечение их движения по заданным траекториям с помощью радиосредств. Объектами радионавигации являются управляемые летательные аппараты (воздушные и космические), морские корабли и др. Совокупность взаимодействующих радиоустройств и вспомогательных технических средств, расположенных на подвижном объекте и вне его, предназначенных для решения тактической задачи радионавигации, называют *радионавигационной системой* (РНС).

Основными задачами РЛС и РНС являются:

1. Обнаружение – состоит в принятии решения о наличии или отсутствии объекта в заданной области пространства.

2. Измерение координат и параметров движения – сводится к получению оценок координат объектов и их производных (скорости, ускорения). Число и вид измеряемых координат определяются назначением РЛС и РНС и выбранной системой координат, в которой определяется местоположение объекта.

3. Разрешение – сводится к обнаружению и измерению координат и параметров движения объекта при наличии в исследуемом участке пространства других объектов.

4. Распознавание – состоит в установлении принадлежности объекта к определённому классу.

РТС извлечения информации и, прежде всего, РЛС в зависимости от происхождения принимаемого сигнала подразделяются на активные

и пассивные. В активных радиосистемах информация выделяется из радиосигналов, полученных в результате облучения объекта (цели) зондирующим электромагнитным колебанием – зондирующим сигналом и приёма отражённой (рассеянной) от объекта энергии – отражённого сигнала (рис. 2.1, а, б, д).

В пассивной радиосистеме извлечение информации осуществляется без облучения объекта электромагнитными колебаниями. Поэтому пассивная радиосистема состоит из приёмной антенны и радиоприёмного устройства (РПРУ) (рис. 2.1, в).

По степени автономности РНС подразделяют на автономные и неавтономные.

Неавтономная РНС включает в себя радиолинию, состоящую из РПДУ, передающей системы и РПРУ (рис. 2.1, з). Радиопередающее устройство РПДУ устанавливается в пункте с известными координатами –

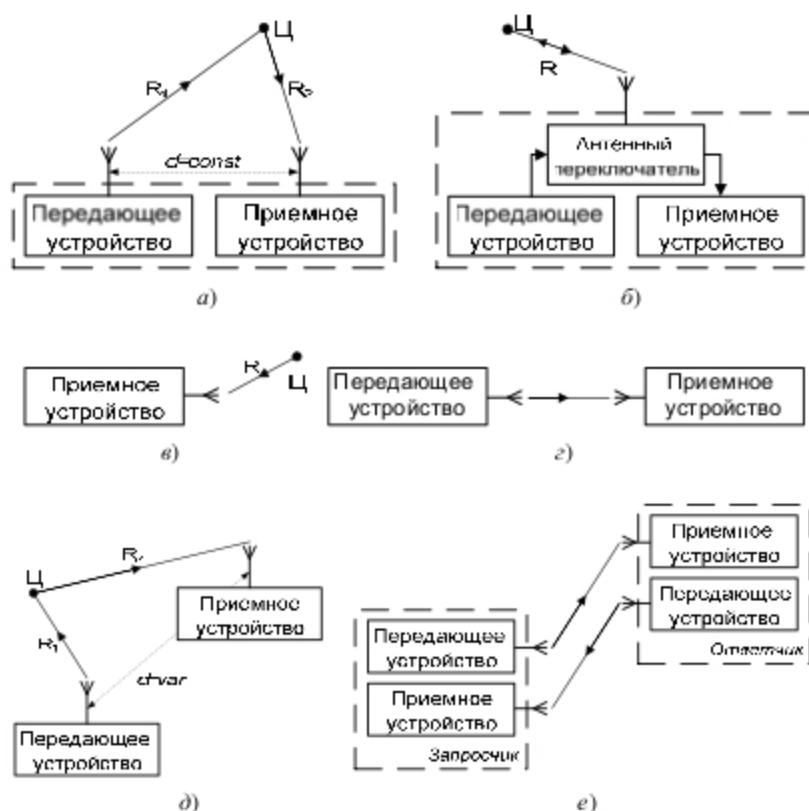


Рис. 2.1. Структурные схемы РНС

радионавигационной точке (РНТ). Таких точек обычно несколько, и они могут располагаться на Земле, либо на движущихся объектах – ИСЗ и других летательных аппаратах (ЛА). Радиоприёмное устройство (РПрУ) находится на подвижном объекте, местоположение которого требуется определить.

Автономная РНС не нуждается в радиоаппаратуре, устанавливаемой в РНТ; она определяет местоположение подвижного объекта с помощью только бортовых радиоустройств и представляет собой по существу активную РЛС (рис. 2.1, а, б, в), при этом отражающим объектом обычно является земная поверхность.

В радиолокации и радионавигации используются также *активные системы с активным ответом* (рис. 2.1, е). В таких системах на объекте устанавливается *ответчик* – приёмопередающее устройство, отвечающее на сигналы активной системы – *запросчика*.

В зависимости от расположения РПрУ и РПдУ в пространстве РЛС подразделяют на *однопозиционные* (совмещённые), когда РПрУ и РПдУ размещены в одном пункте (рис. 2.1, б); *разнесённые* (бистатические, двухпозиционные, однобазовые), когда РПрУ и РПдУ расположены в двух пунктах, достаточно удалённых друг от друга на расстояние  $d$ , называемое *базой* (рис. 2.1, а, в), и *многопозиционные* (многобазовые).

Совмещённое средство часто содержит одну антенну, коммутируемую поочередно на передачу и приём сигналов.

Базы бывают не только постоянными,  $d = \text{const}$  (рис. 2.1, а), но и *переменными* (рис. 2.1, в). Приёмный пункт – головка самонаведения – располагается, в частности, на ракете, так что  $d = \text{var}$ .

Многопозиционная РЛС (МП РЛС) состоит из нескольких разнесённых в пространстве передающих, приёмных или приёмно-передающих позиций, в которых осуществляется совместная обработка РЛИ. В связи с усложнением задач радиолокации интерес к разнесённым радиолокационным средствам в последнее время возрастает.

## 2.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИООБНАРУЖЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Проблема радиобнаружения объекта сводится к обнаружению сигнала, излучаемого или переизлучаемого этим объектом на фоне различного рода помех. *Активное радиобнаружение* основано на явлении отражения или рассеивания радиоволн, если на пути их распространения встречается объект с электрическими параметрами, отличными от параметров среды. Такой объект, облучённый электромагнитным колебанием, становится источником отражённого, т.е. вторичного электромагнитного поля. Мощность вторичного излучения зависит от

интенсивности первичного поля около объекта, параметров объекта (габаритов, формы, электрических свойств), положения объекта относительно источника зондирующего сигнала, поляризации первичного поля, длины волны  $\lambda$ .

Зависимость мощности вторичного излучения от  $\lambda$  особенно важна, так как её характер определяет диапазон радиоволн, пригодный для радиобнаружения. Если линейные размеры объекта  $l$  таковы, что

$$l \gg \lambda, \quad (2.1)$$

то мощность вторичного излучения от  $\lambda$  практически не зависит. Если  $l \ll \lambda$ , то мощность вторичного излучения обратно пропорциональна  $\lambda^4$ . При этом с увеличением  $\lambda$  мощность вторичного излучения резко падает, что приводит к соответствующему уменьшению дальности обнаружения. Поэтому в радиолокации используют в основном такие радиоволны, длина которых удовлетворяет соотношению (2.1). Следовательно, для радиолокационного наблюдения целей типа самолётов, автомашин и т.п. нужно использовать диапазон метровых и более коротких волн ( $10 \dots 10^{-3}$  м).

Необходимость укорочения длины волны обусловлена также стремлением создать более узкий радиолуч, чтобы обеспечить разрешение (разделение) целей по угловым координатам, более высокую точность их измерения и более экономное расходование энергии передатчика. Дело в том, что угловая ширина луча или ширина диаграммы направленности (ДН) антенны

$$\alpha_a = \frac{k\lambda}{d_a}, \quad (2.2)$$

где  $d_a$  – линейный размер апертуры антенны;  $k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от распределения электромагнитного поля по апертуре.

Следовательно, при заданном размере антенны сужение луча достигается путём уменьшения длины волны  $\lambda$ .

Необходимо, однако, учитывать и фактор, ограничивающий укорочение волны – затухание радиоволн в атмосфере, которое в сантиметровых и миллиметровых диапазонах может оказаться значительным.

Для обнаружения целей, лежащих далеко за линией горизонта, т.е. для *загоризонтной радиолокации*, диапазон  $10 \dots 10^{-3}$  м не пригоден, так как волны этого диапазона распространяются по законам, близким к оптическим, т.е. в пределах прямой видимости. Способностью проникать далеко за линию горизонта обладают радиоволны с большей длиной волны. В загоризонтной радиолокации используется прежде всего диапазон декаметровых волн  $10 \dots 100$  м. Эти волны способны

отражаться от верхних слоёв атмосферы и позволяют обнаруживать различные объекты, скрытые за линией горизонта (самолёты, стартовые баллистические ракеты и др.).

Обнаружение объектов возможно при импульсном и непрерывном зондирующих сигналах. В первом случае объект облучается короткими импульсами, длительность которых обычно значительно меньше паузы между ними. При этом используется временная развязка приёмного и передающего каналов, реализованная *антенным переключателем* (АП). При непрерывном сигнале влияние передающего канала на приёмный ослабляется с помощью пространственной, частотной или поляризационной развязки.

*Пассивное обнаружение* основано на использовании собственно, в частности, теплового излучения объекта. Любое физическое тело, температура которого выше абсолютного нуля, излучает электромагнитные колебания, поэтому имеется принципиальная возможность обнаруживать любые объекты без предварительного облучения. Максимум теплового излучения земной поверхности и многих других объектов лежит в области инфракрасного диапазона волн. Для обнаружения может использоваться также радиоизлучение, вызванное работой различных радиоустройств, имеющихся на объекте, запуском ракет и т.п.

*Физической основой определения местоположения объектов* является то, что в однородной среде радиоволны распространяются прямолинейно и с постоянной скоростью  $c = 3 \times 10^8$  м/с. Это позволяет определить направление на излучатель радиоволн и пройденный ими путь (дальность)  $R = c\tau$ , измерив время распространения  $\tau$  между излучателем и приёмником. Так, если  $\tau = 1$  мкс, то  $R = 300$  м, а если  $\tau = 1$  мс, то  $R = 300$  км. Однако реальная среда в общем случае не является однородной. Поэтому траектория распространения радиоволн, вообще говоря, отличается от прямой линии, а скорость их распространения меняется на пути распространения. Это приводит к соответствующим ошибкам в определении местоположения объекта.

В некоторых РЛС и РНС для определения местоположения объекта наряду с перечисленными свойствами радиоволн используется эффект Доплера – изменение частоты принимаемых электромагнитных колебаний при изменении расстояния  $R$  между приёмником и излучателем радиоволн. Найдём это изменение, полагая, что излучается гармоническое колебание частоты  $f_0$  с начальной фазой  $\varphi_0$ . Тогда текущее значение фазы колебания на входе приёмника

$$\varphi(t) = 2\pi f_0(t - R/c) + \varphi_0.$$

При изменении расстояния  $R$ , например из-за движения излучателя с радиальной скоростью  $V_R = dR/dt$ , частота принимаемого колеба-

ния  $f = (d\varphi / dt) / 2\pi = f_0 - f_0 \cdot V_R / c$  отличается от частоты излучаемого на значение

$$f_D = -f_0 \cdot V_R / c = -V_R / \lambda, \quad (2.3)$$

где  $\lambda = c / f_0$  – длина волны (выводы справедливы при условии  $V_R \ll c$ ).

Величина (2.3) называется *частотой Доплера* или *доплеровским смещением частоты*.

Если в одном и том же пункте производится излучение и приём колебаний, отражающихся объектом, перемещающимся относительно излучателя, то эффект Доплера проявляется дважды:

$$f'_D = -f_0 \cdot V_R / c = -2V_R / \lambda, \quad (2.3a)$$

Диапазон радиоволн, используемый в радионавигации, значительно шире, чем в радиолокации. Дело в том, что в неавтономных РНС отражающие свойства объекта не используются и поэтому условие (2.1) не ограничивает выбора диапазона радиоволн. В радионавигации он обусловлен особенностями распространения радиоволн в реальной среде, которые существенно зависят от длины волны. Кроме того, учитывается *регламент радиосвязи*, т.е. свод правил, которые регулируют порядок использования диапазонов радиоволн разными странами в различных радиосистемах.

В неавтономных РНС, обеспечивающих определение местоположения объекта на больших расстояниях (порядка 8...10 тыс. км) используются мириаметровые волны ( $\lambda = 10...100$  км); при меньших расстояниях (1...3 тыс. км) – километровые ( $\lambda = 1...10$  км) и гектометровые ( $\lambda = 0,1...1$  км) волны. В автономных РНС, например в радиовысотомерах, доплеровских измерителях скорости и угла сноса (ДИСС), а также в неавтономных РНС, например в радиомаячных системах посадки, в которых требуется сформировать достаточно узкий радиолуч, нужно учитывать соотношение (2.2), поэтому такие системы работают на метровых и более коротких волнах.

### 2.3. ПОЗИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Проблема определения местоположения объекта, или, короче, проблема местоопределения, сводится к определению (измерению) некоторых геометрических величин, однозначно характеризующих место объекта в пространстве. К ним относятся, прежде всего, длина траектории распространения или *дальность* и *направление на излучатель радиоволн*. Определение этих величин, называемое *радиодально-*

метрий и радиопеленгацией соответственно, осуществляется с помощью радиоустройств – радиодальномеров и радиопеленгаторов. Угол между начальным направлением и искомым называется пеленгом. При пеленгации в горизонтальной плоскости в качестве начального принимают северное направление географического меридиана. За положительное направление отсчёта пеленга выбирают направление вращения часовой стрелки. При помощи радиоустройств можно определить следующие геометрические величины:

- 1) пеленг  $\alpha_M$  искомой точки  $M$  из фиксированной точки  $A$  (рис. 2.2, а);
- 2) пеленг  $\alpha_A$  фиксированной точки  $A$  из искомой точки  $M$  (рис. 2.2, б);
- 3) расстояние  $R$  от фиксированной точки  $A$  до искомой точки  $M$  (рис. 2.2, в);
- 4) разность расстояний  $R_1 - R_2$  от искомой точки  $M$  до двух фиксированных точек  $A$  и  $B$  (рис. 2.2, з);
- 5) сумму расстояний  $R_1 + R_2$  от искомой точки  $M$  до двух фиксированных точек  $A$  и  $B$  (рис. 2.2, д).

Каждому измеренному значению какой-либо из перечисленных величин соответствует линия положения – геометрическое место точек, для которых величина, определяющая местоположение объекта, постоянна. При постоянном пеленге искомой точки из фиксированной

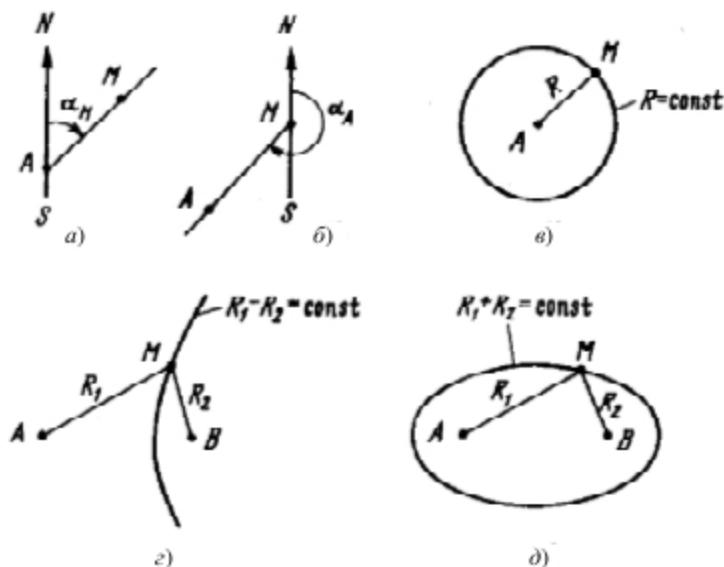


Рис. 2.2. К определению пеленга

(рис. 2.2, а), как и при постоянном пеленге фиксированной точки из искомой (рис. 2.2, б), линии положения являются прямыми. При постоянном расстоянии от искомой точки до фиксированной линия положения представляет собой окружность с центром в точке  $A$  и проходящую через точку  $M$  (рис. 2.2, в). При постоянной разности расстояний от искомой точки до двух фиксированных линия положения является гиперболой, проходящей через точку  $M$  (рис. 2.2, з); фиксированные точки  $A$  и  $B$  – фокусы гиперболы. При постоянной сумме расстояний от искомой точки до двух фиксированных линия положения является эллипсом, проходящим через точку  $M$  (рис. 2.2, д); точки  $A$  и  $B$  – фокусы эллипса.

Для определения местоположения объекта на плоскости надо найти две пересекающиеся линии положения. Точка пересечения этих линий даст искомое местоположение. Такой метод местоопределения называется *позиционным*. В зависимости от видов используемых линий положения различают следующие позиционные методы:

- пеленгационный, при котором местоположение объекта определяется как точка пересечения двух прямых (рис. 2.3, а);
- дальномерный, при котором местоположение объекта – точка пересечения двух окружностей (рис. 2.3, б);
- разностно-дальномерный, при котором местоположение объекта – точка пересечения двух гипербол (рис. 2.3, в);

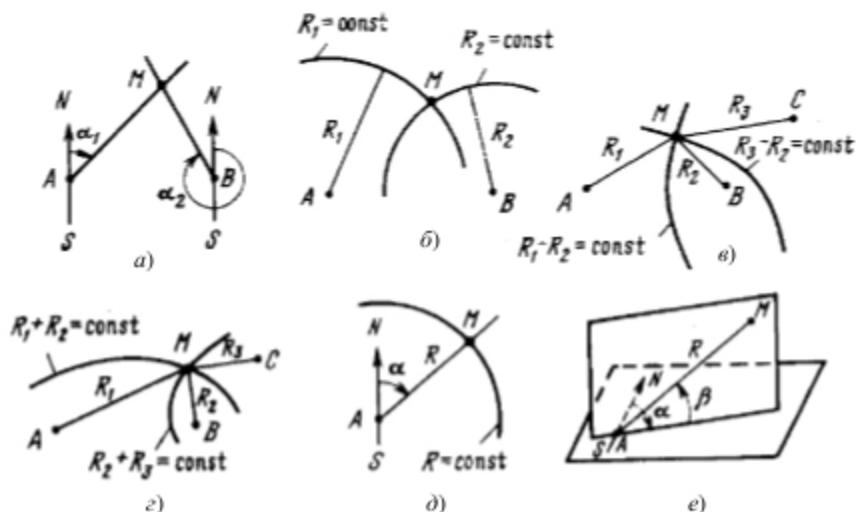


Рис. 2.3. Позиционный метод определения

- суммарно-дальномерный, при котором местоположение объекта – точка пересечения двух эллипсов (рис. 2.3, *з*);
- дальномерно-пеленгационный, при котором местоположение объекта – точка пересечения прямой с окружностью (рис. 2.3, *д*).

Пеленгационный и разностно-дальномерный методы широко применяют в радионавигации для определения собственного положения подвижного объекта относительно радиомаяков (РПДУ), устанавливаемых в РНТ. Эти методы используют также в радиолокации – в пассивных РЛС. Дальномерный метод применяют в радионавигации. Кроме того, дальномерный, а также суммарно-дальномерный методы используют в радиолокации – в активных РЛС. Дальномерно-пеленгационный метод – основной в однопозиционной радиолокации, так как он единственный из рассмотренных методов позволяет определить местоположение объекта из одной точки.

При местоопределении объекта в пространстве постоянному значению каждой из перечисленных геометрических величин соответствует поверхность возможных местоположений объекта, которую называют *поверхностью положения*. Так, постоянному значению расстояния от фиксированной точки до искомой соответствует поверхность положения в виде сферы. При постоянном значении суммы от искомой точки до фиксированных поверхностей положения является эллипсоид. При постоянном значении в горизонтальной плоскости искомой точки из фиксированной поверхностью положения будет вертикальная плоскость, проходящая через эти точки.

Пересечение двух поверхностей положения даёт линию положения в пространстве. Точка пересечения линии положения и третьей поверхности определяет местоположение объекта в пространстве. Если, например, использовать дальномерно-пеленгационный метод, то местоположение объекта даёт точка пересечения прямой со сферой. В этом случае для однозначного определения направления на объект необходимо осуществить пеленгацию в двух пересекающихся плоскостях, как правило – горизонтальной и вертикальной (рис. 2.3, *е*). Угол  $\alpha$  между северным направлением географического меридиана и проекцией направления на объект на горизонтальную плоскость называется *азимутом*. Угол  $\beta$  между направлением на объект и горизонтальной плоскостью называется *углом места*. Расстояние  $R$  от радиолокатора до объекта называется *наклонной дальностью*. Как видим, задача местоопределения объекта в пространстве дальномерно-пеленгационным методом сводится к измерению трёх координат: наклонной дальности, азимута и угла места.

## 2.4. ДРУГИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Помимо позиционных методов, широко применяемых в радиолокации и радионавигации, в последней используют и другие методы местоопределения: счисления пути и обзорно-сравнительный.

**Метод счисления пути** основан на измерении вектора скорости летательного аппарата (ЛА) относительно поверхности Земли и интегрировании скорости по времени, в результате чего определяется пройденный путь. Измерения выполняются на борту ЛА с помощью ДИСС, который определяет путевую скорость и угол сноса. *Путевой скоростью* называется горизонтальная составляющая  $\vec{V}$  вектора скорости ЛА относительно земной поверхности. Путевая скорость складывается из двух составляющих: скорости движения ЛА относительно воздушной массы – воздушной скорости  $\vec{V}_a$  и скорости перемещения воздушной массы относительно земной поверхности – скорости ветра  $\vec{U}$ . Эти векторы образуют навигационный треугольник скоростей (рис. 2.4).

Угол  $\alpha$  между векторами  $\vec{V}_a$  и  $\vec{V}$ , вызванный сносом ЛА ветром, называется *углом сноса*. Для определения местоположения ЛА помимо ДИСС необходима ещё курсовая система, определяющая курс ЛА – угол в горизонтальной плоскости между северным направлением меридиана и проекцией продольной оси ЛА. Навигационный вычислитель, используя данные ДИСС и курсовой системы, а также координаты начального пункта маршрута ЛА, определяет его местоположение в текущий момент времени.

Достоинством рассмотренной системы местоопределения является её автономность, а главный недостаток – ухудшение точности местоопределения с течением времени (происходит накопление погрешностей по мере удаления ЛА от начального пункта).

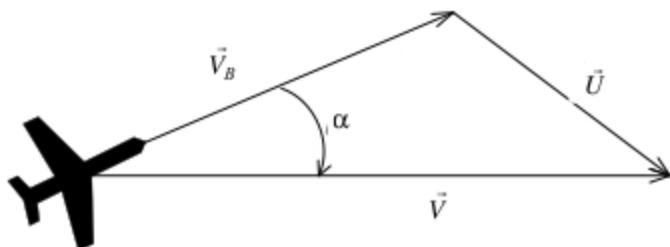


Рис. 2.4. Навигационный треугольник скоростей



Рис. 2.5. Система экстремальной радионавигации

**Обзорно-сравнительный метод** основан на измерении параметров какого-либо физического поля, характерного для осматриваемой местности, и сравнении этих параметров с параметрами эталонного поля, полученного заранее и хранящегося в памяти системы. Радионавигационные системы, использующие этот метод, называют системами *экстремальной радионавигации* (рис. 2.5), так как они отыскивают экстремум некоторой меры близости измеренных и эталонных параметров. Если за меру близости указанных параметров принята их взаимная корреляционная функция, то систему называют *корреляционно-экстремальной* (КЭС).

В этом случае блок сравнения (см. рис. 2.5) представляет собой коррелятор. Оптимизатор выдаёт сигнал на перемещение эталонного поля, обеспечивая поиск максимума корреляционной функции, а также формирует сигнал коррекции для системы автоматического управления, чтобы ликвидировать отклонение объекта от заданного курса. В качестве физического поля может выступать, например, поле высот рельефа местности.

Достоинствами экстремальных систем радионавигации являются их автономность, сравнительно высокая помехозащищённость, отсутствие накапливающихся с течением времени погрешностей.

Недостатки их связаны с необходимостью предварительно получать информацию о характеристиках местности и сложностью обработки сигналов (требуется вычислительное устройство с высоким быстродействием и большой ёмкостью памяти).

## 2.5. ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ

### 2.5.1. ВТОРИЧНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Явление вторичного излучения, лежащее в основе активной радиолокации, свойственно волнам любой природы. Оно возникает всякий раз, когда волна встречает препятствие на пути своего распростра-

нения. Падающую на препятствие волну называют *первичной*, а отражённую, или рассеянную, – *вторичной*. Препятствие в этом случае является пассивным вторичным излучателем.

Характер вторичного излучения зависит от многих факторов, основными из которых являются электрические свойства, геометрическая форма, движение и взаимное перемещение элементов отражающего объекта, соотношение размера объекта и длины облучающей его волны, соотношение размеров объекта и разрешаемого объёма пространства (объект считается сосредоточенным, если он попадает в пределы одного разрешаемого объёма, и объёмно распределённым, если занимает несколько разрешаемых объёмов), закон модуляции и поляризация облучающей электромагнитной волны.

Вторичное излучение принято разделять на *зеркальное отражение*, *диффузное рассеяние* и *резонансное излучение*. Зеркальное отражение наблюдается при облучении гладких поверхностей, размеры которых много больше длины волны  $\lambda$  облучающих радиоволн, а размеры шероховатостей не превосходят  $\lambda/16$ . В этом случае соблюдается закон зеркального отражения – угол падения равен углу отражения.

Свойством диффузного рассеяния обладают большие поверхности с размерами шероховатостей порядка длины волны облучающих радиоволн. Резонансное излучение имеет место при размерах облучаемых объектов, кратных нечётному числу полуволн. Вторичное излучение зависит также от размеров и конфигурации отражающих объектов.

Основными характеристиками радиолокационных целей (РЦ) являются *отражающая способность*, *статистические параметры* и *спектры флуктуаций амплитуды и фазового фронта отражённого сигнала*.

### 2.5.2. ЭФФЕКТИВНАЯ ПЛОЩАДЬ РАССЕЯНИЯ ЦЕЛЕЙ

Отражающие свойства цели определяют *эффективную площадь рассеяния* (ЭПР)  $\sigma$ , т.е. площадь поверхности идеального изотропного и не поглощающего энергию переизлучателя, который, будучи помещённым в точку цели, создаёт у антенны РЛС такую же плотность потока мощности отражённого сигнала, как и реальная цель. Если зондирующий сигнал РЛС создаёт у цели, находящейся на расстоянии  $R$ , плотность потока мощности  $P_1$ , то цель с ЭПР  $\sigma$  воспринимает мощность  $P_2 = P_1 \sigma$ . У антенны РЛС плотность потока мощности

$$P_2 = P_1 / (4\pi R^2) = P_1 \sigma / (4\pi R^2), \quad (2.4)$$

отсюда

$$\sigma = 4\pi R^2 P_2 / P_1. \quad (2.5)$$

Поскольку мощность пропорциональна квадрату напряжённости электрического поля  $E^2$ , выражение (2.5) с учётом формулы (2.4) может быть представлено в виде  $\sigma = 4\pi R^2 E_2^2 / E_1^2$ , где  $E_1, E_2$  – значения напряжённости поля вблизи цели и РЛС соответственно.

По методу определения ЭПР различают *элементарные* и *сложные цели*. Для элементарных целей (металлический шар, лист, вибратор, уголкового отражатель и т.п.) ЭПР можно определить аналитическим путём. Так, ЭПР уголкового отражателя, состоящего из трёх взаимно перпендикулярных металлических треугольных листов и обладающего свойством отражения радиоволн в сторону облучающей РЛС (рис. 2.6), определяется по формуле

$$\sigma_{\text{уoa}} = \frac{4\pi\alpha^4}{3\lambda^2}.$$

ЭПР полуволнового вибратора

$$\sigma_{\lambda/2} = 0,86\lambda^2 \cos^4 \varphi,$$

где  $\varphi$  – угол между нормалью и направлением на радиолокационную станцию.

Для плоской хорошо проводящей пластины

$$\sigma_{\text{пл}} = \frac{4\pi S^2}{\lambda^2}.$$

ЭПР шара с идеально проводящей гладкой поверхностью и радиусом  $r_{\text{ш}} \gg \lambda$  определяется с помощью выражения

$$\sigma_0 = \pi r_{\text{ш}}^2.$$

В качестве пассивных радиомаяков на море используют, например, биконические отражатели (рис. 2.7).

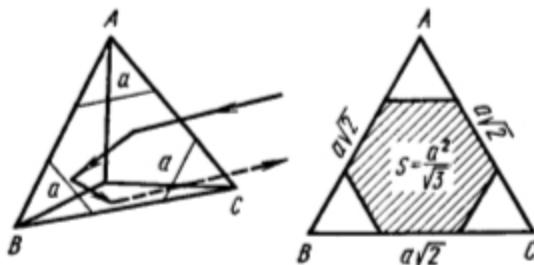


Рис. 2.6. ЭПР уголкового отражателя

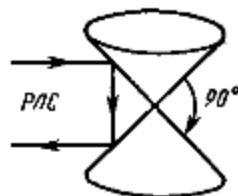


Рис. 2.7. Биконические отражатели

ЭПР сложных целей получают экспериментальными методами. Сложные цели делятся на *точечные* (малоразмерные) и *распределённые*. Точечными считают те цели, размеры которых много меньше элементов разрешения (разрешаемых расстояний) по дальности и угловым координатам. Примерами точечных целей являются самолёты, корабли, ИСЗ на большом расстоянии от РЛС. Если указанные условия не выполняются, говорят о распределённых целях. Примерами распределённых целей являются земная поверхность, облака пассивных отражателей, гидрометеоры. Для распределённых целей вводят понятие удельной ЭПР, характеризующей отражающие свойства единицы площади или объёма.

Примерные значения средних ЭПР для различных целей, имеющих размеры  $l_c \gg \lambda$ , приведены в табл. 1.1.

### 1.1. ЭПР для различных целей

Радиолокационная цель	$\sigma_{ср}, м^2$
Корабль водоизмещением $10^4$ т	$2 \cdot 10^4$
Средний корабль водоизмещением $3 \cdot 10^4 \dots 10^3$ т	$10^4 \dots 3 \cdot 10^3$
Малые корабли водоизмещением 200...60 т	250...50
Подводные лодки в надводном положении	140...35
Транспортный самолёт, дальний бомбардировщик	100...20
Средний бомбардировщик	30...5
Бронетранспортёр	30...5
Тягач тяжёлый	20...15
Тёжелый истребитель	10...5
Танк	9...6
Автомобиль	8...6
Лёгкий истребитель	5...2
Человек ( $\lambda = 3$ см)	1,2...0,5
Рубка подводной лодки	1
Крылатая ракета	$1 \dots 10^{-2}$
Стая птиц, попадающих в разрешаемый объём РЛС	$1 \dots 10^{-2}$
Головка баллистической ракеты	$1 \dots 10^{-3}$
Голубь ( $\lambda = 3$ см)	$10^{-2} \dots 10^{-3}$
Пчела рабочая ( $\lambda \approx 10 \dots 0,8$ см)	$6 \cdot 10^{-3} \dots 10^{-8}$

### 2.5.3. СПЕКТРЫ ФЛУКТУАЦИЙ АМПЛИТУДЫ И ФАЗОВОГО ФРОНТА ОТРАЖЁННОГО СИГНАЛА

Зависимость ЭПР от угла облучения называют *диаграммой рассеяния цели*. Из-за неравномерной диаграммы рассеяния реальных целей и случайного изменения ракурса  $\theta$  их облучения РЛС возникают

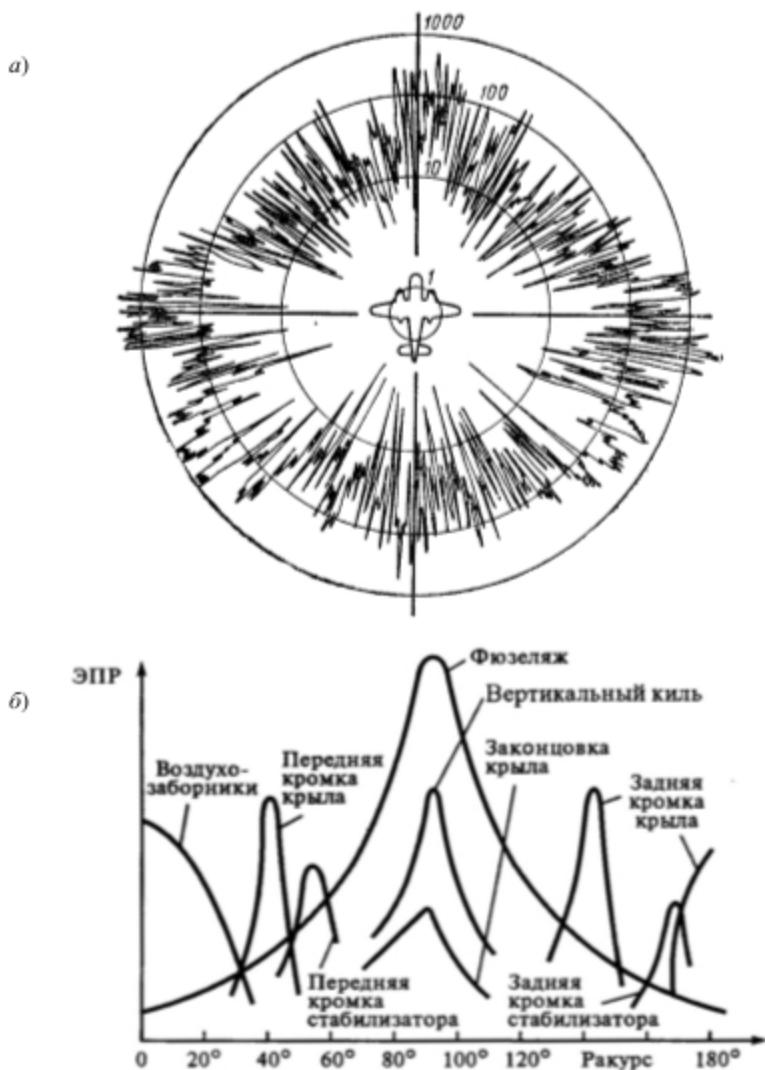


Рис. 2.8. Флукутации мощности отражённого сигнала в точке приёма (a) и зависимость ЭПР (b) от ракурса

флуктуации мощности отражённого сигнала в точке приёма. Возможный вариант таких флуктуаций показана на рис. 2.8, а. На рисунке 2.8, б показана зависимость ЭПР основных элементов планера-истребителя от его ракурса.

ЭПР флукутирующей цели является случайной величиной, характеризующейся плотностью вероятности  $p(\sigma)$  и средним значением  $\bar{\sigma}$ . Например, если амплитуда отражённого сигнала распределена по закону Рэлея

$$p(A) = \frac{A}{\bar{\sigma}^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\bar{\sigma}^2}\right), \quad 0 < A < \infty, \quad (2.6)$$

то плотность вероятности ЭПР реальной цели подчиняется экспоненциальному закону:

$$p(\sigma) = \frac{1}{\bar{\sigma}} \exp\left(-\frac{\sigma}{\bar{\sigma}}\right), \quad 0 < \sigma < \infty, \quad (2.7)$$

где  $\bar{\sigma}^2$  – средняя интенсивность (мощность) результирующего сигнала.

При переходе от выражения (2.6) к (2.7) учтено, что величина ЭПР  $\sigma$  пропорциональна  $A^2$ . Вид кривой  $p(\sigma)$ , соответствующий формуле (2.7), приведён на рис. 2.9. При наличии в отражённом сигнале регулярной составляющей плотность вероятности амплитуды подчиняется закону Райса. В этом случае  $p(\sigma)$  определяется выражением

$$p(\sigma) = \frac{1}{\bar{\sigma}} \exp\left(-\frac{\sigma_0 + \sigma}{\bar{\sigma}}\right) I_0\left(\frac{2\sqrt{\sigma_0\sigma}}{\bar{\sigma}}\right), \quad 0 < \sigma < \infty. \quad (2.8)$$

Из (2.8) следует, что  $p(\sigma)$  зависит от уровня регулярной составляющей  $\sigma_0$  и при  $m = \frac{\sigma_0}{\bar{\sigma}} \gg 1$  имеет характер гауссовского распределения (см. рис. 2.9).

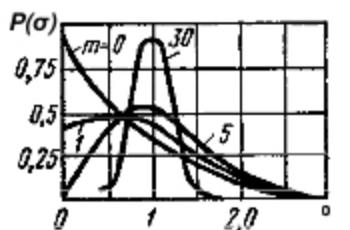


Рис. 2.9. Плотность вероятности ЭПР реальной цели

Спектр амплитудных флуктуаций отражённого от цели сигнала определяется степенью изрезанности диаграммы рассеяния цели и скоростью изменения ракурса облучения. В сантиметровом диапазоне волны при манёврах самолёта 10...20 град/с наивысшая частота спектра флуктуаций составляет 100...400 Гц. При проектировании РЛС и особенно следящих угломерных устройств необходимо учитывать ширину спектра флуктуаций отражённого сигнала, выбирая такие методы обработки, которые в меньшей степени подвержены амплитудным флуктуациям сигнала (например, моноимпульсные методы).

Поверхность, в любой точке которой отражённый сигнал имеет одну и ту же фазу, определяет *фазовый фронт*. При неравномерной диаграмме рассеяния цели фазовый фронт отражённой волны оказывается отличным от сферического, направление нормали к нему может отклоняться не только от направления на какую-либо блестящую точку, но и выходить за пределы углового размера цели. Возникающие флуктуации фазового фронта называют *угловыми шумами* цели. Спектр этого шума низкочастотный и имеет максимальную интенсивность примерно в полосе от 0 до 5 Гц. Угловой шум проявляется сильнее для целей с малым числом блестящих точек.

Сложной цели свойственен также *поляризационный шум*, обусловленный тем, что цель может преобразовывать поляризацию облучающей электромагнитной волны. В отражённой волне появляются составляющие на ортогональной поляризации. Такие цели являются поляризационно-избирательными.

Уменьшение ЭПР цели является одной из основных задач развития и модернизации средств воздушного нападения. Решение этой задачи ведётся по многим направлениям, к основным из которых можно отнести следующие.

**Совершенствование формы летательных аппаратов.** Техническая реализация этого направления проявляется в устранении острых кромок, разрывов поверхностей (например, в самолётах F-111, ATF-1, F-16), в уменьшении площади вертикальных килей за счёт перехода к двухкилевой схеме, отклонение килей внутрь к оси фюзеляжа (в самолётах SR-71, F-19). Эффективными методами уменьшения ЭПР являются применение аэродинамической схемы «летающее крыло» (в самолётах B-2, АТВ и т.п.); интеграция систем «планер–воздухозаборник–двигатель» и «планер–оружие» путём размещения воздухозаборников и сопел на верхней поверхности самолёта (как это реализовано в SR-71), применение конформных систем подвески вооружения (например, в самолёте B-2B). Кроме того, придание фюзеляжу и передним кромкам аэродинамических поверхностей формы, уменьшающей зеркальное отражение в сторону облучающей РЛС.

**Применение радиопрозрачных и радиопоглощающих материалов и устройств.** Технически это достигается использованием композиционных материалов для создания элементов конструкции летательных аппаратов. Так, термопластики могут составлять до 60% массы самолёта ATF. Широко применяются радиопоглощающие покрытия (ферромагнитные материалы и полимеры), для уменьшения отражения от входного канала двигателя используются аттенюаторы. В самолётах SR-11, U-2, TR-1, F-19 применяются токопроводящие покрытия для устранения разрывов между материалами с различными электрическими свойствами.

**Снижение заметности бортовых антенных систем.** Для реализации этого направления используют следующие пути: ориентируют антенны таким образом, чтобы исключить зеркальное отражение в сторону РЛС (так, в бомбардировщике В-1В антенна многофункциональной РЛС отклонена вниз); уменьшают число антенн; используют обтекатели с управляемыми характеристиками радиопрозрачности.

## 2.6. ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ РАДИОСИСТЕМ

Под *дальностью действия радиосистемы* понимают максимальное расстояние  $R_{\max}$ , при котором обеспечивается заданная точность действия. Так как точность действия в разных режимах работы РЛС и РНС характеризуется разными показателями качества, то и дальность действия в различных режимах будет, вообще говоря, разной. Дальность действия радиосистемы зависит от её вида и технических характеристик, условий распространения радиоволн, наличия тех или иных помех, отражающих свойств объекта.

Для свободного пространства без учёта затухания радиоволн в атмосфере и отражения радиоволн от земной поверхности плотность потока мощности  $P_1$ , создаваемая у цели:

$$P_1 = P_{\text{прд}} G_{\text{прд}} \eta_{\text{прд}} / (4\pi R^2), \quad (2.9)$$

где  $P_{\text{прд}}$  – мощность передатчика РЛС;  $G_{\text{прд}}$  – коэффициент направленного действия (КНД) передающей антенны;  $\eta_{\text{прд}}$  – коэффициент полезного действия (КПД) передающего антенно-фидерного тракта.

В соответствии с (2.4) плотность потока мощности  $P_2$  отражённой волны у приёмной антенны РЛС определяется плотностью потока  $P_1$ , ЭПР  $\sigma$  и расстоянием  $R$ . Тогда мощность сигнала на входе приёмника

$$P_{\text{прм}} = P_2 S_{\text{а прм}} \eta_{\text{прм}} \quad (2.10)$$

где  $S_{\text{а прм}}$  – эффективная площадь приёмной антенны;  $\eta_{\text{прм}}$  – КПД приёмного антенно-фидерного тракта.

Используя соотношения (2.4), (2.9) и (2.10), получим

$$P_{\text{прм}} = P_{\text{прд}} G_{\text{прд}} S_{\text{а прм}} \sigma \eta_{\text{прд}} \eta_{\text{прм}} / (4\pi)^2 R^4. \quad (2.11)$$

Максимальная дальность действия РЛС определяется минимальной мощностью сигнала  $P_{\text{прм min}}$  на входе приёмника (пороговым сигналом), при котором обеспечивается требуемое качество обнаружения. Из выражения (2.11) следует

$$R_{\text{max}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{прд}} G_{\text{а прд}} S_{\text{а прм}} \sigma \eta_{\text{прд}} \eta_{\text{прм}}}{(4\pi)^2 P_{\text{прм min}}}}. \quad (2.12)$$

В импульсных РЛС, использующих для передачи и приёма одну антенну с антенным переключателем, можно принять  $\eta_{\text{прд}} = \eta_{\text{прм}} = \eta$  и

$$S_{\text{а прм}} = G_{\text{а прд}} \lambda^2 / 4\pi. \quad (2.13)$$

В этом случае максимальная дальность

$$R_{\text{max}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{прд}} G_{\text{а прд}}^2 \lambda^2 \sigma \eta^2}{(4\pi)^3 P_{\text{прм min}}}}. \quad (2.14)$$

Соотношение (2.14), связывающее максимальную дальность действия с техническими характеристиками РЛС, называют *уравнением дальности*.

Рассмотрим другие формы записи уравнения дальности. Выразим пороговую мощность, характеризующую чувствительность реального приёмника, через пороговую мощность оптимального приёмника:  $P_{\text{прм min}} = k_n P_{0 \text{ прм}}$ , где  $k_n$  – коэффициент потерь, обусловленный шумами приёмника. Считая отношение энергий излучённого и принятого сигналов пропорциональным отношению мощностей ( $E_n / E_n = P_{\text{прд}} / P_{0 \text{ прм}}$ ), можно записать

$$P_{\text{прм min}} = k_n P_{\text{прд}} E_n / E_n = k_n q k T_{\text{ш}}^x P_{\text{прд}} / (2E_n), \quad (2.15)$$

где  $q = 2E_n / N_0$  – отношение сигнал/шум;  $N_0 = k T_{\text{ш}}^x$  – спектральная плотность шума, выраженная через постоянную Больцмана  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  Дж/К и шумовую температуру приёмника  $T_{\text{ш}}^x$  (в Кельвинах).

С учётом выражения (2.15) уравнение дальности представляется в виде

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{2E_n G_{\text{прд}}^2 \lambda^2 \sigma \eta^2}{(4\pi)^3 k_n q k T_{\text{ш}}^x}}. \quad (2.16)$$

Это уравнение связывает дальность действия с основными характеристиками РЛС и через отношение сигнал/шум  $q$  – с требуемыми качественными показателями обнаружения.

Дальность действия радиолокационных систем с активным ответом определяется параметрами не только РЛС, но и ответчика, расположенного на цели. Если  $G_1$  и  $G_2$  – коэффициенты направленного действия антенн РЛС и ответчика, то максимальная дальность действия определяется соотношением

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{2E_n G_1 G_2 \lambda^2 \eta^2}{(4\pi)^2 k_n q k T_{\text{ш}}^x}}. \quad (2.17)$$

При активном ответе дальность действия является квадратом дальности активной РЛС.

По аналогии с (2.14) можно также записать уравнение радиосвязи в свободном пространстве:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{прд}} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \lambda^2 \eta_{\text{прд}} \eta_{\text{прм}}}{(4\pi)^2 P_{\text{прм min}}}}. \quad (2.18)$$

На основе этого уравнения рассчитывается дальность действия неавтономной РНС.

Обнаружение низколетящих целей связано с отражением радиоволн от земной поверхности. Отражённые от земли радиоволны интерферируют с прямой волной, приводя к изменению мощности принимаемого сигнала. Пусть антенна РЛС расположена на высоте  $h_a$ ,  $\beta$  – угол места (рис. 2.10, а), тогда

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{2E_n G_{\text{прд}}^2 \lambda^2 \sigma \eta^2}{(4\pi)^3 k_n q k T_{\text{ш}}^x}} F_0(\beta), \quad (2.19)$$

где  $F_0(\beta) = 2 \sin \frac{2\pi h_a H_u}{\lambda R \cos \beta}$  – интерференционный множитель, принимающий значения в интервале  $[0; 2]$ .

Из выражения (2.19) следует, что при расположении цели на углах места, соответствующих максимуму диаграммы направленности, дальность  $R_{\max}$  увеличивается примерно в 2 раза по сравнению с даль-

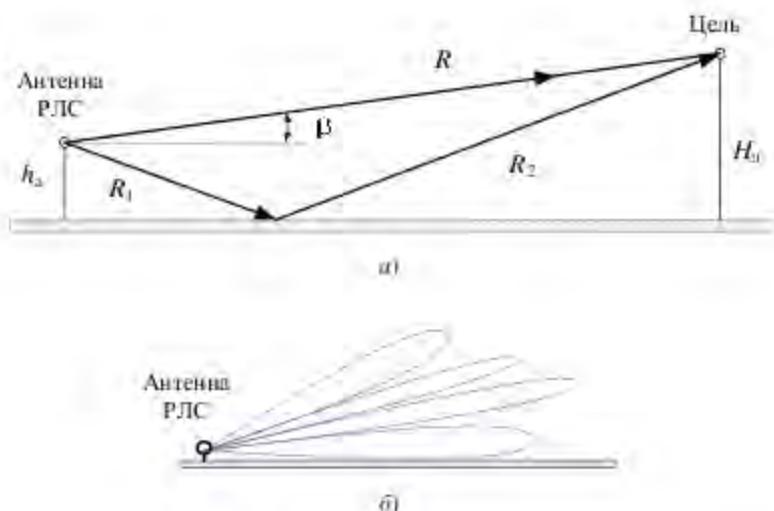


Рис. 2.10. К определению угла места (а) и зоны нулевого излучения и приёма (б)

ностью в свободном пространстве. При малых углах места  $\beta$  образуются зоны нулевого излучения и приёма (рис. 2.10, б).

В РЛС, использующих радиоволны длиной менее 30 см, определённое влияние на дальность действия оказывает затухание радиоволн в кислороде воздуха и парах воды. С учётом затухания  $\eta_z$  дальность действия  $R_z$  определяется уравнением

$$R_z = R_{\max} \exp(-0,115\eta_z R_z), \quad (2.20)$$

где вместо  $R_{\max}$  следует подставить правую часть соотношения (2.16). Данное уравнение удобнее решать графически.

При использовании ультракоротких волн дальность действия РЛС ограничивается кривизной земной поверхности. При этом предельная дальность прямой видимости РЛС равна

$$R_{\text{пред}} = 4,12 \left( \sqrt{h_a} + \sqrt{H_c} \right), \quad (2.21)$$

где  $h_a$  и  $H_c$  – высоты антенны РЛС и цели, выраженные в метрах, а дальность  $R_{\text{пред}}$  – в километрах.

Анализ приведённых выражений показывает, что дальность действия РЛС определяется величиной энергии сигнала и не зависит от вида его модуляции. Улучшение направленных свойств антенны позволяет увеличить дальность радиолокации, что достигается за счёт увеличения эффективной площади антенны паряду с переходом на более короткие

волны (см. (2.13)). При этом, однако, необходимо учитывать увеличение затухания радиоволн в атмосфере. Снижение шумовой температуры  $T_{ш}^k$  позволяет поднять чувствительность приёмника и за счёт этого увеличить дальность РЛС. Таким образом, уравнение дальности может быть положено в основу энергетического расчёта РЛС.

## 2.7. КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Классификацию радиолокационных систем так же, как и классификацию радиотехнических систем, можно проводить по различным признакам. В зависимости от используемых классификационных признаков радиолокационные системы подразделяются:

1. По месту установки (наземные, корабельные, авиационные, космического базирования).

2. По назначению (РЛС обнаружения целей, управления оружием, обеспечения полётов, метеорологические, навигационные, опознавания государственной принадлежности, многофункциональные).

3. По происхождению радиосигнала, принимаемого приёмником РЛС: активные РЛС (с активным и пассивным ответом), полуактивные и пассивные РЛС.

4. По рабочему диапазону длин волн (станции декаметрового, метрового, дециметрового, сантиметрового, миллиметрового диапазонов длин волн, многодиапазонные).

5. По виду излучения (РЛС импульсного, непрерывного, квазинепрерывного, шумового и комбинированного излучения).

6. По числу применяемых каналов излучения и приёма сигналов (одноканальные и многоканальные с частотным или пространственным разделением каналов).

7. По числу измеряемых координат (двухкоординатные – обычно дальность и азимут; трёхкоординатные – обычно дальность, азимут и угол места).

8. По числу занимаемых позиций (однопозиционные и многопозиционные).

Рассмотрим задачи, решаемые РЛС в зависимости от места их установки.

Наземные РЛС можно разделить на РЛС надгоризонтного обнаружения (НГО), загоризонтного обнаружения (ЗГО) и подповерхностной радиолокации.

Системы НГО работают в метровом, дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн (0,03...300 ГГц), подразделяются на стационарные и подвижные (мобильные): самоходные, буксируемые, возимые, переносные. По решаемым задачам (назначению) они подразделяются на РЛС:

- управления воздушным движением (УВД);
- обнаружения, наведения и целеуказания;
- обнаружения маловысотных целей;
- наведения зенитных управляемых ракет;
- орудийной наводки;
- радиолокационной разведки на поле боя: наземной разведки, наземной артиллерийской разведки, обнаружения стреляющих минометов и стартующих ракет;
- высотомеры;
- предупреждения о ракетном нападении (ПРН);
- противоракетной обороны (ПРО);
- контроля космического пространства (ККП);
- полигонные;
- метеорологические и др.

РЛС загоризонтного обнаружения (или загоризонтные РЛС) основаны на использовании эффекта отражения радиоволн декаметрового диапазона (3...30 МГц) от ионосферы Земли и работают в режиме обратного рассеяния радиоволн, при котором сигнал принимается в месте излучения, или же в режиме прямого рассеяния, когда падающий и рассеянный потоки радиоволн распространяются в одну сторону. Загоризонтные РЛС могут быть односкачковыми и многоскачковыми. Они предназначены для:

- наблюдения на больших площадях за состоянием поверхности морей и океанов, а также за движением кораблей и самолётов;
- обнаружения областей с отчётливо выраженной плазменной неоднородностью, создаваемой стартующими баллистическими ракетами и метеорными следами;
- ионосферных исследований.

Дальность действия загоризонтных РЛС достигает нескольких тысяч километров.

Радиолокаторы подповерхностного зондирования предназначены для обнаружения полостей в грунте, различных объектов, сооружений из бетона, определения толщины льда, подводной радиолокации и др. Достижимая глубина проникновения может составлять до нескольких сотен метров.

Корабельные РЛС предназначены для обнаружения и сопровождения воздушных и надводных целей, обзора надводной и береговой поверхности, целеуказания, наведения зенитных управляемых ракет и орудий, а также для кораблевождения и навигации (определения местонахождения кораблей, их скорости и проверки курса). Для обеспечения необходимого обзора антенные системы корабельных РЛС устанавливаются на мачтах, а для устранения влияния качки корабля стаби-

лизируют или расширяют сектор обзора по углу места. На современных кораблях число РЛС может быть более 50.

Авиационные (самолётные) РЛС делятся на РЛС обзора воздушного пространства, РЛС землеобзора (обзора земной поверхности), многофункциональные РЛС.

К РЛС обзора воздушного пространства относятся системы:

- перехвата и прицеливания;
- дальнего радиолокационного обнаружения (дозора) и наведения (управления);
- защиты своих самолётов;
- обхода препятствий в воздухе (например, грозовых образований) и др.

К радиолокационным системам землеобзора относятся:

- панорамные;
- бокового обзора с антенной, расположенной вдоль фюзеляжа;
- бокового обзора с синтезированной апертурой (РСА);
- подповерхностной радиолокации.

РЛС космического базирования применяются для дистанционного исследования (в том числе и картографирования) Земли и планет, обеспечения сближения, стыковки и посадки космических аппаратов. Обсуждаются также возможности создания и использования РЛС космического базирования для решения задач противовоздушной и противокосмической обороны.

Приведённая классификация включает далеко не все используемые типы РЛС. Однако и перечисленных типов достаточно для характеристики широты и многообразия применения радиолокационных средств.

## **2.8. КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Как было отмечено ранее, основной задачей навигации является вывод подвижного объекта по оптимальной траектории в заданную точку или область пространства в заданный момент времени.

Решение этой общей задачи подразделяется на ряд частных задач, разнообразных по характеру и методам решения. К частным задачам навигации относятся:

1) выбор и расчёт оптимальной траектории объекта и временных характеристик движения;

2) измерение основных навигационных параметров объектов, т.е. величин, характеризующих его текущие координаты, направление и скорость перемещения;

3) сравнение результатов определения навигационных параметров с заданными или расчётными и выработка корректирующих сигналов и команд;

4) непосредственное воздействие на органы управления объекта для изменения его углового положения (стабилизации) относительно центр масс.

Технические средства навигации в зависимости от физических принципов работы делятся на:

1. Геотехнические средства, использующие геофизические поля Земли (магнитное или гравитационное поля, изменение атмосферного давления с высотой и т.п.): магнитные компасы, барометрические высотомеры, указатели воздушной скорости, гироскопические навигационные приборы, инерциальные системы (ИНС), определённые типы корреляционно-экстремальных навигационных систем (КЭС) и др.

*Достоинства:* автономность, высокая помехозащищённость от активных помех, высокая надёжность, сравнительная простота в изготовлении.

*Недостатки:* точность навигационных измерений низка, погрешности (кроме КЭС и средств визуального ориентирования) растут с течением времени.

2. Радиотехнические средства, использующие закономерности и свойства распространения радиоволн в пространстве: дальномерные, угломерные, угломерно-дальномерные, разностно-дальномерные системы; бортовые РЛС, ДИСС и др.

*Достоинства:* возможность работы в сложных условиях, высокая точность измерений, достаточно большая дальность действия.

*Недостатки:* подвержены воздействию помех, в ряде случаев неавтономны.

Чаще используют периодически, для коррекции результатов, полученных с помощью геотехнических систем.

3. Астрономические средства, использующие световое или радиоизлучение небесных тел, закономерное изменение взаимоположения Земли и других небесных светил: астрокомпасы, секстанты, астроориентаторы, радиоастрономические приборы и др.

*Достоинства:* не подвержены воздействию помех.

*Недостатки:* точность навигационных измерений низка, применение зависит от условий видимости и метеоусловий.

4. Светотехнические и другие визуальные средства обеспечения воздушного движения: световые маяки, посадочные огни, прожекторы, бортовые огни, цветные сигнальные знаки (полотнища), сигнальные ракеты, лазерные системы посадки (ЛСП) и др.

*Достоинства:* простота использования (кроме ЛСП).

*Недостатки:* могут быть использованы в условиях хорошей или слабо ограниченной видимости; решают ограниченный круг задач.

Комплексное использование средств навигации позволяет компенсировать недостатки одних преимуществами других систем. Комплексирование осуществляется, как правило, на базе ЭВМ. Это позволяет автоматизировать решение навигационных задач, что особенно важно для современных ЛА.

## 2.9. ОСНОВНЫЕ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЛС

Радиолокационные и радионавигационные системы относятся к классу РТС извлечения информации. Поэтому их можно описать теми же характеристиками, которые используются для описания РТС в целом, но с учётом задач, решаемых РЛС и РНС.

Характеристики РТС можно разделить на *тактические*, определяющие назначение и возможности практического использования систем, и *технические*, определяющие основные устройства систем (передатчик, антенну, приёмник, выходные устройства и др.). Иными словами, тактические характеристики задаются при проектировании РТС, а обеспечиваются они правильным выбором технических характеристик.

Основными тактическими характеристиками РЛС являются:

1. Зона действия – область пространства, в которой система надёжно выполняет функции, соответствующие её назначению. Так, для РЛС обнаружения зоной действия является область пространства, в которой объекты с заданными характеристиками отражения обнаруживаются с вероятностью не меньше заданной. Зону действия РЛС часто определяют секторами обзора по азимуту и углу места и дальностью действия (максимальной и минимальной).

2. Время обзора – это время, необходимое для однократного обзора заданной зоны действия системы.

3. Число измеряемых координат и параметров движения объектов определяются назначением РЛС. Системы могут быть однокоординатными (радиовысотомер), двухкоординатными (при определении местоположения наземных и надводных объектов), трёхкоординатными (при определении местоположения объектов в воздушном и космическом пространстве). Если решается, например, задача управления беспилотными объектами, то кроме их координат обычно требуется измерять скорости и ускорения объектов.

4. Точность действия характеризуется показателями качества работы РЛС, которые в различных режимах работы систем разные. В режиме обнаружения объектов это, прежде всего, *вероятности ошибочного обнаружения*: вероятность ложной тревоги  $P_{лж}$  (вероятность принятия решения о наличии объекта в исследуемом простран-

стве при условии, что он отсутствует) и вероятность пропуска  $P_{\text{пр}}$  (вероятность принятия решения об отсутствии объекта в исследуемом пространстве при условии, что он в нём присутствует).

При работе РЛС в режиме измерения координат и параметров движения объекта точность действия характеризуется *погрешностями измерения*. Если  $\Theta$  – измеряемая величина, а  $\hat{\Theta}$  – результат измерения или оценка величины  $\Theta$ , то разность  $\Delta\Theta = \hat{\Theta} - \Theta$  есть абсолютная погрешность измерения или ошибка оценивания. Отношение  $\Delta\Theta/\Theta$  – относительная погрешность измерения. Погрешности и ошибки имеют случайные и неслучайные (систематические) составляющие.

5. Разрешающая способность системы – её способность различно обнаруживать и определять координаты и параметры движения близко расположенных объектов. Соответственно, различают разрешающую способность по дальности и угловым координатам (азимуту и углу места), а также по радиальной скорости. Разрешающую способность количественно принято оценивать минимальной разностью значений измеряемых координат (параметров) соседних объектов, при которой они воспринимаются системой различно.

6. Пропускная способность определяется максимальным числом объектов, обслуживаемых системой в течение заданного времени с заданной точностью действия.

7. Помехозащищённость – это способность РЛС надёжно выполнять заданные функции в условиях воздействия непреднамеренных и организованных помех. Помехозащищённость определяется помехоустойчивостью системы и скрытностью её работы.

Под *помехоустойчивостью* понимают способность системы при воздействии на неё определённой совокупности помех сохранять значения показателей качества в заданных пределах. Различают реальную и потенциальную помехоустойчивость. *Потенциальной* называется наивысшая помехоустойчивость системы в условиях, когда единственной помехой является собственный шум радиоприёмного устройства. Потенциальная помехоустойчивость может быть достигнута лишь при оптимальном, т.е. наилучшем способе обработки радиосигнала. Сравнивая помехоустойчивость реальной системы, т.е. *реальную помехоустойчивость* с потенциальной, можно выявить принципиальную возможность и целесообразность дальнейшего повышения помехоустойчивости системы.

*Скрытность* системы характеризуется трудностью обнаружения её работы, измерения основных характеристик излучаемого сигнала и создания эффективных помех. Чем выше скрытность системы, тем

труднее создать для неё помеху и, следовательно, тем выше помехозащищённость системы.

8. Электромагнитная совместимость (ЭМС) – способность систем одновременно работать с требуемыми значениями показателей качества в условиях непреднамеренных помех от различных радиосредств и не создавать помехи недопустимого уровня другим системам.

9. Надёжность – это свойство системы сохранять во времени в установленных пределах значения параметров, характеризующих её способность выполнения требуемых функций в заданных режимах и условиях применения, хранения и транспортировки.

Основными техническими характеристиками РЛС являются:

1. Вид и параметры излучаемого сигнала (непрерывный или импульсный);
2. Вид модуляции или манипуляции (частотная, фазовая);
3. Несущая частота (длина волны) и её стабильность;
4. Излучаемая мощность;
5. Диаграмма направленности (ДН) антенны (форма и ширина главного максимума, коэффициент усиления, уровень боковых лепестков);
6. Метод обзора рабочей зоны;
7. Чувствительность и полоса пропускания приёмного устройства;
8. Метод обработки сигналов в радиоприёмнике;
9. Число и типы выходных устройств;
10. Используемая элементная база;
11. Весогабаритные характеристики;
12. Мощность, потребляемая от источников питания и др.

## **2.10. ОСНОВНЫЕ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РНС**

Основными тактическими характеристиками РНС являются:

1. Эффективность – степень приспособленности РНС к выполнению заданных функций в конкретных условиях эксплуатации.
2. Надёжность (безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость).
3. Дальность действия – максимальное расстояние в пределах рабочей зоны.
4. Рабочие зоны – объём пространства, в пределах которого обеспечивается работа РНС с погрешностями, не превышающими допустимого значения с заданной вероятностью.
5. Разрешающая способность (по дальности, по углу).

6. Пропускная способность (в РНС, имеющих односторонний радиоканал ПС неограничена в отличие от запросно-ответных РНС).

7. Помехозащищённость (помехоустойчивость и скрытность).

8. Тактическая гибкость – возможность использования РНС для выполнения боевой задачи в условиях изменения внешней или боевой обстановки и противодействия противника.

9. Мобильность – возможность быстрой смены географического района действия РНС.

10. Оперативность – способность в кратчайшие сроки получить навигационную информацию, обработать её и использовать по назначению.

11. Точность измерения радионавигационных параметров – характеризуется погрешностями измерения навигационных параметров (несовершенство методов измерений и аппаратуры, воздействие внешней среды, слабая подготовка операторов и др.).

12. Электромагнитная совместимость.

Основными техническими характеристиками РНС являются:

1. Мощность передатчика.

2. Чувствительность приёмника.

3. Вид и параметры модуляции.

4. Значение и стабильность несущей частоты.

5. Характеристики приёмных и передающих антенн (размеры, ширина ДНА, уровень боковых лепестков).

6. Габариты, масса, прочность.

7. Потребляемая мощность.

8. Удобство эксплуатации, экономические затраты на разработку.

Рассмотренные выше тактические и технические характеристики не являются изолированными друг от друга, а тесно связаны между собой.

Отклонение технических характеристик радиотехнических систем от заданного значения в отдельных случаях может вызвать выход одной или нескольких тактических характеристик за пределы установленных допусков, что снижает безопасность полетов ЛА. Поэтому поддержание технических характеристик РТС в пределах установленных допусков является одной из важнейших задач технического обслуживания.

## **2.11. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДАХ ЗАЩИТЫ ОТ ПОМЕХ**

В любой радиотехнической системе может существенно сказываться влияние различного рода помех, способы защиты от которых основаны на использовании различий сигналов и помех. Эти различия

позволяют осуществить первичную селекцию сигналов: частотную, временную, пространственную и поляризационную. При наложении спектров сигнала и помехи подавление помехи возможно в устройствах обработки, учитывающих отличия в тонкой структуре сигнала. Возможные различия между сигналом и помехой, которые используются для подавления действия помехи, сводятся к следующим.

В случае различия спектров сигнала и помехи для борьбы с помехами применяют фильтрующие схемы. Возможны следующие ситуации:

- спектры помехи и сигнала не перекрываются,
- спектр помехи сосредоточен на участке спектра сигнала,
- спектры помехи и сигнала перекрываются, но имеются различия в их тонкой структуре.

При действии активной помехи эффективна перестройка РЛС по частоте со скоростью, не позволяющей противнику создать опасную для РЛС помеху. В этом случае помеха оказывается исключённой из полосы пропускания перестраиваемого приёмника. В случае сосредоточенной по спектру активной помехи применяются узкополосные фильтры подавления (режекции) помехи, устанавливаемые в тракте промежуточной частоты или после детектора. На рисунке 2.11 показана возможная амплитудно-частотная характеристика такого подавителя.

При перекрытии спектров помехи и сигнала, когда перестройка по частоте или режекция неэффективна, используют гребёчатые или согласованные фильтры. Различия в структуре спектров сигнала и помехи используются также в устройствах селекции движущихся целей (СДЦ) на фоне пассивных помех. Принципы СДЦ будут рассмотрены ниже.

Различия во временной структуре сигналов и помех используют для борьбы с импульсными помехами, имеющими отличающиеся от сигнала параметры: длительность, период повторения, момент вре-

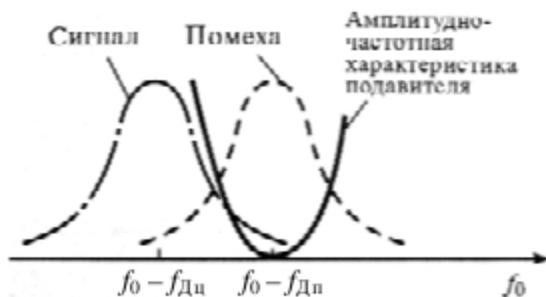


Рис. 2.11. Амплитудно-частотная характеристика подавителя

мени прихода. Применение кодирования сигнала по числу импульсов и интервалу между ними, селекция по длительности при автосопровождении цели – вот некоторые из существующих методов борьбы с указанными видами помех.

Различия в пространственном положении источников сигнала и помехи позволяют существенно ослабить действие помехи за счёт повышения разрешающей способности РЛС и РНС по угловым координатам, подавления боковых лепестков ДН, компенсации помех, попадающих по боковым лепесткам ДН.

Различия в поляризационной структуре сигналов и помех используются в настоящее время для подавления мешающих отражений от гидрометеоров за счёт применения поляризованных антенн.

Более полная классификация радиоэлектронных помех и методы защиты от них рассмотрены в § 2.33.

## 2.12. СЕЛЕКЦИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ЦЕЛЕЙ

В РТС извлечения информации важное значение имеют некоторые специфические виды помех, с которыми гораздо реже приходится считаться, например в радиосвязи. Такими помехами являются, в частности, *пассивные помехи*, представляющие собой отражения от подстилающей поверхности, гидрометеоров (облака, дождь, туман и т.д.) и сосредоточенных местных предметов, как правило, искусственного происхождения (инженерные сооружения, здания, трубы заводов и т.д.).

Пассивные помехи в общем случае нестационарны во времени и неоднородны в пространстве, их мощность может намного превышать мощность полезного сигнала.

Обнаружение движущихся целей на фоне пассивных помех является одной из важнейших проблем, с которыми приходится сталкиваться при разработке и эксплуатации РЛС и РНС различного назначения.

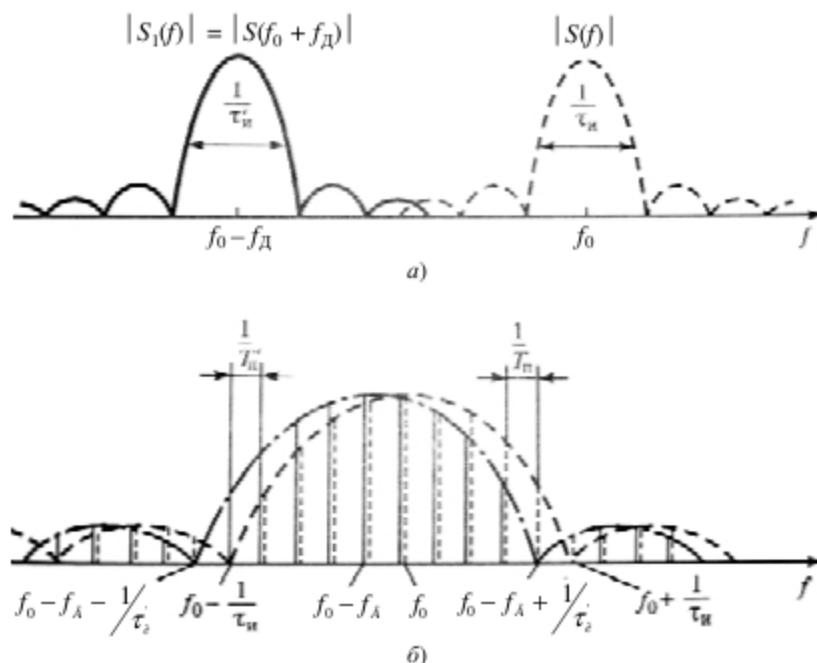
Электромагнитные колебания, отражённые от земной поверхности, гидрометеоров или специально созданных металлизированных лент, угольковых и других сосредоточенных отражателей, создают помехи РЛС, затрудняющие обнаружение целей и определение их координат. Различие в скоростях перемещения мешающих отражателей и реальных целей приводит к различным сдвигам фаз между принимаемым и излучённым сигналами. На этом различии основана селекция движущихся целей.

В когерентно-импульсных системах СДЦ доплеровские смещения частоты используются в качестве признака, позволяющего выделить сигналы движущихся целей на фоне отражений от неподвижных или малоподвижных объектов.

Колебания, отражённые неподвижными объектами, отличаются от излучаемых РЛС колебаний как амплитудой, так и фазой. При постоянной частоте колебаний  $f_0$  и дальности  $R$  до цели эта фаза постоянна и равна  $\varphi = 2\pi f_0 2R/c$ . При движении цели с радиальной скоростью  $V_R$  образуется доплеровский сдвиг частоты  $f_D = f_0 \cdot 2V_R/c$  и фаза  $\varphi$  изменяется во времени.

Спектр импульсного сигнала, отражённого неподвижным объектом, совпадает со спектром зондирующего импульса. Спектр импульсного сигнала, отражённого от движущегося объекта, сжимается при удалении объекта или растягивается при его приближении, так как все частоты спектра импульса изменяются в  $(1 + 2V_R/c)$  раз. Это означает, что отражённые от движущейся цели импульсы имеют несущую частоту  $f_{0D} = f_0(1 + 2V_R/c)$ , частоту повторения  $F_{nD} = F_n(1 + 2V_R/c)$  и длительность  $\tau_{nD} = \tau_n / (1 + 2V_R/c)$ .

На рисунке 2.12 представлен пример трансформации спектров сигналов, отражённых от движущейся цели для одиночного радиоимпульса (а) и для периодической последовательности радиоимпульсов (б).



**Рис. 2.12. Трансформация спектров сигналов:**

а – отражённых от движущейся цели для одиночного радиоимпульса;

б – периодической последовательности радиоимпульсов

Для выделения сигналов движущейся цели можно использовать изменение любого из этих параметров. Однако практически реализуемо только смещение центральной частоты, а точнее, изменение фазы высокочастотного заполнения импульсов за период повторения  $T_n$ , так как из-за малости абсолютного изменения частоты повторения  $F_n$  или длительности импульсов  $\tau_n$  выявить их трудно.

Различают системы СДЦ с внутренней и внешней когерентностью.

Системы СДЦ с *внутренней когерентностью* различают по способу формирования когерентных опорных колебаний во время приёма отражённых радиосигналов.

В РЛС, имеющих передающее устройство с независимым возбуждением, высокочастотные колебания задающего генератора, работающего непрерывно, используются в качестве опорных непосредственно или после умножения до частоты, на которой происходит сравнение с частотой принимаемых сигналов (рис. 2.13).

При применении в передающем устройстве генератора высокой частоты с самовозбуждением (например, магнетрона) в качестве источника когерентных опорных колебаний служит специальный генератор, фазуемый колебаниями генератора передатчика в течение дли-



Рис. 2.13. Система СДЦ с независимым возбуждением





Рис. 2.15. Череспериодный компенсатор

При вычитании сигналы неподвижных объектов, амплитуда которых за период повторения не меняется, компенсируются, а сигналы движущихся, амплитуда которых изменяется с доплеровской частотой  $f_D$ , дают на выходе компенсирующего устройства разность, значение которой определяется набегом фазы за период повторения:

$$\Delta\phi = 2\pi f_D T_n.$$

Нетрудно показать, что такой череспериодный компенсатор представляет собой гребенчатый фильтр с амплитудно-частотной характеристикой

$$|K_1(f)| = 2 |\sin \pi f T_n|. \quad (2.22)$$

Отсюда следует, что АЧХ  $|K_1(f)|$  обращается в нуль на частотах кратных  $F_n$  (рис. 2.16). Изменение положения нулей может быть получено путём включения фазовращателя после линии задержки. Таким образом, при периодическом сигнале мешающие отражения от неподвижных объектов полностью подавляются, поскольку их спектральные составляющие имеют частоты как раз  $nF_n$ . Следовательно, если сигнал движущейся цели имеет доплеровское смещение частоты  $f_D = 2V_R/\lambda_n = nF_n$ , то он подавляется фильтром, т.е. скорости цели

$$V_{R\text{сн}} = \lambda_n n F_n / 2 \quad (2.23)$$

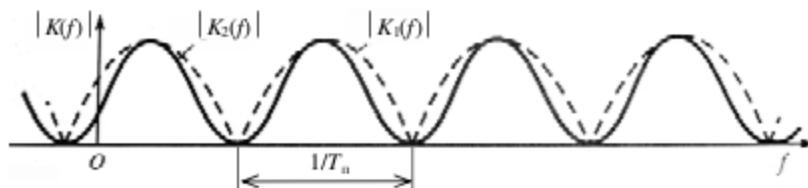


Рис. 2.16. АЧХ череспериодного компенсатора

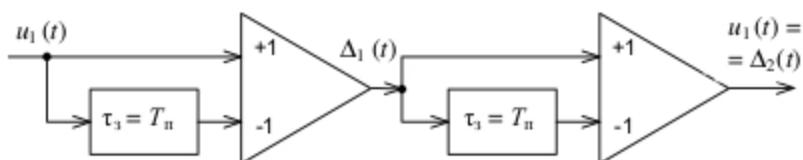


Рис. 2.17. Последовательное включение двух ЧПК

будут «слепыми». Наоборот, при  $f_d = 0,5(2n+1)F_n$  условия наблюдения движущейся цели наиболее благоприятны, т. е. радиальные скорости цели

$$V_{\text{конт}} = \frac{2n+1}{4} \lambda_n F_n \quad (2.24)$$

являются оптимальными.

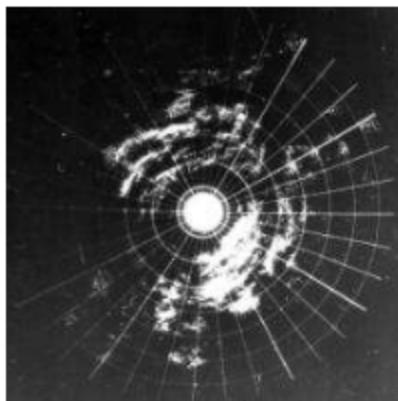
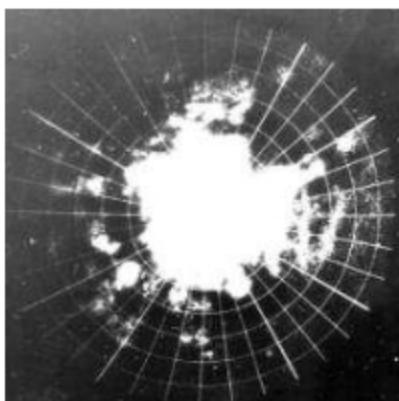
В реальных РЛС отдельные спектральные линии расплываются и полного подавления отражений от неподвижных объектов ЧПК не обеспечивает. Для лучшего согласования ширины провалов АЧХ фильтра подавления со спектром помехи используют схему двукратного вычитания. При включении последовательно двух схем ЧПК (рис. 2.17) результирующая АЧХ

$$|K_2(f)| = |K_1(f)|^2 = 4 |\sin^2 \pi f T_n| = 2(1 - \cos \pi f T_n). \quad (2.25)$$

Таким образом, провалы АЧХ (рис. 2.16) вблизи частот  $nF_n$  расширяются, что обеспечивает лучшее подавление помехи с широкими гребнями спектра.

На фотографии (слева) представлен вид экрана индикатора кругового обзора обзорной РЛС типа «Онега». В ближней зоне (несколько десятков километров) отражения от местных предметов дают интенсивные «засветки» и выделить отметку цели (самолёта) практически невозможно. На правой фотографии представлен вид экрана индикатора в случае прохождения отражённых сигналов через аппаратуру СДЦ, реализующую неадаптивные алгоритмы череспериодной компенсации. Отражения от местных предметов существенно подавлены, но видны не скомпенсированные отражения от движущихся гидрометеоров. Улучшить изображение можно только путём применения адаптивных алгоритмов обработки и цифровых карт зон действия и параметров мешающих отражений.

К точности и стабильности характеристик элементов системы СДЦ предъявляют весьма жёсткие требования. Например, высокая точность сохранения равенства  $\tau_1 = T_n$  для линии задержки ЧПК, а также высокая степень идентичности амплитуды и формы сигналов в



каналах ЧПК. Для получения достаточно большого времени задержки  $\tau_z = T_n$  и сохранения формы импульса при его задержке в аналоговых компенсаторах используют ультразвуковые линии задержки с полосой  $\Delta f_{\text{пл}} > 1/\tau_n$ , имеющие большое затухание (более 80 дБ), для компенсации которого в канал задержки последовательно включают усилитель. Для идентичности каналов такой же усилитель вводят и в другой «не задержанный» канал. Для выравнивания коэффициентов усиления применяют и аттенуатор с затуханием, равным затуханию в линии задержки. В результате аналоговые фильтры получаются дорогими и недостаточно надёжными. Поэтому в настоящее время предпочтение отдаётся цифровым фильтрам подавления.

В цифровом виде просто осуществить задержку на несколько периодов и сравнительно несложно изменять весовые коэффициенты, что позволяет не только оптимизировать АЧХ фильтра подавления, но и управлять ею в соответствии с изменением помеховой обстановки, т.е. создать адаптивную цифровую систему СДЦ.

Качество функционирования СДЦ принято оценивать по значению *коэффициента улучшения* отношения сигнал/помеха:

$$k_{\text{сн}} = \frac{P_{\text{свых}} / P_{\text{пвых}}}{P_{\text{свх}} / P_{\text{пвх}}}, \quad (2.26)$$

где  $P_{\text{свых}}$ ,  $P_{\text{пвых}}$ ,  $P_{\text{свх}}$ ,  $P_{\text{пвх}}$  – мощности сигнала от цели и пассивных помех соответственно на выходе и входе тракта СДЦ.

Значение  $k_{\text{сн}}$  зависит от изменений спектра сигналов движущихся целей и пассивных помех, вызванных перемещением пассивных отражателей относительно друг друга и РЛС, вращением ДНА при обзоре, нестабильностью частоты передатчика и гетеродинов приёмника РЛС и других её параметров.

Развитие цифровых методов позволило повысить эффективность устройств СДЦ за счёт создания радиолокационных карт помех, применения вобуляции частоты повторения, использования быстрых дискретных преобразований, в частности быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Продолжаются интенсивные теоретические и экспериментальные исследования адаптивных цифровых устройств (АЦУ) СДЦ, способных обнаруживать цели на фоне пассивных помех с изменяющимися в широких пределах во времени и в пространстве характеристиками. Не менее интенсивно осуществляются исследования и в области создания адаптивных антенных решёток (ААР), пригодных для использования в когерентно-импульсных РЛС.

### **2.13. ОБОБЩЁННЫЕ СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Структура радиотехнических систем извлечения информации существенно зависит от их назначения, места установки, источника сигнала, методов измерения координат и т.д. Однако при всём многообразии РТС можно выделить элементы, которые в той или иной степени присущи большинству современных, а также перспективных РЛС и РНС.

На рисунке 2.18 приведена обобщённая структурная схема РЛС, содержащая системы (подсистемы), предназначенные для непосредственного получения радиолокационной информации (РЛИ), и дополнительные средства, которые могут включаться или не включаться (кроме системы питания) в состав РЛС в зависимости от её назначения, места установки и т.д.

Основной функцией радионавигационных средств является получение (извлечение) количественных данных о координатах подвижных объектов, параметрах их движения и пространственно-временной ориентации относительно заданных траекторий.

Обобщённые структурные схемы РНС, поясняющие принцип их работы в соответствии с положениями теории информации независимо от конкретного назначения и сложности систем, приведены на рис. 2.19.

Под передающим устройством (ПРД) на рис. 2.19, *а, б* подразумевается вся аппаратура формирования структуры радиосигнала (включая модуляцию и кодирование с целью повышения помехозащищённости РНС), а под приёмным устройством (ПРМ) – аппаратура, обеспечивающая выделение информационных сигналов и преобразование (демодуляцию и декодирование) их к виду, пригодному для подачи в измерительное устройство. Под измерительным устройством РНС понимают аппаратуру, которая на основе сопоставления параметров сигналов, поступающих с приёмника, с заданным (опорным) параметром колебаний опорного генератора формирует навигационную информацию, удобную для использования потребителем. Опорный параметр задаёт начало отсчёта измеряемых данных.

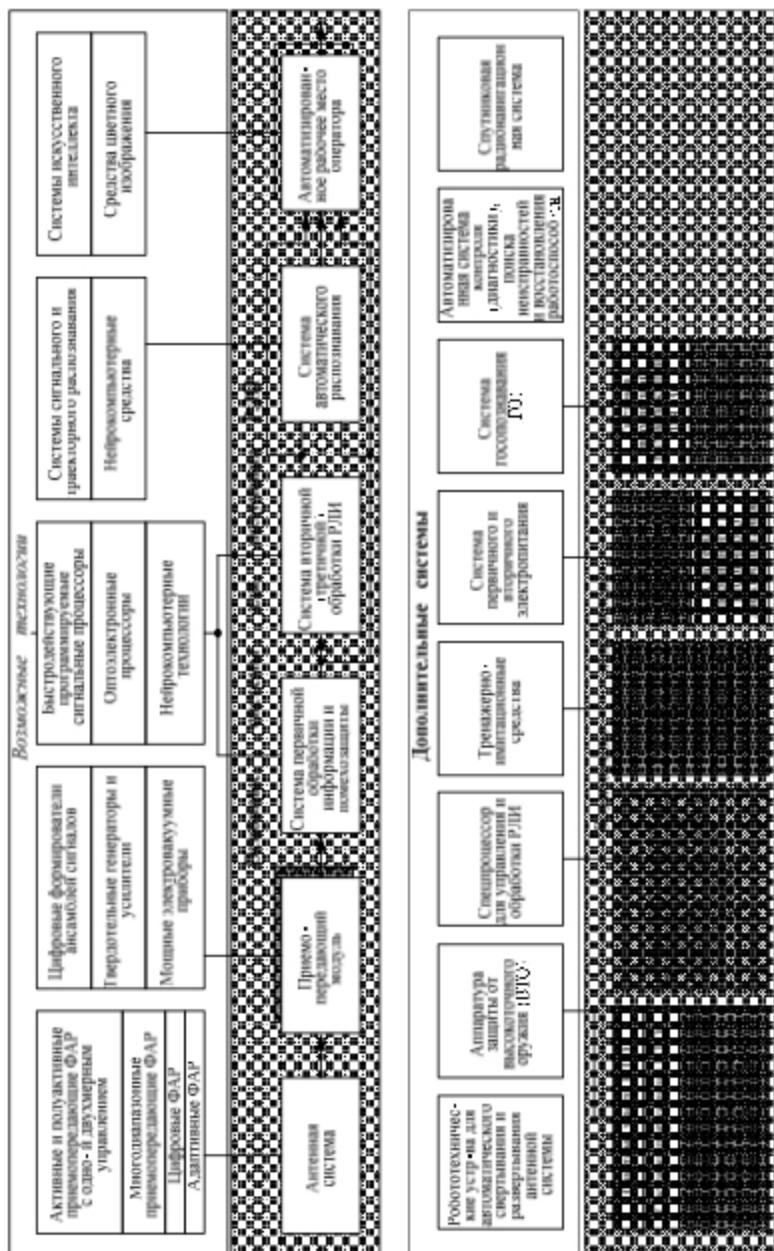


Рис. 2.18. Обобщенная структурная схема РЛС

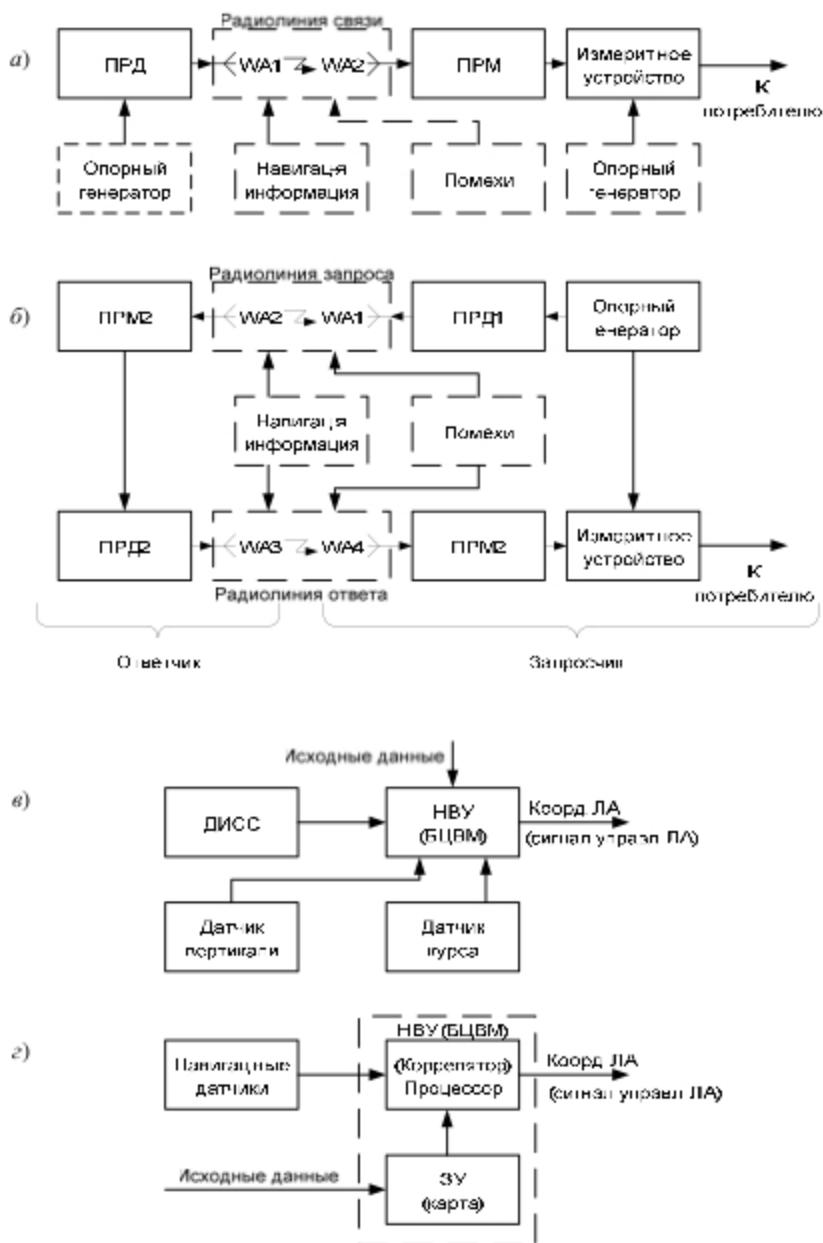


Рис. 2.19. Обобщённая структурная схема РНС

На рисунке 2.19, *а* изображена беззапросная РНС, передающая сигналы только в одном направлении («ЛА–Земля» или «Земля–ЛА»). При этом опорный сигнал может быть сформирован как на приёмной, так и на передающей стороне.

Структурная схема РНС, показанная на рис. 2.19, *б*, содержит ретрансляционное устройство (ответчик) (ПРМ2, ПРД2, WA2 и WA3) и позволяет передавать сигналы в двух направлениях («ЛА–Земля–ЛА» или «Земля–ЛА–Земля»).

Для автономных РНС, использующих свойство отражения радиосигналов, в этой схеме вместо приёмопередатчика ответчика следует рассматривать отражающий объект. При этом схема РНС может содержать несколько передающих, приёмных и антенных устройств, т.е. являться многоканальной.

Автономными РНС являются доплеровские навигационные системы и некоторые типы корреляционно-экстремальных систем, содержащие в качестве основных датчиков навигационной информации радиотехнические измерители, например бортовые радиолокаторы, радиовысотомеры.

Комплекс взаимосвязанных технических средств навигации, включающий ДИСС, датчики курса ( $\psi$ ) и вертикали (углы  $\gamma$  и  $\vartheta$ ), навигационное вычислительное устройство (НВУ) и обеспечивающий определение МПЛА методом счисления пути, называется доплеровской навигационной системой (ДНС) (рис. 2.19, *в*). В качестве НВУ на борту ЛА обычно используется аналоговая или цифровая ЭВМ (БЦВМ).

Тип навигационного вычислителя определяет, какие алгоритмы (точные или упрощённые) следует использовать для расчёта. Точные алгоритмы имеет смысл применять только тогда, когда инструментальная погрешность вычислителя меньше методической погрешности упрощения. Поэтому только в ДНС с цифровыми вычислителями (бортовыми ЦВМ) применяют точные алгоритмы, учитывающие влияние крена и тангажа. В доплеровской навигационной системе ДИСС вырабатывает сигналы, содержащие информацию о путевой скорости и угле сноса. Применение бортовых ЦВМ (БЦВМ) позволяет осуществлять комплексную обработку информации от нескольких датчиков, включая нерадиотехнические, которая учитывает статистические характеристики полезных сигналов и помех.

Кроме основной задачи ДНС на основе исходных данных решает следующие задачи:

- определяет курс следования на заданный пункт маршрута;
- путь, пройденный по ортодромии, боковые отклонения от неё;
- рассчитывает поправку курса, оставшееся расстояние и время полёта до выбранного пункта маршрута, а также при необходимости

управляющий сигнал, подаваемый в систему автоматического управления (САУ) ЛА для обеспечения следования по линии заданного пути.

Автоматическая навигация по геофизическим полям с определением МПЛА основана на сопоставлении информации, получаемой с помощью бортовых датчиков наблюдения поля (датчика поля), с информацией о поле (картой поля), хранящейся в бортовом запоминающем устройстве (ЗУ). Сопоставление обычно осуществляется в процессоре НВУ (рис. 2.19, з) путём вычисления некоторого функционала типа корреляционной функции и поиском или беспойсковым нахождением его экстремума. Поэтому системы автоматической навигации по физическим полям получили название корреляционно-экстремальных навигационных систем (КЭНС).

Для функционирования КЭНС с памятью требуется информация о физическом поле (радиолокационном поле, поле высот рельефа и т.п.). Эти системы объединяются в большую группу систем навигации и наведения по рельефу и картам местности. Основным достоинством их является возможность получения высокой точности в определении координат МПЛА, не зависящей (после окончания переходного процесса) от продолжительности полёта в пределах закартографированной области и скорости полета ЛА. Основная трудность, возникающая при реализации этих систем, заключается в необходимости их обеспечения исходной (априорной) информацией, т.е. создании рабочих карт поля.

В связи с применением в КЭНС в качестве датчика радиолокационного поля РЛС обзора земной поверхности с синтезированием апертуры антенны (РСА) и цифровой обработкой сигналов на борту ЛА существенно повышаются точность определения его местоположения и качество управления полетом. Это связано с тем, что РСА имеют высокую разрешающую способность по дальности и азимуту и позволили приблизить информационные возможности радиолокатора к оптическим средствам. Причём РСА позволяют получать текущее радиолокационное изображение одновременно с обоих бортов ЛА, которое затем сравнивается с соответствующими картами в НВУ, что также способствует улучшению точности определения его местоположения.

Основной трудностью, возникающей при разработке и использовании РНС, в отличие от радиосвязных систем, является не столько увеличение количества передаваемой по радиоканалу информации, сколько повышение помехоустойчивости и точности переработки навигационной информации.

Рассмотрим основные задачи, решаемые каждой системой, и возможные технологии, которые используются или предполагают использовать в современных и перспективных РЛС и РНС.

## 2.14. ОСНОВНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ И РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

*Антенная система* служит для излучения и приёма радиоволн. В зависимости от назначения РТС, места установки и используемого диапазона длин волн применяют следующие типы антенн:

- проволочные: спиральные и вибраторные (поперечного или осевого излучения);
- акустического типа: волноводные и рупорные;
- оптического типа: зеркальные (рефлекторные) и линзовые;
- поверхностных волн;
- с обработкой сигнала;
- с частотным качанием (сканированием) луча;
- фазированные антенные решётки (ФАР).

В современных РТС всё чаще используют активные ФАР с одно- и двумерным управлением, многодиапазонные приёмопередающие ФАР, цифровые ФАР, адаптивные ФАР и др.

*Приёмопередающий модуль* размещается как можно ближе к антенной системе и включает радиопередающие и радиоприёмные устройства.

*Радиопередающее устройство (радиопередатчик)* генерирует импульсы или непрерывные высокочастотные (сверхвысокочастотные) колебания с заданными параметрами амплитудной и угловой (частотной или фазовой) модуляции.

Основными задачами радиопередающего устройства являются генерирование колебаний, управление параметрами колебаний (модуляция) и усиление мощности. Соответственно, функционально необходимыми узлами являются: автогенератор (возбудитель), модулятор и усилитель мощности. В состав радиопередающего устройства входят также источники вторичного электропитания, умножители (делители) частоты, системы автоподстройки частоты и параметров модуляции сигналов и др. В зависимости от тактико-технических требований к РЛС и РНС радиопередающие устройства делят на однокаскадные и многокаскадные. В однокаскадных передатчиках генерирование колебаний обеспечивается автогенератором необходимой мощности, в многокаскадных – колебания высокостабильного маломощного автогенератора усиливаются до необходимого уровня мощности. По сравнению с однокаскадными многокаскадные радиопередающие устройства обеспечивают более высокие мощность и стабильность параметров зондирующих сигналов, возможность генерирования сложных сигналов.

Для генерирования и усиления колебаний используются электровакуумные и твердотельные электронные приборы. К электровакуумным приборам относятся электронные лампы (триоды и тетроды), магнетроны, клистроны, лампы бегущей волны (для усиления колебаний), лампы обратной волны, гибридные (твистронные) и другие приборы. К твердотельным относятся: транзисторные (на биполярных транзисторах, на полевых транзисторах), диодные (лавинно-пролётные диоды, диоды Ганна, варакторы) и другие полупроводниковые приборы. Всё более широкое применение в РТС находят цифровые формователи сигналов (ансамблей сигналов).

*Радиоприёмные устройства* (радиоприёмники) совместно с системой первичной обработки информации и помехозащиты обеспечивают усиление, преобразование и выделение (оптимальную обработку) принятых антенной сигналов на фоне внутренних шумов и внешних помех.

*Первичная обработка* радиолокационной информации включает операции обнаружения и измерения (оценки) параметров сигналов, полученных за период (цикл) обзора РЛС или РНС. Совокупность оценок параметров сигналов и их показателей качества образует радиолокационную отметку от цели.

В зависимости от способа выделения принимаемых сигналов на фоне помех используют фильтровые, корреляционные, корреляционно-фильтровые, взаимокорреляционные (в многопозиционных РТС), автокорреляционные (в пассивных) радиоприёмники.

*Система вторичной (траекторной) обработки радиолокационной информации.* Вторичная обработка проводится по совокупности радиолокационных (радионавигационных) отметок, полученных за несколько циклов обзора от одной совмещённой РЛС (РНС) или нескольких приёмных позиций многопозиционной РЛС (РНС), и обеспечивает формирование траекторной информации.

*Третичная обработка* состоит в объединении и отождествлении информации, полученной отдельными РЛС или РНС, входящими в радиолокационную или радионавигационную систему, или информации, полученной отдельными системами. Следует отметить, что распределение операций первичной, вторичной и третичной обработки между подсистемами и средствами РТС, а также области применения цифровых методов и устройств не являются окончательно установленными. Вторичная и третичная обработки уже осуществляются с помощью электронных вычислительных машин. Первичная обработка проводится как цифровыми, так и аналоговыми средствами. В качестве аналоговых устройств применяют приборы на поверхностных акустических волнах, приборы с переносом заряда, оптоэлектронные процессоры и др. При цифровой обработке используют быстродействующие

программируемые сигнальные процессоры, нейрокомпьютерные технологии и др.

*Система автоматического распознавания (классификации, различения)* решает задачи определения, к каким классам и типам относятся соответствующие наблюдаемые объекты. Для распознавания различных целей (аэродинамических, наземных, надводных) можно использовать, в частности, *траекторные* признаки, т.е. параметры траекторий целей, определяемые их тактико-техническими характеристиками, учитывающими соответствующие закономерности движения целей. Наряду с траекторными используют *сигнальные* признаки, учитывающие особенности сигналов, отражённых от целей различных классов. В общем случае для решения задачи распознавания требуется высокая производительность систем вычислительной техники ( $10^8 \dots 10^{10}$  операций в секунду и более). Среди многочисленных предложенных алгоритмов распознавания большое внимание последнее время уделяется нейрокомпьютерным алгоритмам.

*Автоматизированное рабочее место (АРМ)* оператора является выходным устройством РТС. В современных и перспективных АРМ используются системы искусственного интеллекта, системы цветного отображения радиолокационной информации и др.

## 2.15. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

*Робототехнические устройства для автоматического свёртывания и развёртывания антенных систем* используются, в частности, в РТС космического базирования и мобильных РТС военного назначения.

*Аппаратура защиты от высокоточного оружия (ВТО)* применяется в РТС военного назначения. Высокоточное оружие, обеспечивающее огневое поражение РЛС, можно разделить на две группы:

- противорадиолокационные ракеты (ПРР), самонаводящиеся на радиоизлучение активных РЛС; такие ракеты применяют пассивные радиолокационные головки самонаведения (ГСН);

- управляемые ракеты класса «воздух–поверхность» и управляемые (корректируемые) авиабомбы, использующие активные, полуактивные радиолокационные (лазерные) и пассивные инфракрасные, телевизионные и другие ГСН; такие средства могут наводиться и на неизлучающий радиолокатор, используя, в частности, соответствующий контраст между РТС и окружающей поверхностью.

Для защиты от противорадиолокационной ракеты (ПРР) используют дополнительные передатчики, обеспечивающие смещение точки прицеливания в сторону от РТС; системы, обеспечивающие своевременное выключение (или ограничение времени выхода в эфир) РТС при полете ПРР и при этом дополнительный уход противорадиолокацион-

ной ракеты, повышение скрытности излучения. Для защиты от управляемых ракет добиваются снижения заметности РТС в видимом, ИК и радиодиапазонах. Общими методами защиты от высокоточного оружия являются использование существующих или создание специальных сравнительно недорогих средств огневого поражения ВТО (например, зенитных ракетно-пушечных комплексов малой и сверхмалой дальности) и непосредственное повышение защищённости (живучести) позиций РТС за счёт применения специального инженерного оборудования позиций, разнеса на местности отдельных систем, бронирования её наиболее важных и уязвимых элементов и др.

*Спецпроцессор для управления и обработки радиолокационной (радионавигационной) информации* выполняется в виде распределённого комплекса вычислительных средств и предназначен для решения разнообразных задач.

*Тренажно-имитационные средства* используют различные программно-аппаратные средства для комплексного обучения и тренировок операторов РЛС и РНС как в составе боевого расчёта, так и в составе, например, войскового соединения или войсковой части.

*Система первичного и вторичного электропитания* является неотъемлемой частью любой РТС. К основным системам первичного питания относятся внешняя электрическая сеть или дизель-электростанция. Могут использоваться также и иные источники питания: химические, ядерные и др. В системах вторичного питания, кроме традиционных источников, использующих трансформаторы, применяются бестрансформаторные источники.

*Система опознавания государственной принадлежности* (система госопознавания) может быть запросной или беззапросной. Используется в радиолокаторах, работающих прежде всего по воздушным целям. Система госопознавания (иногда её называют системой вторичной радиолокации) – это самостоятельный активный радиолокатор с активным ответом (запросная система) или пассивный радиолокатор с активным ответом (беззапросная система). Для эффективной работы беззапросных систем требуются высокостабильные генераторы как в РЛС, так и на цели, или использование системы единого времени.

*Автоматизированная система контроля (диагностики) поиска неисправностей и восстановления работоспособности.* Современные РТС оснащаются встроенными автоматизированными (автоматическими) системами функционального контроля (диагностики), использующими методы сигнатурного анализа и допускового контроля для сквозных и локальных проверок всей аппаратуры. Современные системы обеспечивают в большинстве случаев поиск неисправного элемента с достоверностью не менее 0,99 и дают оператору информацию о расположении отказавших элементов и месте хранения соответ-

вующих запасных частей. Встроенные средства измерения основных параметров дают оператору информацию о состоянии РТС без прекращения её работы, а наличие автоматических систем регулировки и защиты приёмного тракта и передатчика обеспечивают стабильность рабочих характеристик РТС в течение срока службы без трудоёмких работ по её настройке. Использование автоматизированных систем диагностики, поиска неисправностей и восстановления работоспособности обеспечивает длительную непрерывную работу РЛС без выключения на обслуживание и с сохранением всех основных параметров на 20 суток и более, а время восстановления работоспособности – не более чем 0,3...0,5 ч.

*Спутниковая навигационная система* позволяет осуществлять быструю высокоточную топопривязку, что существенно повышает мобильность РТС.

## 2.16. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ И СКОРОСТИ

Как уже отмечалось ранее, в однородной среде радиоволны распространяются прямолинейно и с постоянной скоростью. Поэтому время распространения радиоволн между передатчиком и приёмником, расстояние между которыми  $R$ , равно

$$\tau = R / c. \quad (2.27)$$

В однопозиционной РЛС время распространения радиоволн от РЛС до отражающего объекта и обратно, т.е. время запаздывания сигнала

$$\tau = 2R / c. \quad (2.28)$$

При работе с ответчиком

$$\tau = 2R / c + \tau_{от}, \quad (2.29)$$

где  $\tau_{от}$  – время задержки сигнала в ответчике.

Как видно из (2.28) и (2.29), определение дальности можно свести к измерению времени запаздывания  $\tau$  принимаемого сигнала относительно излучённого и вычислению  $R$  в соответствии с какой-либо из приведённых формул (в зависимости от типа радиосистемы).

В зависимости от вида сигнала и его параметра, содержащего информацию о дальности, различают три основных метода радиодальнометрии: импульсный (иногда называют также амплитудным либо временным), фазовый и частотный. Эти методы используют как в радиолокации, так и в радионавигации. В радионавигации, кроме того, широко применяют методы разностно-дальномерных измерений, позволяющие определять разность расстояний от подвижного объекта до

радионавигационных точек (РНТ). Разность расстояний находят либо путём измерения временного интервала между сигналами, принимаемыми от двух РНТ, либо путём измерения разности фаз принимаемых когерентных колебаний. В соответствии с этим в радиодальномерных системах для местоопределения подвижного объекта используют импульсный разностно-дальномерный, фазовый разностно-дальномерный, а также комбинированный импульсно-фазовый методы измерений.

Измерение радиальной скорости движения объекта можно свести к измерению доплеровского смещения частоты принимаемого сигнала.

### 2.16.1. ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ

Импульсный метод радиодальнометрии основан на непосредственном измерении времени запаздывания принимаемого радиопульса относительно излученного. Работа импульсного дальномера, структурная схема которого изображена на рис. 2.20, а, поясняется эпиярами на рис. 2.20, б.

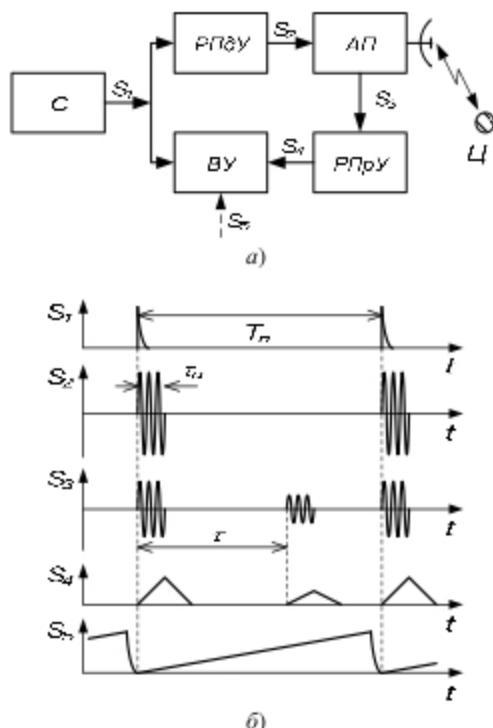


Рис. 2.20. Структурная схема (а) и эпияры работы (б) импульсного дальномера

Передатчик, запускаемый импульсами  $S_1$  синхронизатора С, генерирует радиоимпульсы  $S_2$  с длительностью  $\tau_n$  и периодом повторения  $T_n$ . Антенный переключатель АП подключает антенну к передатчику РПДУ на время генерации импульса и к приёмнику РПрУ на время до начала генерации следующего импульса. На вход приёмника поступают ослабленные зондирующие импульсы и отражённый от объекта сигнал, запаздывающий на время  $\tau$  относительно зондирующего импульса ( $S_3$ ). Если в качестве выходного устройства ВУ используется электронно-лучевая трубка, то к её вертикально отклоняющим пластинам подводится напряжение с выхода приёмника ( $S_4$ ), а к горизонтально отклоняющим пластинам – пилообразное напряжение развёртки ( $S_5$ ). Передатчик и схема формирования развёрток запускаются одновременно импульсами  $S_1$ , поэтому одновременно с излучением радиоимпульса начинается горизонтальное перемещение светящегося пятна по экрану трубки со скоростью развёртки  $V_R$ . Расстояние, на которое сместится пятно к моменту прихода отражённого импульса:

$$L = V_R \tau = V_R 2R / c = MR, \quad (2.30)$$

где  $M = 2V_R R / c$  – масштаб развёртки. Измерив это расстояние с помощью масштабных меток на развёртке, определяют дальность  $R$ .

На точность импульсных радиодальномеров значительное влияние оказывают аппаратные погрешности. Они вызваны несопадением начала развёртки с началом зондирующего импульса, т.е. погрешностью синхронизации; непостоянством скорости развёртки и её несоответствием шкале индикатора; неточностью визуальной индикации; запаздыванием сигнала в цепях дальномера. Перечисленные факторы приводят к возникновению систематических погрешностей измерения дальности, которые могут быть частично скомпенсированы при калибровке дальномера.

При импульсном методе дальнометрии могут возникать значительные ошибки, если не выполняется условие однозначного измерения дальности. Это условие требует, чтобы принимаемые сигналы поступали в приёмник до начала следующего зондирующего импульса, т.е. максимальное время запаздывания  $\tau_{\max}$  не должно превышать периода повторения импульсов  $T_n$ :

$$\tau_{\max} = 2R_{\max} / c < T_n, \quad (2.31)$$

где  $R_{\max}$  – максимальная дальность объекта. В противном случае при  $R > cT_n/2$  появляется дальномерная ошибка, кратная  $cT_n/2$ .

Условие (2.31) позволяет выбрать период повторения импульсов для однозначного измерения дальности.

Основными достоинствами импульсной дальнометрии являются: возможность развязки передающего и приёмного каналов с помощью антенного переключателя, позволяющей строить РЛС с одной антенной; простота разрешения объектов по дальности и удобство измерения дальности многих объектов. Недостатки: необходимость использования больших импульсных мощностей передатчиков; невозможность измерения малых дальностей из-за наличия «мёртвой» зоны, которая определяется длительностью излучаемых импульсов и временем протекания переходных процессов в антенном переключателе.

## 2.16.2. ЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ

При частотном методе дальнометрии излучается непрерывное частотно-модулированное колебание; время запаздывания определяется путём измерения частоты биений между излучаемым и принимаемыми сигналами. Однако непрерывное изменение частоты по линейному закону практически не осуществимо и приходится применять периодическую модуляцию частоты (симметричную линейную, несимметричную линейную, гармоническую). Пусть передатчик, состоящий из частотного модулятора ЧМ и генератора высокой частоты ГВЧ (рис. 2.21, а), генерирует колебания, частота которых меняется по пилообразному периодическому закону.

При симметричном пилообразном законе модуляции (рис. 2.21, б) частота излучаемых колебаний

$$f_n(t) = f_0 + 2F_d t / T_m, \quad 0 < t < T_m/2,$$

где  $f_0$  – начальное значение частоты;  $F_d$  – девиация частоты;  $T_m = 1 / F_m$  – период модуляции. Частота принимаемого сигнала  $f_c(t)$  изменяется по такому же закону (при неподвижном объекте), при этом

$$f_c(t) = f_0 + 2F_d(t - \tau) / T_m$$

из-за задержки сигнала на время  $\tau = 2R / c$ . На выходе смесителя образуются биения разностной частоты

$$f_{\text{б}} = f_n(t) - f_c(t) = 4F_d F_m R / c,$$

которые после усилителя низкой частоты УНЧ поступают на частотный анализатор ЧА. В результате

$$R = c f_{\text{б}} / 4F_d F_m. \quad (2.32)$$

Частотный анализатор может быть последовательным (одноканальным), либо параллельным (многоканальным). Последовательный анализатор – это перестраиваемый по частоте узкополосный фильтр.

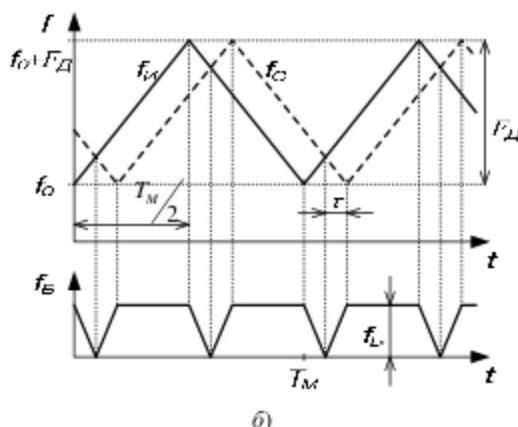
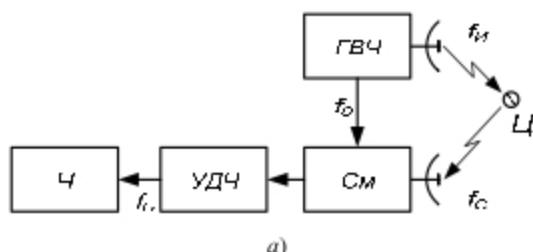


Рис. 2.21. Структурная схема передатчика ЧМ (а) и симметричной пилообразный закон модуляции (б)

При таком построении анализатора приходится тратить время на поиск сигнала по частоте, что приводит к энергетическим потерям. Этого недостатка нет в параллельном частотном анализаторе, состоящем из набора узкополосных фильтров, перекрывающих диапазон возможных частот биений. В этом случае можно одновременно измерять дальность до многих целей. Недостатком параллельного ЧА по сравнению с последовательным является увеличение объёма аппаратуры. Погрешность измерения дальности  $\Delta R = c / 4F_d$ . Для уменьшения  $\Delta R$  необходимо увеличивать девиацию частоты  $F_d$ , т.е. расширять спектр зондирующего сигнала.

Основные достоинства частотного метода измерения дальности: достаточно высокие точность и разрешающая способность, малая пиковая мощность зондирующего сигнала; возможность разрешения объектов по дальности. Недостатки: трудности обеспечения эффективной развязки передающего и приёмного каналов, высокие требования к линейности изменения частоты с целью исключения методических ошибок измерения дальности.

### 2.16.3. ФАЗОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ

Фазовый метод радиодальнометрии основан на измерении разности фаз излучаемых и принимаемых колебаний. Генератор масштабной частоты ГМЧ (рис. 2.22) модулирует по амплитуде колебания генератора высокой частоты ГВЧ, которые излучаются в пространство.

На фазометр Ф с ГМЧ поступают колебания

$$S_1 = A_1 \sin(\omega_m t + \varphi_0)$$

и сигнал с выхода приёмника, который без учёта шумов можно записать в виде

$$S_2 = A_2 \sin[\omega_m (t - \tau) + \varphi_0 + \varphi_{от} + \varphi_{д}],$$

где  $\omega_m$  – масштабная частота;  $\varphi_0$  – начальная фаза;  $\tau$  – время запаздывания сигнала;  $\varphi_{от}$  – фазовый сдвиг, возникающий при отражении радиоволн от объекта;  $\varphi_{д}$  – фазовый сдвиг сигнала в цепях дальномера. Разность фаз сигналов  $S_1$  и  $S_2$ :  $\varphi_p = \omega_m \tau - \varphi_{от} - \varphi_{д}$ . Поэтому время запаздывания  $\tau = (\varphi_p + \varphi_{от} + \dots + \varphi_{д}) / \omega_m$  и, следовательно, дальность до объекта согласно (2.28)

$$R = c (\varphi_p + \varphi_{от} + \varphi_{д}) / 2\omega_m. \quad (2.33)$$

Таким образом, если предварительно определить сдвиг фаз  $\varphi_{от}$  и  $\varphi_{д}$ , то измерив разность фаз  $\varphi_p$ , можно найти дальность. Выражение (2.33) справедливо и при работе с ответчиком. В этом случае под  $\varphi_{от}$  следует понимать фазовый сдвиг сигнала в цепях ответчика.

Однозначное измерение фаз двух колебаний возможно в пределах не более  $2\pi$ . Следовательно, для однозначного измерения дальности необходимо, чтобы

$$\varphi_{p \max} = \omega_m \tau_{\max} = \omega_m 2R_{\max} / c = 2\pi f_0 \cdot 2R_{\max} / c = 2\pi \cdot 2R_{\max} / \lambda < 2\pi, \quad (2.34)$$

т.е. частота  $f_m = \omega_m / 2\pi$  масштабных колебаний и их период  $T_m = 1 / f_m$  должны удовлетворять условию

$$f_m < c / 2R_{\max}, \quad T_m > 2R_{\max} / c. \quad (2.35)$$

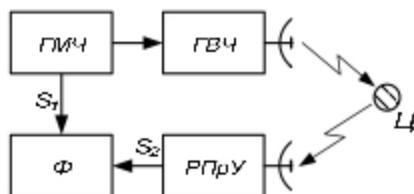


Рис. 2.22. Генератор масштабной частоты

Этому условию удовлетворяют сравнительно низкие частоты. Например, при  $R_{\max} = 150 \text{ км}$   $f_M < 1 \text{ кГц}$ .

При этом максимальное измеряемое расстояние составляет при условии  $\varphi_p = 2\pi$

$$R_{\max} = \frac{\lambda \varphi_p}{4\pi} = \frac{\lambda}{2}, \quad (2.36)$$

что, очевидно, не представляет практической значимости.

Чтобы обеспечить требуемую точность (ошибка в измерении дальности, как видно из (2.33), обратно пропорциональна  $\omega_m$ ) и в то же время однозначность измерения дальности, используют две масштабные частоты и более, т.е. применяют многоканальный метод измерения дальности. Вначале однозначно измеряют дальность на низкой масштабной частоте, т.е. по грубой масштабной шкале. Затем измерения производят на второй, более высокой масштабной частоте, т.е. по более точной шкале. При этом, чтобы сохранялась однозначность измерения дальности, период второй масштабной частоты  $T_{2m}$  должен превышать погрешность измерения временного запаздывания  $\Delta t_1$  на первой масштабной частоте (т.е. по грубой шкале).

Достоинства фазового метода измерения дальности: малая пиковая мощность генерируемых колебаний благодаря непрерывному излучению колебаний; возможность измерения малых дальностей; простота построения измерителя. Недостатки: отсутствие разрешения объектов по дальности; необходимость использования двух антенн для эффективной развязки приёмного и передающего каналов.

#### 2.16.4. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ

Измерение радиальной скорости движения объекта сводится к измерению доплеровского смещения частоты принимаемого сигнала. Пусть, например, приёмник неподвижный, а излучатель радиоволн движется и  $R(t)$  – расстояние между ними в момент времени  $t$ . Радиальная скорость  $V_R$  есть проекция вектора скорости движения излучателя на направление «приёмник – излучатель». Частота  $f$  принимаемого сигнала смещена относительно частоты  $f_0$  излучаемого на величину, равную частоте Доплера  $f_d = -f_0 V_R / c$ . Отсюда радиальная скорость  $V_R = -c f_d / f_0$ . Для её определения нужно измерить доплеровское смещение  $f_d$ , а для этого в точках излучения и приёма должны быть установлены высокостабильные эталоны частоты.

В однопозиционных РЛС необходимость в указанных эталонах отпадает, так как передатчик и приёмник расположены в одном месте,

причём в качестве опорного колебания, относительно частоты которого измеряется смещение частоты принимаемого сигнала, используется сам излучаемый сигнал. При этом

$$f_d = -f_0 V_R / c = -2V_R / \lambda. \quad (2.37)$$

При уменьшении дальности её производная  $V_R < 0$  и, следовательно,  $f_d > 0$ . При удалении от РЛС  $V_R > 0$ , поэтому  $f_d < 0$ . Радиальная скорость

$$V_R = \lambda f_d / 2 \quad (2.38)$$

определяется в результате измерения доплеровского смещения частоты (рис. 2.23). Генератор высокой частоты ГВЧ формирует непрерывное немодулированное колебание частоты  $f_0$ . На смеситель (См) приёмника поступают прямой сигнал и сигнал частоты  $f_0 \pm f_d$ , отражённый от цели (знак  $f_d$  определяется знаком  $V_R$ ). В смесителе образуется сигнал биений частоты  $f_d$ , который через усилитель доплеровской частоты УДЧ поступает на частотомер Ч, проградуированный в значениях радиальной скорости.

На основе схемы на рисунке 2.23 строят и ДИСС, определяющие путевую скорость  $V$  и угол сноса  $\alpha$  ЛА. Для одновременного определения  $V$  и  $\alpha$  антенная система ДИСС должна формировать как минимум две узкие ДН, обеспечивающие наклонное облучение земной поверхности. При этом необходимо получить достаточно большие проекции вектора скорости ЛА на направление облучения и в то же время сохранить достаточно сильное отражение в направлении на ДИСС. Отражённые сигналы, поступающие по двум лучам, разделяются, обрабатываются, измеряются их доплеровские смещения  $f_{d1}$  и  $f_{d2}$ , однозначно связанные с путевой скоростью  $V$  и углом сноса  $\alpha$ . Наибольшая точность определения путевой скорости и угла сноса обеспечивается в многолучевых ДИСС.

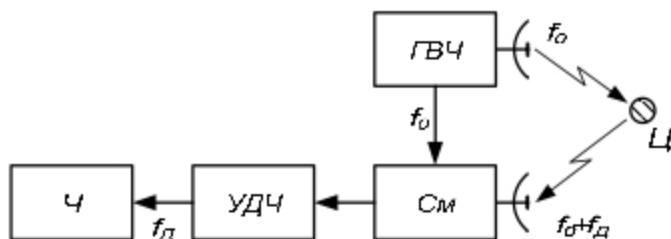


Рис. 2.23. Структурная схема доплеровского измерителя скорости и сноса (ДИСС)

## 2.17. СЛЕДЯЩИЕ ИЗМЕРИТЕЛИ ДАЛЬНОСТИ И СКОРОСТИ

### 2.17.1. СЛЕДЯЩИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ДАЛЬНОСТИ

Следящий измеритель дальности (СИД) предназначен для автоматического измерения времени запаздывания отражённых сигналов, пропорционального текущей дальности до цели. СИД позволяет также реализовать разрешение целей по дальности. Он включает в себя кольцо слежения, состоящее из временного дискриминатора (ВД), экстраполятора и синтезатора задержки, а также схему поиска и захвата (СПЗ) и другие элементы РЛС (рис. 2.24).

Работа СИД протекает в тесном взаимодействии с основными элементами приёмно-передающего тракта РЛС. Под воздействием запускающих импульсов (ЗИ), поступающих от синхронизатора РЛС, передатчик излучает зондирующие колебания. Эти колебания после отражения или переизлучения их целью становятся сигналом, который обычно через антенну поступает на вход приёмника РЛС. Отражённые импульсы (ОИ) очень слабы и искажены шумом. Их временное положение относительно запускающих импульсов, пропорциональное дальности цели, испытывает случайные колебания относительно истинного значения. Поэтому непосредственный отсчёт дальности по отражённым импульсам приводит к ошибкам.

Задачей СИД является формирование следящих импульсов (СИ), временное положение которых отображает лишь плавное закономерное изменение дальности и почти не изменяется под воздействием хаотических шумовых возмущений. Отсчёт дальности по положению следящих импульсов СИД обеспечивает высокую точность измерений.

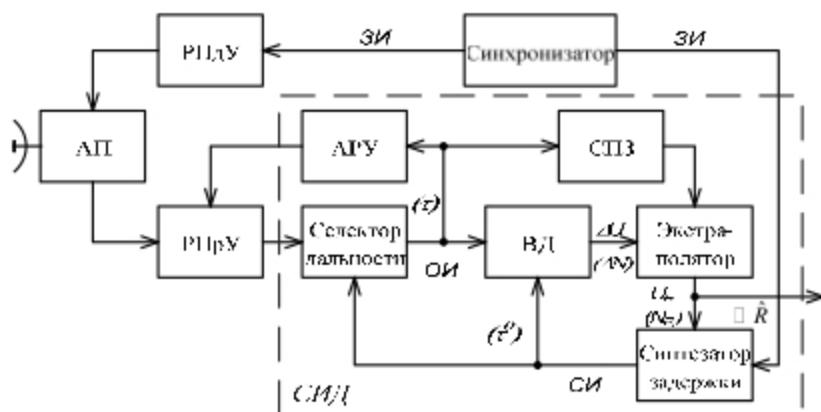


Рис. 2.24. Структурная схема следящего измерителя дальности

Отражённый импульс с выхода РПрУ через селектор дальности поступает на вход ВД, опорным сигналом которого является следящий импульс. ВД выдаёт на вход экстраполятора сигнал рассогласования в аналоговом ( $\Delta U$ ) или цифровом ( $\Delta N$ ) виде. Чтобы исключить зависимость сигнала рассогласования от интенсивности отражённого импульса, производится нормировка с помощью схемы автоматической регулировки усиления (АРУ) по сигналу отслеживаемой цели, для чего селектор дальности стробируется следящим импульсом, обычно несколько расширенным.

Под воздействием сигнала рассогласования экстраполятор вырабатывает напряжение или код, управляющий синтезатором задержки. В последнем запускающий импульс задерживается на величину  $\tau^0$ , пропорциональную управляющему воздействию экстраполятора, и становится следящим импульсом, который через ВД замыкает кольцо слежения. Благодаря действию обратной связи в этом кольце рассогласование между временем запаздывания  $\tau$  отражённого импульса и задержкой  $\tau^0$  следящего импульса в среднем сводится к нулю. В установленном режиме задержка следящего импульса  $\tau^0 = \hat{\tau}$  становится оценкой времени запаздывания (дальности). Оценка выдаётся в виде напряжения  $U_R$  или чисел  $N_R$  на выходе экстраполятора, которым пропорциональна задержка  $\tau^0$ .

Режиму слежения (измерения) предшествует режим поиска и захвата (обнаружения). В режиме поиска кольцо слежения разорвано, так как временное положение отражённого импульса неизвестно и рассогласование между отражённым и следящим импульсами настолько велико, что они не перекрываются. В этом случае специальное программное устройство схемы поиска и захвата воздействует на экстраполятор, который линейно изменяет  $U_R$  или  $N_R$  и тем самым медленно во времени смещает следящий импульс на выходе синтезатора задержки (перестройка по дальности). Вместе с ним перемещается расширенный импульс, стробирующий селектор дальности.

Когда в процессе медленной перестройки по дальности произойдёт совпадение отражённого и следящего импульсов, селектор дальности пропустит несколько отражённых импульсов на вход схемы поиска и захвата. Эта схема содержит накопитель сигналов (в простейшем случае – конденсатор) и реле. Так как селектор дальности открывается на короткие интервалы времени синхронно с поступлением импульсов цели, отражённые импульсы интегрируются. Когда накопленный сигнал превысит порог, срабатывает реле и поиск прекращается, так как программное устройство отключается от экстраполятора. При этом рассогласование между отражённым и следящим импульсами мало, в



В смесителе измерителя СМ образуется преобразованный сигнал, частота которого равна разности частот колебания УГ и входного сигнала  $f_p = f_{УГ} - f$ . Преобразованный сигнал отфильтровывается и усиливается полосовым усилителем ПУ, настроенным на номинальное значение разностной частоты  $f_0$ . На фазовый детектор ФД кроме преобразованного сигнала разностной частоты поступает также опорное напряжение частоты  $f_0$ . В установившемся режиме, в отсутствие рассогласования частот преобразованного и опорного сигналов ( $f_p = f_0$ ), фазы этих сигналов имеют сдвиг  $\pi/2$ . Этот постоянный фазовый сдвиг на структурной схеме учитывается с помощью фазовращателя. При этом условиями уравновешенного состояния СИС будут  $f_p = f_0$  и  $\varphi_p = \varphi_0$ , где  $\varphi_p$  и  $\varphi_0$  – начальные фазы колебаний преобразованного и опорного сигналов соответственно.

Напряжение на выходе ФД

$$U_{ФД} = k_{ФД} U_p U_0 \sin(\varphi_p - \varphi_0), \quad (2.39)$$

где  $U_p$ ,  $U_0$  – амплитуды соответственно преобразованного и опорного напряжений;  $k_{ФД}$  – коэффициент пропорциональности.

График функции (2.39), являющейся характеристикой дискриминатора, приведён на рис. 2.25, б. В состоянии равновесия напряжение на выходе ФД равно нулю.

В случае неравенства частот  $f_p$  и  $f_0$  возникает фазовый сдвиг между преобразованным сигналом и опорным напряжением. На выходе ФД появляется напряжение рассогласования, величина и знак которого определяются величиной и знаком рассогласования  $\Delta\varphi = \varphi_p - \varphi_0$ . Напряжение рассогласования интегрируется и усиливается в УУ. Под воздействием выходного сигнала УУ происходит перестройка частоты УГ таким образом, чтобы обеспечить восстановление баланса частот и фаз сигналов в СИС. Измеритель с ФАП, таким образом, следит за частотой и фазой входного сигнала измерителя. Выходное напряжение УУ используется в качестве приборного эквивалента скорости.

Режиму слежения предшествует режим поиска, в котором частота УГ перестраивается по линейному закону в пределах рабочего диапазона частот измерителя. Управление УГ в режиме поиска производится схемой поиска. При возникновении в процессе поиска преобразованного сигнала, частота которого попадает в полосу пропускания ПУ, схема захвата прерывает поиск, замыкает контур автосопровождения измерителя и переводит его в режим слежения. Схемы поиска и захвата на рис. 2.25, а не показаны.

Перестройка частоты УГ осуществляется изменением параметров его колебательной системы: индуктивности, ёмкости, сопротивления в RC-генераторах. Управление может быть электронным (варикап, реактивная лампа) или электромеханическим (электродвигатель, редуктор, управляемый элемент). Точность следящего измерителя с ФАП в существенной мере зависит от точности установки и стабильности частоты опорного сигнала  $f_0$ . Часто для этого используется кварцевая стабилизация.

## 2.18. ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ ДАЛЬНОСТИ В ИМПУЛЬСНЫХ РЛС И РНС

Цифровые измерители дальности в импульсных РЛС и РНС строятся на основе преобразования временного интервала, пропорционального дальности, в код, используемый в ЭВМ. Как правило, этот код двоичный. Структурная схема цифрового измерителя представлена на рис. 2.26.

Импульс синхронизатора запускает генератор строба ГСт, который на время, равное  $2R_{\max}/c$  отпирает каскад совпадения для прохождения счётных импульсов с генератора масштабных импульсов ГМИ, который также запускается импульсом синхронизатора. После окончания импульса строба счёт прекращается и счётчик возвращается в исходное состояние. Считывание текущей дальности происходит в момент поступления импульса цели на генератор импульсов считывания (ГИС). Этот генератор представляет собой комбинацию RS-триггера и

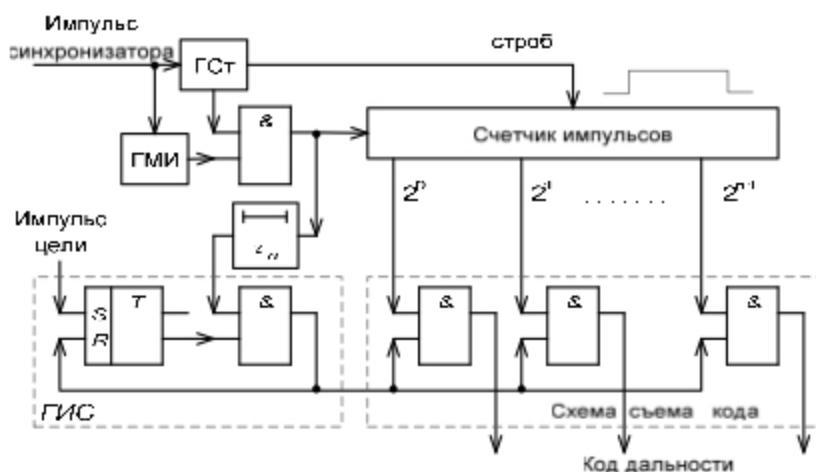


Рис. 2.26. Структурная схема цифрового измерителя

каскада совпадения. Импульсы цели проходят в схему съёма кода лишь по окончании переходных процессов в триггерах счётчика. Для этого импульс цели запускает RS-триггер, импульс которого совпадает со счётными лишь после задержки в линии задержки на время, равное длительности переходных процессов  $\tau_n$ . Импульс на выходе каскада совпадения ГИС переводит его триггер в исходное состояние и одновременно воздействует на каскады совпадения схемы съёма кода. Последняя выдаёт число, соответствующее дальности до цели. Это число в двоичном коде может поступить в блок памяти ЭВМ. При этом процесс счёта не прекращается и с приходом другого импульса цели выдаётся другое значение дальности.

Дискретность отсчёта дальности определяется выражением

$$\Delta R_d = c / 2F_m, \quad (2.40)$$

где  $F_m$  – частота повторения ГМИ.

Число разрядов счётчика  $n$  определяется исходя из максимальной дальности действия и допустимой погрешности, обусловленной дискретным измерением дальности:

$$2^n > R_{\max} / \Delta R_d. \quad (2.41)$$

Например,  $R_{\max} = 200$  км и  $\Delta R_d = 20$  м. Тогда  $2^n = 10^4$ , и значит  $n = 14$ .

## 2.19. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ

Измерение угловых координат основано на определении угла прихода радиоволны, излучённых или отражённых объектом. Для этого используют радиопеленгаторы. Важной характеристикой радиопеленгатора является его пеленгационная характеристика  $U(\alpha)$  – зависимость нормированного входного напряжения приёмника от направления прихода радиоволны. В зависимости от того, какой параметр радиосигнала оказывает основное влияние на формирование пеленгационной характеристики, методы углометрии (пеленгации) подразделяют на амплитудные, фазовые, частотные и комбинированные (амплитудно-фазовые). Основными из этих методов, нашедшими распространение на практике, являются амплитудные и фазовые методы пеленгации.

### 2.19.1. АМПЛИТУДНЫЕ МЕТОДЫ

Амплитудные методы пеленгации основаны на использовании направленных свойств антенн. Если используются направленные свойства только приёмной антенны, ДН которой равна  $f_{\text{пр}}(\alpha)$ , то пеленгационная характеристика радиопеленгатора  $U(\alpha) = k f_{\text{пр}}(\alpha)$ , где  $k$  – коэффициент

пропорциональности. При использовании направленных свойств как приёмной, так и передающей антенны  $U(\alpha) = k' f_{\text{пр}}(\alpha) f_{\text{прд}}(\alpha)$ , где  $f_{\text{прд}}(\alpha)$  – ДН передающей антенны. Если на передачу и приём работает одна антенна, то  $f_{\text{прд}}(\alpha) = f_{\text{пр}}(\alpha) = f(\alpha)$ , при этом  $U(\alpha) = k' f^2(\alpha)$ .

Среди амплитудных методов пеленгации различают методы максимума, минимума и сравнения. *Пеленгация методом максимума* (рис. 2.27, а) осуществляется путём совмещения направления максимума пеленгационной характеристики  $\alpha$  с направлением на пеленгуемый объект  $\alpha_0$  в результате плавного вращения ДН антенны; пеленг отсчитывается в тот момент времени, когда напряжение на выходе приёмника становится максимальным.

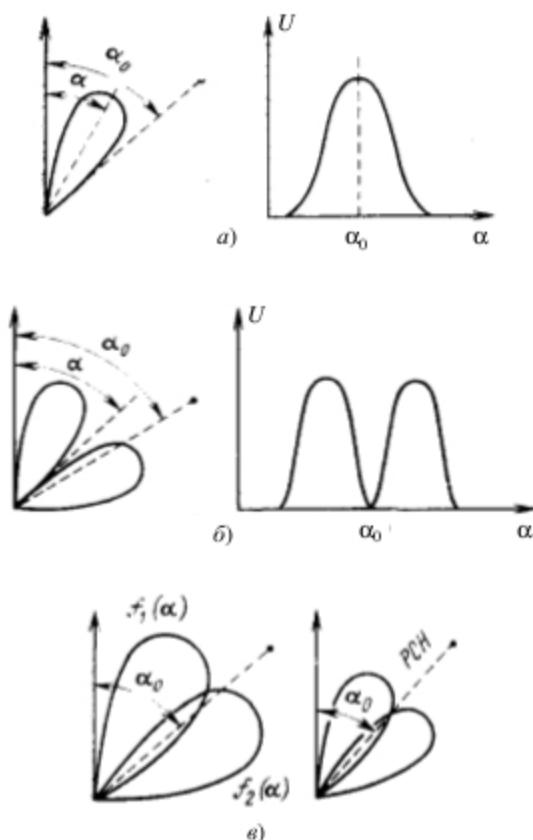


Рис. 2.27. Амплитудные методы пеленгации методом:  
а – максимума; б – минимума; в – сравнения

Достоинства метода максимума: простота технической реализации; получение наибольшего отношения сигнал/шум в момент отсчёта пеленга. Недостатки метода: низкая пеленгационная чувствительность и, как следствие, низкая точность пеленгации.

Пеленгационная чувствительность – это способность радиопеленгатора изменять напряжение на выходе приёмника при изменении положения ДН антенны относительно направления на объект. Чем больше изменение напряжения при заданном изменении угла, тем выше пеленгационная чувствительность. Количественной мерой пеленгационной чувствительности является крутизна пеленгационной характеристики

$$K_n = \left| dU(\alpha) / d\alpha \right|_{\alpha=\alpha_0} . \quad (2.42)$$

Если  $\Delta U$  – минимальное изменение выходного напряжения приёмника, которое может зафиксировать измеритель, то согласно (2.42) абсолютная погрешность измерения угловой координаты  $\Delta\alpha = \Delta U / K_n$ . Таким образом, чем больше крутизна пеленгационной характеристики, тем выше пеленгационная чувствительность и тем меньше погрешность измерения угла.

Так как максимум ДН антенны обычно «тупой», то пеленгационная чувствительность при пеленгации методом максимума мала и, следовательно, погрешность измерения высока.

*Пеленгация методом минимума* (рис. 2.27, б) осуществляется путём плавного вращения ДН с резким провалом. Угол отсчитывается в тот момент времени, когда направление минимума пеленгационной характеристики  $\alpha$  совпадает с направлением на объект  $\alpha_0$ . При этом напряжение на выходе приёмника минимально. Крутизна пеленгационной характеристики в этом случае выше, чем при методе максимума, поэтому выше и точность пеленгации. Однако амплитуда принимаемого сигнала вблизи направления на объект мала, что затрудняет определение дальности до объекта и, следовательно, использование метода минимума в активной радиолокации. Этот метод применяется главным образом в радионавигации при пеленгации источников мощного собственного излучения.

При пеленгации *методом сравнения* (рис. 2.27, в) угол определяется по соотношению амплитуд двух принимаемых сигналов, соответствующих двум пересекающимся диаграммам направленности  $f_1(\alpha)$  и  $f_2(\alpha)$ . Приёмник в этом случае двухканальный, причём напряжения на выходе каналов пропорциональны значениям  $f_1(\alpha_0)$  и  $f_2(\alpha_0)$ :

$S_1 = k_1 f_1(\alpha_0)$ ,  $S_2 = k_2 f_2(\alpha_0)$ . Сравнивая эти сигналы, например путём деления, находим

$$S = S_1 / S_2 = k_1 f_1(\alpha_0) / k_2 f_2(\alpha_0). \quad (2.43)$$

Измерив отношение  $S$  и решив уравнение (2.43) относительно  $\alpha_0$ , найдём искомый угол. Достоинством метода сравнения является возможность быстрого определения направления на объект (в течении одного импульса) в пределах сравнительно широкого сектора при неподвижных антеннах. Однако точность измерения может иногда оказаться низкой в зависимости от вида и взаимного положения ДН антенн и угла прихода радиоволн.

В том случае, когда отношение сигналов  $S_1 / S_2$  стремятся сделать равным единице, приходим к *равносигнальному методу пеленгации*. При этом методе ДН антенной системы поворачивается до тех пор, пока объект не окажется на равносигнальном направлении (РСН), когда  $S = S_1 / S_2 = 1$ . Достоинство равносигнального метода – сравнительно высокая точность пеленгации, так как при измерении используется та часть ДН, которая обладает большой крутизной. Данный метод применяется при автоматическом слежении по угловым координатам за движущимся объектом. В этом случае удобнее формировать не отношение сигналов (2.43), а их разность  $S = S_1 - S_2$ . Система управления поворачивает антенну (или ДН при неподвижной антенне) в ту или иную сторону (в зависимости от знака величины  $S$ ), стремясь свести рассогласование  $S$  к нулю. При этом равносигнальное направление будет отслеживать изменение направления на объект. Методы сравнения, в частности равносигнальный, используют в многоканальных (моноимпульсных) и одноканальных радиопеленгаторах. В первом случае, благодаря многоканальности приёмной системы, сравнение сигналов происходит в один и тот же момент времени. Во втором случае нужно периодически менять положение ДН антенны в пространстве, при этом сравниваются между собой сигналы, принятые в разные моменты времени при различных положениях ДН. Одноканальные пеленгаторы проще многоканальных, однако, имеют малую помехозащищённость и обеспечивают меньшую точность.

### 2.19.2. ФАЗОВЫЙ МЕТОД

Фазовый метод пеленгации основан на измерении разности фаз электромагнитных колебаний, принимаемых на две разнесённые антенны. Пусть в точках  $A$  и  $B$ , расстояние (база) между которыми  $d$  (рис. 2.28), расположены приёмные антенны. Разность фаз принимаемых колебаний  $\varphi_p = 2\pi / \lambda (R_A - R_B)$ , где  $R_A, R_B$  – расстояния от антенн до объекта. При  $R_A \gg d, R_B \gg d$  имеем

$$\varphi_p = (2\pi / \lambda) d \sin\alpha, \quad (2.44)$$

где  $\alpha$  – угол между нормалью к базе и направлением на объект. Измерив разность фаз  $\varphi_p$ , найдём

$$\alpha = \arcsin [\varphi_p / (2\pi d / \lambda)]. \quad (2.45)$$

При пеленгации объекта не на плоскости, а в пространстве, когда требуется получить две угловые координаты, нужна вторая пара антенн, база которых пересекается с базой первой пары антенн.

В качестве фазочувствительного элемента можно использовать фазовый детектор. Напряжение на его выходе пропорционально косинусу разности фаз:  $S = k \cos\varphi_p$ . Согласно (2.44) пеленгационная характеристика  $U(\alpha) = \cos[(2\pi / \lambda) d \sin\alpha]$ . При малых углах  $\sin\alpha = \alpha$ , поэтому  $U(\alpha) = \cos[(2\pi / \lambda) d\alpha]$  (кривая 1 на рис. 2.29). Так как в окрестности  $\alpha = 0$  крутизна пеленгационной характеристики мала, то и точность пеленгационной характеристики будет низкой. Кроме того, поскольку рассматриваемая пеленгационная характеристика является чётной функцией угла, то его определение будет двузначным, т.е. нельзя будет определить направление смещения объекта от перпендикуляра к базе.

Эти недостатки устраняются, если ввести в один из приёмных каналов после резонансного усилителя РУ фазовращатель (ФВ) на  $\pi/2$  (рис. 2.30). Напряжение на выходе фазового детектора (ФД) измеряется вольтметром (В). Благодаря смещению фазы сигнала в одном из каналов на  $\pi/2$  пеленгационная характеристика становится нечётной функцией (кривая 2 на рис. 2.29)

$$U(\alpha) = \sin[(2\pi / \lambda) d\alpha] = (2\pi / \lambda) d\alpha.$$

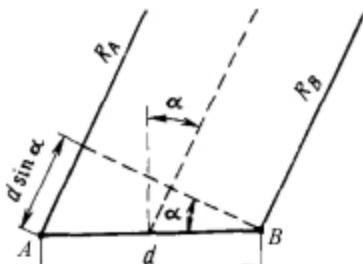


Рис. 2.28. Расположение приёмных антенн при фазовом методе

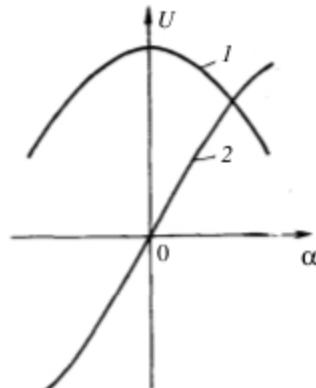


Рис. 2.29. Пеленгационные характеристики

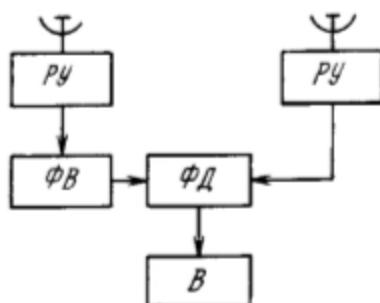


Рис. 2.30. Приёмный тракт с фазовращателем

При этом её крутизна  $K_{\pi} = (2\pi / \lambda)d\alpha$ . Как видим, пеленгационная чувствительность, а следовательно, и точность пеленгации растёт с увеличением отношения  $d / \lambda$ . Однако при этом будет уменьшаться диапазон однозначного измерения угла  $\Delta\alpha_{\max}$ . Действительно, поскольку для однозначного измерения разности фаз с помощью ФД необходимо, чтобы  $\varphi_p < \pi$ , а при малых  $\alpha$  согласно (2.44)  $\varphi_p = 2\pi d\alpha / \lambda$ , то  $\Delta\alpha_{\max} = \lambda / 2d$ .

Для обеспечения высокой точности и в то же время однозначности измерений можно применить многоканальный метод (подобно фазовой дальнометрии). При двухканальном методе вводят третью антенну и создают большую и малую базы. Пара антенн с малой базой обеспечивает грубое, но однозначное измерение угла (в диапазоне  $\Delta\alpha_{\max}$ ). Антенны с большой базой дают более точный отсчёт.

Неоднозначность пеленгации можно устранить также, применяя антенны с достаточно узкими ДН: их ширина  $\alpha_a$  не должна превышать диапазон однозначной пеленгации, т.е.  $\alpha_a < \Delta\alpha_{\max}$ . Кроме того, остро-направленные антенны обеспечивают разрешение объектов по угловым координатам.

## 2.20. СЛЕДЯЩИЕ ИЗМЕРИТЕЛИ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ

Схема построения таких устройств зависит от принятого метода определения угловых координат.

При методе максимума и линейном перемещении луча антенны устройством автоматического сопровождения цели представляет собой аналоговую или цифровую следящую систему. Аналоговая система имеет в своём составе дискриминатор (Д), усилитель сигнала ошибки (У), интегратор (И), схему сравнения напряжений (ССН), схему формирования угловых импульсов (СФУП) (рис. 2.31).

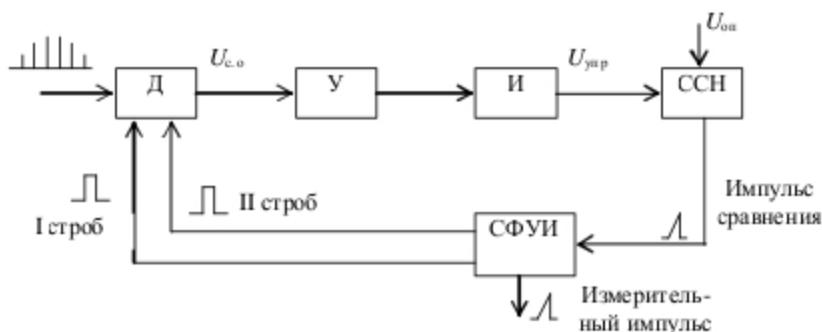


Рис. 2.31. Структурная схема следящего измерителя угловых координат

Луч антенны, перемещающийся в некотором секторе по углу места (азимуту) формирует пакеты (пачки) импульсов, отражённых от цели. Максимум пачки соответствует моменту совпадения максимума луча антенны с направлением на цель. После прохождения приёмника и детектирования импульсы пачки подаются на дискриминатор, куда поступают также стробы сопровождения со схемы формирования угловых импульсов.

В дискриминаторе происходит сравнение временного положения энергетического центра пачки импульсов с серединой стробов сопровождения. В результате вырабатывается напряжение сигнала ошибки  $U_{c.o.}$ , величина и знак которого соответствует величине и знаку временного рассогласования  $\Delta t$  между энергетическим центром пачки и серединой стробов сопровождения:

$$U_{c.o.} = k_{\phi} \Delta t, \quad (2.46)$$

где  $k_{\phi}$  – коэффициент пропорциональности.

Напряжение сигнала ошибки после дискриминатора подаётся на интегратор, преобразующий это напряжение в управляющее  $U_{упр.}$

Сопровождение цели по направлению в одной из плоскостей осуществляется непрерывным совмещением стробов с пачкой импульсов цели. Скорость перемещения стробов в системе с одним интегратором пропорциональна  $U_{c.o.}$ . Таким образом, ошибка слежения увеличивается при увеличении скорости изменения угловых координат цели, что является недостатком рассматриваемого устройства сопровождения.

При равносигнальном методе с амплитудной суммарно-разностной обработкой сигналов устройство сопровождения содержит систему слежения цели в вертикальной и систему слежения в горизонтальной плоскостях. В соответствии с этим антенна формирует четыре луча,

максимумы которых смещены относительно РСН на некоторый угол. Принятые антенной сигналы поступают на антенно-волноводный тройник. С выхода «Е» плеча снимается разностный сигнал, с выхода «Н» плеча – суммарный. После приёмника напряжение разностного сигнала используется в схеме управления положением антенны, напряжение суммарного сигнала – для измерения дальности цели. Текущие значения угловых координат цели считываются датчиками, установленными на осях вращения антенн в соответствующих плоскостях.

Аналогичным вышерассмотренному является устройство слежения при фазовом методе. Его основное отличие – в принципе получения разностного сигнала, пропорционального разности фаз сигналов, принимаемых антеннами.

## 2.21. СИНТЕЗИРОВАНИЕ РАСКРЫВА ПРИ БОКОВОМ ОБЗОРЕ

РЛС бокового обзора устанавливается на борту ЛА. Антенна РЛС, расположенная вдоль оси ЛА, образует ДН, широкую в вертикальной и узкую в горизонтальной плоскостях. Обзор земной поверхности производится за счёт перемещения ЛА (а не за счёт вращения ДН антенны, как в РЛС кругового обзора). При обеспечении необходимой разрешающей способности РЛС бокового обзора можно использовать для картографирования местности. Качество радиолокационного изображения местности определяется минимальным расстоянием между двумя её точками, разрешаемыми по углу, т.е. линейной разрешающей способностью  $\Delta R_c$ . Если  $\theta_a$  – разрешающая способность по углу, то на дальности  $R$  линейная разрешающая способность  $\Delta R_c = \theta_a R$ .

Разрешающая способность РЛС бокового обзора существенно зависит от того, какая обработка сигналов используется в РЛС: некогерентная или когерентная. При некогерентной обработке разрешающая способность по углу  $\theta_a \approx \lambda / d_a$ . Поэтому

$$\Delta R_c = (\lambda / d_a) R, \quad (2.47)$$

т.е. линейная разрешающая способность ухудшается прямо пропорционально увеличению дальности. Уменьшение  $\Delta R_c$  достигается уменьшением длины волны  $\lambda$  (но при этом возрастают потери в атмосфере) и увеличением размера антенны  $d_a$  (что ограничено размерами самого ЛА).

Кардинальное решение задачи повышения разрешающей способности РЛС бокового обзора состоит в переходе к когерентной обработке

сигналов, позволяющей создавать искусственный раскрыв антенны – синтезированный, значительно превышающий физический раскрыв антенны  $d_a$ . Известно, что в обычной линейной многоэлементной антенне сигналы, отражённые от цели, принимаются практически одновременно всеми элементами антенны. В фидерной системе происходит векторное сложение всех сигналов, и результирующая сумма поступает в приёмник. Максимум суммы обеспечивается, если цель находится в направлении, перпендикулярном к раскрыву антенны, когда элементарные сигналы находятся в фазе. При синтезировании раскрыва сигналы принимаются одним элементом, но этот элемент перемещается в пространстве вдоль воображаемого раскрыва.

Принимаемые последовательно во времени сигналы требуется запоминать по амплитуде и по фазе и через определённое время одновременно суммировать. Если такой элемент антенны установить на борту самолёта, при его движении образуется эквивалентный раскрыв произвольной величины. На рисунке 2.32, *a* показан элемент с шириной луча  $\theta_a$ . Синтезированный раскрыв равен отрезку траектории полёта самолёта  $L = V_c T_c$  ( $V_c$  – скорость полёта,  $T_c$  – время полёта).

Результирующая ДН имеет узкий основной лепесток шириной  $\theta_a = \lambda / 2L$ , определяемый синтезированной антенной с раскрывом  $L$  (рис. 2.32, *б*). Можно показать, что в рассматриваемом случае линейная разрешающая способность РЛС бокового обзора

$$\Delta R_c = d_a / 2. \quad (2.48)$$

Из (2.48) следует, что линейная разрешающая способность РЛС бокового обзора при когерентной обработке не зависит ни от длины волны  $\lambda$ , ни от дальности  $R$  и определяется только линейным размером апертуры антенны  $d_a$ . Чем меньше  $d_a$ , тем выше разрешающая способность.

РЛС бокового обзора с когерентной обработкой сигналов называется РЛС с синтезированной апертурой (РСА).

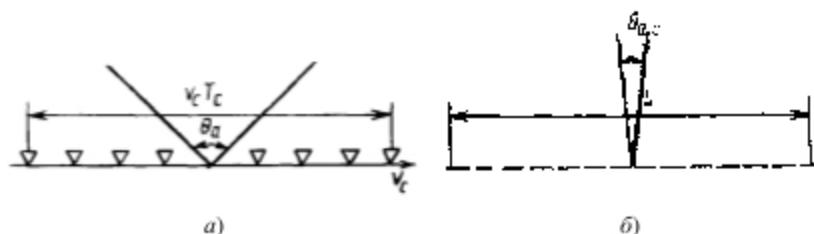


Рис. 2.32. Элемент с шириной луча  $\theta_a$  (*a*) и ширина ДН (*б*) антенны

## 2.22. ОБНАРУЖЕНИЕ СИГНАЛОВ В ПАССИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

В пассивной радиолокации используются методы и средства определения местоположения объектов по их собственным (пассивным) радиоизлучениям. Пассивными естественными являются тепловые радиоизлучения, обусловленные электродинамическими процессами в веществе, из которого состоит физический объект, и радиоизлучения нетеплового происхождения, к которым относится излучение столба ионизированных газов при запуске ракет, радиоизлучения при газовых разрядах, ядерных взрывах и т.д. Пассивную радиолокацию часто называют *радиотеплокацией* или *радиометрией*. Радиометры работают в инфракрасной, миллиметровой и сантиметровой областях электромагнитного спектра.

Так как все виды излучений в пассивной радиолокации носят характер случайных процессов, то возникает задача обнаружения случайного шумоподобного сигнала на фоне помех. Плотность вероятности теплового сигнала  $S_c(t)$  можно считать близкой к гауссовской. Средняя мощность такого сигнала определяется величиной  $\sigma_s^2 = kT^* \Delta f$ , где  $\Delta f$  – полоса частот, пропускаемая приёмником;  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $T^*$  – абсолютная температура, К. Если в этой полосе действует внутренний шум приёмника  $n(t)$ , имеющий спектральную плотность  $N_0 = kT_{ш}^*$ , то средняя мощность помехи  $\sigma_n^2 = N_0 \Delta f$ , где  $T_{ш}^*$  – шумовая температура приёмника.

Оптимальный алгоритм обнаружения случайного сигнала  $S_c(t)$  на фоне аддитивной помехи  $n(t)$  сводится к вычислению отношения правдоподобия и сравнению его с порогом  $h_0$ . Здесь  $x(t) = \theta S_c(t) + n(t)$  – смесь сигнала и помехи, действующая на входе приёмника в течение интервала  $[0, T]$ ;  $\theta$  – параметр обнаружения, принимающий одно из двух значений – 0 или 1. При этом оптимальный обнаружитель (рис. 2.33) содержит устройство возведения в квадрат входной смеси, интегратор и пороговое устройство.

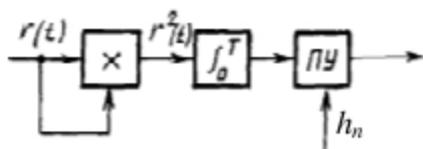


Рис. 2.33. Оптимальный обнаружитель

На выходе интегратора в момент времени  $T$  образуется напряжение, пропорциональное энергии входной реализации, поэтому такой приёмник называется энергетическим. При действии в смеси одного шума энергия реализации равна энергии шума  $E_n$ . При наличии в смеси сигнала и шума к энергии  $E_n$  добавляется энергия сигнала  $\Delta E$ . Если применить компенсацию и выбрать порог  $h_n$  равным значению  $E_n$ , то при превышении порога фиксируется наличие в смеси сигнала. В противном случае принимается решение об отсутствии сигнала.

Радиометр может быть также реализован на основе применения модуляционного метода, не требующего использования компенсационных устройств внутренних шумов приёмника. Схема модуляционного приёмника приведена на рис. 2.34.

В основе схемы лежит принцип обычного приёма, дополненного синхронным детектором (СД). Опорный сигнал для СД вырабатывается генератором модулирующего колебания (ГМК). Модулирующее колебание питает модулятор (М), который осуществляет амплитудную модуляцию сигналов, поступающих с выхода антенны. Благодаря размещению модулятора непосредственно после антенны внутренние шумы приёмника не подвергаются искусственной модуляции, поэтому на выходе СД напряжение появляется лишь при действии сигнала на входе антенны. При этом детектор огибающей (ДО) выделяет напряжение с частотой модуляции  $\Omega_m$ . Модуляционный приёмник значительно подавляет действие низкочастотных флуктуаций, вызываемых изменениями коэффициента усиления тракта. Вместе с тем чувствительность модуляционного приёмника несколько ниже, чем корреляционного. Коэффициент потерь  $k_n$ , определяющий дальность действия радиолокации, при использовании модуляционного приёмника примерно в два раза больше, чем при корреляционном приёме, что уменьшает дальность действия радиолокации.

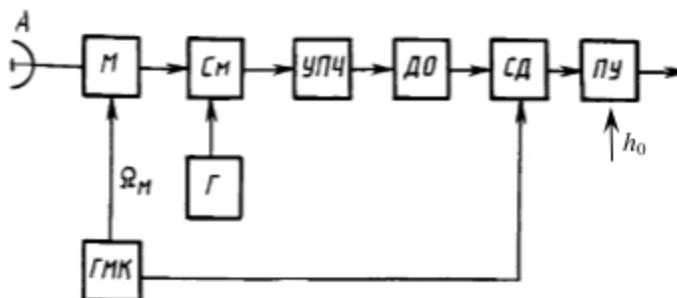


Рис. 2.34. Схема модуляционного приёмника

### 2.23. ИЗМЕРЕНИЕ КООРДИНАТ ЦЕЛЕЙ В ПАССИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

По сравнению с РЛС, работающими в активном режиме, с помощью однопозиционного радиотеплолокатора (РТЛ), антенная система которого расположена в одном пункте, можно определить лишь угловое положение излучающего объекта. Для нахождения дальности необходимо произвести приём излучения в нескольких разнесённых пунктах и их совместную обработку.

Определение с помощью РТЛ направления на источник теплового излучения называют *радиотеплопеленгацией*. Для её реализации используют направленные свойства антенн поверхностного (рупорные или зеркальные) или дискретного (антенные решётки) типа.

При применении апертурных антенн основными являются два метода пеленгации: метод максимума для РТЛ кругового обзора и метод сравнения амплитуд для РТЛ со слежением за источником излучения. Типичным примером РТЛ следящего типа является радиосекстант – прибор, позволяющий измерить угловые координаты врезанных источников излучения.

На рисунке 2.35, *а* приведена структурная схема пеленгатора источника теплового излучения, основанного на методе сравнения амплитуд. Антенное устройство (АУ) в такой системе имеет два выхода, каждому из которых соответствует своя ДН (рис. 2.35, *б*).

Сигналы с выхода АУ имеют одинаковые фазы, а их амплитуды зависят от положения источника (И) относительно равносигнального направления (РСН). Эти сигналы подаются на два идентичных приёмника ПРМ1 и ПРМ2, осуществляющих фильтрацию сигналов в полосе  $\Delta f$ . Каждый из приёмников, входящих в состав пеленгатора, имеет два выхода. С одного сигнал подаётся на квадратурный детектор (КД), а с другого – на амплитудно-фазовый детектор (АФД). В АФД формируется разность результатов квадратичного детектирования суммы и разности выходных сигналов приёмников ПРМ1 и ПРМ2. Усреднение за

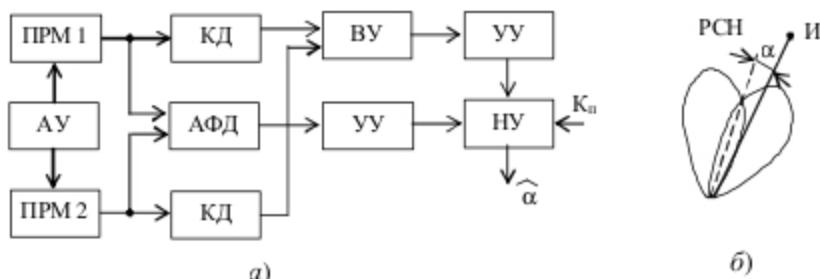


Рис. 2.35. Структурная схема (*а*) и ДН (*б*) пеленгатора источника теплового излучения

время наблюдения выходного сигнала АФД в усредняющем устройстве (УУ) даёт оценку мощности пеленгуемого сигнала. Ненормированная (зависящая от мощности сигнала) оценка пеленга получается в результате образования в вычитающем устройстве (ВУ) разности выходных сигналов квадратурных детекторов и её усреднения в УУ. Нормировка в нормирующем устройстве (НУ) заключается в делении ненормированной оценки на оценку мощности сигнала и крутизну нормированной пеленгационной характеристики  $K_n$ , определяемой параметрами АУ.

Для улучшения разрешающей способности и повышения точности измерения координат применяют интерферометры, антенны которых содержат малое число сильно разнесённых между собой элементов. Если наблюдаемые источники излучения движутся относительно интерферометра на расстояниях, соизмеримых с его базой (расстоянием между элементами АУ), то можно наряду с углами измерить и дальность до цели.

Достоинством пассивных РЛС является скрытность их работы, связанная с отсутствием излучения, а также малые габариты и масса.

К недостаткам радиометрических методов следует отнести малый уровень и случайный характер принимаемых колебаний. Как следствие, большое время накопления делает эти системы очень инерционными, что затрудняет работу при больших скоростях взаимного перемещения.

## 2.24. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ФИЗИЧЕСКИХ ОСНОВАХ ОПТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ

С появлением лазеров сформировалось новое направление в радиолокации – оптическая (лазерная) локация. *Оптической локационной системой* (ОЛС) называют совокупность технических средств, позволяющих обнаруживать объекты и оценивать их координаты с помощью электромагнитных волн оптического диапазона (от  $3 \times 10^{12}$  до  $3 \times 10^{16}$  Гц или в длинах волн от 100 до 0,01 мкм).

В качестве излучателей в ОЛС используются лазеры. По сравнению с другими источниками света лазеры имеют то преимущество, что излучаемое ими электромагнитное поле обладает высокой пространственно-временной когерентностью, что даёт возможность формировать узкие ДН ( $\theta = \lambda / d$ , где  $d$  – диаметр излучающей площадки активной среды лазера). Понятие «когерентности» эквивалентно понятиям «согласованности» или «корреляции» между фазами колебаний в различных точках пространства в один и тот же момент времени (пространственная когерентность) и между фазами колебаний в одной и той же точке пространства в различные моменты времени (временная коге-

рентность). Для твёрдотельных лазеров угловая расходимость составляет единицы миллирадиан, а для газовых – десятки доли миллирадиана. Следствием этого является более высокая, чем у РЛС СВЧ-диапазона, угловая разрешающая способность и точность измерения угловых координат. Малое поле зрения (узкая ДН) приёмных оптических антенн позволяет эффективно селективировать отражения от земли и местных предметов при обнаружении объектов с малыми углами места, повышает помехоустойчивость ОЛС по отношению к преднамеренным помехам.

Переход в оптический диапазон даёт также возможность повысить точность измерения дальности до цели и её радиальной скорости. При импульсном методе измерения это связано с возможностью излучения импульсов наносекундной длительности с пиковой мощностью в сотни и тысячи мегаватт. При фазовом методе измерение ведётся на поднесущих, имеющих частоты вплоть до СВЧ-диапазона.

Однако ОЛС присущи и недостатки: сильное затухание лазерного излучения в дожде, снеге и тумане, дымах на поле боя, что резко снижает дальность действия ОЛС в наземных условиях; сложность наведения узкого луча ОЛС и большое время обзора.

Часто ОЛС работают в комплексе с другими системами, что позволяет преодолеть некоторые из указанных недостатков. Для ОЛС наиболее характерным является активный режим, при котором источник зондирующего сигнала и приёмник отражённого излучения пространственно совмещены.

Структурная схема ОЛС в общем виде представлена на рис. 2.36.

В её состав входят источник и приёмник излучения, оптическая система (ОС), формирующая излучаемый в направлении цели световой пучок и собирающая отражённое объектом излучение, система обработки и наведения, осуществляющая оценивание координат цели и их автоматическое сопровождение.



Рис. 2.36. Структурная схема ОЛС

Характеристики ОЛС во многом зависят от свойств среды, в которой происходит распространение излучения, отражающей способности объекта и уровня помех, которые, как и в радиодиапазоне, можно разделить на внешние и внутренние. На рисунке 2.36 для обозначения оптических, электрических и механических связей использованы соответственно двойные, одинарные и пунктирные линии.

Рассмотрим подробнее элементы структурной схемы ОЛС.

Источник излучения – лазерный передатчик (ЛП) – служит для создания зондирующего сигнала с требуемыми характеристиками, он работает в импульсном или непрерывном режиме. Для формирования ДН, обеспечивающей концентрацию излучаемой энергии в узком пучке, применяется оптическая система (рис. 2.37), состоящая из двух линз: окуляра 1 и объектива 2, фокальные плоскости которых совмещены.

Такая система, называемая коллимирующей, позволяет уменьшить расходимость исходного пучка в  $k$  раз, где  $k = f_1 / f_2$ ;  $f_1$ ,  $f_2$  – фокусные расстояния объектива и окуляра.

Для наведения лазерного луча на цель или сканирования используют систему поворотных зеркал и призм, или устройства, основанные на эффекте преломления луча в оптически неоднородной среде, в которой изменение показателя преломления создаётся управляющим напряжением.

Излучаемые оптические сигналы, распространяясь через атмосферу или другую среду, претерпевают изменения, которые обусловлены тремя основными явлениями: поглощением, рассеянием и турбулентностью. Поглощение и рассеяние определяют среднее затухание оптического сигнала и относительно медленные флуктуации, вызванные изменением метеоусловий. С турбулентностью связаны быстрые изменения поля, имеющие место при любой погоде. Вследствие её влияния происходит расширение диаметра светового пучка; его амплитуда, фаза, поляризация и угол падения флуктуируют.

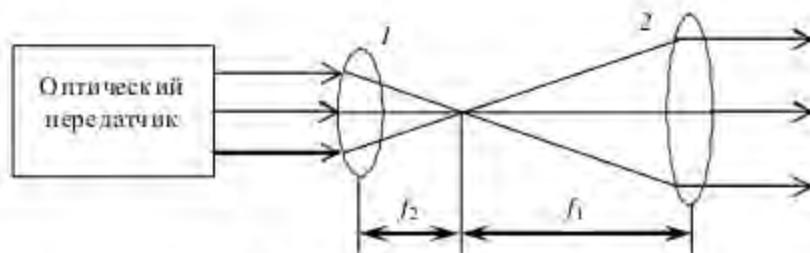


Рис. 2.37. Оптическая система

При взаимодействии лазерного пучка с отражающей поверхностью цели возникает вторичное излучение, характер которого зависит от свойств зондирующего луча и особенностей цели (состояние поверхности, характер движения). В зависимости от состояния отражающей поверхности различают *зеркальное* и *диффузное* отражение. При зеркальном отражении вторичное излучение формируется по законам геометрической оптики.

Одним из наиболее часто применяемых зеркальных отражателей является, как и в радиолокации, уголкового отражатель (световозвращатель), называемый в оптике трипель-призмой.

В тех случаях, когда размеры шероховатостей поверхности больше  $\lambda/16$ , имеет место диффузное отражение, при анализе которого пользуются моделью ламбертова отражателя. Энергетическая яркость такого отражателя не зависит от направления наблюдения. К ламбертовым поверхностям можно отнести земные ландшафты (почвы, пески, растительные образования) и некоторые наземные объекты (дороги, ВПП аэродромов, кровли зданий).

Рассеянное объектом излучение с учётом прохождения через турбулентную среду имеет случайный характер, характеризуемый, в большинстве случаев, гауссовским законом распределения мгновенных значений напряжённости поля.

Вместе с полезным сигналом на входе оптической приёмной системы присутствует световой фон (фоновая помеха), создаваемый рассеянным в атмосфере солнечным излучением, свечением звёздного неба, а также излучением, отражённым от различных посторонних объектов, оказавшихся в поле зрения приёмной системы ОЛС.

При работе ОЛС в сильно замутнённой среде (туман, вода) основным видом помех является обратное рассеяние излучения передатчика – так называемая помеха обратного рассеяния. Кроме внешних помех необходимо учитывать внутренние шумы, возникающие при преобразовании оптического сигнала в электрический. Связанный с ними ток, возникающий на выходе преобразователя при отсутствии светового сигнала на входе, называют темновым.

Часть отражённого от цели излучения вместе с внешними помехами попадает на входную апертуру оптического приёмного устройства, состоящего из оптической приёмной антенны, светофильтра и фотоприёмника. Могут быть использованы линзовые, отражательные и смешанные антенные устройства.

Антенное устройство смешанного типа представлено на рис. 2.38. Приходящее излучение попадает на зеркало 2, переотражается на зеркало 1 и после прохождения диафрагмы 3 преобразуется с помощью окуляра 4, оптического фильтра 5, фокусирующей линзы 6 и поступает на фотоприёмник 7.

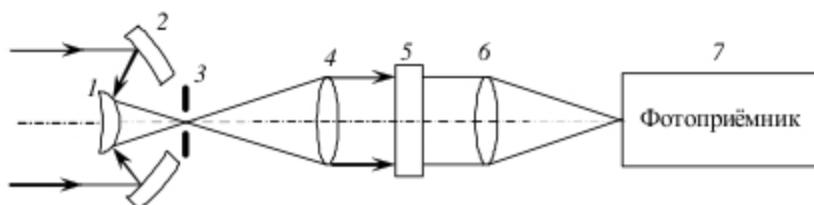


Рис. 2.38. Антенное устройство смешанного типа

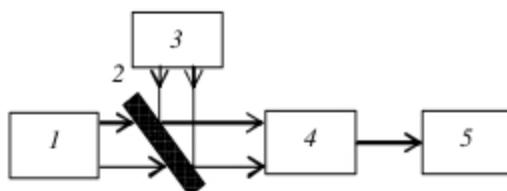


Рис. 2.39. Гетеродинный приём оптических сигналов

Фотоприёмник, преобразующий оптический сигнал в электрический, может быть выполнен на основе прямого фотодетектирования (энергетический приём) или с помощью оптического гетеродинирования.

При гетеродинном приёме (рис. 2.39) на светочувствительный элемент 4 подаётся аддитивная смесь принятого светового потока с приёмной оптической системы и излучения от оптического гетеродина 3, формируемая с помощью полупрозрачного зеркала 2. На выходе светочувствительного элемента с помощью фильтра 5 выделяется сигнал промежуточной частоты. Дальнейшая обработка ведётся уже с помощью радиодиапазона. В качестве светочувствительного элемента используется фотодетектор, например фотоэлектронный умножитель (прибор с внешним фотоэффектом).

Остальные узлы ОЛС принципиально не отличаются от соответствующих устройств РЛС.

В настоящее время наиболее распространены и освоены лазеры на рубине ( $\lambda = 0,694$  мкм) и углекислом газе ( $\lambda = 10,6$  мкм).

## 2.25. СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОННОЙ НАВИГАЦИИ

Радионавигационные системы предназначены для определения местоположения движущихся и неподвижных воздушных, морских, наземных и космических объектов различного назначения. Кроме основной задачи РНС могут обеспечивать потребителей информацией о точном времени, параметрах движения (скорость, путевой угол, прой-

денный путь, взаимное расположение движущихся объектов и т.д.), а также осуществлять контроль за их перемещением.

В нашей стране разработан и эксплуатируется целый ряд РНС: спутниковая РНС «ГЛОНАСС», импульсно-фазовая РНС (ИФРНС) с наземным базированием «ЧАЙКА», многочастотная фазовая разностно-дальномерная система навигации для судовождения «МАРС-75», многочастотная разностно-дальномерная локационно-навигационная система «БРАС-3», разностно-дальномерная система ближней навигации РСБН, дальномерная фазовая радиогеодезическая система «КРАБИК-3», единая система посадки летательных аппаратов «ПЛАЦДАРМ», радиомаяки и др.

В США несколько ранее были созданы аналогичные системы. В частности, основными радионавигационными системами США являются спутниковая РНС GPS (NAVSTAR), ИФРНС LORAN-C, азимутальная система ближней навигации VOR, дальномерная система ближней навигации DME, тактическая азимутально-дальномерная система TACAN, аэродромные системы посадки метрового (ILS) и микроволнового (MLS) диапазонов, радиомаяки.

Важная роль отводится отечественным радиотехническим системам дальней навигации (РСДН), предназначенным для определения координат местоположения самолётов, кораблей, а также подводных лодок в надводном, подводном положении и подо льдом при решении задач навигации и боевого применения. РСДН включает в себя комплекс наземного оборудования и бортовой аппаратуры объекта.

*По принципу определения координат местоположения самолёта* РСДН – это разностно-дальномерная радионавигационная система (РНС), линией положения которой является гипербола (линия равных разностей расстояний), вследствие этого РСДН иногда называют гиперболическими системами.

*По принципу действия* РСДН подразделяются на:

- фазовые – РСДН-20 («Маршрут»), «Омега» (выведена США из работы в 1997 году);
- импульсно-фазовые – РСДН-3/10, РСДН-4, РСДН-5, РСДН-10 и Лоран-С (США);
- многочастотные – «Марс-75» (состоят на вооружении ВМФ РФ, могут использоваться авиацией ВС).

*По принципу базирования* РСДН подразделяются на:

- стационарные – РСДН-20, РСДН-3/10 (Европейская), РСДН-4 (Дальневосточная), РСДН-5 (Северная и Северо-Западная) и Лоран-С (23 системы);
- мобильные – РСДН-10 (Северо-Кавказская, Южно-Уральская, Сибирская, Саянская, Ангарская, Забайкальская и Дальневосточная) и

«Марс-75» (Балтийского, Баренцева, Черного, Охотского и Японского морей, Камчатско-Курильская).

РСДН состоит из 3 – 5 наземных станций. Наземные стационарные РСДН представляют собой мощные передающие станции, состоящие из комплекса радиотехнического, специального и связного оборудования. Антенно-мачтовые устройства стационарных РСДН представляют собой сооружение из одной мачты высотой около 460 м или 5 – 7 мачт высотой 250...350 м. Антенно-мачтовые устройства мобильных РСДН представляют собой сооружение из 4 мачт высотой 50 м.

Системы РСДН могут применяться для межсамолётной навигации и захода на посадку на аэродромы, не оборудованные радиотехническими средствами посадки. Для определения координат местоположения самолёта необходимо минимум три наземные станции.

В зависимости от способа измерения расстояний различают фазовые и импульсно-фазовые РСДН.

### 2.25.1. ФАЗОВЫЕ РНС

Принцип действия фазовых радионавигационных систем (ФРНС), так же как и импульсных РНС, основан на измерении дальностей или разностей дальностей до нескольких РМ. Наиболее широкое распространение получили ФРНС без ответчика, структура которых во многом напоминает структуру импульсных РНС. Опорные РМ излучают колебания, когерентность которых поддерживается специальной системой синхронизации. На борту потребителя производится приём и идентификация сигналов нескольких РМ. Для определения координат потребителя в ФРНС, как и в других РНС без ответчика, могут быть использованы дальномерные, квазидальномерные и разностно-дальномерные измерения. При дальномерных измерениях бортовая шкала времени совмещена со шкалой времени опорных РМ. При квазидальномерных измерениях имеется постоянное, но априори неизвестное расхождение шкал времени, которое измеряется в процессе навигационных определений. При разностно-дальномерных измерениях расхождение шкал времени также неизменно в течение радионавигационного сеанса и компенсируется в РНП, определяемом как разность фазовых запаздываний сигналов.

Принципиальное отличие ФРНС от импульсных РНС заключается в том, что измерение дальности или разностей дальностей производится фазовым методом. Показания бортового фазометра  $\Delta\varphi_p$  однозначно связаны с оценкой РНП лишь в том случае, когда сдвиг фаз между подаваемыми на него колебаниями  $\Delta\varphi_p < 2\pi$ . При невыполнении этого условия разность фаз включает неизвестное число  $n$  полных фазовых циклов.

В общем случае измерение РНП фазовым методом неоднозначно. Одному и тому же значению  $\Delta\varphi_{\phi}$  отвечает семейство линий положения. Если измеренное фазометром значение  $\Delta\varphi_{\phi} = 0$ , то выносится решение о том, что потребитель находится на одной из таких линий положения, но неизвестно на какой именно.

В простейших ФРНС многозначность фазовых измерений устраняется путём непрерывного подсчёта целого числа полных фазовых циклов в показаниях фазометра при перемещении потребителя от точки с известными координатами. Однако этот метод устранения многозначности ненадёжен, так как даже кратковременный сбой в синхронизаторе бортового измерителя приводит к потере фазовых соотношений.

Наибольшее распространение получил многошкальный метод устранения многозначности, для реализации которого нужно, чтобы сигналы излучались на нескольких частотах, находящихся между собой в определённом целочисленном соотношении. Используют также метод устранения многозначности, основанный на привлечении информации о функции, модулирующей несущие колебания по амплитуде. Это может быть гармоническая модулирующая функция или какая-либо другая, например функция в виде видеоимпульса определённой формы. Необходимым условием при этом является поддержание строгого синхронизма между модулирующей функцией и фазой несущего колебания.

### 2.25.2. ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВЫЕ РНС

В качестве примера рассмотрим современное состояние и режимы использования ИФРНС LORAN-C и «ЧАЙКА».

Разработка импульсно-фазовых, разностно-дальномерных радионавигационных систем с наземным базированием LORAN-C и «ЧАЙКА» была начата практически одновременно в конце 40-х и начале 50-х гг. по заказам военных ведомств США и СССР. Первоначально обе системы предназначались для навигационного обеспечения ударных сил авиации и военно-морского флота при решении ими боевых задач.

Высокие тактико-технические характеристики (ТТХ) этих систем (см. табл. 2.2) предопределили, начиная с 70-х гг., их массовое применение гражданскими потребителями подавляющего большинства стран мира для решения хозяйственно-экономических задач.

Благодаря последовательной модернизации, аппаратура передающих станций РНС LORAN-C и «ЧАЙКА» соответствует современному уровню развития радиоэлектроники, причём большинство станций РНС LORAN-C могут работать в полуавтоматическом режиме и на них требуется присутствие лишь дежурного оператора.

## 2.2. Тактико-технические характеристики РНС

Характеристики	«ЧАЙКА»	LORAN-C
Рабочая частота, кГц	100	
Дальность действия, км:		
суша	1400...1800	
море	1800...2000	
Мощность излучения передающих станций, кВт	150...1000	200...1000
Среднеквадратическая погрешность, м:		
определения местоположения в гиперболическом режиме	100...700	Не более 230 (расчётная величина)
повторного выхода в заданную точку		10...45
Вероятность безотказной работы одной станции	0,999	
Относительная суточная нестабильность стандартов частоты передающих станций	$5 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{-12}$

В настоящее время ИФРНС LORAN-C продолжает обеспечивать навигацию гражданских и некоторых видов военных потребителей различных государств в море, воздухе и на суше. В мире в эксплуатации находятся 26 цепей РНС LORAN-C, каждая из которых содержит от 3 до 5 станций; некоторые станции работают одновременно в двух цепях.

Рабочие зоны цепей РНС LORAN-C перекрывают территории США и Канады и почти всё побережье Североамериканского континента, Северную Атлантику, Скандинавию и Западную Европу, Северное и Норвежское моря, атлантическое побережье Франции и Восточную Атлантику, Средиземное море, центральный и северо-западный районы Тихого океана, большую часть побережья КНР, весь Аравийский полуостров, районы Ближнего Востока, Красного моря, Персидского залива, залив Аден, часть побережья Индии. Общая площадь рабочих зон цепей РНС LORAN-C превышает 95 млн. км<sup>2</sup>.

В России в эксплуатации находятся четыре цепи системы «ЧАЙКА»:

– Европейская, в составе пяти станций, три из которых расположены в районах городов Брянск (ведущая), Петрозаводск, Сызрань (Россия) и две – за пределами России – Слоним ( Республика Беларусь) и Симферополь (Украина);

– Восточная, в составе четырёх станций, расположенных в районах городов Александровск-Сахалинский (ведущая), Петропавловск-Камчатский, Усурийск и Охотск;

– на Севере России функционируют две цепи в составе пяти станций, расположенных в районах г. Дудинка (ведущая), пос. Таймылыр, о. Панкратьева, г. Инта (ведущая-ведомая) и п. Туманный, причём три станции одновременно работают в обеих цепях.

Общая площадь рабочих зон всех цепей РНС «ЧАЙКА» составляет около 20 млн. км<sup>2</sup>.

Кроме того, в России имеются региональные цепи ИФРНС средней мощности. Завершены работы по созданию объединённой российско-американской цепи «ЧАЙКА»/LORAN-C в составе двух российских станций в районах городов Петропавловск-Камчатский и Александровск-Сахалинский и одной американской станции LORAN-C на о. Атту (США).

РНС LORAN-C остаётся самой распространённой системой с наземным базированием: количество её потребителей в мире составляет более 2 млн., причём более половины находятся в США. На рисунке 2.40 показана зона покрытия систем «ЧАЙКА» и LORAN-C.

К сожалению, номенклатура и объём выпускаемой отечественной приёмоиндикаторной аппаратуры РНС «ЧАЙКА» в настоящее время недостаточны для удовлетворения требований многочисленных потребителей. По уровню технических решений отечественная приёмоиндикаторная аппаратура не уступает зарубежной, однако её элементная база отстаёт от зарубежного уровня. В настоящее время ведутся разработки новых образцов отечественных приёмоиндикаторов РНС «ЧАЙКА»/LORAN-C.

Рассмотрим принцип действия и режимы использования сигналов ИФРНС LORAN-C и «ЧАЙКА».

Передающие станции ИФРНС LORAN-C и «ЧАЙКА», излучающие группы (пачки) из восьми («ведомые» станции) или девяти («ведущие» станции) импульсов на несущей частоте 100 кГц, объединены в цепи – группы станций, излучающих синхронизированные импульсные сигналы с одинаковой частотой повторения. Каждая цепь состоит из одной «ведущей» и двух – четырёх «ведомых» передающих станций.

Интервалы повторения пачек импульсов используются для опознавания цепей и уменьшения взаимных помех между ними. Значения интервалов повторения пачек изменяются от 40 000 до 99 990 мкс с дискретом 10 мкс.

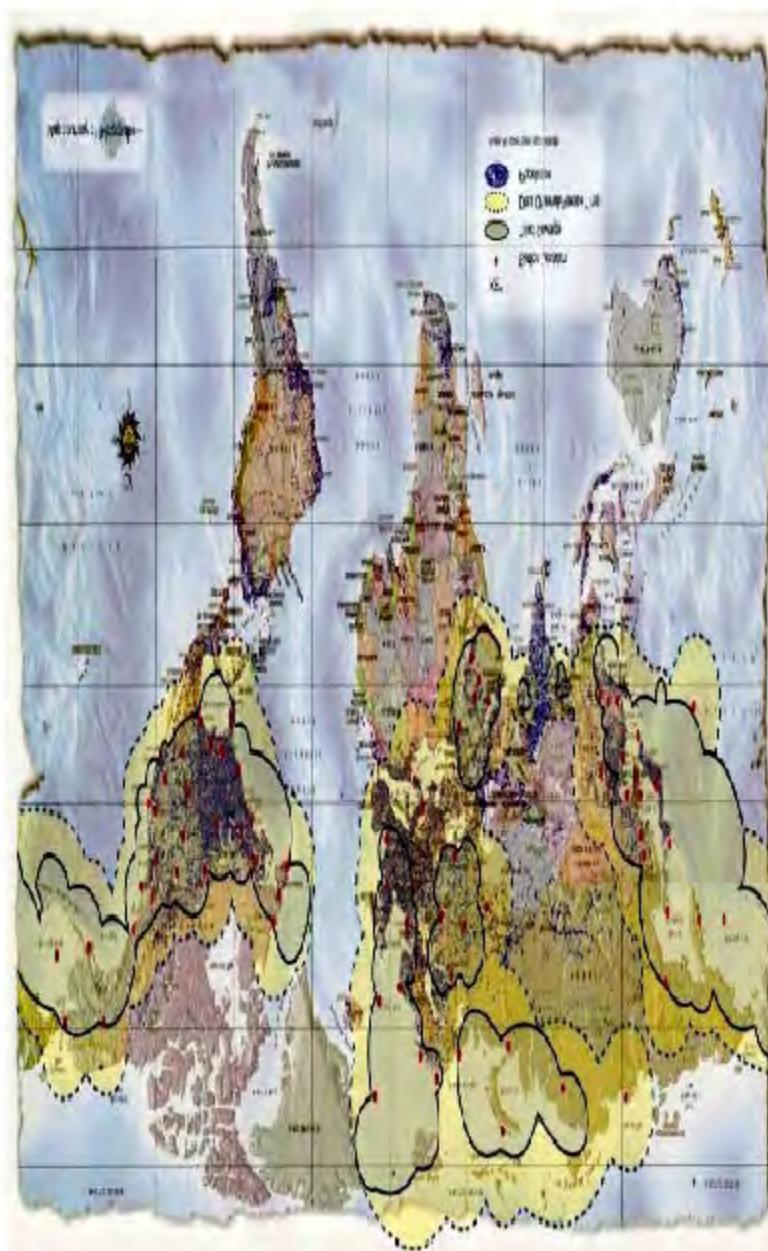


Рис. 2.40. Рабочая зона на РНС «Чайка» и LORAN-C

Классическим режимом использования сигналов ИФРНС является стандартный разностно-дальномерный (гиперболический) режим. Этому режиму свойственны ограничения по точности и размерам рабочей зоны, обусловленные геометрическим фактором, зависящим от взаимного расположения передающих станций и потребителей. Поэтому в зависимости от задач и требований потребителей получили широкое распространение и другие режимы использования сигналов ИФРНС, а именно: режим работы с функционально равноценными станциями, дальномерный, дифференциальный режимы, режим одновременной работы со смежными цепями.

Ни одна из существующих систем не является универсальным навигационным средством. Каждая из систем GPS/«ГЛОНАСС» или LORAN-C/«ЧАЙКА» обладает определёнными преимуществами и недостатками. Отметим лишь, что по сравнению со спутниковыми РНС импульсно-фазовые значительно экономичнее: сравнение затрат на одного потребителя в год показывает, что для РНС GPS и LORAN-C они отличаются более чем на порядок.

Совместное использование систем «ЧАЙКА» и LORAN-C открывает новые перспективы в направлении улучшения качества навигационно-временного обеспечения не только в Европе и на Дальнем Востоке, но и в других регионах мира, где работают или могут быть установлены новые цепи передающих станций «ЧАЙКА»/LORAN-C.

Другим направлением совершенствования существующей инфраструктуры РНС LORAN-C/«ЧАЙКА» является возможность использования её в качестве мощного системного усиления для спутниковых систем GPS, GNSS, «ГЛОНАСС». Примером ещё одного направления использования систем LORAN-C/«ЧАЙКА» являются работы по созданию системы EUROFIX (Нидерланды), представляющей собой комплексную систему обслуживания, использующую сигнал РНС LORAN-C для передачи дифференциальных поправок и другой достоверной информации потребителям системы GPS или другой спутниковой системы на большие расстояния.

Аналогичная концепция заложена в систему LAGPS (Loran Augmented GPS), которая разрабатывается в США и представляет собой РНС GPS, дополненную системой LORAN-C.

В России также ведётся разработка системы передачи дифференциальных поправок РНС «ГЛОНАСС» по навигационному каналу РНС «ЧАЙКА».

В таблице 2.3 представлены действующие и перспективные системы навигации космического и наземного базирования.

## 2.3. Системы навигации

---

Спутниковые системы навигации:

*Исторические –*

 *Transit* (США)

*Действующие –*

 *NAVSTAR GPS* (США);

 /  **ГЛОНАСС** (СССР/Россия);

 *Цикада* (СССР);  *Циклон* (СССР);

 *Бэйдоу* (Китай)

*Проектируемые –*

 *Галилео* (ЕС);  *IRNSS* (Индия)

---

Системы радионавигации наземного базирования:

 *Omega* (США);  *Альфа* (Россия);

 *Loran-C* (США);  *Чайка* (Россия);

 *Decca* (Великобритания);

 *Consol* (Великобритания)

---

## 2.26. СПУТНИКОВЫЕ РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ (СРНС)

Принципы навигационных измерений, статистические методы обработки сигналов и другие технические решения, разработанные применительно к РНС наземного базирования, явились научно-техническим фундаментом для проектирования спутниковых радионавигационных систем, в которых носителем источника навигационного сигнала является искусственный спутник Земли (навигационный космический аппарат, НКА). Возможность использования в качестве источника навигационного сигнала объекта, движущегося со скоростью порядка нескольких километров в секунду, базируется на том, что орбита НКА и параметры его движения могут прогнозироваться и контролироваться с весьма высокой точностью, т.е. известны в любой момент времени.

Первые работы в области навигационного использования искусственного спутника Земли (ИСЗ) были опубликованы в 1957 г., одновременно с запуском первого ИСЗ. В 1958 – 1959 гг. были проведены работы, определившие технический облик первого поколения СРНС, который был реализован в советской низкоорбитальной системе Цикада. Сходные решения были использованы в американской низкоорбитальной СРНС Транзит. Система Цикада включала в себя четыре НКА, система Транзит – шесть НКА.

### 2.26.1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СРНС ПЕРВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В 1957 г. группа советских учёных под руководством академика В.А. Котельникова экспериментально подтвердила возможность определения параметров движения искусственных спутников Земли по результатам измерений доплеровского сдвига частоты сигнала, излучаемого с ИСЗ, в точке приёма с известными координатами. Была установлена также возможность решения и обратной задачи нахождения координат точки приёма по измеренному доплеровскому сдвигу частоты сигнала, излучаемого с ИСЗ, параметры движения которого известны.

Использование ИСЗ в качестве радионавигационной опорной станции, координаты которой хотя и изменяются, но заранее известны для любого момента времени, позволило создать ряд проектов спутниковых радионавигационных систем (СРНС) первого поколения. Характерной чертой первого поколения СРНС является применение низковысотных (низкоорбитальных) ИСЗ и использование для навигационных определений сигнала одного, оказывающегося в зоне радиовидимости наблюдателя ИСЗ.

Рассмотрим низкоорбитальную СРНС «Транзит», в состав которой входят пять или шесть ИСЗ, наземный комплекс контроля и парк бортовой аппаратуры потребителей. ИСЗ расположены на круговых полярных орбитах высотой около 1100 км и имеют период обращения около 107 мин. При таких параметрах орбит каждый ИСЗ может находиться в зоне радиовидимости потребителя, радиус которой достигает 2000 км, от 10 до 16 мин. Учитывая, что период передачи навигационной информации (эфмеридная информация, метки времени, служебная информация) равен 2 мин, то за один пролёт ИСЗ можно получить несколько поверхностей положения. Минимальное достаточное для местоопределения число 3. Избыточное число образованных поверхностей положения может быть использовано для статистического сглаживания получаемых оценок координат. Кроме сглаживания избыточная информация позволяет измерить не только координаты – гео-

графическую широту и долготу, но и расхождение между шкалами времени потребителя и ИСЗ.

Средний интервал времени между наблюдениями зависит от географической широты потребителя и колеблется от 35 мин в приполярных районах до 90 мин вблизи экватора. Уменьшение этого интервала путём увеличения числа спутников в данных системах невозможно, так как все ИСЗ излучают сигналы на одних и тех же частотах. При нахождении в зоне радиовидимости нескольких спутников возникают взаимные помехи, что нарушает работоспособность систем.

Таким образом, низкоорбитальные СРНС обладают по крайней мере двумя серьёзными недостатками: малой точностью определения координат высокодинамичных объектов и большим интервалом времени между наблюдениями.

## 2.26.2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СРНС ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

Характерными особенностями СРНС второго поколения являются применение средневысотных (среднеорбитальных) ИСЗ и использование для навигационных определений сигналов нескольких одновременно находящихся в зоне радиовидимости ИСЗ. В состав СРНС входят подсистема космических аппаратов, подсистема контроля и управления (наземный командно-измерительный комплекс) и подсистема аппаратуры потребителей (рис. 2.41).

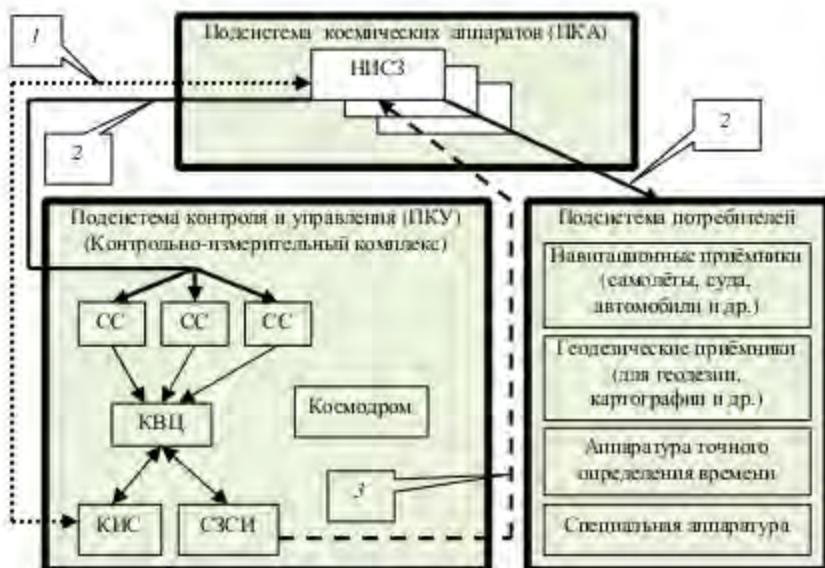
Первый спутник ГЛОНАСС был выведен Советским Союзом на орбиту 12 октября 1982 года. 24 сентября 1993 года система была официально принята в эксплуатацию. В 1995 году спутниковая группировка составила 24 аппарата (рис. 2.42).

Из-за недостаточного финансирования число работающих спутников сократилось.

В августе 2001 года была принята федеральная целевая программа «Глобальная навигационная система», согласно которой полное покрытие территории России планировалось уже в начале 2008 года, а глобальных масштабов система достигла бы к началу 2010 года.

25 декабря 2008 года количество действующих спутников доведено до 18 штук, что обеспечило 100%-ную непрерывную навигацию на всей территории России. На остальной части земного шара при этом перерывы в навигации могут достигать полутора часов.

Практически непрерывная навигация по всей территории Земли обеспечивается при полной орбитальной группировке из 24 действующих спутников.



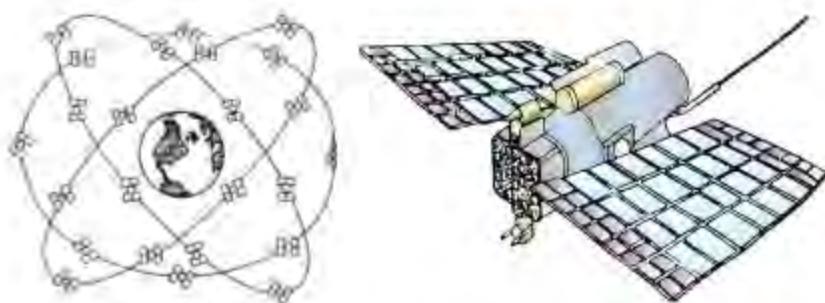
**Рис. 2.41. СРНС второго поколения**

СС – станции слежения за НИСЗ; КВЦ – координационно-вычислительный центр; КИС – командно-измерительная станция; НИСЗ – навигационный искусственный спутник Земли; СЗСИ – станция загрузки служебной информации; 1 – команды управления и телеметрия; 2 – навигационные сигналы спутников; 3 – служебная информация.

Обнародованы планы доведения численности группировки до 30 аппаратов (включая резервные по образцу NAVSTAR/GPS), хотя структура резервирования с учётом используемого системой частотно-го разделения остается неясной.

Организация-разработчик и изготовитель спутников - ОАО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетёва (до 2008 года – НПО ПМ), город Железногорск, Красноярский край.

Её аналог – система GPS (Navigation System With Time And Ranging Global Positioning System (NAVSTAR GPS), США) (рис. 2.42) разрабатывались с начала семидесятых годов как системы двойного применения: для военных и гражданских потребителей. Их разработка велась с учётом прогресса развития науки, техники и технологии, что привело на данном этапе к ситуации, когда обе системы используются как военными, так и гражданскими потребителями в качестве мирового стандарта в навигации, местоопределении и в системе формирования времени и частоты.



a)



b)

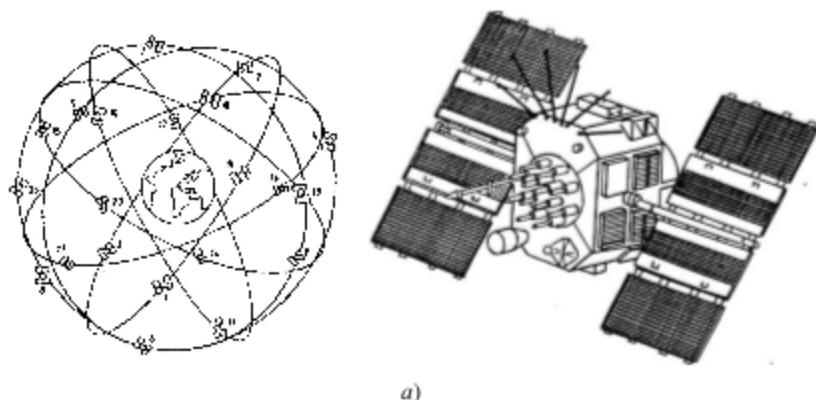
**Рис. 2.42. Система ГЛОНАСС:**

*a* – спутниковая навигационная система и спутник ГЛОНАСС;

*б* – размещение станций контроля и управления системы ГЛОНАСС

Стационарные элементы наземных сегментов системы ГЛОНАСС:

- центр управления системой ГЛОНАСС (ЦУС);
- центральный синхронизатор (ЦС);
- контрольная станция (КС);
- система контроля фаз (СКФ);
- квантово-оптическая станция (КОС);
- аппаратура контроля полета (АКП);
- командная станция слежения (КСС);
- другие станции слежения за работой бортовых устройств спутников.



a)



б)

**Рис. 2.43. Система GPS:**

- а – спутниковая навигационная система и спутник NAVSTAR/GPS;  
 б – расположение станций контроля и управления системой NAVSTAR/GPS:  
 ● – станции слежения;  
 ■ – главные станции слежения;  
 ▲ – наземные антенны

Основные общесистемные характеристики СРНС ГЛОНАСС и GPS приведены в табл. 2.4, а в табл. 2.5 приведены точностные характеристики, а на рис. 2.44 показано размещение космических навигационных аппаратов по орбитам.

## 2.4. Основные характеристики СРНС ГЛОНАСС и GPS

Параметр, способ	ГЛОНАСС	GPS
Число НС (резерв)	24 (3)	24 (3)
Число орбитальных плоскостей	3	6
Число НС в орбитальной плоскости	8	4
Тип орбит	Круговая ( $e = 0 \pm 0,01$ )	Круговая
Высота орбит, км	19 100	20 145
Наклонение орбит, 1 рад	$64,8 \pm 0,3$	55 (63)
Драконический период обращения НС	11 ч 15 мин 44 с $\pm 5$ с	11 ч 56,9 мин
Способ разделения сигналов НС	Частотный	Кодовый
Несущие частоты навигационных радиосигналов, МГц:		
$L_1$	1602,5625...1615,5	1575,42
$L_2$	1246,4375...1256,5	1227,6
Период повторения ПСП (дальномерного кода или его сегмента)	1 мс	1 мс (C/A-код) 7 дн (P-код)
Тактовая частота ПСП, МГц	0,511	1,023 (C/A-код) 10,23 (P, Y-код)
Скорость передачи цифровой информации (соответственно СИ- и D-код), бит/с	50	50
Длительность суперкадра, мин	2,5	12,5
Число кадров в суперкадре	5	25
Число строк в кадре	15	5
Система отсчётов времени	UTC(SU)	UTC(USNO)
Система отсчёта пространственных координат	ПЗ-90	WGC-84
Тип эфемерид	Геоцентрические координаты и их производные	Модифицированные кеплеровы элементы

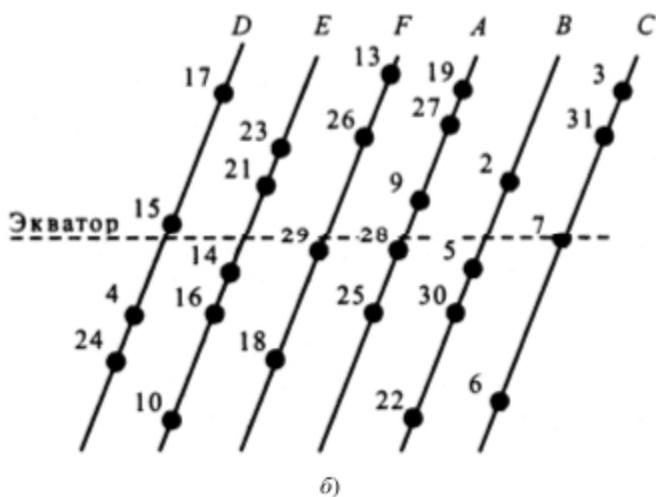


Рис. 2.44. Размещение космических навигационных аппаратов по орбитам:  
*a* – ГЛОНАСС; *б* – GPS

## 2.5. Точностные характеристики ГЛОНАСС и GPS

Параметр	Точность измерений		
	GPS (P = 0,95)		ГЛОНАСС (P = 0,997)
Горизонтальная плоскость, м	100 (72/18) 300 (P = 0,9999) 18	(C/A-код) (C/A-код) (P-, Y-код)	60 (СТ-код) (39)
Вертикальная плоскость, м	156 28	(135/34)	(C/A-код) (P-, Y-код)
Скорость, см/с	< 200 20	(C/A-код) (P-, Y-код)	15 (СТ-код)
Ускорение, мм/с <sup>2</sup>	8 < 19	(C/A-код) (C/A-код)	–
Время, мкс	0,34 0,18	(C/A-код) (P-, Y-код)	1 (СТ-код)

### 2.26.3. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СРНС

К числу потребителей СРНС второго поколения относятся наземные объекты (подвижные и неподвижные), летательные аппараты (высокодинамичные и низкодинамичные) и др. В зависимости от типа потребителя требования к точностным характеристикам, числу измеряемых координат и составляющих скорости, допустимому времени вхождения в синхронизм, массогабаритным показателям и стоимости аппаратуры потребителя колеблются в широких пределах. Для наземных и морских объектов достаточно ограничиться измерением двух координат и двух составляющих скорости. Для летательных аппаратов число измеряемых координат и составляющих скорости возрастает до трёх. Поэтому номенклатура модификаций бортовой аппаратуры весьма обширна.

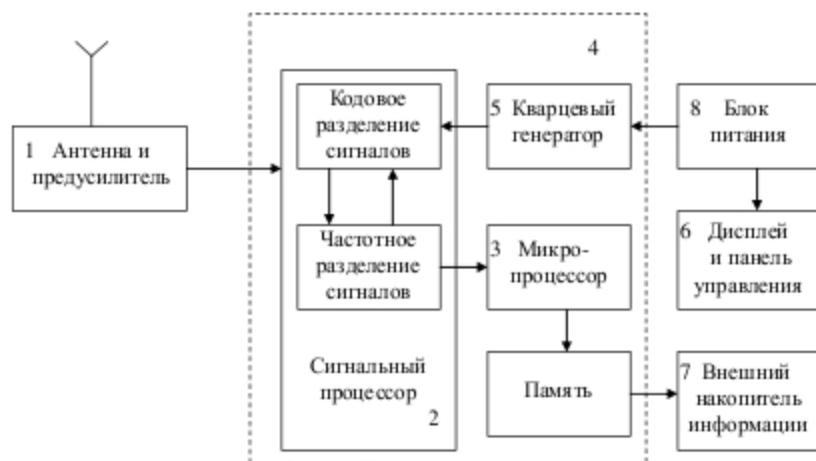
Основными задачами, решаемыми аппаратурой потребителя, являются: выбор рабочего созвездия ИСЗ, поиск и опознавание навигационных сигналов ИСЗ, введение в синхронизм систем слежения по времени запаздывания и фазе несущей частоты дальномерных сигналов, измерение времени запаздывания и доплеровского сдвига частоты, выделение и расшифровка содержания навигационного (информационного) сообщения, расчёт координат ИСЗ на момент навигационных измерений, решение навигационной задачи (определение координат).

нат и составляющих вектора скорости потребителя, поправок к сдвигу шкал времени и частот), отображение вычисленных данных на информационном табло.

Упрощённая структурная схема приёмника аппаратуры потребителя представлена на рис. 2.45.

Впервые потребительские спутниковые навигаторы, рассчитанные на совместное использование ГЛОНАСС и GPS, поступили в продажу 27 декабря 2007 года – это были спутниковые навигаторы Glospace.

Количество видимых над горизонтом в России спутников ГЛОНАСС уже, как правило, равняется четырём или более – и никогда не бывает меньше трёх. По заявлениям продавцов прибора Glospace, для определения местоположения достаточно трёх видимых спутников ГЛОНАСС, а четвёртый даёт уточнение о высоте. Отсюда нетрудно сделать вывод, что для ориентирования наземных пользователей (автомобилей, грибников, туристов и т.п.) система вполне пригодна прямо сейчас, хотя при самолётовождении ещё могут возникать определённые трудности.



**Рис. 2.45. Структурная схема приёмника навигационной системы:**

- 1 – антенна с предусилителем; 2 – идентификатор сигналов и распределение частот по каналам; 3 – микропроцессор для управления работой приёмника;
- 4 – расшифровка принятой информации, вычисление абсолютных координат и поправок в часы приёмника, выполнение фазовых измерений;
- 5 – стабильный кварцевый генератор; 6 – дисплей и панель управления;
- 7 – блок памяти для записи и хранения информации; 8 – блок питания

Объём производства составляет полторы-две тысячи навигаторов в месяц. Важная проблема ГЛОНАСС состоит в нехватке электронных карт, поэтому основные средства, выделяемые на ГЛОНАСС, пойдут именно на эту часть программы.

В России навигационную аппаратуру выпускают порядка 10 предприятий (ЗАО «КБ «НАВИС», ОАО «РИРВ», ОАО «МКБ «Компас», ФГУП «НИИМА «Прогресс», ФГУП «НИИ КП» и другие).

Смешанная ГЛОНАСС/GPS аппаратура профессионального уровня изготавливается многими производителями, в том числе зарубежными.

В качестве примера рассмотрим **спутниковую радионавигационную систему СН-3001**.

Аппаратура СН-3001 предназначена для:

- непрерывного определения координат места, времени и вектора путевой скорости объекта по радиосигналам НКА систем ГЛОНАСС и GPS/NAVSTAR по открытым ПТ и C/A кодам в любой точке земного шара, в любой момент времени, независимо от метеоусловий, решения сервисных задач;

- индикации навигационных параметров и выдачи их внешним потребителям на АРМ по стандартному интерфейсу RS232.

Основные характеристики СН-3001 представлены в табл. 2.6.

## 2.6. Основные характеристики СН-3001

Технические характеристики	Значение
Среднеквадратичная ошибка определения текущих значений навигационных параметров:	
– координат места при работе по СНС, м:	
ГЛОНАСС;	40
NAVSTAR;	30
NAVSTAR/ГЛОНАСС;	20
– по высоте, м	80
– вектора скорости при работе по СНС, м/с:	
ГЛОНАСС;	0,5
NAVSTAR;	0,1
NAVSTAR/ГЛОНАСС	0,1
Время получения координат, мин	менее 1,5...5
Время вхождения в сеть с СРНС, мин	менее 1

Технические характеристики	Значение
Вероятность получения сигнала при помехе до 24 дБ	0,9
Условия определения параметров:	
– скорость движения потребителя, км/ч	180
– угловая скорость поворотов, об/ч	5
– угол места приёма сигналов СНС, град	7



Рис. 2.46. СН-3001. Передняя панель приёмника



Рис. 2.47. Блок антенный

Аппаратура работает по всемирному координированному времени (UTS) или с учётом поправок на местное время, вводимых оператором. Время обновления данных – 1 с.

Состав аппаратуры СН-3001:

1. Приёмник (ПИ) (рис. 2.46).
2. Блок антенный (БА) (рис. 2.47).
3. Сетевой адаптер (СА).
4. Аккумуляторный блок (АБ).
5. Зарядное устройство (ЗУ).
6. Комплект кабелей.
7. Штатив.
8. Чехол.
9. Футляр.
10. ЗИП-0 (одиночный комплект).
11. Комплект эксплуатационной документации (ЭД).
12. Ящик упаковочный.

Полная масса аппаратуры в упаковке, предназначенной для транспортирования – 7 кг.

Питание аппаратуры СН-3001 осуществляется постоянным током напряжением 27 В.

Питание может осуществляться также и от сети однофазного переменного тока напряжением 110, 127...220 В и частотой 50, 400 Гц через СА. Предусмотрено питание от сети постоянного тока напряжением 10...30 В и силой тока не менее 1 А, либо от штатного аккумуляторного блока.

Аппаратура СН-3001 может быть установлена на различных объектах, например на 122-мм реактивной системе залпового огня (РСЗО) 9К51 «Град» (БМ-21) (рис. 2.48).

Например, малогабаритный навигационно-связной комплект (МНСК) «Тропа» для экипировки бойца (рис. 2.49, табл. 2.7), а для морского базирования – комплект «Бот» (рис. 2.50) предназначены для решения задач автономной навигации и сопровождения подвижных объектов (людей, автомобилей, небольших судов) в реальном масштабе времени посредством передачи информации о своём местоположении на диспетчерский пункт.

Основные решаемые задачи: навигационные (прокладка маршрутов и контроль движения по ним); обеспечение непрерывной связи в зоне действия радиостанции; измерение суммарного расстояния по ломаной линии; программно-голосовое сопровождение на маршруте; обеспечение просмотра пройденного пути; возможность навесения на карту дополнительных объектов из имеющегося списка.



Рис. 2.48. 122-мм РСЗО 9К51 «Град» (БМ-21)



Рис. 2.49. МНСК «Тропа»

## 2.7. Основные технические характеристики МНСК «Тропа»

Характеристики	Значение
Точность определения координат, м	3
Частота обновления навигационной информации, Гц	1
Время автономной работы, ч	10
Температурный режим, °С	от -10 до +70
Масса (комплект), кг	0,5 (0,8)

В комплект «Тропа» входят: портативная УКВ-радиостанция; РНТИ с GPS-антенной; карманный персональный компьютер с электронно-картографической системой; источник автономного питания на 10 ч.

Подключение РНТИ к радиостанции обеспечивает передачу информации о местоположении бойца в микрокомпьютер и в эфир на командный пункт.

В состав МНСК могут входить радиостанции различных стандартов и протоколов, что позволяет вести переговоры и передавать данные по КВ, сотовой связи, спутниковой связи «Глобалстар» и УКВ, включая транкинговую связь.



Рис. 2.50. МНСК «Бот»



Рис. 2.51. МНАП «Грот-М»

Морской комплект «Бот», как и сухопутный, может размещаться в сумке-чехле или входить в состав спасательного жилета.

Ещё одна разработка – малогабаритная навигационная аппаратура потребителя ГЛОНАСС/GPS «Грот-М» 14Ц822 (рис. 2.51).

МНАП 14Ц822 предназначена для определения координат местоположения, путевой скорости и курса движения потребителя по сигналам космических навигационных систем (КНС) ГЛОНАСС и GPS.

Состав:

- навигационный приёмник со встроенной навигационной антенной;
- внешняя навигационная антенна;
- сетевой адаптер питания;
- зарядное устройство;
- запасной блок аккумуляторов;
- чехол;
- документация.

Основные характеристики аппаратуры 14Ц822 представлены в табл. 2.8.

## 2.8. Основные технические характеристики МНАП «Грот-М»

Характеристики	Значения
1. Диапазон частот принимаемых каналов, ГГц	1,6
2. Тип используемых спутниковых сигналов	ПТ и ВТ (ГЛОНАСС) и С/А( GPS)
3. Число независимых (параллельных) каналов приёма	12
4. Время первого определения: – холодный старт, мин; – тёплый старт, с	3 25
5. Частота обновления координат, с	1
6. Системы координат	ПЗ-90, WGS-84, СК-42, СК-95 (геодезические и в проекциях Гаусса- Крюгера, Балтийская система высот)
7. Предельные погрешности определений при работе по ГЛОНАСС на стоянке (в движении): – координат местоположения, м; – составляющих вектора скорости, с	30 (40) 0,05
8. Реализуемые функции: – выбор созвездия НКА ГЛОНАСС и/или GPS автоматически или по заданию оператора; – автоматический приём служебной информации, передаваемой с НКА; – работа по НКА ГЛОНАСС и/или GPS; – автоматический расчёт, индикация на табло и выдача внешним потребителям координат местоположения, скорости и значений текущего времени; – пакет специализированных сервисных задач	
9. Тип интерфейса обмена информацией с внешними потребителями	2 порта RS-232

Характеристики	Значения
10. Приём и выдача дифференциальных поправок	
11. Время непрерывной работы от одного блока аккумуляторов, ч	8
12. Источники электропитания	Блок аккумуляторов; сетевой адаптер
13. Потребляемая мощность, Вт	2
14. Масса МНАП с блоком аккумуляторов, кг	0,6
15. Габаритные размеры, мм	223 × 70 × 35

В настоящее время погрешность определения координат составляет порядка 50 м при использовании КА «Глонасс» и порядка 15 м для КА «Глонасс-М» с улучшенным бортовым стандартом частоты. К 2010 году планируется обеспечить точность до 5 м.

Точность американской системы (GPS) при наземных уточняющих сигналах может достигать трёх метров.

## **2.27. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАЗРЕШЕНИИ И РАСПОЗНАВАНИИ ОБЪЕКТОВ И СИГНАЛОВ**

Разрешение и распознавание радиолокационных объектов и сигналов относятся к числу основных задач радиолокации. Эти задачи в той или иной степени приходится решать и в радионавигации, и в радиосвязи. Так, например, некоторые задачи поиска импульсных сигналов в радионавигационных системах сводятся к распознаванию сигналов. В радиосвязи приходится разделять многолучевые сигналы, образующиеся за счёт многомодового распределения радиоволн на трассе передатчик–приёмник.

Так как приём сигналов осуществляется на фоне случайных помех и, кроме того, сами сигналы флуктуируют, то, следовательно, задачи разрешения и распознавания являются статистическими.

### **2.27.1. РАЗРЕШЕНИЕ СИГНАЛОВ**

Задача разрешения сводится к обнаружению и измерению координат и параметров движения объекта при наличии в исследуемом пространстве других объектов. Последние могут быть близко расположенными радиолокационными объектами (самолёты, корабли и т.п.),

для которых также требуется выполнение операций обнаружения и измерения координат, или могут быть маскирующими объектами естественного (дождь, земная поверхность) либо искусственного происхождения (ложные цели, дипольные отражатели), затрудняющими выполнение задач, стоящих перед РЛС.

Способность системы разделять обнаруживать и измерять координаты и параметры движения близко расположенных объектов называют *разрешающей способностью*. Это одна из важнейших тактических характеристик РЛС.

Разрешение объектов сводится, в конечном счёте, к разрешению принимаемых радиолокационных сигналов, а разрешающая способность по той или иной координате будет определяться разрешающей способностью по соответствующему параметру сигнала (времени запаздывания, частоте, направлению прихода радиоволн) – так называемому *параметру разрешения*. Разрешающая способность зависит от формы принимаемых сигналов, ширины их спектра, протяжённости сигналов по параметру разрешения на выходе приёмника РЛС. На рисунке 2.52 изображены огибающие сигналов  $x(\theta)$  на выходе приёмника РЛС, имеющие различную протяжённость по параметру разрешения  $\theta$ . Как видно, при одинаковом значении  $\Delta\theta$  «узкие» сигналы (рис. 2.52, б) разделяются лучше, а разрешающая способность будет выше.

Разрешающая способность зависит и от отношения энергии принимаемых сигналов к спектральной плотности шума; она, очевидно, возрастает при увеличении отношения сигнал/шум.

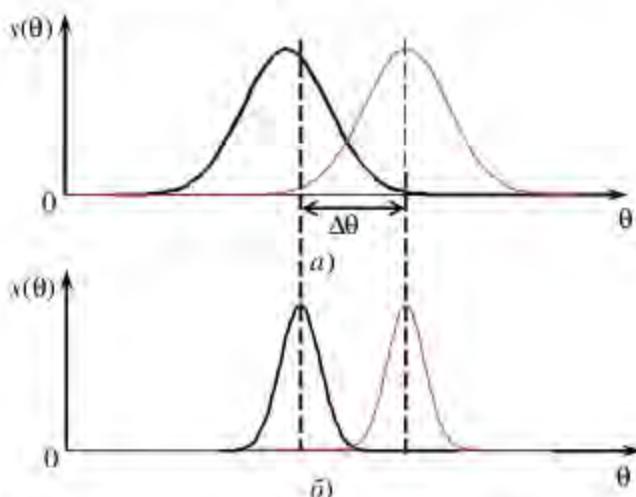


Рис. 2.52. Огибающие сигналов на выходе приёмника РЛС

Различают *потенциальную* и *реальную разрешающую способности*. *Потенциальной* называется наивысшая разрешающая способность, которая может быть достигнута лишь при оптимальной обработке сигналов. В реальных условиях разрешающая способность РЛС всегда ниже потенциальной.

## 2.27.2. РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ И СИГНАЛОВ

*Распознавание* радиолокационных объектов состоит в установлении принадлежности объектов к определённым классам. Оно сводится к распознаванию радиолокационных сигналов, несущих информацию об объектах и принимаемых на фоне шумов.

Процесс распознавания включает в себя следующие этапы:

- получение данных радиолокационного наблюдения;
- анализ этих данных и извлечение из них признаков, отличающих объекты и, соответственно, радиолокационные сигналы друг от друга;
- классификация наблюдаемых сигналов в соответствии с тем или иным алгоритмом, определяемым принятой мерой близости полученных (в результате обработки сигналов) и исходных признаков объектов.

Надёжность распознавания в значительной мере зависит от выбора системы признаков, по которым классифицируются объекты. Этот выбор определяется как характеристиками самих объектов, так и характеристиками *зондирующих сигналов*, т.е. сигналов, излученных в пространство.

Для классификации могут быть использованы *кинематические признаки*, а также признаки, определяемые размером, формой и материалом отражающей поверхности.

К кинематическим признакам относятся параметры поступательного движения объекта (скорость, ускорение), параметры вращательного движения объекта или его отдельных частей, а также признаки, связанные с особенностями траекторий объектов – траекторные признаки. Эти признаки проявляются в виде соответствующих характеристик эхосигналов (при активной радиолокации), по которым и осуществляется классификация. Например, объекты, движущиеся с различными скоростями, можно распознать по доплеровскому смещению частоты принимаемых сигналов. Вращающиеся части объектов (лопасти реактивных турбин, винты) создают модуляцию (амплитудную и частотную) эхосигналов, которую можно использовать для классификации объектов. Траекторные признаки (баллистическая траектория, траектория маневрирующего объекта и др.) проявляются при многократных наблюдениях в результате вторичной обработки радиолокационной информации.

Признаки, связанные с размером, формой и материалом отражающей поверхности, определяют интенсивность, форму, вид флуктуаций и поляризационные характеристики эхосигнала. Так, сферический объект, являясь симметричным отражателем, создаёт нефлуктуирующий эхосигнал, не обладающий чётко выраженными поляризационными свойствами.

При выборе признаков классификации следует учитывать и характеристики зондирующих сигналов, в частности, разрешающую способность при тех или иных сигналах. Так, скорость движения объектов можно выбирать в качестве признака классификации только тогда, когда разрешающая способность по частоте достаточна для разрешения эхосигналов. Если, например, объекты различной конфигурации по числу и расположению *блестящих точек* (т.е. точек на поверхности объекта, для которых нормаль к поверхности совпадает с направлением на РЛС), то необходимо использовать зондирующие сигналы, при которых разрешающая способность по времени запаздывания достаточна для разрешения этих точек. Тогда расположение импульсов по оси времени соответствует распределению блестящих точек на объекте. В результате указанные радиоимпульсы создают *радиолокационный портрет объекта*, сравнивая который с заранее полученными радиолокационными портретами известных (эталонных) объектов, можно решить задачу распознавания.

Объекты можно классифицировать как по одиночным признакам, так и по их совокупности. В последнем случае увеличивается надёжность распознавания, однако при этом усложняется распознающее устройство.

Решение задачи распознавания существенно упрощается, если требуется классифицировать объекты лишь на «свои» и «чужие». В этом случае применяют РЛС с активным ответом, использующие запросно-ответные устройства. Сигналы этих устройств кодируются соответствующим образом, что позволяет не только разделить наблюдаемые объекты на «свои» и «чужие», но и провести подробную классификацию своих объектов (определить тип самолёта, остаток топлива, исправность оборудования и т.д.). Кодирование сигналов может осуществляться путём изменения по тому или иному закону несущей частоты, амплитуды импульсов, длительности импульсов, числа импульсов в пачке, временных характеристик между импульсами. Наилучшие технические характеристики аппаратуры распознавания достигаются при использовании комбинированных кодов, когда одновременно кодируются несколько из указанных параметров.

Как ясно из сказанного, задачи разрешения и распознавания объектов (сигналов) связаны между собой. Так, разрешающая способность влияет на выбор признаков классификации и в конечном счёте сказыва-

вается на надёжности распознавания. При распознавании близко расположенных объектов вначале решается задача их разрешения. Особенно тесная взаимосвязь разрешения и распознавания сигналов проявляется при статистической оптимизации этих процедур.

## 2.28. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗРЕШЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ СИГНАЛОВ

Так как приём сигналов осуществляется на фоне случайных помех и, кроме того, сами сигналы, как правило, флуктуируют, то задачи разрешения и распознавания сигналов являются статистическими. Поэтому оптимальное решение этих задач может быть получено на основе теории оптимального приёма сигналов.

Рассмотрим случай разрешения и распознавания детерминированных сигналов.

Пусть наблюдаемый процесс имеет вид:

$$\xi(t) = \lambda_1 s_1(t) + \lambda_2 s_2(t) + n(t), \quad t \in [0, T], \quad (2.49)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – независимые случайные величины, которые могут принимать значения 0 и 1;  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  – детерминированные сигналы;  $n(t)$  – гауссовский белый шум с математическим ожиданием  $\langle n(t) \rangle = 0$  и корреляционной функцией  $\langle n_1(t)n_2(t) \rangle = \frac{N_0}{2} \delta(t_2 - t_1)$ .

При разрешении двух сигналов возможны следующие четыре ситуации:

- наличие в смеси  $\xi(t)$  обоих сигналов и шума ( $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$ );
- наличие в смеси  $\xi(t)$  сигнала  $s_1(t)$  и шума ( $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0$ );
- наличие в смеси  $\xi(t)$  сигнала  $s_2(t)$  и шума ( $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1$ );
- наличие в смеси  $\xi(t)$  одного шума ( $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$ ).

Рассматриваемую задачу разрешения двух детерминированных сигналов можно также интерпретировать как статистическую задачу распознавания четырёх возможных ситуаций.

Задача оптимального устройства разрешения сигналов состоит в оценке параметров  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , обеспечивающей максимум функции правдоподобия.

В рассматриваемом случае функцию правдоподобия можно представить в виде

$$\Lambda(\lambda_1, \lambda_2) = \exp \left\{ -\frac{1}{N_0} \int_0^T [x(t) - s(t, \lambda_1, \lambda_2)]^2 dt \right\}, \quad (2.50)$$

где

$$s(t, \lambda_1, \lambda_2) = \lambda_1 s_1(t) + \lambda_2 s_2(t); \quad (2.51)$$

$x(t)$  – реализация случайного процесса  $\xi(t)$ .

Максимизация функции правдоподобия (2.50) сводится к определению минимального значения интеграла в показателе экспоненты. Предположим, что энергии сигналов  $s_1$  и  $s_2$  одинаковы и равны  $E$ . Тогда с учётом выражения (2.51) запишем

$$y = \int_0^T x^2(t) dt - 2\lambda_1 \int_0^T x(t) s_1(t) dt - 2\lambda_2 \int_0^T x(t) s_2(t) dt + \lambda_1^2 E + 2\lambda_1 \lambda_2 r_s E + \lambda_2^2 E,$$

где  $r_s = \frac{1}{E} \int_0^T s_1(t) s_2(t) dt$  – коэффициент взаимной корреляции между сигналами  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$ .

Определим значения  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , при которых обеспечивается минимум величины достаточной статистики  $y$ . Оценки  $\hat{\lambda}_1$  и  $\hat{\lambda}_2$  определяются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \left. \frac{dy}{d\lambda_1} \right|_{\lambda=\hat{\lambda}} = \hat{\lambda}_1 E \int_0^T x(t) s_1(t) dt + r_s \hat{\lambda}_2 E = 0; \\ \left. \frac{dy}{d\lambda_2} \right|_{\lambda=\hat{\lambda}} = \hat{\lambda}_2 E \int_0^T x(t) s_2(t) dt + r_s \hat{\lambda}_1 E = 0. \end{cases} \quad (2.52)$$

Решив систему уравнений (2.52), получаем значения оценок  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , приводящих к минимуму достаточную статистику  $y$  ( $y = y_{\min}$ ):

$$\begin{cases} \hat{\lambda}_1 = (E(1-r_s^2))^{-1} \int_0^T x(t)(s_1(t) - r_s s_2(t)) dt; \\ \hat{\lambda}_2 = (E(1-r_s^2))^{-1} \int_0^T x(t)(s_2(t) - r_s s_1(t)) dt. \end{cases} \quad (2.53)$$

Оптимальное устройство разрешения, реализующее алгоритм (2.53), состоит из двух каналов, включающих согласованные фильтры (рис. 2.53). Импульсные характеристики согласованных фильтров имеют вид:

$$\begin{aligned} h_{\text{сф1}}(t) &= C (s_1(T-t) - r_s s_2(T-t) (E(1-r_s^2))^{-1}), \\ h_{\text{сф2}}(t) &= C (s_2(T-t) - r_s s_1(T-t) (E(1-r_s^2))^{-1}), \end{aligned} \quad (2.54)$$

где  $C$  – постоянный коэффициент. Возможна также реализация устройства разрешения на основе корреляторов.

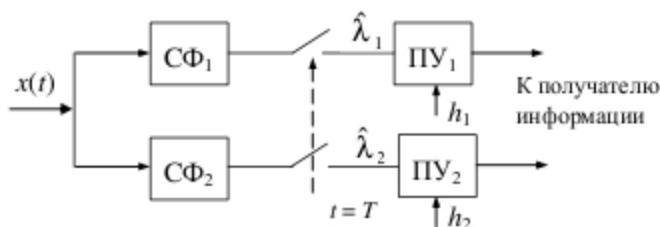


Рис. 2.53. Оптимальное устройство разрешения

В отличие от обнаружителя сигнала с полностью известными параметрами импульсные характеристики согласованных фильтров в устройстве разрешения имеют более сложную зависимость от сигналов  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$ . При отсутствии корреляции между сигналами ( $r_s = 0$ ) каждый из каналов превращается в оптимальный обнаружитель одиночного типа.

Процесс разрешения осуществляется по наблюдениям выходов обоих каналов (рис. 2.53): при превышении порога только в канале  $\lambda_1$  принимается решение, что имеется один сигнал  $s_1(t)$ ; превышение порога в канале  $\lambda_2$  указывает на то, что имеется только сигнал  $s_2(t)$ ; превышение порогов одновременно в обоих каналах свидетельствует о присутствии обоих сигналов.

Для двух сигналов, имеющих случайные независимые амплитуды и случайную разность фаз, каждый из каналов оптимального устройства разрешения включает в себя: согласованный фильтр (СФ), детектор огибающей (ДО) и пороговое устройство (ПУ). На рисунке 2.54 изображена структурная схема устройства разрешения двух сигналов со случайными параметрами.

Надёжность разрешения сигналов со случайными параметрами существенно уступает надёжности разрешения детерминированных сигналов. Однако, на практике реализовать разрешение сигналов по схеме на рис. 2.54 оказывается проще, чем для случая полностью известных радиосигналов. Это обусловлено простотой реализации согласованных фильтров на видеочастоте.

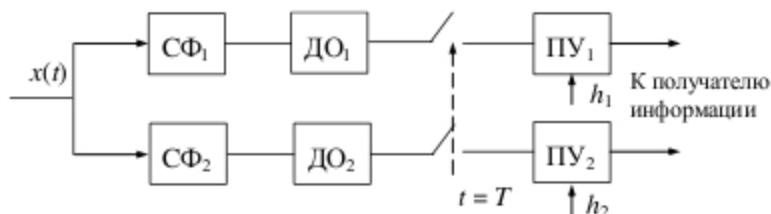


Рис. 2.54. Структурная схема устройства разрешения двух сигналов со случайными параметрами

## 2.29. ОЦЕНКА РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

Рассмотрим оценки потенциальной разрешающей способности по дальности, скорости и угловым координатам целей. Информация об этих параметрах целей содержится соответственно в задержке  $\tau$  сигнала, в доплеровском сдвиге частоты  $\Omega$  и в направлении прихода радиоволны  $\varphi$ . Для оценки потенциальной разрешающей способности будет использован упрощённый метод по ширине выходного сигнала (сигнальной функции) оптимального фильтра при пренебрежении мешающим шумом. Этот метод даёт удобные для инженерной оценки формулы, приводящие к результатам, близким к действительным, и является эффективным при сравнении сигналов различного вида с точки зрения их разрешения. Однако при этом подходе не раскрывается статистический характер разрешающей способности, что не следует забывать при использовании такой оценки.

### 2.29.1. СВЯЗЬ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ С ФУНКЦИЕЙ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ

Обычно разрешение целей осуществляется на этапе, когда отношение энергий сигналов и шума достаточно велико и сигналы уверенно обнаруживаются.

При таких условиях можно пренебречь шумовой составляющей выходного напряжения. Если приёмник осуществляет оптимальную обработку, то его выходным эффектом при принятом допущении является сигнальная функция

$$S(\tau, \Omega) = \frac{2}{N_0} \int_0^T s(t, \omega) s(t - \tau, \omega + \Omega) dt, \quad (2.55)$$

где  $s(\tau, \Omega)$  – принимаемый сигнал, являющийся функцией времени  $t$  и частоты  $\omega$ ;  $s(t - \tau, \omega + \Omega)$  – опорный сигнал;  $\tau, \Omega$  – сдвиги опорного сигнала относительно принимаемого по времени и частоте (возникают из-за незнания параметров принимаемого сигнала, имеют любой знак);  $T$  – интервал наблюдения, в пределах которого полностью находятся принимаемый и опорный сигналы. Интеграл в (2.55) при  $\tau = 0$  и  $\Omega = 0$  равен энергии сигнала  $E$ , поэтому выходное напряжение приёмника можно представить в виде:

$$S(\tau, \Omega) = q^2 k^0(\tau, \Omega),$$

где  $q^2 = 2E/N_0$ ,

$$k^0(\tau, \Omega) = \frac{1}{E} \int_0^T s(t, \omega) s(t - \tau, \omega + \Omega) dt. \quad (2.56)$$

Выражение (2.56) принято называть нормированной по энергии автокорреляционной функцией входного сигнала. Этот термин введён в теории разрешения по аналогии с обычной корреляционной функцией по времени. Таким образом, при  $q^2 \gg 1$  и оптимальной фильтрации выходной сигнал с точностью до постоянного множителя  $q^2$  равен нормированной автокорреляционной функции входного сигнала.

Если  $s(t, \omega)$  и  $s(t - \tau, \omega + \Omega)$  представить в комплексной форме (которая в данном случае является более удобной из-за простоты последующих математических выкладок), то автокорреляционная функция примет вид

$$k^0(\tau, \Omega) = \frac{1}{E} \operatorname{Re} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} S(t, \omega) S^*(t - \tau, \omega + \Omega) dt \right]. \quad (2.57)$$

Здесь  $\operatorname{Re}$  – символ, указывающий, что от выражения в прямых скобках надо взять лишь действительную часть;

$$\dot{S}(t, \omega) = \dot{A}(t) \exp(j\omega t) \quad (2.58)$$

– входной сигнал, записанный в комплексной форме;

$$\dot{S}^*(t - \tau, \omega + \Omega) = \dot{A}^*(t - \tau) \exp[j(\omega + \Omega)(\tau - t)] \quad (2.59)$$

– сопряжённый входному опорный сигнал, сдвинутый во времени и по частоте;  $\dot{A}(t)$  и  $\dot{A}^*(t - \tau)$  – комплексные амплитуды входного и сопряжённого опорного сигналов.

Подставляя (2.58) и (2.59) в (2.57), получим

$$k^0(\tau, \Omega) = \frac{1}{E} \operatorname{Re} \left[ \exp(j(\omega + \Omega)\tau) \int_{-\infty}^{\infty} \dot{A}(t) \dot{A}^*(t - \tau) \exp(-j\Omega t) dt \right]. \quad (2.60)$$

Действительная часть интеграла даёт автокорреляционную функцию огибающей входного сигнала, а экспоненциальный множитель перед интегралом характеризует высокочастотное заполнение. Обычно высокочастотное заполнение не используется для получения информации, а анализу подвергается только огибающая сигнала, получаемая путём детектирования и пропорциональная функции неопределённости

$$\rho(\tau, \Omega) = \frac{1}{E} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \dot{A}(t) \dot{A}^*(t - \tau) \exp(-j\Omega t) dt \right| \quad (2.61)$$

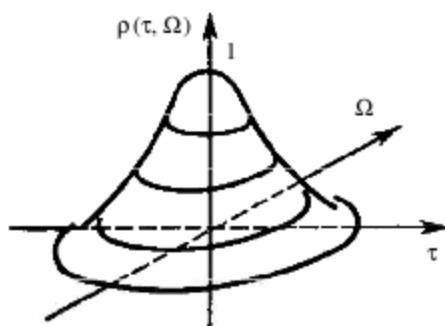


Рис. 2.55. Тело неопределённости для сигнала с гауссовой огибающей

при линейном детекторе, либо  $\rho^2(\tau, \Omega)$  при квадратичном детекторе. Поэтому разрешающая способность по времени запаздывания и частоте при достаточно большом отношении сигнал/шум будет определяться «шириной» функции неопределённости на уровне 0,5 по осям  $\tau$  и  $\Omega$  соответственно. Разрешающая способность тем выше, чем уже функция неопределённости по соответствующей оси.

Функция неопределённости  $\rho(\tau, \Omega)$  описывает некоторую поверхность, которая над плоскостью осей  $\tau$  и  $\Omega$  образует пространственную фигуру, называемую *телом неопределённости*. На рисунке 2.55 изображено тело неопределённости для сигнала с гауссовой огибающей. Проекция сечения тел неопределённости горизонтальными плоскостями на плоскость  $\tau, \Omega$  называют *диаграммами неопределённости*.

## 2.29.2. РАЗРЕШЕНИЕ ПО ВРЕМЕНИ ЗАПАЗДЫВАНИЯ

Проведём оценку потенциальной разрешающей способности по дальности. Из выражения (2.61) при  $\Omega = 0$ , т.е. когда опорный сигнал имеет одинаковую частоту с принимаемым и отличается только сдвигом по времени прихода, получим сечение функции неопределённости вертикальной плоскостью, для которой  $\Omega = 0$ :

$$\rho(\tau, 0) = \frac{1}{E} \left| \int_0^T \dot{A}(t) \dot{A}^*(t - \tau) dt \right|. \quad (2.62)$$

Это выражение и будет служить исходным для анализа сигналов конкретного вида.

Определим потенциальную разрешающую способность по дальности при входном сигнале в виде импульса длительностью  $\tau_1$  с прямоугольной формой огибающей. В этом случае (рис. 2.56, а – в)

$$\dot{A}(t) = A \text{ при } 0 \leq t \leq \tau_n, \quad (2.63)$$

$$\dot{A}(t-\tau) = \begin{cases} A \text{ при } -\tau \leq t < \tau_n - \tau \text{ и } \tau < 0; \\ A \text{ при } \tau \leq t < \tau_n + \tau \text{ и } \tau > 0, \end{cases} \quad (2.64)$$

где  $|\tau| \leq \tau_n$ . Подставляя значения (2.63) и (2.64) в формулу (2.62), получим после интегрирования

$$\rho(\tau, 0) = \begin{cases} 1 - |\tau|/\tau_n \text{ при } |\tau| \leq \tau_n; \\ 0 \text{ при } |\tau| > \tau_n, \end{cases} \quad (2.65)$$

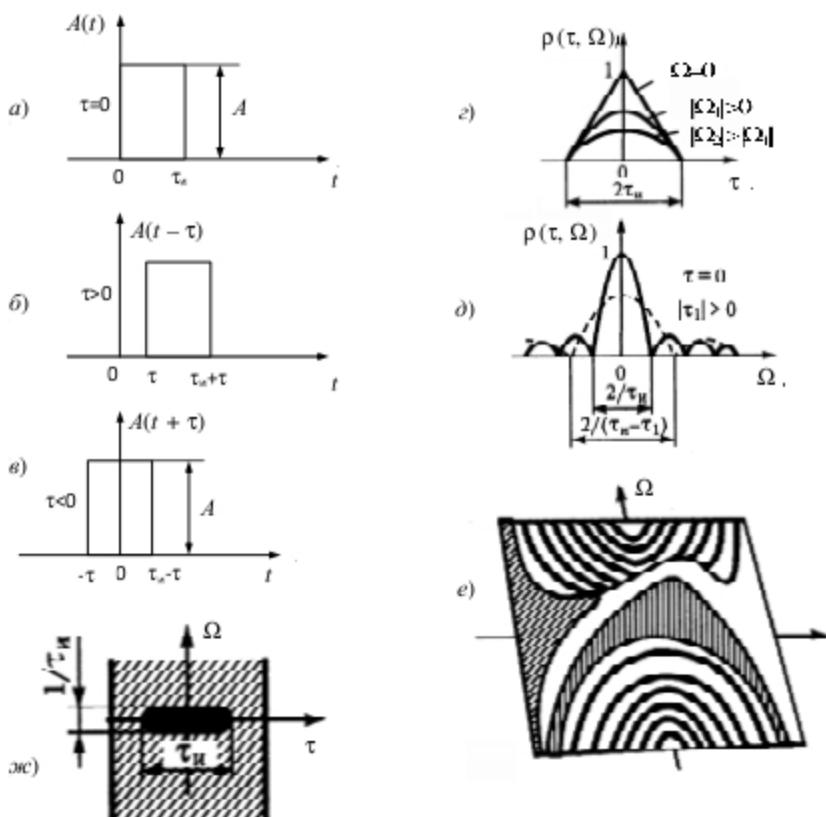


Рис. 2.56. К определению потенциальной разрешающей способности по дальности с прямоугольной формой огибающей

Графически эта зависимость в виде различных сечений тела неопределённости изображена на рис. 2.56,  $z - ж$ . Найдём ширину функции  $\rho(\tau)$  на уровне 0,5:

$$\rho(\tau_{0,5}, 0) = 1 - \frac{|\tau_{0,5}|}{\tau_n} = 0,5,$$

отсюда  $|\tau_{0,5}| = 0,5\tau_n$  и ширина

$$2\tau_{0,5} = 0,5\tau_n. \quad (2.66)$$

Учитывая формулу, связывающую дальность и время запаздывания сигнала, получим выражение для потенциальной разрешающей способности по дальности для сигнала в виде импульса с прямоугольной огибающей

$$\delta(R)_{\text{пот}} = \frac{c}{2} 2|\tau_{0,5}| = \frac{c\tau_n}{2}. \quad (2.67)$$

Если принять ширину спектра сигнала  $\Delta f_c = 1/\tau_n$ , то

$$\delta(R)_{\text{пот}} = 0,5c / \Delta f_c. \quad (2.68)$$

Аналогичным образом можно показать, что для сигнала в виде импульса с гауссовой (колокольной) формой огибающей  $\dot{S}(t) = A_0 \exp(-\gamma^2 t^2) \exp(j\omega t)$

$$\rho(\tau, 0) = \exp(-0,5\gamma^2 \tau^2), \quad (2.69)$$

где  $\gamma = \Delta f_c = \sqrt{\pi}/\tau_c$  – коэффициент, характеризующий скорость изменения огибающей и равный эффективной ширине спектра сигнала  $\Delta f_c$ ;  $\tau_c$  – ширина импульса сигнала, отсчитываемая на уровне 0,46.

Ширина  $\rho(\tau, 0)$  на уровне 0,5 равна

$$2|\tau_{0,5}| = 2\sqrt{2 \ln 2} / \gamma = 1,3\tau_n.$$

Поэтому величина потенциальной разрешающей способности по дальности

$$\delta(R)_{\text{пот}} = 0,66c\tau_n = 1,15c / \Delta f_c. \quad (2.70)$$

Из анализа (2.67) и (2.70) следует, что разрешающую способность по дальности можно повысить путём уменьшения длительности импульсов. Однако такой путь приводит к уменьшению энергии сигналов, следовательно, и к уменьшению дальности действия РЛС.

### 2.29.3 . РАЗРЕШЕНИЕ ПО СКОРОСТИ И УГЛОВЫМ КООРДИНАТАМ

Рассмотрим теперь разрешающую способность по скорости. Из выражения (2.61), считая, что сигналы приходят одновременно ( $\tau = 0$ ), находим, что сечение функции неопределённости вертикальной плоскостью, для которой  $\tau = 0$ :

$$\rho(0, \Omega) = \frac{1}{E} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \dot{A}(t) \dot{A}^*(t) \exp(-j\Omega t) dt \right|. \quad (2.71)$$

Для сигнала в виде импульса с прямоугольной огибающей модуль автокорреляционной функции по частоте имеет вид

$$\rho(0, \Omega) = \frac{\sin(0,5\Omega\tau_n)}{0,5\Omega\tau_n}. \quad (2.72)$$

Его ширина на уровне 0,5 равна  $2(\Omega_{0,5}) = 7,6/\tau_n$ .

Следовательно, потенциальная разрешающая способность по скорости

$$\delta(V_p)_{\text{пот}} = 3,8c/\omega\tau_n \cong 0,6\lambda/\tau_n. \quad (2.73)$$

Для сигнала в виде импульса гауссовой формы соответственно имеем

$$\rho(0, \Omega) = \exp(-\Omega^2/8\gamma^2), \quad (2.74)$$

$$2(\Omega_{0,5}) = 8,3/\tau_n,$$

$$\delta(V_p)_{\text{пот}} = 4,15c/\omega\tau_n = 0,66\lambda/\tau_n. \quad (2.75)$$

Выражения (2.73) и (2.75) показывают, что при немодулированных сигналах потенциальная разрешающая способность по скорости обратно пропорциональна длительности сигнала и может быть улучшена при её увеличении.

Потенциальная разрешающая способность по угловым координатам для обзорной РЛС рассматривается аналогично разрешению по дальности и при аппроксимации диаграммы направленности гауссовой кривой равна

$$\delta(\varphi)_{\text{пот}} = 1,3\theta_{0,5}, \quad (2.76)$$

а при прямоугольной аппроксимации

$$\delta(\varphi)_{\text{пот}} = \theta_{0,5}, \quad (2.77)$$

где  $\theta_{0,5}$  – ширина диаграммы направленности антенны в плоскости разрешения на уровне 0,5.

#### 2.29.4. СЛОЖНЫЕ СИГНАЛЫ

Для сложных сигналов произведение ширины спектра  $\Delta f$  на длительность  $\Delta t$ , т.е. база сигнала  $B$ , значительно больше единицы

$$B = \Delta f \Delta t \gg 1. \quad (2.78)$$

Для простых сигналов

$$\Delta f \Delta t = 1. \quad (2.79)$$

В частности, прямоугольный радиоимпульс с постоянной частотой заполнения относится к классу простых сигналов, так как для него  $\Delta f = 1 / \tau_n$ ,  $\Delta t = \tau_n$  и, следовательно, выполняется условие (2.79).

Примером сложного сигнала является линейно-частотно-модулированные (ЛЧМ) импульсные сигналы, несущая частота которых

$$f(t) = f_0 + (\Delta f_d / \tau_n) t, \quad 0 \leq t \leq \tau_n, \quad (2.80)$$

где  $f_0$  – начальное значение частоты;  $\Delta f_d$  – девиация частоты;  $\tau_n$  – длительность импульса (рис. 2.57).

Линейному закону изменения частоты (2.80) соответствует квадратичный закон изменения фазы ЛЧМ сигнала:

$$\phi(t) = 2\pi \int_0^t f(\tau) d\tau = 2\pi f_0 t + \frac{\pi \Delta f_d}{\tau_n} t^2.$$

Для прямоугольного ЛЧМ импульса (рис. 2.57) комплексная огибающая

$$\dot{A}(t) = \begin{cases} \exp(j\pi \Delta f_d t^2 / \tau_n), & |t| \leq \tau_n / 2; \\ 0, & |t| > \tau_n / 2. \end{cases} \quad (2.81)$$

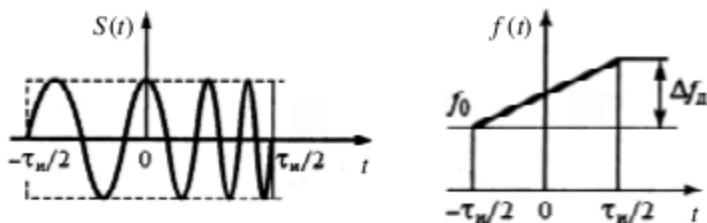


Рис. 2.57. ЛЧМ импульсного сигнала

Подставляя (2.81) в соотношение (2.61) с учётом того, что  $\Omega = 2\pi$ , получаем

$$\rho(\tau, f) = \begin{cases} \left| \frac{\sin [\pi(f + f_d(\tau/\tau_n))](\tau_n - |\tau|)}{\pi(f + f_d(\tau/\tau_n))\tau_n} \right|, & |\tau_n| \leq \tau_n; \\ 0, & |\tau| > \tau_n. \end{cases} \quad (2.82)$$

Эта функция описывает рельеф тела неопределённости прямоугольного ЛЧМ импульса, сечение которого вертикальной плоскостью  $f = 0$  (рис. 2.58, а, сплошная линия) представляет собой огибающую ЛЧМ импульса на выходе согласованного фильтра при отсутствии расстройки по частоте. Для сравнения штриховой линией показана огибающая прямоугольного радиоимпульса с постоянной частотой заполнения и длительностью  $\tau_n$  на выходе своего согласованного фильтра.

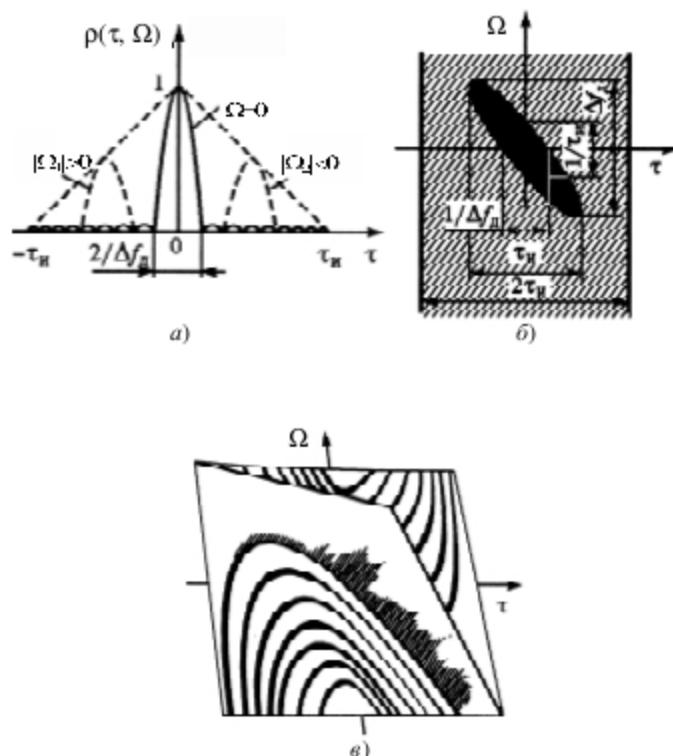
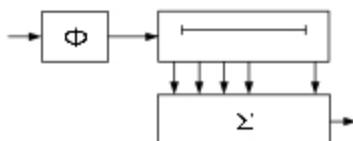


Рис. 2.58. Рельеф тела неопределённости прямоугольного ЛЧМ импульса



**Рис. 2.59.** Упрощённая структурная схема фильтра сжатия

При прохождении ЛЧМ импульса через согласованный фильтр происходит его сжатие по времени. Если на входе фильтра импульс имел длительность  $\tau_{\text{вх}} = \tau_{\text{н}}$ , то на выходе  $\tau_{\text{вых}} = 1,2 / \Delta f_g$  (отчёт по уровню 0,5). Следовательно, коэффициент сжатия

$$K_{\text{сж}} = \tau_{\text{вх}} / \tau_{\text{вых}} = \tau_{\text{н}} \Delta f_g / 1,2. \quad (2.83)$$

Как ясно из рисунка 2.58, б, в и формулы (2.83), при  $f = 0$  разрешающая способность по времени запаздывания

$$2|f_{0,5}| = 1,2 / \Delta f_d = \tau_{\text{н}} / K_{\text{сж}}. \quad (2.84)$$

По сравнению с простым радиоимпульсом она возросла в  $K_{\text{сж}}$  раз. Что касается разрешающей способности по частоте, то она, как следует из (2.82) при  $\tau = 0$ , осталась прежней (как у простого импульса)

$$2|f_{0,5}| = 1,2 / \tau_{\text{н}}. \quad (2.85)$$

На рисунке 2.59 изображена упрощённая структурная схема фильтра сжатия.

### 2.30. МЕТОДЫ РАДИОПРОТИВОДЕЙСТВИЯ

*Радиопротиводействием* (РП, радиоэлектронной борьбой РЭБ) называют совокупность технических мероприятий, направленных на снижение эффективности работы радиоэлектронных средств противника. По своему характеру РП может быть пассивным и активным. Примерами пассивного противодействия могут служить применение противорадиолокационных покрытий, уменьшение ЭПР за счёт выбора соответствующей формы объектов, разработка антенн с малым уровнем обратного излучения.

Составными частями РЭБ являются радиоэлектронное подавление, радиоэлектронная защита и мероприятия по обеспечению РЭБ.

*Радиоэлектронное подавление* (РЭП) представляет собой мероприятия и действия, проводимые войсками (силами) по подавляющему и дезинформирующему воздействию на РЭС и системы противника энергией электромагнитных (акустических) излучений.

Радиодезинформация в системе РЭП проводится для введения противника в заблуждение путём ложной работы РЭС своих войск (сил), изменения режимов их работы и имитации работы РЭС противоборствующей стороны. Основными способами радиодезинформации считаются: показ ложных демаскирующих признаков РЭС, объектов и обстановки; преднамеренное вхождение в радиосети и радионаправления противника, передача в них ложных информации и команд, искажение сведений, сигналов и позывных; повышение интенсивности работы РЭС на второстепенных направлениях при сохранении режима работы на главном.

Радиодезинформация может быть успешной только в том случае, если она проводится в сочетании с такими мероприятиями по введению противника в заблуждение, как ложные агентурные данные, распространение необоснованных слухов, имитация переброски войск, загрузка дорожной сети, подвоз или вывоз грузов, сооружение ложных складов, демонстрация занятия войсками исходного положения, соответствующая активность авиации и т.п.

*Радиоэлектронная защита (РЭЗ)* – это комплекс мероприятий по обеспечению эффективного и устойчивого функционирования РЭС в условиях воздействия на них средств РЭП противника. Она достигается скрыванием РЭС от радиоэлектронной разведки (РЭР) и защитой их от радиоэлектронного подавления, а также контролем за излучениями РЭС своих войск (сил) и систем оружия.

*Мероприятия РЭБ*, проводимые в сочетании с огнём и манёвром, считаются существенным фактором повышения боевой мощи войск (сил) и оружия. Их разделяют на наступательные (активные) и оборонительные (защитные, пассивные).

## **2.31. КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ПОМЕХ**

Как отмечалось ранее (см. §2.11), по своему происхождению помехи могут быть естественными, взаимными и искусственными.

*Естественными* являются помехи природного происхождения. Например, естественные пассивные помехи образуются в результате переотражений от холмов, гор, облаков и т.д. Естественные активные помехи создаются излучениями Солнца и других внеземных источников.

*Взаимными* называют активные помехи, вызываемые влиянием излучений различных радиоэлектронных средств друг на друга. Наряду с взаимными активными помехами иногда наблюдаются также взаимные пассивные помехи (например, в гористой местности помеха радиолокатору создается за счёт переотражения колебаний, излучаемых другим радиолокатором).

*Искусственные* активные и пассивные помехи создаются, как правило, для РТС военного назначения. Такие помехи широко применяются во время боевых действий. Создание помех является одной из форм радиоэлектронной войны (борьбы), а радиоэлектронная война считается важной составной частью информационной войны.

По характеру воздействия на подавляемое средство помехи делятся на *маскирующие* и *имитирующие*. Маскирующие помехи создают фон, на котором трудно выделить сигнал, прикрываемый помехой. Наряду с этим они обычно подавляют сигнал в нелинейных элементах приёмника РТС. Имитирующие помехи создают эффект ложных целей, затрудняя получение информации об истинных целях. Каждая из трёх указанных выше разновидностей помех – естественная, взаимная и искусственная – может быть в свою очередь маскирующей и имитирующей.

Существуют два основных вида источников естественных маскирующих активных помех: *дискретные* и *распределённые*. К дискретным источникам помех относятся Солнце, Луна и радиозвезды. К распределённым источникам – галактические шумы, излучение атомарного водорода и шумы атмосферы. Из дискретных источников практически влияние на работу РТС извлечения информации СВЧ-диапазона могут оказывать Солнце и в меньшей степени Луна. Из распределённых источников преобладающим является собственное тепловое излучение атмосферы.

По мере стремительного увеличения числа используемых радиоэлектронных средств резко возрастает опасность их взаимных влияний, а, следовательно, важную роль начинают играть *взаимные помехи*. Как уже отмечалось ранее, чтобы устранить эти влияния, практикуется плановое распределение рабочих частот между различными радиоэлектронными средствами. Тем не менее, при отсутствии должных мер защиты от взаимных помех наблюдается взаимное влияние радиоэлектронных средств даже с различными рабочими частотами. Последнее имеет место при наличии *внеполосных* и *побочных излучений* радиоэлектронных средств. Наряду с внеполосными и побочными излучениями причиной взаимных помех являются *побочные каналы приёма* в супергетеродинных приёмных устройствах.

Совокупность мер, направленных на исключение взаимных помех, обеспечивает *электромагнитную совместимость*. Наряду с правильным распределением частот и другими организационными мероприятиями электромагнитная совместимость достигается за счёт фильтрации побочных излучений в передающих устройствах, гетеродинных колебаний в приёмных трактах, за счёт правильного использования условий распространения, особенностей местности, выбора режимов работы радиотехнических систем.

В качестве искусственных маскирующих активных помех может быть использовано излучение шумовых колебаний. Такие помехи называют *прямошумовыми*, они в наибольшей степени приближаются к нормальному шуму. Прямошумовые помехи могут создаваться двумя способами. В первом – шумовые колебания формируются генератором СВЧ непосредственно в рабочем диапазоне частот РЛС и после усиления по мощности излучаются в пространство. В качестве первичных источников шума на СВЧ используют газоразрядные лампы, специальные магнетроны, работающие в шумящем режиме. Второй способ создания прямошумовой помехи заключается в формировании шумовых колебаний на низкой частоте, переносе средней частоты этих колебаний в заданную область высоких (сверхвысоких) частот с помощью гетеродинирования, для последующего усиления по мощности и излучения в пространство. В качестве первичных источников шума на низкой частоте используют диоды прямого накала, тиратроны в магнитном поле, фотоэлектронные умножители.

Для упрощения аппаратуры создания помех наряду с генерацией шума используют генерацию колебаний, модулированных шумом по амплитуде или частоте. Так, например, модулированное по частоте колебание.

К числу электронных приборов, позволяющих сравнительно просто осуществить частотную модуляцию, относятся лампы обратной волны. Лампы обратной волны допускают частотную девиацию от единиц до сотен мегагерц, что позволяет создавать помехи в сравнительно широком и узком спектрах частот, называемые соответственно *заградительными* и *прицельными*.

Как шумовые, так и модулируемые шумом передатчики помех могут дополнительно перестраиваться (скользить по частоте). Получаемая при этом помеха называется *скользящей*.

Эффективным видом случайных помех для импульсных РТС являются *хаотические импульсные помехи* (ХИП), представляющие собой случайную последовательность импульсов, параметры которых (несущая частота, длительность, ширина спектра) должны быть по возможности близкими к соответствующим параметрам сигналов подавляемой РТС.

Как уже указывалось выше, к естественным пассивным помехам относятся радиопомехи, создаваемые природными отражателями (местными предметами, водной поверхностью, гидрометеорами, северными сияниями и т.д.). Эти помехи могут существенно нарушать работу аэродромных радиолокаторов, обеспечивающих посадку самолётов, и радиолокаторов военного назначения, используемых для обнаружения целей, особенно на малых высотах.

Наибольшее распространение из искусственных маскирующих пассивных помех получили помехи, создаваемые дипольными противорадиолокационными отражателями. Они представляют собой пассивные полуволновые вибраторы, изготовленные из металлизированных бумажных лент, фольги или металлизированного стеклянного или капронового волокна. Длина узкополосных резонансных вибраторов выбирается примерно равной половине длины волны подавляемой РЛС. Ширина лент в зависимости от их длины может быть в пределах от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров, а диаметр волокна – от десятков до сотен микрон при толщине металлического покрытия порядка единиц микрон.

Обычно дипольные отражатели собираются в пачки таким образом, чтобы каждая пачка по своим отражающим свойствам имитировала реальную цель (т.е. средняя эффективная площадь пачки должна равняться средней эффективной площади цели  $\sigma_n = \sigma_c$ ). Число отражателей  $n$  в пачке зависит от диапазона длин волн, в котором работает подавляемая РЛС, и может быть определено по формуле  $n = \bar{\sigma}_n / (0,17\lambda^2)$ .

Основной недостаток таких пачек – узкий диапазон перекрываемых частот. Полоса частот расширяется, если пачки комплектовать вибраторами различной длины или увеличивать длину и поперечные размеры диполей.

*Методы защиты от маскирующих активных помех* основаны на использовании различий статистических характеристик сигнала и помехи.

Основные направления защиты РТС извлечения информации от маскирующих активных помех связаны с использованием амплитудных, поляризационных, частотных и пространственных различий между принимаемыми сигналами и помехами. Например, повышение энергии зондирующего сигнала (или коэффициента усиления передающей антенны в направлении на цель) позволяет увеличить дальность действия в помехах пропорционально  $\sqrt[4]{E}$  ( $\sqrt[4]{G}$ ).

*Увеличение энергии зондирующего сигнала* может осуществляться путём повышения мощности, увеличения длительности сигнала и числа импульсов в пачке за счёт соответствующего увеличения времени облучения и (или) частоты следования импульсов.

*Увеличение коэффициента усиления антенны в направлении на цель* может в то же время соответственно замедлить обзор пространства. В настоящее время используют и развивают методы управляемого обзора с последовательным анализом, когда время, в течение которого антенна направлена на цель, зависит от условий обнаружения и, в частности, от помеховой обстановки. Особенно широкие возможности

для использования программного автоматически управляемого обзора открываются при применении передающих антенн с электронным управлением луча в виде фазированных решёток.

*Амплитудная селекция* защищает приёмное устройство от перегрузки помехой, попавшей на его вход. Она обеспечивается применением различных типов автоматических регулировок усиления, а также усилителей с расширенным динамическим диапазоном.

*Временная селекция* достигается путём стробирования приёмного устройства РТС на время действия полезного сигнала.

Известно, что приёмная антенна обычно настроена на определённую *поляризацию* принимаемого сигнала: линейную, круговую либо (в общем случае) эллиптическую. Возможны антенны с регулируемой поляризацией. Если поляризация антенны соответствует поляризации помехи, эффект воздействия помехи будет наибольшим. С учётом этого антенну можно тем или иным способом перестроить на ортогональную поляризацию и, тем самым, достичь существенного ослабления помех. Будет ли при этом происходить ослабление полезного сигнала, зависит от поляризации колебаний сигнала. Если поляризация колебаний полезного сигнала точно совпадает с поляризацией колебаний помехи, одновременно с помехой и в той же мере будет ослаблен сигнал. Поскольку поляризация сигналов, отражённых от реальных целей, случайная и в общем случае не совпадает с поляризацией помехи, имеются принципиальные возможности ослабить помеху в большей степени, чем сигнал.

Для повышения помехозащищённости целесообразно *уменьшать коэффициент различимости  $\nu$* , что достигается за счёт приближения приёма к оптимальному. Если помехой является стационарный белый шум, то уменьшение  $\nu$  достигается оптимизацией приёма для таких помех. При фильтровом приёме, в частности, осуществляют оптимальную *частотную селекцию*. Частотная селекция тем более эффективна, чем шире спектр помехи по сравнению со спектром сигнала, так как спектральная плотность мощности *заградительной* по частоте помехи при заданной мощности передатчика помех снижается обратно пропорционально ширине полосы частот помехи. *Прицельные* помехи (с меньшей полосой частот), как правило, более эффективны, но их труднее реализовать. Создание прицельных помех затрудняется при повышении скрытности РЛС. Например, при использовании быстрой перестройки частоты радиолокатора, при многочастотном или широкополосном зондирующем сигнале и т.д. Если полоса частот помехи заметно уже ширины спектра принимаемого сигнала, то целесообразно использование различного рода настраиваемых *режекторных* фильтров для подавления помехи, приводящее к существенному уменьшению коэффициента различимости  $\nu$ .

Снижение уровня боковых лепестков диаграммы направленности может существенно ослабить влияние помех и представляет собой самостоятельную задачу. Из теории антенн известно, что снижение уровня боковых лепестков может быть достигнуто увеличением размеров антенны, рациональным распределением поля в раскрыве, повышением точности изготовления, снижением влияния переотражений от близлежащих объектов. Повышение избирательности антенны позволяет улучшить *пространственную* селекцию принимаемых колебаний.

Для улучшения пространственной селекции сигнала на фоне помех, приходящих с отдельных направлений, кроме перечисленных выше мер, могут быть также использованы методы *некогерентной* и *когерентной компенсации помеховых колебаний*, для чего наряду с основной могут быть задействованы дополнительные антенны (в фазированной антенной решётке – её отдельные элементы).

Если сигналы, принимаемые дополнительной антенной и боковыми лепестками основной антенны, компенсируются после детектора, следует говорить о некогерентной компенсации. Если такая компенсация производится на высокой (промежуточной) частоте, её можно называть когерентной. Для обеспечения как когерентной, так и некогерентной компенсации помеховые колебания должны быть *пространственно когерентны* (коррелированы).

## 2.32. СИСТЕМЫ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ

Радиотехническая разведка (РТР) осуществляется специальными радиотехническими средствами в целях получения данных о типе, назначении и местоположении радиоэлектронных средств противника. РТР ведётся с помощью специальной аппаратуры, размещаемой на наземных объектах, кораблях и летательных аппаратах.

В задачи радиоразведки входят перехват и анализ сигналов, излучаемых радиоэлектронными средствами противника. Это позволяет определить параметры излучаемых сигналов, вид модуляции, пространственные характеристики и режимы работы РЭС. К параметрам излучаемых сигналов относятся: несущая частота (частота высокочастотных колебаний)  $f_c$ , мощность излучения  $P$ . Вид и параметры модуляции характеризуют структуру излучаемых сигналов, что даёт возможность определить назначение РЭС и содержание передаваемой информации. Модуляция несущих колебаний может быть амплитудной, частотной, фазовой.

При амплитудной импульсной модуляции средства радиоразведки могут определить частоту повторения  $F_n$  и длительность  $\tau_n$  импульсов, структуру серии импульсов и их форму. В случае амплитудной

модуляции гармоническими колебаниями может быть определён закон изменения модулирующих сигналов.

При частотной (фазовой) модуляции несущих колебаний определяется частота  $F_{\text{н}}$  и форма модулирующих колебаний, девиация  $\Delta F_{\text{н}}$  несущей частоты.

К пространственным характеристикам РЭС относят направление распространения и поляризацию радиоволн, форму и ширину диаграммы направленности антенны, способ обзора пространства. Режимы работы РЭС характеризуются видом несущих колебаний, продолжительностью работы и др.

Для ведения радиоразведки могут применяться наземные, надводные и бортовые (самолётные) средства, а также искусственные спутники Земли.

Типовой радиоразведывательный комплекс (рис. 2.60) имеет широкополосный канал приёма и анализа сигналов, канал селекции РЭС.

Сигналы, принятые широкополосной антенной, проходят широкополосные антенные усилители и через антенный коммутатор поступают в приёмники, имеющие определённую частотную избирательность.

В результате обеспечивается частотная селекция сигналов и их выделение на фоне мешающих сигналов. После усиления и предварительного преобразования сигналы с выхода приёмников могут быть поданы в аппаратуру выделения каналов, демодуляции и декодирования, в аппаратуру анализа и на индикаторы. Аппаратура выделения каналов, демодуляции и декодирования обеспечивает выделение одно-



Рис. 2.60. Типовой радиоразведывательный комплекс

го или нескольких каналов многоканального РЭС и преобразует сигнал в форму, удобную для его регистрации. После этого сигнал подаётся на регистрирующую аппаратуру для записи.

Обычно данные средств РТР используются для повышения эффективности систем радиопротиводействия и образуют единый автоматизированный комплекс.

### **2.33. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Научно-технический прогресс в области РТС проявляется в обновлении технической структуры РТС, в замене устаревших технических средств новыми. Вновь создаваемые РТС должны обладать лучшими показателями качества, более широкими функциональными возможностями и в большей степени удовлетворять требованиям получателя информации.

В развитии РТС выделяют следующие принципиальные направления:

- интеллектуализация РТС на основе вычислительных средств;
- освоение в создаваемой радиоэлектронной технике широкого диапазона радиоволи: от миллиметрового до сверхдлинных;
- переход в современной аппаратуре от отдельных электронных элементов узкого назначения (транзисторов, логических ячеек, ячеек памяти) к функциональным сложным интегральным микросхемам;
- повышение роли устройств обработки информации в РТС;
- расширение областей применения РТС.

Основой развития РТС являются как достижения фундаментальных наук, открывающие новые физические принципы функционирования устройств и систем, так и успехи современной электроники, для которой характерным является всё возрастающая степень интеграции. Продолжает развиваться функциональная электроника: появились акустоэлектронные процессоры, приборы с зарядовой связью и устройства на их основе.

Усложнение функций, связанных с передачей, накоплением и обработкой информации, решается, главным образом, за счёт устройств цифровой техники, которая используется в устройствах обработки сигналов, системах формирования луча и управления его сканированием в устройствах с фазированными антенными решётками, в системах связи, радиовещания и телевидения.

Наряду с микропроцессорной техникой быстро развиваются цифровые процессоры сигналов (ЦПС) – приборы, где цифровая техника наиболее тесно взаимодействует с аналоговой. Современные ЦПС характеризуются производительностью в несколько десятков миллионов операций в секунду.

Повышение степени интеграции позволяет повысить надёжность и быстродействие системы, снизить стоимость, перейти на высокоскоростные методы передачи и обработки информации, создать интегрированные многофункциональные комплексы с высоким уровнем искусственного интеллекта, адаптивные к помеховой обстановке.

За последнее десятилетие особенно существенные изменения претерпели РТС передачи информации.

Одним из перспективных направлений совершенствования СПИ является создание высокоскоростных сетей для передачи всех видов информации.

Эффективной движущей силой радикальных изменений облика телекоммуникаций являются и успехи в развитии подвижной радиосвязи.

К важнейшим средствам организации международной и междугородной телефонно-телеграфной связи, телевидения и радиовещания относится спутниковая связь. Особенно незаменимы спутниковые системы для больших территорий с малой плотностью населения, суровыми климатическими условиями.

Одним из последних достижений в области развития проводной и радиосвязи являются службы передачи информации, получившие название «телематические». Их появление стало результатом взаимопроникновения ЭВМ и новых средств связи.

Дальнейшее совершенствование получили РЛС и РНС. Современные системы позволяют решать задачи, которые были недоступны единичным радиолокационным средствам. Они обладают высокой разрешающей способностью по дальности, угловым координатам, радиальной скорости, что обеспечивается применением сверхширокополосных сигналов, когерентных сигналов большой длительности, антенн со сверхузкими диаграммами направленности.

В развитии РЛС наблюдаются тенденции к увеличению числа измеряемых координат (в частности, к созданию трёхкоординатных РЛС), многорежимности зондирования и обзора пространства, повышению когерентности сигналов и эффективному её использованию, автоматизации обработки сигналов и построению трасс целей, сокращению энергозатрат, сочетанию перспективных антенных решёток с более дешёвыми антеннами при значительном уменьшении уровня боковых лепестков, существенному повышению надёжности и ресурса РЛС, диагностике и ускоренному устранению неисправностей, сокращению количества обслуживающего персонала, ограничению функций персонала применением дистанционного контроля.

Большое внимание уделяется РЛС с активным ответом. К ним относятся прежде всего РЛС управления воздушным движением. Большинство РЛС военного назначения имеют также каналы опознавания

государственной принадлежности. Для этих РЛС повышенное внимание уделяется защите от помех, а в ряде случаев и от самонаводящихся на излучение снарядов. В связи с широким применением малозаметных воздушных целей существенно повысилась роль РЛС метрового диапазона. Во всех диапазонах проводятся работы по распознаванию классов (и даже типов) воздушных целей.

В последние годы значительно возрос интерес к подповерхностной радиолокации. Методы подповерхностной радиолокации используются для построения геологических разрезов и профилей дна водоёмов, определения положения уровня грунтовых вод и границ распространения полезных ископаемых, измерения толщины пресноводных и морских льдов, выявления местоположения инженерных сетей (металлических и пластиковых труб, кабелей и др.), оценки качества бетонных конструкций (мостов, дамб и плотин), обнаружения утечек из нефтепроводов и захоронения экологически опасных отходов, установления местонахождения археологических объектов и тайников, исследования структуры торфяных месторождений, песчаников, известняков, мёрзлых почв. В оборонной промышленности георадары могут использоваться для обнаружения мест установки мин, расположения подземных тоннелей, коммуникаций, складов, а также для выявления подкопов к охраняемым объектам.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

---

Содержание учебного пособия и, особенно, параграфы, посвящённые построению РТС извлечения информации, подтверждает необходимость всестороннего (системного) рассмотрения всей совокупности проблем, возникающих при разработке любой РТС. При этом разработчик должен чётко представлять назначение и условия эксплуатации проектируемой системы, определяющие выбор принципа действия, тактико-технических характеристик и её структуры. Кроме того, при разработке системы необходимо учитывать исторический опыт и перспективы развития систем не только рассматриваемого класса, но и конкурирующих с ними, о которых разработчик должен иметь достаточно глубокое представление. Особенно важно это 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 её 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 учитываться требования экономичности производства разрабатываемой радиоэлектронной аппаратуры, её надёжности и экономичности в эксплуатации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

---

1. Информационные технологии в радиотехнических системах : учебное пособие / В.А. Васин, И.Б. Власов, Ю.М. Егоров и др. ; под ред. И.Б. Федорова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 768 с.
2. Радиотехнические системы : учебник для вузов по специальности «Радиотехника» / Ю.П. Гришин, В.П. Ипатов, Ю.М. Казаринов и др. ; под ред. Ю.М. Казаринова. – М. : Высшая школа, 1990. – 496 с.
3. Палий, А.И. Радиоэлектронная борьба / А.И. Палий. – 2-е изд. – М. : Воениздат, 1989. – 350 с.
4. Лёзин, Ю.С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем : учебное пособие для вузов / Ю.С. Лёзин. – М. : Радио и связь, 1986. – 260 с.
5. Бакулев, П.А. Методы и устройства селекции движущихся целей / П.А. Бакулев, В.М. Степин. – М. : Радио и связь, 1986.
6. Пестряков, В.Б. Радиотехнические системы : учебник для вузов / В.Б. Пестряков, В.Д. Кузенков. – М. : Радио и связь, 1985.
7. Теоретические основы радиолокации / Л.А. Коростелев, А.Ф. Ключев, Ю.А. Мельник и др. ; под ред. В.Е. Дулевича. – М. : Советское радио, 1978. – 608 с.
8. Левин, Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. – М. : Советское радио, 1976. – Кн. 3. – 288 с.
9. Тихонов, В.И. Статистическая радиотехника / В.И. Тихонов. – М. : Радио и связь, 1982. – 275 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

---

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	3
<b>1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ</b> .....	4
1.1. Назначение и классификация радиотехнических систем .....	4
1.2. Основные параметры и характеристики РТС .....	5
1.3. Ограничения и противоречивость показателей качества РТС .....	6
1.4. Общая модель радиотехнической системы .....	7
1.5. Характеристики сигналов и помех в РТС .....	9
1.6. Особенности задач оптимизации РТС .....	11
<b>2. ПРИНЦИПЫ И ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ</b> .....	16
2.1. Основные понятия и определения .....	16
2.2. Физические основы радиолокационного обнаружения и определения местоположения объектов .....	18
2.3. Позиционные методы определения местоположения объектов .....	21
2.4. Другие методы определения местоположения объектов .....	25
2.5. Характеристики радиолокационных целей .....	26
2.5.1. Вторичное излучение .....	26
2.5.2. Эффективная площадь рассеяния целей .....	27
2.5.3. Спектры флуктуаций амплитуды и фазового фронта отражённого сигнала .....	30
2.6. Дальность действия радиосистем .....	33
2.7. Классификация радиолокационных систем .....	37
2.8. Классификация радионавигационных систем .....	39
2.9. Основные тактико-технические характеристики РЛС .....	41
2.10. Основные тактико-технические характеристики РНС .....	43
2.11. Общие сведения о методах защиты от помех .....	44
2.12. Селекция движущихся целей .....	46
2.13. Обобщённые структурные схемы радиолокационных и радионавигационных систем .....	53
2.14. Основные системы для получения радиолокационной и радионавигационной информации .....	58
2.15. Дополнительные системы .....	60
2.16. Методы измерения дальности и скорости .....	62
2.16.1. Импульсный метод измерения дальности .....	63
2.16.2. Частотный метод измерения дальности .....	65
2.16.3. Фазовый метод измерения дальности .....	67
2.16.4. Методы измерения скорости .....	68

2.17. Следящие измерители дальности и скорости .....	70
2.17.1. Следящий измеритель дальности .....	70
2.17.2. Следящие измерители скорости .....	72
2.18. Цифровые измерители дальности в импульсных РЛС и РНС .....	74
2.19. Методы измерения угловых координат .....	75
2.19.1. Амплитудные методы .....	75
2.19.2. Фазовый метод .....	78
2.20. Следящие измерители угловых координат .....	80
2.21. Синтезирование раскрыва при боковом обзоре .....	82
2.22. Обнаружение сигналов в пассивной радиолокации .....	84
2.23. Измерение координат целей в пассивной радиолокации .....	86
2.24. Общие сведения о физических основах оптической локации .....	87
2.25. Системы позиционной навигации .....	91
2.25.1. Фазовые РНС .....	93
2.25.2. Импульсно-фазовые РНС .....	94
2.26. Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) .....	99
2.26.1. Основные принципы построения и функционирования СРНС первого поколения .....	100
2.26.2. Основные принципы построения и функционирования СРНС второго поколения .....	101
2.26.3. Принципы построения аппаратуры потребителей СРНС .....	107
2.27. Общие сведения о разрешении и распознавании объектов и сигналов .....	115
2.27.1. Разрешение сигналов .....	115
2.27.2. Распознавание объектов и сигналов .....	117
2.28. Статистическая оптимизация разрешения и распознавания сигналов .....	119
2.29. Оценка разрешающей способности .....	122
2.29.1. Связь разрешающей способности с функцией неопределённости .....	122
2.29.2. Разрешение по времени запаздывания .....	124
2.29.3. Разрешение по скорости и угловым координатам .....	127
2.29.4. Сложные сигналы .....	128
2.30. Методы радиопротиводействия .....	130
2.31. Классификация радиоэлектронных помех .....	131
2.32. Системы радиотехнической разведки .....	136
2.33. Тенденции развития радиотехнических систем .....	138
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	<b>141</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	<b>142</b>