

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ
РАДИОТЕХНИКИ, ЭЛЕКТРОНИКИ И АВТОМАТИКИ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

В.Ш. БЕРИКАШВИЛИ

ОСНОВЫ ТЕОРИИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

КУРС ЛЕКЦИЙ

МОСКВА 2007

ББК 32.88; 32.845.7

Б 64

УДК 681.7.068

Рецензенты : проф. МГУ, д.ф-м.н. А.С.Чиркин,
проф. РГТУ, д.т.н. В.И.Шанин

Б 64 В.Ш. Берикашвили. Основы теории радиотехнических систем.: Курс лекций / Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)». –М., 2004 – 100 с.

Рассмотрены основные типы радиотехнических систем (РТС): передачи и извлечения информации, управления, навигации и радиопротиводействия. Проведена классификация РТС по используемым частотам (длинам волн), типу модуляции, назначению, методам обработки информации, функциональным особенностям. Выделены последние достижения в области спутниковой связи и навигации, создании сотовых и волоконно-оптических систем связи. Отмечена тенденция к переходу РТС в область более высоких частот и цифровых высокоскоростных систем передачи информации. Детально рассмотрена роль разработчиков, конструкторов и технологов в создании и эксплуатации новых видов радиосистем.

Курс лекций предназначен для студентов и аспирантов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям: «Радиотехника», «Радиофизика», «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры», «Основы метрологии, стандартизации и измерительной техники».

Табл. 5 Илл. 55. Библиогр.: 20 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета университета.

ISBN 5-7339-0333-3

© В.Ш. Берикашвили, 2007

ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

Использование радиотехнических систем и сфера их действия быстро расширяются. Растёт их сложность и удельная стоимость на объектах (60% стоимости в самолёте и 80% в спутнике). Возникают проблемы необходимости сочетания технических, тактических и стоимостных характеристик. Роль разработчика радиотехнических систем, конструктора и технолога, представляются в равной мере существенными и постоянно требуются специалисты данных направлений.

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

Материал лекций даёт представление о принципах построения, возможностях, параметрах и характеристиках современных РТС. Для изучения этой дисциплины необходимо изучить курсы: “Общая физика”, “Теория вероятности”, “Основы радиоэлектроники”, “Конструкция экранов и СВЧ устройств”, “Волновые процессы”.

ГЛАВА 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

1.1. Основные определения радиотехники и физические основы использования радиоволн

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

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

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

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

Информация в радиотехнике представляется с помощью радиосигнала распространяющегося в пространстве.

Радиосигнал – это электромагнитные колебания, как правило, синусоидальны с несущей частотой ω_{s0} и модулированные первичным электрическим сигналом (звуковых колебаний или видеосигнал).

Аналитически радиосигнал можно представить в следующем виде:

$$S_H(t) = A_s(t) \cos(\omega_{s0}t + \varphi_s(t)), \quad (1.1)$$

где A_s , ω_{s0} , φ_s - амплитуда, циклическая частота и фаза сигнала; t – время.

Информация в виде сообщения может содержаться в изменении любого из параметров A_s , ω_{s0} , φ .

Процесс отображения информации в параметрах сигнала

называется модуляцией. Виды модуляции: амплитудная $A_s(t)$, частотная $\omega_s(t)$, фазовая $\varphi(t)$.

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

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

Распространение радиоволн в пространстве

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

$$\begin{aligned} E(t,z) &= E_{s0}(z) \cos(\omega_{s0}t + \varphi_{s0} - \omega_{s0}z/c) \\ H(t,z) &= H_{s0}(z) \sin(\omega_{s0}t + \varphi_{s0} - \omega_{s0}z/c) \end{aligned} \quad (1.2)$$

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

$$\omega_{s0} \lambda_s / c = 2\pi, \quad \lambda_s = 2\pi c / \omega_{s0} = c / f_{s0}, \quad f_{s0} = \omega_{s0} / 2\pi, \quad f_s = 1 / T_s. \quad (1.3)$$

Здесь, как и в формуле (1.1), ω_{s0} – несущая циклическая частота в радианах в секунду, f_s – частота в Герцах, T_s – период колебаний во времени, c – скорость света, λ_s – длина волны (период колебаний в пространстве).

Замечательные особенности радиоволн

Широкое использование радиотехники обусловлено следующими замечательными особенностями радиоволн:

1. Распространение на большие расстояния (используют в радио и телевидении).
2. Огибание препятствий и земной поверхности, и отражение от ионосферы (дальняя радиосвязь).
3. Проникают в глубь суши и воды (радиозондирование).
4. Проходят через облака, туман, дождь и снег (всепогодность).
5. Отражаются от металлических предметов (используют в

- радиолокации).
6. Разная степень отражения от поверхности суши и воды (радиозондирование).
 7. Возможность направленного излучения (дальние радиорелейные линии и спутниковая радиосвязь).
 8. Высокая скорость передачи информации и большой объём (спутниковая связь).
 9. Возможность создания больших мощностей генерации и выделения слабых сигналов (радиозондирование планет и радиоастрономия).
 10. Современная радиоаппаратура очень надёжна и позволяет устанавливать её на стационарных и подвижных объектах. Технология производства её отработана и совершенствуется.

1.2. Системные методы и радиотехнические системы

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

Основные понятия:

Подсистема – элемент «Сверхсистемы».

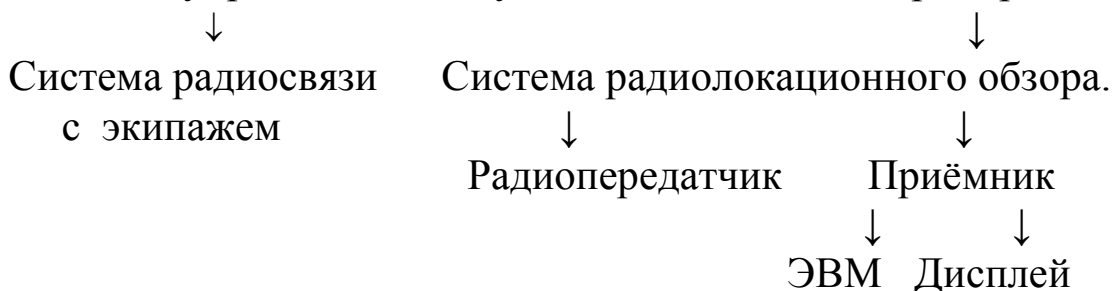
Системный подход к изучению объекта - разбиение на системы и подсистемы, выделение главного и второстепенного.

Структура – связь элементов в целое.

Иерархия – подчинённость систем.

Пример:

Система управления воздушным движением аэропорта.



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

Примеры типов РТС по выполняемым функциям:

1. Радиосвязь, радиовещание, телевиденье, радиоуправление (передача информации).
2. Радиолокация (извлечение информации).
3. Радиоуправление (передача + извлечение информации).
4. Радиопротиводействие (подавление информации).

1.3. Жизненный цикл РТС

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

При разработке и эксплуатации РТС выделяют следующие основные этапы:

1. Замысел. Функция РТС. На основе потребностей общественного развития. Принципы действия РТС; технико-экономические возможности, формируются цели и задачи, составляют техническое задание (ТЗ) на проектирование.

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

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

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

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

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

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

В процессе разработки, изготовления и эксплуатации РТС происходит взаимодействие этапов. Каждый этап связан с предшествующим и последующим. Качество исполнения этапа влияет на качество РТС. На первых двух этапах основная роль у разработчиков (физиков, расчетчиков, радиотехников). На третьем и четвертом этапах основная роль конструкторов и технологов. На пятом – у инженеров и техников по эксплуатации.

1.4. Классификация РТС по назначению

Таблица 1.1

Классификация РТС по назначению

Типы РТС	Назначение
1) Передачи информации	Местная (малоканальная) Радиорелейная Спутниковая радиосвязь Радиовещательная и ТВ Телеметрия Передача команд Сотовая мобильная связь
2) Извлечение информации	Радиолокация (обнаружение и классификация целей, определение координат и параметров движения) Радионавигация Радиоразведка ископаемых и составляющих поверхности Земли Радиоастрономия Радиоразведка РТС противника
3) Радиоуправление	Управление ракетами Радиоуправление КА Подрыв боевых снарядов
4) Разрушение информации	Радиопротиводействие

1.5. Структурные и функциональные схемы РТС

Системы передачи информации

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

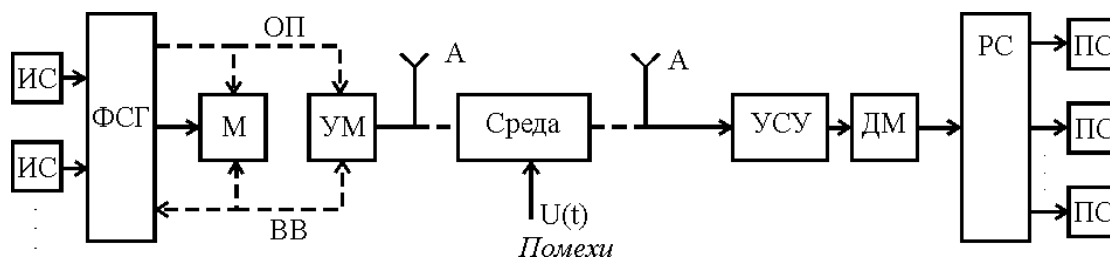


Рис. 1.1. Структурная схема многоканальной системы передачи информации

На рис 1.1. использованы следующие обозначения: ИС – источник сообщений; ФГС – формирователь групп сигнала; М – модулятор; УМ – усилитель мощности; А – антенны; УСУ – устройство селекции и усиления; ДМ – демодулятор; РС – разделитель сигналов; ПС – получатели сообщений; ВВ – внешнее воздействие; ОП – операторы.

Системы извлечения информации

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

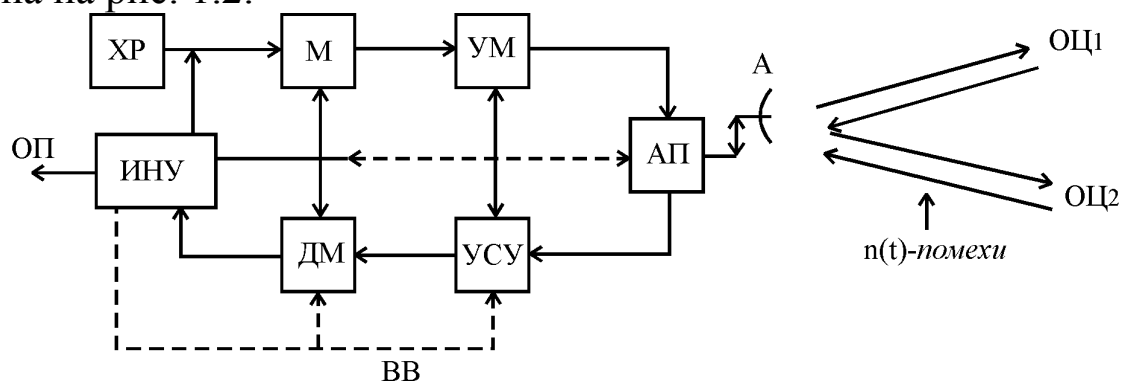


Рис. 1.2. Структурная схема РЛС

На рис 1.2. использованы (в дополнение к рис 1.1) следующие обозначения: ИИУ – измерительно-индикаторное устройство, ОЦ – объекты-цели, ХР - хронометрирующий генератор (синхронизатор), АП – антенный переключатель.

Системы радиоуправления

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

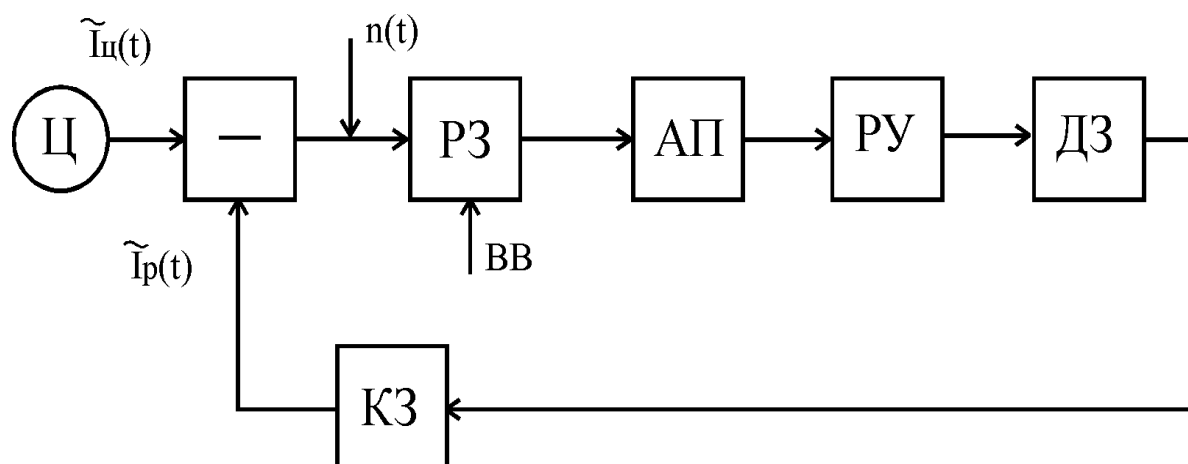


Рис. 1.3. Структурная схема системы радиоуправления зенитной ракетой

На рис 1.3 использованы следующие обозначения:

Ц – движущаяся цель; «—» - командное устройство, выявляющее соотношение между пространственным положением и движением цели $I_{ц}I_{ц}(t)$ и ракеты; $I_p(t)$ и выдающее команды через радиозвено (РЗ) на автопилот (АП), который управляет рулями (РУ);

ДЗ – динамическое звено, отображающее реакцию ракеты на управляющее воздействие;

КЗ – кинематическое звено, определяет закономерности перехода положение ракеты и цели в пространстве и формирует оптимальную траекторию полета ракеты.

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

Системы радиопротиводействия

Системы радиопротиводействия предназначены для искажения информации или нарушения работы канала связи противника (рис. 1.3).

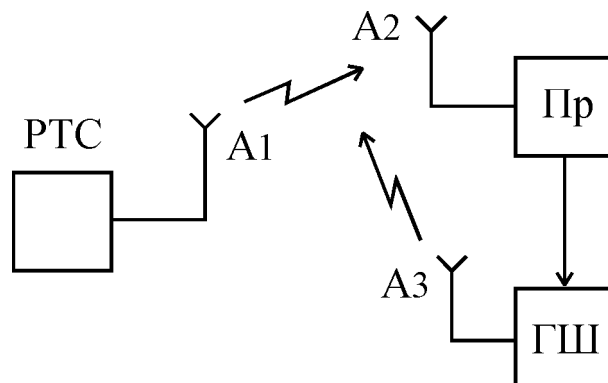


Рис. 1.3. Структурная схема системы радиопротиводействия (РТС – передающая радиосистема, А1- А3 – антенны, Пр – приемник, ГШ – генератор шума)

ГЛАВА 2 КОЛИЧЕСТВО И ХАРАКТЕР ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ

2.1. Количественная оценка информации

Информация передается в виде сообщений выраженных в виде букв или цифр. За единичную меру количества информации в сообщении принят 1 бит (0 или 1).

При равной вероятности появления событий 0 и 1 имеем: $P(0) = P(1) = 0,5$.

Из множества неравновероятных событий появления символов a_k ($k=1,2,\dots,l$) с вероятностью появления $P(a_k) = P_k$ ($P_k < 1$), получим разную информацию при приеме символа a_k . Чем меньше P_k , тем больше информации при появлении события a_k .

Количество информации полученной при приеме символа a_k . оценивают величиной: $I = \log_2 \left(\frac{1}{P_k} \right)$.

Энтропия источника сообщения дает представление о его возможности передавать информацию: $H = \sum_{k=1}^l P_k \cdot \log_2 \left(\frac{1}{P_k} \right)$

Оценим количество информации в одном бите, содержащееся в единичном сообщении о наступлении одного из l событий $I_1 = H$:

$$\text{Событие} \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad I_1 = 0,5 \cdot \log_2 2 + 0,5 \cdot \log_2 2 = 1 \text{ бит.}$$

При равновероятных событиях получаем 1 бит информации при одном событии.

Последовательная передача m событий даёт $I = mH = mI_1$ при $l=2$ $I=m$ (чем больше длина “ слова ”, тем больше индекс)

Число сочетаний в m составляет $a_k \quad N_1 = l^m$

$$I = m \cdot \log_2 l = \log_2 (l^m) = \log_2 N_1$$

Для оцифровки непрерывных сигналов проводят квантование по времени (рис 1.4) и по значению. Отсчёты по времени берутся через интервалы, определяемые теоремой В.А.Котельникова:

$$\Delta t = \tau_s = 1/(2f_{SB}),$$

где f_{SB} - высшая частота спектра сообщений.

Иногда за τ_s берут интервал корреляции случайного процесса.

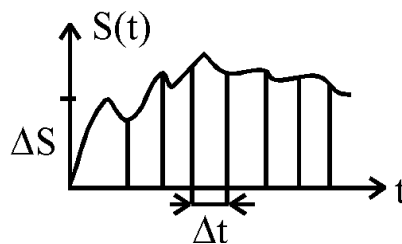


Рис. 1.4. Выбор интервала квантования по времени

В общем случае можно оценить информацию одного значения радиосигнала $S(t)$ как меру неопределённости его появления в определенном интервале значений: $I_1 = \log_2 \left(\frac{\Delta S_M}{\Delta S} \right)$,

где ΔS_M - область возможных равновероятных значений S ,

δS - дискрет (интервал) значений S .

Информация о реализации (случайные функции) $S(t)$ за время t оценивается по формуле:

$$I = \left(\frac{t}{r_k S} \right) \cdot \log_2 \left(\frac{\Delta S_M}{\delta S} \right) = 2 f_{SB} \cdot t \cdot \log_2 \left(\frac{\Delta S}{\delta S} \right)$$

Скорость получения информации будет: $V_1 = 2 f_{SB} \cdot \log_2 \left(\frac{\Delta S}{\delta S} \right)$.

Большую информацию в жизни и радиотехнике несут звуковые (речевые и музыкальные) сигналы с частотами до 25 кГц. Еще большую информацию несёт сигнал, изменяющийся в пространстве и во времени (телевидение) $f_{SB} = 8$ МГц.

2.2. Вероятностное описание процесса (сообщения)

Непрерывное сообщение $\tilde{S}_H(t)$ можно описать многомерной плотностью распределения вероятности $w(S(t_i, z_k))$.

Обычно достаточно менее полное описание одномерной плотностью распределения вероятности $\omega(S_H, t)$, которая характеризует отклонение значений от среднего. В радиотехнике используются сигналы с колебанием напряжения или тока около нулевого значения (среднее значение равно 0), которые называют стационарными случайными процессами. Для их описания используют статистические характеристики, корреляционную и спектральную функции.

Статистические характеристики стационарного процесса

Обычно используют следующие усредненные параметры:

$$M_1(S_H) = \frac{1}{T} \int_0^T S(t) dt$$

$$D(S_H) = \frac{1}{T} \int_0^T S^2(t) dt$$

$$M_2(S_H) = \frac{1}{T} \int_0^T [S(t) - M_1(S)]^2 dt$$

$$M_2(S_H) = D(S_H) - M_1^2(S)^2$$

Здесь: M_1 – математическое ожидание или среднее значение

процесса $S(t)$ на интервале T ; D – дисперсия значений процесса, $M2$ – центрированная дисперсия. При большом T у стационарного процесса $M1=0$ и $M2=D$.

Используют также ниже следующие усредненные характеристики.

Корреляционная (или *автокорреляционная*) *функция* характеризует меру связанности процесса:

$$R_s(t, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\theta - \tau)S(\theta)d\theta,$$

где θ - текущее время внутри области интегрирования, τ - разность времени (интервал) между точками, в которых берутся значения $S(t)$.

Корреляционная функция стационарного процесса зависит только от τ (т.е. $R(\tau)$), причем $R(0)=D$. Если корреляционную функцию разделить на дисперсию D , то получим нормированную корреляционную функцию $\rho(\tau) = R(0)/D$ у которой $\rho(0) = 1$.

Если $\rho(\tau) > 0,5$, то говорят, что есть взаимная связь между значениями $S(t)$ и $S(t-\tau)$. Наоборот, если $\rho(\tau) < 0,5$, то связи между ними нет. Величина τ_k , при которой $\rho(\tau_k) = 0,5$, называется интервалом корреляции. Таким образом, в интервале от $\tau=0$ ($\rho(0)=1$) до $\tau=\tau_k$ ($\rho(\tau_k)=0,5$) связь между $S(t)$ и $S(t-\tau)$ есть, а при $\tau > \tau_k$ её нет.

По аналогии с автокорреляционной используется понятие *взаимнокорреляционной функции*:

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\theta - \tau)y(\theta)d\theta.$$

Эта функция характеризует меру связанности двух процессов $x(t)$ и $y(t)$ в различные моменты времени, разделенные во времени интервалом τ .

Преобразование Фурье (или *спектр*) процесса $S(t)$ дает *амплитудное* распределение частотных составляющих:

$$F_s(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \cdot \exp\{-i\omega t\}dt,$$

Зная $F_s(\omega)$ можно восстановить значение исходной функции

$S(t)$, воспользовавшись рядом Фурье:

$$\tilde{S}(t) = \sum_{i=1}^n F_s(\omega) \cdot \sin(\omega_i, t).$$

Или, осуществить более полное восстановление, с помощью обратного преобразования Фурье:

$$S(t) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{\infty} F_s(\omega) e^{-i\omega t} d\omega.$$

Энергетический спектр сигнала, или распределение по мощности частотных составляющих определяется с помощью преобразования Фурье от корреляционной функции:

$$G_s(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_p(u) \cdot e^{-i\omega u} du.$$

Как и в предыдущем случае, восстановить корреляционную функцию можно с помощью обратного преобразования Фурье.

Всякий процесс можно описать не только гармоническими (синусоидальными) функциями, но и полиномами:

$$S(t) = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i \cdot x^i$$

Такое описание позволяет производить экстраполяцию функции за пределы наблюдения (прогноз), интерполяцию (детальное изменение между двумя точками) и сглаживание (исключение выбросов от случайных помех). Коэффициенты a_i определяются путем решения системы алгебраических уравнений.

Аналогичное описание процесса может быть сделано *ортogonalными функциями*:

$$S(t) = \sum_{i=0}^k A_i P_i(t), \text{ где } A_i = \int_0^T S(t) \cdot P_i(t) dt.$$

Условие ортогональности выражается следующим образом:

$$I = \int_0^T P_i(t) P_j(t) dt = \{ =1 \text{ при } i=j \text{ и } =0 \text{ при } i \neq j \}.$$

2.3. Описание цифровых сообщений

При цифровой передаче, сообщение выражается случайной последовательностью дискретных значений, отсчитываемых в дискретные моменты времени.

N - число дискретных сообщений.

P_i - вероятность их появлений.

a_k - число (алфавит) различных символов a .

m - число символов в комбинации (кодовом слове), отображающей возможное количество дискретных значений N_i .

V_i - скорость передачи символов.

T_s - длительность отображения сигнала.

$\Delta\omega = 1/T_s$ - ширина спектра дискретного сигнала.

2.4. Классификация РТС по характеру сообщений, циркулирующих в системе

В зависимости от характера сообщений, циркулирующих в РТС они делятся на следующие:

1. Непрерывные РТС (аналоговые). РТС вырабатывает случайный непрерывный процесс.

Примеры: радиовещание, пеленгационные системы, доплеровские РЛС, навигационные системы определения координат по разности фаз между РТС. Изменяемые параметры процесса: амплитуда - A , частота - ω и фаза - φ .

2. Импульсные системы – последовательность отрезков случайных непрерывных процессов (импульсов). Изменяемые параметры: $A, \tau, \Delta\tau$.

Примеры: импульсные радиолокационные системы, импульсные радионавигационные системы, радио переговоры ключом, телеграф.

3. Дискретные или цифровые системы.

Информация содержится в последовательности различных символов (дискретных сигналов). Полезная информация заключена в наличии и отсутствии сигналов в их последовательности.

При последнем способе передачи влияние помех мало ска-

зывается на приеме сигналов, обеспечивается высокая точность передачи, меньше требований к стабильности характеристик аппаратуры.

Цифровые системы являются наиболее перспективным направлением создания РТС.

2.5. Классификация РТС по используемым частотам

Таблица 2.1

Деление радиосигналов по частотным диапазонам

№	Название	по частоте	f_H	λ	Название	Свойства
1	Сверх. Дл.	ОНЧ	3-30 кГц	10-100 км	Мириаметровые	Огибание земной поверхности
2	Дл.В.	НЧ	30-300 кГц	1-10 км	Километровые	-----//-----
3	Ср.В.	СЧ	0,3-3 МГц	100 м-1000 м	Гектометровые	-----//-----, огибание предметов
4	К.В.	ВЧ	3-30 МГц	10-100 м	Декаметровые	Отражение от ионосферы
5	УКВ	ОВЧ	30-300 МГц	1-10 м	Метровые	Высокая направленность
6	УКВ	УВЧ	0,3-3 ГГц	0,1-1 м	Дециметровые	-----//-----
7	УКВ	СВЧ	3-30 ГГц	1-10 см	Сантиметровые	Высокая разреш. способ.
8	УКВ	КВЧ	30-300 ГГц	0,1-1 см	Миллиметровые	-----//-----

Диапазон рабочих частот современных РТС простирается от 2 кГц до 300 ГГц. Рабочую частоту РТС выбирают в зависимости

от её функционального назначения и условий распространения радиоволн.

Несущая частота определяет полосу пропускания: $\Delta\omega \approx \frac{1}{6} f_{раб}$.

Все рабочие частоты делятся на частотные диапазоны, представленные в таблице 2.1. В соответствии с используемыми диапазонами называются и классифицируются РТС (Например, «Местная УКВ радиостанция»).

2.6. Классификация РТС по модулируемому параметру

В системах передачи информации используют следующие системы:

а) Непрерывные системы (АМ – амплитудная модуляция, ЧМ – частотная модуляция, ФМ – фазовая модуляция).

б) Импульсные системы (ВИМ – время–импульсные, ШИМ – широтно-импульсные).

в) Дискретные системы (Частотная манипуляция на двух несущих f_1 и f_2 . Аналогично: АМ – амплитудная манипуляция – на двух уровнях, ФМ – фазовая манипуляция – переключение фаз.).

г) Цифровые системы. (ИКМ – импульсно-кодовая модуляция или манипуляция).

Пример 1: УКВ система связи с ИКМ и частотной манипуляцией.

Пример 2: Сантиметровая Радиолокационная импульсно-доплеровская система.

2.7. Параметры, характеристики и показатели качества РТС

Параметр – величина, описывающая количественное свойство изделия (мощность, масса, $\Delta\omega$).

Характеристика – описание свойства развернуто в зависимости от времени или частоты $K(\omega)$.

Параметры и характеристики РТС характеризуют её тактико-технические и технико-экономические показатели.

Основные параметры РТС:

1. Назначение – тип информации, информационные характеристики, скорость передачи, объем передаваемой информации, многофункциональность (прием-передача).
2. Точность – степень отображения информации.
3. Разрешающая способность – способность воспринимать информацию при сдвиге сигнала по ω , φ , напряжению.
4. Дальность действия и направленность.
5. Помехоустойчивость – обеспечение дальности и точности при $n(t)$.
6. Диапазон частот.
7. Электромагнитная совместимость.
8. Устойчивость к внешним воздействиям.
9. Стоимость.
10. Сложность и трудоемкость изготовления.
11. Масса, габариты, потребляемая мощность.
12. Скрытность.
13. Функциональная надежность (возможность обеспечения основных показателей).
14. Перспективность использования.

Ограничения и противоречивость показателей

Выбор диапазона для различных устройств определен свойствами диапазонов радиоволн. Природные ограничения и повышение требований устойчивости к внешним воздействиям приводит к усложнению и удорожанию системы.

Противоречивость требований к показателям качества РТС заключается в том, что, например, для увеличения дальности требуется увеличить мощность передатчика, а, следовательно, увеличить вес и габариты аппаратуры. Для бортовых систем важны масса, габариты и энергопотребление. Надежность передачи и мощность связаны с весом аппаратуры и её стоимостью. Обычно при проектировании системы приходится идти на компромисс и выбирать оптимальный вариант.

ГЛАВА 3 РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА (РЭА) РТС

3.1. Системные методы и радиоэлектронная аппаратура

Радиоэлектронная аппаратура представляет отдельные устройства, которые являются подсистемами РТС. Они предназначены для преобразования радио сигнала в соответствии с принципами работы и требованиями, предъявляемыми к РТС.

РЭА разделяют на следующие подсистемы или устройства:

1. Антенно-фидерные устройства.
2. Передающие и приемные устройства.
3. Источники питания.
4. Устройства управления (пульты управления).
5. Устройства обработки и выдачи информации.
6. Соединительные устройства (механические и электрические).
7. Устройства сопряжения РЭА с потребителями информации (операторами, объектами).

Каждое из устройств имеет алгоритм функционирования и схему. Устройство характеризуется конструкцией, особенностями технологии и методами технической эксплуатации.

Противоречия заключаются в следующем: стремление к универсальности усложняет РЭА и снижает надежность. Специализированные устройства проще, но больше элементов в РТ системе и трудность стыковки.

3.2. Схемотехническое деление РЭА

1. Схема. Принципиальная или электрическая схема – изображение, показывающее электрическое соединение элементов. РЭА должна предусматривать такое соединение элементов, при котором обеспечиваются операции над сигналами в соответствии с назначением РЭА и РТС. Иногда под схемой

понимают реальную совокупность элементов и их связей.

2. Схемотехника. Совокупность методов синтеза и анализа схем. Монтажная схема, схема размещения элементов на каркасе.

3. Конструкция. Целесообразно-организованная материально-пространственная структура. Целесообразно – значит структура (устройство) способна удовлетворять определенному назначению (возможность выполнять функции в различных условиях и пригодность к производству).

Конструкция описывается с помощью чертежей по ЕСКД, кинематических схем, схем соединений, монтажных схем.

Конструкция создается на основе схемы, избранных принципов построения, применяемых материалов и элементной базы.

4. Технология. Совокупность способов и процессов обработки, включая специальное оборудование, используемые при изготовлении элементов конструкции и сборке аппаратуры.

Технология должна обеспечивать получение заданной конструкции с высокой надежностью и производительностью, малыми затратами, исключать вредное влияние на человека и окружающую природу.

Технология определяет техническое содержание производства РЭА, обеспечивает заданные технологии, Эксплуатационные и экономические характеристики. Технология – должна соответствовать современному уровню производства и изменяться в соответствии достижений НТ прогресса и усовершенствование схемных решений.

Технология описывается комплектом технологической документации, включающем комплектовочную ведомость, маршрутную карту, операционные карты, инструкции на вспомогательные функции, инструкцию по ТБ и инструкции по охране окружающей среды.

5. Эксплуатация РЭА – обеспечение рабочего состояния или работоспособности РЭА.

Операции связанные с эксплуатацией: контроль, регулировка, ремонт, техническое обслуживание. Эксплуатация требует

специальных технических средств: встроенный контроль, стенды для испытаний, аппаратуру поиска неисправностей, создания оборудования для ремонта и т.д.

6. Жизненный цикл РЭА такой же как у РТС. Он включает следующие этапы: замысел – исследования – проектирование – изготовление (экспериментальные серии) – испытания и доработка – серийное производство – эксплуатация (использование) – модернизация – свертывание.

Конструкторы и технологи играют важную роль на всех этапах.

3.3. Экономическая эффективность РТС

Экономическая эффективность РТС играет большую роль при их создании и использовании. РТС – возникают в результате потребности общества в решении задач, однако их создание происходит тогда, когда это экономически целесообразно.

Радиовещание и ТВ имеют важное политическое и социальное значение, поэтому финансируется и развивается.

Радионавигационные и радиолокационные системы возникли из потребности обороны, затем стали широко использовать в гражданской авиации и флоте.

Радиозондирование с самолетов и космоса возникли и развиваются для навигации и геологии. Радиосвязь через спутники широко используется в ТВ и «Интернет».

Перед разработкой и после проводят расчет экономической эффективности РТС. Стоимость РТС часто определяет необходимость её покупки и использования. Повышение эффективности создания РТС зависит от системности проработки задач и проработки ее отдельных этапов.

3.4. Роль конструкторов и технологов в развитии РТС

Конструктор РЭА – разрабатывает (теоретически и схемно) РЭА, проводит исследование и проектирование отдельных узлов и конструкции в целом, проводит испытания РЭА, составляет конструкторскую документацию, участвует в производстве и

эксплуатации РЭА.

Технолог – проводит разработку теории и ведёт исследования в области технологии производства РЭА, технологический контроль и проработка конструкторской документации, проектирование специального технологического оборудования, оснастки и приспособлений, создание технологической документации, решение технологических вопросов в процессе производства РЭА, усовершенствование и корректировка технологии в соответствии с достижениями в НТ прогрессе.

Конструкция и технология тесно связаны. Часто конструктор-разработчик РЭА создает и технологию ее производства. Можно использовать термин “ конструктор - технолог”. Конструкторы – технологи работают в тесном взаимодействии с другими специалистами (схемотехниками, физиками, химиками, энергетиками, материаловедами, механиками). Конструкторы-технологи РЭА работают в тесной связи со специалистами по электронной технике, т.к. элементная база определяет схему и конструкцию.

В настоящее время широко используются ИС, БИС, СБИС, микропроцессоры. Поэтому большую роль приобретает связь с системотехниками, программистами.

Иногда конструктор-технолог может предложить специализированную БИС, заменяющую сложную схему в РЭА. Иногда это требует создания производства БИС на заводе создающем РЭА. Эффективность работы “конструктора-технолога” зависит от использования современной вычислительной техники. В настоящее время созданы САПР-К(Т), АСУ ТП, АСУП.

3.5. Системный подход при проектировании РТС

Разработка и конструирование РЭА должно вестись комплексно, системно.

Системный подход к проектированию РТС заключается в выделении главной цели и подцелей; средств, для их достижения; критериев оценки результата. При системном подходе определяется взаимосвязь исполнителей, их подчиненность, назначение

руководителей, ответственных исполнителей, сроки исполнения этапов работы, сетевой график. При разработке больших систем назначается генеральный конструктор, которому подчинены все исполнители.

3.6. Историческое развитие РТС

История развития РТС проходила по следующим этапам:

1890 – изобретение радио (Попов А.С.).

1905 – первая радиосвязь (Радионавигация).

1924 – радиовещание.

1934 – телевидение.

1936 – радиолокация. (с радиолампами)

1945 – радиоуправление (зенитные ракеты, I-е поколение РТС - радиолампы).

1959 – радиоуправляемые КА, связь с использованием ИСЗ, спутниковые радионавигационные системы (II-е поколение РТС - полупроводники, транзисторы).

1960 – радиоуправляемые межпланетные корабли. КА.

(III-е поколение РТС; использование ИС, микросборок, дискретных логических элементы РЭА).

1980 – большие аналоговые РТС и цифровые РТС, служба спасения на ИСЗ. (IV поколение РТС; использование БИС, СБИС, функциональная микроэлектроника).

1990 – межконтинентальные сети связи на ИСЗ и волоконных кабелях, сотовые телефоны, цифровое ТВ с высокой четкостью. (V поколение РТС; использование БИС, СБИС, функциональная микроэлектроника высокой интеграции, оптоэлектроника).

2000 - межконтинентальные многоканальные цифровые сети связи на ИСЗ и волоконных кабелях с высокой информационно-пропускной способностью, сотовые телефоны с видео изображением, цифровое ТВ с высокой четкостью, широкое использование навигационных спутниковых систем. (VI поколение РТС; широкое использование цифровых БИС, СБИС, функциональной микроэлектроники высокой интеграции, оптоэлектроники). Этапы развития технологии приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Развитие конструкций и технологий производства

Этапы, годы	Вид прибора	Число активных элементов	Радиооборудование самолета
1940	Радиоприемник	5 ламп	20-40 ламп
1960	РП и TV-черно-белое	50 ламп	10 ³ транзисторов
1970	РП переносные и TV- цветные	500 транзисторов	1500 транзисторов
1980	Микрокалькулятор	10 ⁵ транзисторов в ИС	10.000 транзист. в ИС и БИС
2000	Персональная ЭВМ	10 ⁶ транзист. в БИС, до 20 ИС и БИС	5 радиокомплексов и до 4 ПЭВМ

Подготовка специалистов

1889 –1900 гг. Попов А.С. В малых офицерских классах.

1921 – 1940 гг. Московский институт инженеров связи (МТУСИ)

1940 – 2000 гг. Политехнические институты – радиотехнические факультеты МЭИ, МАИ, МИРЭА.

Радиопромышленность

Начало отечественной радиопромышленности началось с создания в 1920 г. первой широкоэвещательной радиостанции и выпуска первых бытовых радиоприемников. В 1926 Московский электроламповый радиозавод (МЭЛЗ) начал выпуск радиоламп. Создание радиопромышленности, радиовещания, военной радиосвязи, радионавигации. В 1941-45 гг. быстро развивалась радиопромышленность для военных целей. В 1945 начато серийное производство радиолокационных станций. В 1949 начато телевизионное вещание и серийное производство телевизоров. В СССР с 1957 по 1990 г. радиопромышленность развивалась в рамках Мин. Радиопром, Мин. Электронной промышленности, Мин. Средств связи, Мин. Приборостроения. Сейчас радиотехническая промышленность развивается силами крупных научно-производственных предприятий и объединений.

ГЛАВА 4

ИСКАЖЕНИЯ СООБЩЕНИЙ В РТС, ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ И ОПТИМАЛЬНЫЙ ПРИЕМ

4.1. Источники помех и их фильтрация

Сигнал на входе приемника РТС обычно слаб и сопоставим с уровнем помех. По этому необходима тщательная фильтрация (выделение сигнала и подавление помех).

Основные причины искажений радиосигналов:

- действие помех
- изменение условий распространения
- не идеальность работы РЭА.

Пример: Искажения сигнала в приемнике при фазовой модуляции:

$$S_{np}(t) = A_{S_{np}} \cos\left[\omega_{s0}t + \varphi_{s0} - \frac{\omega_{s0}D}{C} + \tilde{\varphi}_s(t)\right],$$

где φ_{s0} - начальная фаза сигнала, $\tilde{\varphi}_s(t)$ - сообщение, D - дальность от передающей РЛС.

На выходе демодулятора (полосового фильтра) будет:

$$\Delta\tilde{\varphi}_\phi(t) = \tilde{\varphi}_s(t) + \Delta\tilde{\varphi}_p(t) + \Delta\tilde{\varphi}_r(t) + \Delta\tilde{\varphi}_a(t)$$

$\Delta\tilde{\varphi}_p(t)$ - изменение фазы, вызываемые случайными изменениями условий распространения, $\Delta\tilde{\varphi}_r(t)$ - случайные отклонения фазы под действием помех, $\Delta\tilde{\varphi}_a(t)$ - случайное отклонение фазы, вызываемое изменениями настройки фильтра.

Виды и источники помех

Виды помех:

а) Флюктуационные (тепловые и другие шумы РЭА, электромагнитные в атмосфере (атмосферные), космические источники РП).

б) Помехи из-за взаимного влияния цепей РЭА (наводки).

в) Действие аналогичных внешних РТС систем и внутрисистемные.

г) Помехи организованные.

д) Помехи промышленных установок, транспорта и т.п.

Приведенные выше помехи являются *аддитивными*. Они векторно складываются с сигналом и не зависят от сигнала. С ними можно бороться путем увеличения мощности сигнала за счет увеличения мощности передатчика.

Мультипликативные помехи – зависят от самого сигнала (нелинейные эффекты, отражения и искажения сигнала). С ними можно бороться только путем уменьшения мощности сигнала (передатчика). Таким образом, мощность передатчика должна быть оптимальной, т.е., чтобы мультипликативные помехи не превышали аддитивных.

Модели помех:

- флюктуационные – случайные (непрерывные случайные процессы);
- импульсные – случайный поток импульсов;
- узкополосные – квазигармонические (длительные непрерывные колебания от других станций);
- подобные сигналу – от других РТС.

Фильтрация помех

На средних частотах (от 0.1 до 10 МГц), на которых работают усилители промежуточной частоты, фильтры выполняются в виде *LC*-контуров. Амплитудно-частотная характеристика такого фильтра имеет вид, представленный на рис. 4.1. Он характеризуется двумя основными параметрами: центральная частота пропускания - $\omega_{\phi 0}$ и спектральная полоса пропускания - $\Delta\omega_{\phi}$. Или, для частоты в Герцах, $f_{\phi 0}$ и Δf_{ϕ} .

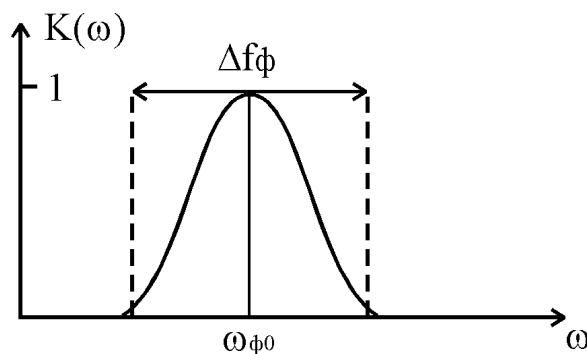


Рис. 4.1. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтра

Флюктуационные помехи на выходе полосового фильтра имеют нормальное распределение $n_\phi(t)$ (так как АЧХ фильтра имеет колоколообразную форму). При этом дисперсия помехи $\sigma_{n\phi}^2 = N_{n\phi} 2\Delta f_{\phi\omega} = D(n_\phi)$, где $N_{n\phi}$ - плотность мощности помехи (на выходе фильтра), $2\Delta f_{\phi\omega}$ - полная энергетическая полоса пропускания фильтра.

Узкополосный флюктуационный шум можно рассматривать как квазигармоническое колебание со случайной амплитудой $\tilde{A}_n(t)$, распределенной по закону Рэлея с фазой $\varphi_n(t)$ по равновероятному закону с несущей $\omega_{no} = \omega_{\phi\omega}$ равной центральной частоте фильтра. Помеха на выходе фильтра будет следующей:

$$n_\phi(t) = A_n(t) \cos[\omega_{\phi\omega} t + \tilde{\varphi}_n(t)]$$

$$\omega(A_n) = \left(\frac{A_n}{\sigma_n} \right) \exp \left\{ \frac{-A_n^2}{2\sigma_{n\phi}^2} \right\}$$

$$\omega(\varphi_n) = \frac{1}{2\pi}$$

$M_1(A_n) = 1,05\sigma_{n\phi}$; $D^{\frac{1}{2}}(A_n) = 0,63\sigma_{n\phi}$ при $K(\omega) = 1$ в области $\omega_{\phi\omega} \pm 1/2 \Delta\omega_\phi$.

Энергетический спектр помехи:

$$G_{n\phi}(\omega) = N_n K_\phi^2(\omega) = N_n K_\phi^2(\Delta\omega, \omega_{\phi\omega}), \text{ где } \Delta\omega = \Delta\omega_\phi.$$

Корреляционная функция помехи имеет вид:

$$r_{n\phi}(\tau) = R_{n\phi}(\tau) \cos \omega_{\phi\omega} \tau.$$

4.2. Искажение информации на выходе фильтра

На рис. 4.2, а показаны эпюры напряжений при прохождении помехи через фильтр, а на рис. 4.2, б частотные характеристики помехи и фильтра вместе с со спектром помех на выходе фильтра и корреляционной функцией помехи на выходе фильтра.

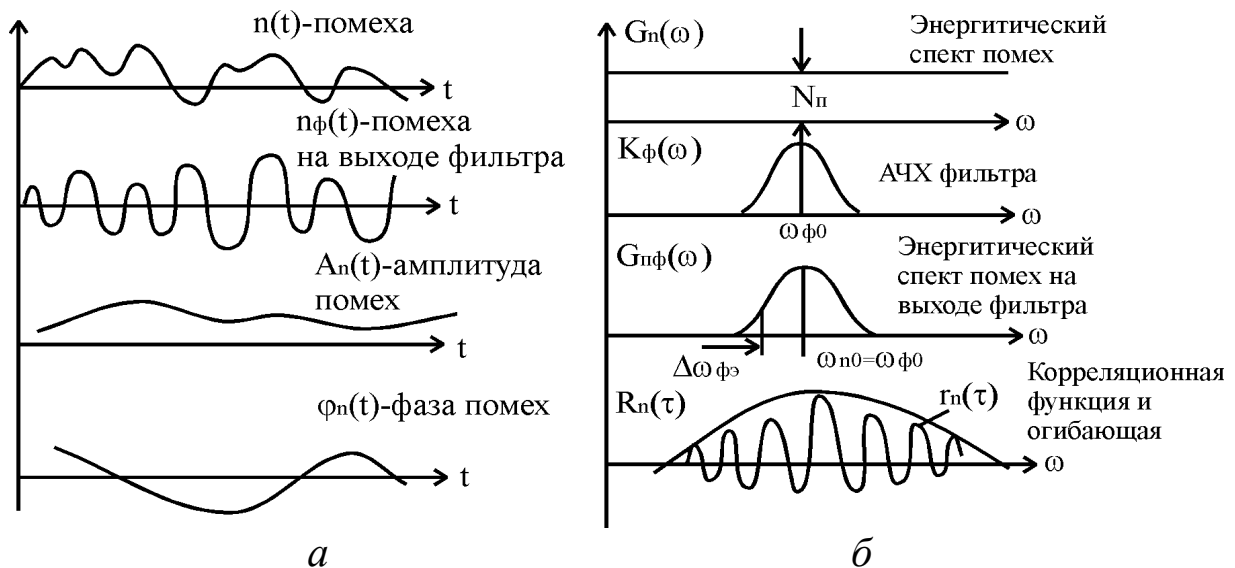


Рис. 4.2. Характер помех на входе и выходе фильтра во временной и спектральной форме

Как следует из приведенных рисунков и пояснений, при прохождении через фильтр помеха уменьшается и видоизменяется, но не исчезает, а превращается в квазигармонический сигнал. Следовательно, она может сложиться с сигналом, причем складывается в векторной форме (с учетом фазы).

Таким образом, на выходе фильтра суммарный сигнал с искажениями, зависящими от амплитуды и фазы сигнала и помехи, как показано на рис. 4.3.

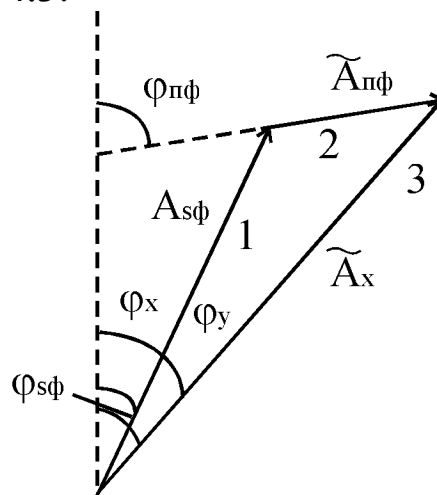


Рис. 4.3. Векторное сложение сигнала и помехи в фильтре (1 – сигнал с фильтра $A_{s\phi}$ $\varphi_{s\phi}$; 2 – помеха с фильтра $A_{n\phi}$ $\varphi_{n\phi}$; 3 – суммарный сигнал на выходе фильтра)

Случайное изменение фазы $\Delta\varphi_{xn}$ можно истолковать как случайное изменение частоты, так как $\Delta\omega_x(t) = \frac{d\Delta\varphi_x(t)}{dt}$ является производной от $\Delta\varphi$.

Спектр флюктуационной помехи (от изменения частоты) определяется выражением:

$$G_{\Delta\omega_x}(\omega) = G_{\Delta\varphi_x}(\omega) \cdot (\omega - \omega_{\phi 0})^2.$$

Из этой формулы следует, что частотная модуляция (ЧМ) уменьшает действие помех в узком спектральном диапазоне. Вместе с тем это достигается за счет расширения спектра сообщения.

Наиболее сильно сообщения искажаются при амплитудной модуляции, меньше - при фазовой, и ещё меньше - при частотной модуляции.

Важной характеристикой сигнала и помехи на входе приемника является отношения “сигнал-шум” $q = P_c / P_{ш}$ (P_c и $P_{ш}$ - мощности сигнала и шума). Увеличение его достигается за счет увеличения мощности передатчика и направленности антенны. Последнее, как будет показано далее, получают путем увеличения размеров антенны. На выходе фильтра получают увеличение отношения “сигнал-шум”.

4.3. Искажения импульсных сигналов

При время–импульсной модуляции ВИМ помеха приводит к задержке относительно тактовых точек и соответствующему искажению информации.

Действие помех приводит к искажению огибающей импульса и изменению положения фронта или достижения максимума. Это ведет к искажению информации.

При расширении полосы пропускания фильтра фронт и максимум импульса более четко выражены. Однако расширение полосы пропускания фильтра приводит к увеличению пропускания помех.

4.3. Действие помех при приеме цифровых сигналов

При приёме цифровых сигналов информация содержится в наличии или отсутствии сигнала (0 или 1).

В фильтре ведется обработка смеси сигнала и помехи, в течение времени действия ожидаемого сигнала, и принимается решение, был сигнал или нет. Наличие помехи приводит к ошибочному решению. При приеме не важно как искажается сигнал в фильтре, важно принять решение “есть сигнал” или “нет сигнала”. Фильтр, обеспечивающий правильное принятие решений, называется оптимальным для импульсных сигналов.

4.5. Оптимизация выделения информации при действии помех

Повышение помехоустойчивости РТС связано с оптимизацией устройств фильтрации (селекции) и обеспечением выделения сигнала на фоне помех. Повышение помехоустойчивости позволяет снизить требования к мощности передатчика и повысить энергетическую эффективность РТС, уменьшить массу и стоимость.

Теоретически оптимальную схему не всегда удастся реализовать, поэтому используют квазиоптимальные системы.

Задача оптимизации фильтра решается для следующих случаев:

- а) информация отображается последовательностью различных дискретных сигналов;
- б) информация имеет характер случайной величины, заложенной в параметре сигнала;
- в) информация является случайной функцией параметра.

4.6. Оптимальное распознавание дискретных сигналов

Оптимальное распознавание дискретных сигналов особенно важно для радиолокации.

Вероятность ошибочных ситуаций:

$$P\left(\frac{p_{ew0}}{S}\right) \cdot P(S) \text{ и } P\left(\frac{p_{ewS}}{0}\right) \cdot P(0).$$

Здесь $P(\text{реш } 0/S)$ – вероятность ошибочного решения о том, что сигнала нет, в то время как он есть, $P(\text{реш } S/0)$ – вероятность ошибочного решения о том, что сигнал есть, в то время как его нет.

Неправильные решения могут иметь нежелательные последствия и важно знать “цену” ошибок: $C_{S \rightarrow 0}$ $C_{0 \rightarrow S}$.

Средний риск (ущерб от неправильных решений) будет:

$$\rho = C_{S \rightarrow 0} \cdot P\left(\frac{\text{реш } 0}{S}\right) \cdot P(S) + C_{0 \rightarrow S} P\left(\frac{\text{реш } S}{0}\right) \cdot P(0)$$

Критерий оптимальности – минимум потерь: $\rho \rightarrow \min$

При решении задачи оптимальности обычно используют вероятностное описание сигнала и помехи: $x(t) = S(t) + n(t)$.

Минимум среднего риска обеспечивается при условии:

$$\frac{W(x_1, x_2, \dots / S, n)}{W(x_1, x_2, \dots / n)} = \Lambda(S) \geq \Pi = \frac{P(0)C_{0 \rightarrow S}}{P(S)C_{S \rightarrow 0}} \rightarrow \text{реш. } S_1,$$

где $W(x_1, x_2, \dots / S, n) \rightarrow$ многомерное распределение вероятности сигнала и помехи.

$W(x_1, x_2, \dots / n) \rightarrow$ многомерное распределение вероятности помехи.

Π – порог, определяемый из условия минимума потерь. Если $\Lambda(S) < \Pi$ – сигнала нет. При $\Lambda(S) \geq \Pi$ – сигнал есть.

$\Lambda(S)$ называется отношением правдоподобия (Байеса), Π – порог (критерий) правдоподобия.

4.7. Схема обнаружения сигнала на фоне помех

Система по схеме обнаружения сигнала на фоне помех определяет наличие или отсутствие сигнала не обращая внимания на степень воспроизведения самого сигнала. Оптимальное распознавание импульсных сигналов на фоне сильных помех можно осуществить с помощью устройства, схематически представленного на рис. 4.4.

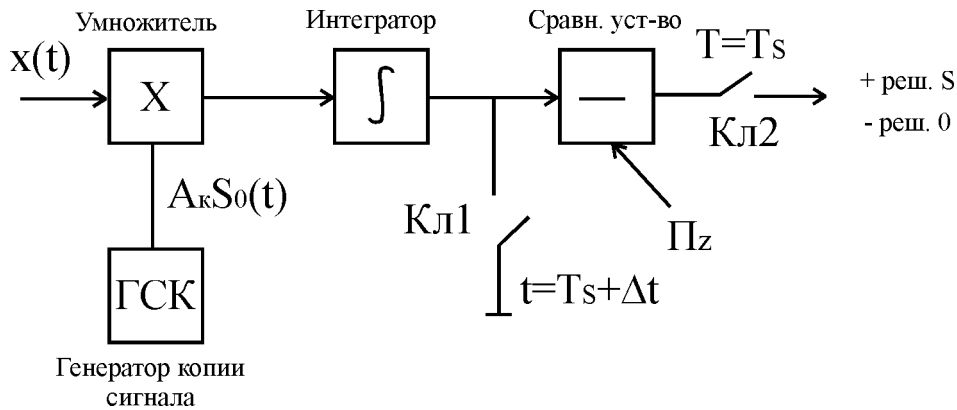


Рис. 4.4. Структурная схема устройства обнаружения импульсного сигнала на фоне помех

Устройство по схеме, представленной на рис. 4.4, осуществляет вычисление значения взаимной корреляционной функции между сигналом $S_0(t)$ и копией сигнала $\lambda(t)$ с последующим принятием решения о наличии сигнала на фоне помех.

Вычисление осуществляется по формуле:

$$\int_0^{T_s} A_k S_0(t) \cdot \lambda(t) dt = Z \geq \Pi_z = \left(\frac{N_n A_k}{2A_s} \right) \ln \Pi + \frac{E_s A_k}{2A_c}$$

Здесь приняты следующие обозначения:

N_n - плотность мощности помехи,

A_k - амплитуда помехи,

A_s - амплитуда сигнала,

$A_k S_0(t) \cdot \lambda(t)$ - функция корреляции $\tau = 0$,

При $Z \geq \Pi_z$ - режим S (сигнал есть), при $Z < \Pi_z$ - режим 0 (сигнала нет).

Помеха имеет случайную амплитуду A_n и фазу φ_n и поэтому при интегрировании нейтрализуется. В момент $t = T_s$ отношение “сигнал/шум” максимально.

Сигнал складывается в фазе с сигналом генератора копии сигнала (ГКС) (с небольшим отклонением по фазе) и интегрируется. В конце действия сигнала $t = T_s$ замыкается Ключ 2 и знак напряжения символизирует решение (+ - сигнал есть, - - сигнала

нет).

Приведенное устройство усредняет сигналы и помехи на интервале T_s и потому не воспринимает отдельные скачки амплитуды помехи.

4.8. Схема обнаружения сигнала со случайной фазой

В предшествующей схеме важно, чтобы сигнал совпадал по фазе с копией сигнала. В случае произвольной фазы сигнала можно использовать схему, представленную на рис. 4.5.

При случайной фазе сигнал при $t \in [0, T_s]$

$$S(t) = \tilde{A}_s \cos(\omega_{s0}t - \tilde{\varphi}_{s0}) = A_s \cos \varphi_{s0} \cos \omega_{s0}t + A_s \sin \varphi_{s0} \sin \omega_{s0}t - t.$$

Сигнал со случайной фазой можно рассматривать как сумму двух сигналов со случайной амплитудой с известной фазой и сигнал со сдвигом на $\pi/2$.

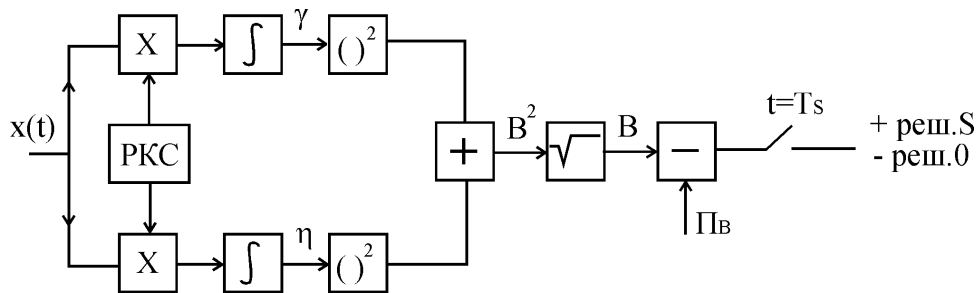


Рис. 4.4. Структурная схема устройства обнаружения импульсно-го сигнала со случайной фазой на фоне помех

Отклики складываются квадратурно и сравниваются с порогом:

$$\begin{aligned} \gamma &= \int_0^t X(t) A_k S_0 \left(t, \frac{\pi}{2} \right) dt & B^2 &= \gamma^2 + \eta^2 \\ \eta &= \int_0^t X(t) A_s S_0(t) dt & \Pi_B &= \left(\frac{N_n}{2A_k} \right) \arg \ln I_0 \left(\ln \Pi + \frac{E_s}{N_n} \right) \end{aligned}$$

В выражении для порога $\Pi = \frac{P(0) \cdot \Pi_{0 \rightarrow S}}{P(S) \cdot \Pi_{S \rightarrow 0}}$ используется функция Бесселя нулевого порядка I_0 , A_k - амплитуда копии сигнала, E_s - мощность сигнала, N_n - мощность помехи.

ГЛАВА 5. СОГЛАСОВАННЫЕ ФИЛЬТРЫ

5.1. Свойства согласованных фильтров

Согласованный фильтр (СФ) обеспечивает на выходе максимальное отношение “сигнал/шум” и вычисление корреляционной функции. При создании СФ используются сведения о сигнале не в форме функции времени как в корреляторах, а в форме спектра.

СФ должен иметь АЧХ тождественно равную спектральной характеристике сигнала. Тогда он пропустит сигнал и максимально отфильтрует помехи.

Преобразование Фурье сигнала имеет следующий вид:

$$F_S(j\omega) = F(S(t)) = F_S(\omega) \exp\{j\varphi_S(\omega)\},$$

где F – символ преобразования Фурье;

$F_S(j\omega)$ – спектр сигнала в комплексной форме,

$F_S(\omega)$ – амплитудно-частотный спектр (АЧХ сигнала),

$\varphi_S(\omega)$ – фазочастотный спектр (ФЧХ сигнала).

Согласованный со спектром фильтр должен иметь комплексную частотную характеристику, согласованную со спектром сигнала:

$$K_{C\Phi}(j\omega) = F_S(\omega) \exp\{-j\varphi_S(\omega)\} \cdot \exp(-j\omega T_S) = K_{C\Phi}(\omega) \exp[j\varphi_{C\Phi}(\omega)]$$

или $K_{C\Phi}(\omega) = F(\omega)$ и $\varphi_{C\Phi}(\omega) = -\varphi_S(\omega) - \omega T_S$.

В момент окончания сигнала ($t = T_S$) СФ обеспечивает максимальное отношение “сигнал/помеха”. Отклик на выходе СФ во все моменты действия сигнала соответствует корреляционной функции:

$$Z_{S\Phi}(t_1) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t - t_1) \cdot S(t) dt$$

t_1 – время до конца действия сигнала T_S .

В момент $t = T_S$ $t_1 = 0$ и $Z_{C\Phi}(t_1 = 0) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \cdot S(t) dt$.

То есть получили, тот же результат, что и для коррелятора в момент $t = T_S$.

СФ инвариантен к фазе и задержке, то есть при любой начальной фазе и задержке откликается одинаково. Для получения отклика, независимого от начальной фазы (для сигнала со случайной фазой), достаточно на выходе включить амплитудный детектор, который выделит огибающую отклика или огибающую автокорреляционной функции сигнала.

5.2. Схемы согласованных фильтров

На рис. 5.1 показана структурная схема фильтрации с СФ радиосигнала длительностью T_s . При $t=T_s$ электронный ключ включается и на выходе образуется сигнал оценки решения (+ - сигнал есть, - - сигнала нет).

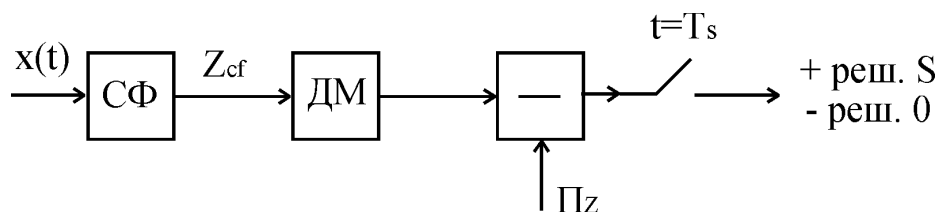


Рис. 5.1. Структурная схема устройства с согласованным фильтром (СФ) (ДМ – демодулятор, «—» - устройство сравнения с пороговым значением Π_z)

При частотной манипуляции важно принять решение о переходе с одной частоты на другую. Структурная схема устройства согласованной фильтрации для оптимального распознавания сигналов при частотной манипуляции приведена на рис 5.2.

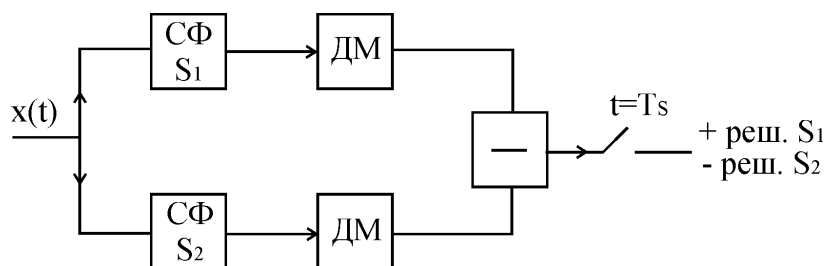


Рис. 5.2. Структурная схема устройства согласованной фильтрации для распознавания сигналов с частотной манипуляцией

Узкополосные согласованные фильтры СФ-S₁ и СФ-S₂ с пропусканием на частотах манипуляции f_1 и f_2 обеспечивают высокую помехоустойчивость и надежность системы.

5.3. Реализация СФ и квазисогласованные фильтры

Обычные радиосигналы квазипериодичны, т.е. содержат несколько периодических составляющих. Например, импульсный радиосигнал длительностью τ содержит несущую частоту ω_0 и ряд гармоник, задаваемый преобразованием Фурье для импульсного изменения напряжения. Фильтрацию таких сигналов можно провести устройством по схеме рис.5.3.

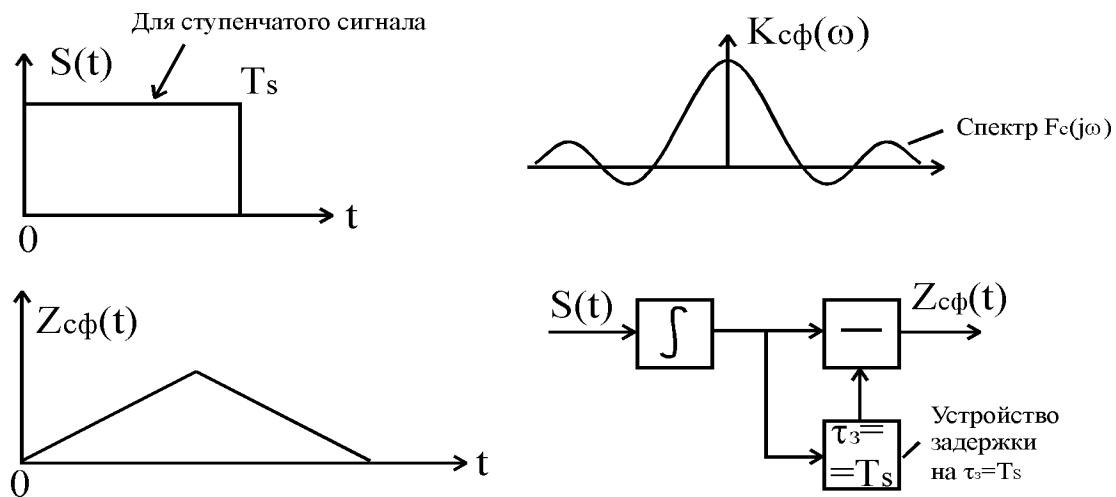
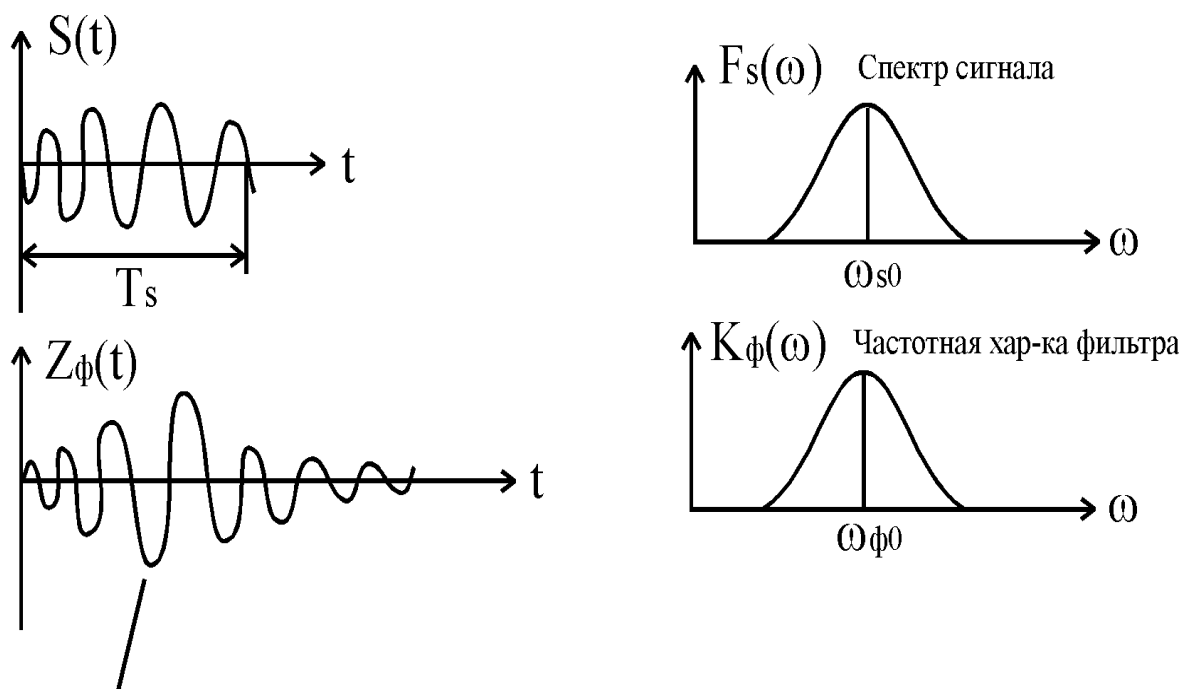


Рис. 5.3. Схема устройства согласованной фильтрации для импульсного сигнала длительностью T_s и его входная, выходная и передаточная характеристики

На рис. 5.4 показаны: измерение импульсного радиосигнала длительностью $\tau = T_s$ после детектирования $S(t)$; комплексная спектральная характеристика согласованного фильтра $K_{cf}(\omega)$, согласованная со спектром сигнала $F_c(j\omega)$; сигнал на выходе фильтра $Z_{cf}(t)$. Анализ работы этого устройства показывает, что оно фактически вычисляет корреляционную функцию, сигнал на выходе фильтра $Z_{cf}(t)$ имеет максимум в конце интервала наблюдения T_s .



Отклик на выходе фильтра близок к корреляционной функции.

Рис. 5.4. Вид радиосигнала, его спектральная характеристика, соответствующая АЧХ согласованного с сигналом фильтра для импульсного сигнала длительностью T_s , и отклик на выходе фильтра

Основной смысл *согласованной фильтрации* состоит в накоплении действия сигнала и выявлении коррелированности (схожести) принятой смеси и ожидаемого сигнала (корреляционный метод). Оптимальный алгоритм согласованной фильтрации не зависит от отношения “сигнал/шум”.

При *квазисогласованной фильтрации* центральная частота пропускания фильтра $\omega_{0\phi}$ должна быть равна частоте сигнала ω_{0c} , а ширина его полосы пропускания $\Delta\omega_{\phi}$ должна быть равна ширине спектральной полосы сигнала $\Delta\omega_c$, т.е. $\omega_{0\phi} = \omega_{0c}$ и $\Delta\omega_{\phi} = \Delta\omega_c$. Таким образом, обычный *RLC*-контур осуществляет квазисогласованную фильтрацию, если его резонансная частота совпадает с частотой принимаемого сигнала, а ширина полосы пропускания отрегулирована внутренним сопротивлением R контура и равна спектральной полосе сигнала.

5.4. Ошибки при обнаружении и распознавании сигнала с известными параметрами

Функция распределения откликов и вероятность ошибок для согласованных фильтров и корреляторов одинаковы.

Дисперсия для помехи: $\sigma_{zn}^2 = \frac{N_n T_s}{4}$, где N_n - плотность мощности помехи.

Отклик на сигнал на выходе согласованного фильтра в момент $t = T_s$:

$$Z_s = \int_0^{T_s} \left(\frac{A_k}{A_s} \right) \cdot S^2(t) dt = E_s \left(\frac{A_k}{A_s} \right) = \frac{A_s T_s}{2}, \text{ где } A_s - \text{ амплитуда}$$

сигнала, T_s - время наблюдения.

Отношение сигнал/шум в момент $t = T_s$:

$$\frac{Z_s}{\sigma_{zn}} = \frac{A_s T_s}{2 \cdot \sqrt{\frac{N_n T_s}{4}}} = \sqrt{\frac{2E_s}{N_n}}.$$

Критерий Неймана – Пирсона устанавливает порог, исходя из допустимой вероятности ложных обнаружений.

$$\otimes P_{z0n} \left(\frac{peuS}{0} \right) = \int_{\Pi_{zHP}}^{\infty} \omega(Z_n) dZ_n = 1 - F \left(\sqrt{\frac{4}{N_n T_s}} \right) \Pi_{zHP},$$

$$\text{где } F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx, \Pi_{zHP} - \text{ порог, выбираемый по}$$

критерию Неймана – Пирсона.

Из выражения $\otimes \rightarrow$ следует:

$$\Pi_{zHP} = \sqrt{\frac{T_s N_n}{4}} \arg F \left[1 - P_{z0n} \left(\frac{peuS}{0} \right) \right],$$

где $\sqrt{\frac{T_s N_n}{4}}$ - порог, не зависящий от интервала наблюдения сигнала.

Вероятность пропуска сигнала равна:

$$P \left(\frac{peu0}{S} \right) = 1 - P \left(\frac{peuS}{S} \right) = 1 - F \left[\sqrt{\frac{2E}{N_n}} - \arg F \left(1 - P_{don} \left(\frac{peuS}{0} \right) \right) \right].$$

В системах с активной помехой, вероятность ошибки составит:

$$P_{ош} = 1 - F\left(\sqrt{\frac{E_s}{N_n}}\right).$$

5.5. Ошибки обнаружения сигналов со случайной фазой

Если фаза случайна, то можно получить функции распределения отклика на помеху и на смесь помехи с сигналом. Если амплитуда сигнала неизвестна, то порог обнаружения $\Pi_{обнар}$ устанавливают исходя из допустимого уровня ложных обнаружений, то есть из заданной вероятности $P_{дон}\left(\frac{решS}{0}\right)$.

$\Pi_{ВНП} = \sqrt{-2 \ln\left[P_{дон}\left(\frac{решS}{0}\right)\right]} \cdot \sqrt{\frac{T_s N_n}{4}}$ - порог и критерий Неймана–Пирсона.

Вероятность пропуска сильного сигнала:

$$P\left(\frac{реш0}{S}\right) = 1 - F\left[\sqrt{\frac{2E_s}{N_n}} - \sqrt{-2 \ln\left[P_{дон}\left(\frac{решS}{0}\right)\right]}\right].$$

Расчетные кривые правильного обнаружения при разных отношениях сигнал/шум приведены на рис. 5.5.

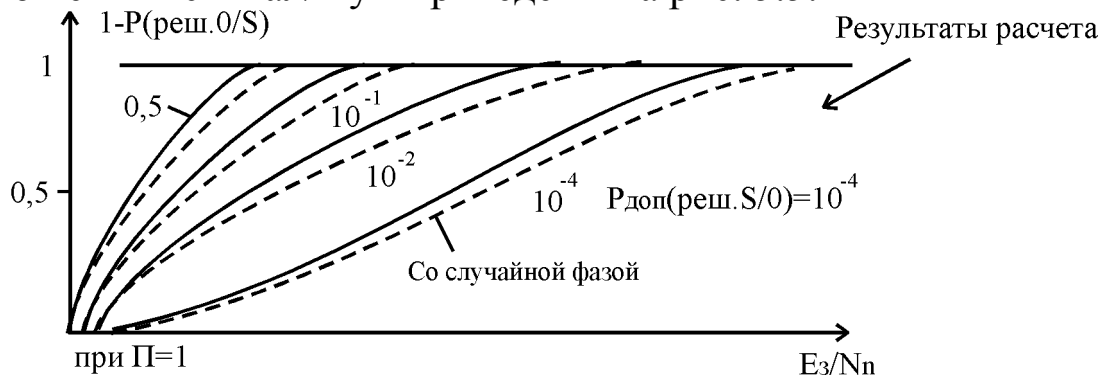


Рис. 5.5. Расчетные кривые правильного обнаружения при разных отношениях сигнал/шум

Вероятность появления ошибок при принятии решения можно оценить по формуле:

$$P_{ош} \cong 0,5 \left\{ e^{\frac{-E}{4} N_n} + \left[1 - F\left(\sqrt{\frac{E_s}{2N_n}}\right) \right] \right\}.$$

Результаты расчета приведены на рис. 5.6.

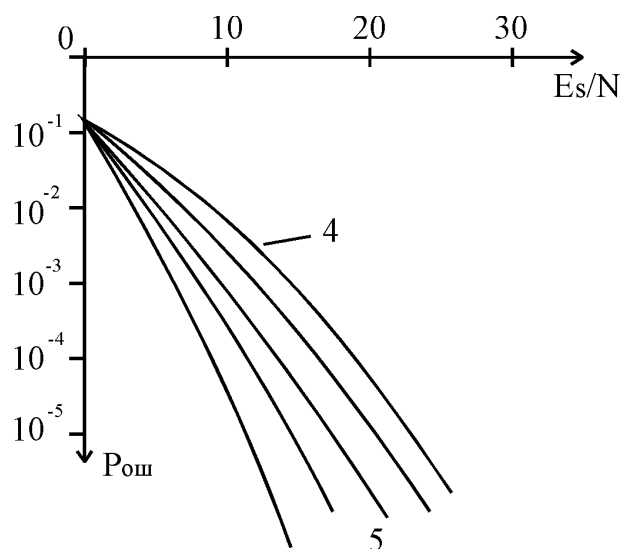


Рис. 5.6. Вероятность ошибочных решений при увеличении отношения «сигнал/шум»

При использовании ортогональных (взаимно независимых) сигналов s_1 и s_2 (с различными частотами f_1 и f_2), ошибка возникает, когда отклик канала без сигнала S_0 больше чем у канала сигнала S_s . В этом случае $N_n > E_s$ и вероятность ошибки определяют по формуле: $P_{\text{ош}} = 0,5 \exp(-E_s/2N_n)$

Мощность помехи в полосе частот Δf_s сигнала составляет:

$$\sigma_n^2 = N_n \cdot 2\Delta f_s.$$

Результаты расчетов приведены на рис. 5.6.

Следствие: $P_{\text{ош}}$ и сигнал/шум на выходе оптимального фильтра зависят только от энергии сигнала и плотности мощности помех на входе фильтра. Чем длиннее сигнал, тем уже его спектр Δf и меньше помех на выходе фильтра. При увеличении скорости передачи информации для обеспечения уровня достоверности необходимо увеличивать мощность сигнала. При медленной передаче мощность сигнала можно уменьшить (дальность возрастает). В релейных линиях передачи информации $T_s = 1$ нс. В дальней космической связи $T_s = 1$ сек.

ГЛАВА 6 ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ И ВЫДЕЛЕНИЯ СООБЩЕНИЙ

6.1. Критерий максимального правдоподобия

Сигнал поступает на входе приемника с помехой $n(t)$:

$$X(t) = S(t, \tilde{E}) - n(t).$$

Критерий минимума дисперсии ошибок при оценке параметра \tilde{E} сигнала:

$$D\left(\frac{\hat{E} - \tilde{E}}{x_1 \cdot x_2 \dots}\right) = \int_{-\infty}^{\infty} (\hat{E} - \tilde{E})^2 \omega(E(x_1, x_2, x_3)) dE = \min.$$

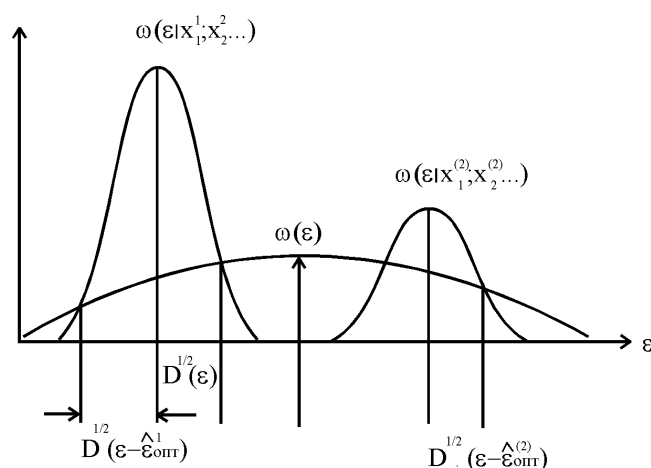


Рис. 6.1. Функции распределения апостериорной вероятности для двух оценок параметра

Критерий максимума апостериорной вероятности и максимального правдоподобия заключается в следующем:

$$d\omega(E(x_1, x_2, \dots))dE|_{E=\hat{E}_{opt}} = 0 \quad (\text{условие максимума}),$$

где $d\omega(E(x_1, x_2, \dots))$ - функция апостериорного распределения вероятности (рис. 6.1).

У функций $\omega(E(x_1, x_2, \dots))$ и $\omega(x_1, x_2, \dots|_E)$ - максимумы совпадают, следовательно $|\omega(x_1, x_2, \dots|_E)|_{E=\hat{E}_{opt}} = \max$ - критерий максимума и правдоподобия.

Структурные схемы выбора параметров по критерию максимального правдоподобия показаны на рис. 6.2.

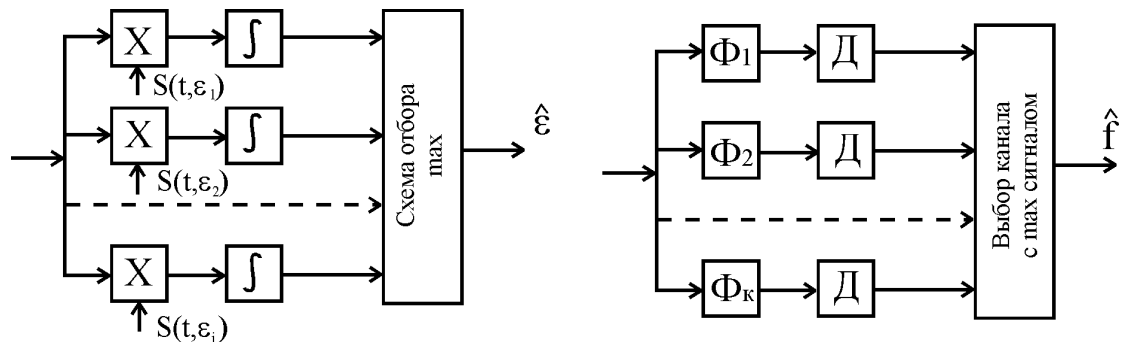


Рис. 6.2. Структурные схемы выбора параметров по критерию максимального правдоподобия в области набора параметров ε и в частотной области

В реальных РТС параметром ε может быть дальность до цели, скорость цели, угол места, азимут и т.п.

6.2. Влияние помех на оценку параметра

При отсутствии помехи настроенный фильтр даст оптимальную оценку частоты. При помехах сигнал и помеха суммируются и наблюдается смещенная оценка: $E_{omn} = \hat{E} + \Delta \hat{E}$.

$$\Delta E = \Delta Z_s(t_H) / d^2 Z_s(t) / dE^2$$

$$D^{\frac{1}{2}}(\Delta E) = D^{\frac{1}{2}} \frac{[Z_s(t_H)]}{\left[\frac{d^2 Z_s(t_H)}{dE^2} \right]} = \sqrt{\frac{0,5N_n}{E_{SH}}} / d^2 Z_{s0}(t_H) / dE^2$$

То есть, среднеквадратическая ошибка (с.к.о.) оценки зависит от второй производной функции корреляции сигнала, а также от отношения мощности помехи и сигнала.

Оценки с.к.о. смещения для φ, ω и задержки τ .

$$\sigma_\varphi = \sqrt{\frac{N_n}{2E_{SH}}} ; \quad \sigma_\omega = \frac{\sqrt{N_n}}{1,2T_S} ; \quad \sigma_\tau = \frac{T_S \sqrt{N_n}}{1,65},$$

где T_S - длительность импульсных сигналов.

Из приведенных выражений следует, что, чем больше T_S ,

тем менее точно определяется дальность (E) и более точно частота ω (скорость цели). Т.е., для непрерывного радиосигнала $T_s = T_H$ частота измеряется с наибольшей точностью, а дальность измерить нельзя. Как известно, для точного определения скорости цели радиолокационным методом, необходимо знать доплеровское смещение частоты с большой точностью, по этому T_s должно быть достаточно большим (много больше рабочей длины волны).

6.3. Оптимизация выделения сообщения из сигнала и помех

Обычно сообщение $S(t, \varepsilon(t))$ описывается случайной функцией. Информационной параметр сигнала $\varepsilon(t)$ также является случайным процессом с плотностью распределения вероятности $W(\varepsilon)$ и энергетическим спектром $G_s(\omega)$. Обычно ставится задача выделить $\varepsilon(t)$ на фоне помех. При этом неважно искажение самого сигнала важно воспроизведение сообщения $\varepsilon(t)$. Решение этой задачи осуществляется с помощью линейной и нелинейной фильтрации.

Линейная и нелинейная фильтрация

Линейная фильтрация осуществляется на фильтрах с линейными элементами (как правило, RLC -цепями и контурами). *Нелинейная* – на нелинейных элементах и устройствах или на цифровых вычислительных машинах.

Как и ранее, полагаем на входе приемника сигнал с помехой:

$$x(t) = S(t, \tilde{\varepsilon}(t)) + n(t).$$

Устройство фильтрации (фильтр) выдает оценки $\hat{\varepsilon}(t)$.

Критерий оптимальной фильтрации – минимум дисперсии отклонения от оценки $\hat{\varepsilon}(t)$:

$$D[\tilde{\varepsilon}(t) - \hat{\varepsilon}(t)] \rightarrow \min$$

Устройство фильтрации может осуществлять линейные и нелинейные преобразования сигнала (линейная и нелинейная фильтрация).

Аддитивное взаимодействие сигнала и помех

Сигналы поступают на вход приемника с помехами:

$$x(t) = S_H(t) + \tilde{n}(t) \quad S_H(t) = C \cdot I(t)$$

Оптимальный фильтр может быть осуществлен на линейных элементах R, L, C , (RLC - контурах).

При $n(t)$ и $S_H(t)$ стационарный случайный процесс с энергетическим спектром $G_{SK}(t)$ и $G_n(\omega)$.

Критерий оптимальности имеет вид :

$$D[\tilde{S}_n(t) - S_H(t)] \rightarrow \min,$$

где $S(t)$ - сигнал на выходе фильтра.

Амплитудно-частотная характеристика оптимального фильтра

Амплитудно-частотная характеристика оптимального фильтра дается выражением:

$$K_{\phi opt}(\omega) = G_{SH}(\omega) / [G_{SK}(\omega) + G_n(\omega)]$$

Такой фильтр называют фильтром Колмогорова-Виннера. При малой помехе $K_{\phi}(\omega) = 1$ и он может пропускать все составляющие спектра .

При равномерном спектре помехи $G_n(\omega) \approx N_0$ и большом ее уровне $K_{\phi opt}(\omega) = G_{SH}(\omega) / N_0$ т.е. то же закон, что и у согласованного фильтра $K(\omega) = G(\omega)$.

Квазиоптимальная фильтрация сообщений

Квазиоптимальная фильтрация сообщений, содержащихся в параметрах радиосигнала, заключается в следующем алгоритме обработки:

Сигнал с помехой \rightarrow фильтр \rightarrow сигнал с ослабленной помехой \rightarrow детектор \rightarrow измеритель $\varepsilon(t) + n(t)$ фильтр \rightarrow оценка $\varepsilon(t)$.

В радиолокационных системах (РЛС) используется информация о дальности, углах, об угловой и радиальной скорости. Соответственно фильтрации подвергаются данные о дальности (селекция по дальности), углах (селекция по углам), об угловой и

радиальной скорости (селекция по угловой и радиальной скорости). Иногда говорят о селекции по траектории (фильтрация траектории).

6.4. Методы борьбы с источниками помех в РТС

Виды помех и методы борьбы с ними

Виды помех, их источник и методы борьбы с ними приведены в таблице 6.1.

Сложные сигналы подвергаются дополнительной модуляции (манипуляции), не содержащей сообщения, при этом спектр сигнала облегчает его выделение на фоне помехи. Такие методы находят наибольшее применение в импульсных и дискретных системах.

Таблица 6.1

Виды помех, их источник и методы борьбы

П№	Вид помехи	Источник и модель	Метод борьбы
1.	Случайные	Всевозможные, стационарный случайный шум	Оптимальная фильтрация
2.	Флуктационные	Нестационарный случайный шум	Линейные согласованные фильтры
3.	Квазигармонические	Соседние станции	Узкополосные фильтры
4.	Импульсные	Специальные помехи, отражения	Импульсная фильтрация. Прием только в определенный период.
5.	Подобные сигналу	Другие РТС, помехи случайные	Выделить сигнал при большой помехе нельзя. Необходимо повысить мощность сигнала или перейти на другую рабочую волну.
6.	Шумоподобные сигналы	Генераторы шума, широкополосный шум	Специальная фильтрация

ГЛАВА 7 ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В РТС

7.1. Характеристики направленной антенны РТС

В зависимости от требований к точности сообщений, метода модуляции и спектра сообщений (скорости передачи данных) требуется различная амплитуда $A_{\text{пр}}$ или мощность принимаемого сигнала $P_{\text{пр}}$ на входе приемника, которые зависят от направленности (усиливающего эффекта) передающей антенны.

Для направленных антенн РТС СВЧ и УВЧ поверхность передающей антенны пропорциональна её диаметру d_A :
$$S_{A \text{ ПЕР}} \approx d_{A \text{ ПЕР}}^2 \quad (S_A = \pi r^2 = \pi d_A^2 / 4).$$

Распределение мощности излучения относительно оси антенны называется **диаграммой направленности антенны**. Экспериментально она определяется с помощью приемника-измерителя по направлению перпендикулярному оси антенны на большом расстоянии от неё. В результате получают распределение энергии близкое к нормальному, как показано на рис. 7.1.

Основной характеристикой антенны является угол расходимости радиолуча θ , называемый **шириной диаграммы направленности антенны**. Этот угол измеряется между лучами, проведенными от излучателя антенны к точкам на уровне $0,5 P_{\text{max}}$, где P_{max} - максимальное значение излучения.

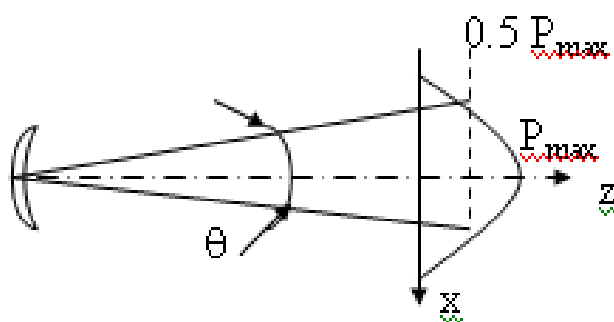


Рис. 7.1. Схема измерения диаграммы направленности и ширины диаграммы направленности

Для параболических антенн ширина диаграммы направлен-

ности в радианах определяется по формуле:

$$\theta = \lambda_s / d_A,$$

где λ_s - рабочая длина волны, d_A - диаметр антенны.

Так как 1 радиан=58°, ширину диаграммы направленности в градусах принято определять из выражения:

$$\theta_A^\circ = 60 \lambda_s / d_{A \text{ ПЕР}}.$$

Коэффициент усиление по мощности за счет направленного излучения определяется по формуле:

$$G = 4\pi S_{A \text{ ПЕР}} / \lambda_s^2.$$

Плотность потока мощности в направлении максимально-го излучения антенны на расстоянии D будет:

$$P_S = P_{\text{ПЕР}} G_{A \text{ ПЕР}} / 4\pi D^2,$$

где $P_{\text{пер}}$ – мощность передатчика.

7.2. Мощности передачи и приема сигналов РТС

Мощность радиоизлучения, поступающего на вход приемника другой (принимающей сообщение) РТС будет:

$$P_{S \text{ ПР}} = S_{A \text{ ПР}} P_S = \frac{P_{\text{ПЕР}} G_{A \text{ ПЕР}}}{4\pi D} S_{A \text{ ПР}} \eta \dots \dots \dots (*)$$

η - коэффициент, затухания в атмосфере $\eta(\omega, t, \lambda)$.

Отношение “сигнал/шум” на входе приемника составит:

$$q = P_{S \text{ ПР}} / P_{\text{ш ПР}},$$

где $P_{\text{ш ПР}}$ – мощность шума на входе приемника.

Допустимая величина q зависит от требований к точности при данной модуляции сигнала (обычно для высокой точности приема требуется $q \approx 10^4$).

Пример:

$$d_A = 25 \text{ м}, G_A = 3 \cdot 10^6, D = 35000 \text{ м}, \Delta f = 2 \text{ МГц}, S_{A \text{ ПР}} = 2 \text{ м}^2,$$

$$T_{\text{шума}} = 1000^\circ \text{К}, q = 10^4.$$

По формуле (*) имеем $P_{\text{перед}} = 10 \text{ кВт}$.

7.3. Расчет мощности передатчиков

Изменение напряженности электромагнитного поля в мкВ\м изменяется с дальностью по закону:

$$E_{\Pi} = \frac{10^4 \sqrt{P_{\text{изл}}}}{D} \eta ,$$

где $P_{\text{изл}}$ - мощность излучателя в Вт ; D - дальность в км ; η - коэффициент ослабления антенно-фидерного тракта.

Мощность передатчика на выходе направленной антенны составит:

$$P_{\text{пер}} = \frac{P_{\text{изл}}}{1600(h_{\text{А ПЕР}}/\lambda_s)^2 R_{\text{ПОТЕРЬ}}}$$

Ослабление электрического поля в зависимости от дальности и вида Земной поверхности приведено на рис. 7.2.

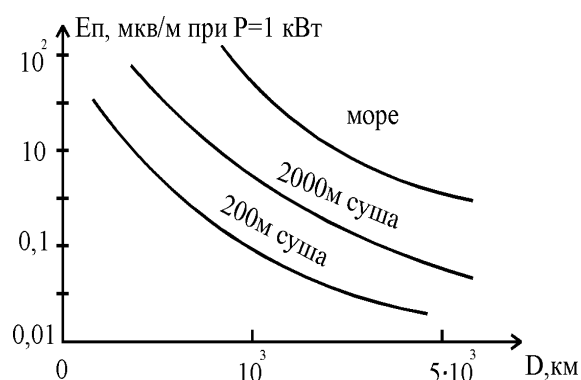


Рис. 7.2. Ослабление электрического поля в зависимости от дальности и вида Земной поверхности

Необходимая напряженность электромагнитного поля на входе приемника задается формулой:

$$E_{\text{ПР}} = \gamma U_{\text{Ш ВХ}} \sqrt{2\Delta f_{\Phi}} / K_{\text{ВХ}} h_{\text{А ПР}} ,$$

где γ -требуемое превышение сигнала над помехой.

Мощность передачи для надежного превышения сигнала над помехой можно рассчитать по формуле:

$$P_{\text{пер}} = \frac{(E_{\Pi} / E_{\text{ПР}})^2}{1600(h_{\text{А ПЕР}}/\lambda_s)^2 / R_{\text{ПОТЕРЬ}}}$$

Ослабление сигнала в радиолинии и в атмосфере удобно рассчитывать в дБ:

$$D = 10 \lg \frac{P_{\text{ПЕР}}}{P_0} \quad \text{дБ}$$

Затухание сигнала на единице расстояния определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{D}{L} \quad \text{дБ/км}$$

Напряженность поля $E_{\text{П}}$ от антенны передатчика для средних и низких частот (СЧ и НЧ) уменьшается с дальностью (D) как $1/D$ (распределение поля по поверхности). Реальное ослабление происходит быстрее из-за поглощения радиоволн. Интенсивность сигнала зависит от мощности $P_{\text{ПЕР}}$ и высоты передающей антенны над уровнем Земной поверхности $h_{\text{А.пер}}$. Антенна приемника для НЧ и СЧ принимает не только сигнал, но и атмосферные помехи, интенсивность которых зависит от рабочей частоты и времени суток.

Необходимо находить оптимальную высоту и размеры антенны для получения оптимального отношения “сигнал-шум” при условии примерного равенства внутренних шумов и атмосферных шумов.

ГЛАВА 8 РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

8.1. Назначение и особенности систем передачи информации

Передача информации с помощью РТС имеет особенности в зависимости от типа сообщений, типа обмена и дальности действия и др., которые необходимо учитывать при проектировании.

Типы сообщений: телеграфные, речь, телевидение, факсимильная, цифровые.

Дальность: от 1 км (местная связь) до 1000 млн. км (космическая связь).

Открытость. Использование радиосигналов в свободном пространстве (затухание сигнала, наличие помех, возможность перехвата сообщений).

Классификация РТС:

- 1) По количеству каналов - одноканальная, многоканальная.
- 2) По режиму использования каналов - односторонняя (радиовещание, ТВ); двухсторонняя - симплексная (последовательная), дуплексная (одновременная, телефон), полудуплексная.
- 3) По типу каналов - спутниковая, наземная радиосвязь, радиорелейная.
- 4) По виду информации - непрерывная, дискретная, импульсная, цифровая.
- 5) По виду модуляции – амплитудная, частотная, фазовая.
- 6) По используемой рабочей частоте (длине волны) – длинноволновая, коротковолновая, сантиметровая, НЧ, ВЧ, СВЧ, УКВ и т.д.
- 7) По дальности действия – космическая связь, глобальные, магистральные, зональные, местные.
- 8) По назначению системы - служебная, морская (торговый флот, рыболовецкая, военно-морская), авиации (гражданский воздушный флот, военная авиация) и т.д.
- 9) По типу связи - проводные системы передачи информации, кабельная (коаксиальная, волоконно-оптическая), радиорелейная.
- 10) По требованиям к точности и помехоустойчивости.
- 11) По мобильности (стационарные, автомобильные, переносные).
- 12) По виду питания (сетевое питание, батарейные, с автономным генератором).

8.2. Модуляция и демодуляция радиосигнала

Общий вид радиосигнала:

$$S(t) = A_s \cos(\omega_{s0}t + \varphi_{s0}),$$

где $A(t)$ - амплитуда, ω_{s0} - несущая частота, φ_{s0} - фаза сигнала

ла.

При передаче сообщений используется амплитудная (АМ), фазовая (ФМ) и частотная (ЧМ) модуляция.

1. Амплитудная модуляция

Изменяется амплитуда $A(t)$. Предельное изменение амплитуды ΔA . Величина, характеризующая изменение амплитуды $\Delta A/A$ называется глубиной модуляции.

При амплитудной модуляции спектр сигнала имеет дополнительные составляющие $\omega_{s0} \pm \Omega$ (Ω - боковые частоты).

Выделение информационного сигнала $A(t)$ из радиосигнала на несущей частоте называется демодуляцией или детектированием (выделение огибающей радиосигнала).

Использование- радиовещание, телевидение.

3. Частотная модуляция.

$$\omega_{s0}(t) = \omega_{s0} + \Delta\omega_s(t),$$

где $\Delta\omega_s$ – девиация частоты.

Величина $\Delta\omega_s/\omega_{s0}$ называется глубиной модуляции. Обычно она $\ll 1$.

Спектр сигнала как при амплитудной модуляции: $\omega_{s0} \pm \Omega$.

Выделение информационного сигнала $\omega(t)$ из радиосигнала на несущей частоте осуществляют частотным детектированием. В частотном детекторе используется левый пологий склон АЧХ усилителя с колоколообразной формой АЧХ. На выходе усилителя получают информационный сигнал в виде изменения амплитуды $A(t)$.

2. Фазовая модуляция.

$$\varphi_s(t) = \varphi_{s0} + \Delta\varphi_s(t)$$

Фазовая модуляция используется редко, в основном в системах специального назначения. Эффективна в телеграфных и цифровых сообщениях при наличии помех. Для фильтрации используются узкополосные фильтры и фильтры на поверхностных ультразвуковых волнах.

Обычно спектр радиосигнала имеет нормальное распределение, а ширину спектральной полосы $\Delta\omega_{s0}$ определяют по уров-

ню 0,5 от максимального значения ω_{S0} спектральной кривой $S(\omega)$.

Оптимальный (квасисогласованный) фильтр для таких сигналов должен иметь полосу пропускания $\omega_{S0} \pm 0,5\Delta\omega_{S0}$.

Частота наименее подвержена искажениям атмосферных помех. По этому сигналы при частотной модуляции наиболее помехоустойчивы.

Помехоустойчивость и качество приема определяется отношением «сигнал/шум» на выходе фильтра. Для согласованных фильтров отношением «сигнал/шум» на выходе на выходе фильтра можно оценить по формуле:

$$q = \frac{P_{S \text{ Вых}}}{P_{П \text{ Вых}}} = 3 \left(\frac{P_{S \text{ Вх}}}{P_{П \text{ Вх}}} \right) \left(\frac{\Delta f_M}{f_s} \right)^3,$$

где $P_{S \text{ Вх}}$ и $P_{S \text{ Вых}}$ - мощности сигнала на входе и выходе фильтра, $P_{П \text{ Вх}}$ и $P_{П \text{ Вых}}$ - мощности помехи на входе и выходе фильтра, f_s и Δf_s - несущая частота и спектральная полоса сигнала.

4. Импульсная модуляция

Импульсная модуляция может быть амплитудная (АИМ), частотная (ЧИМ) и фазовая (ФИМ) модуляция. Информация заложена в амплитудах импульсов, их временном положении, или ширине. Она применяется в дискретных системах передачи информации (телеграф, факс, факсимиле). Преимущество АИМ в том, что в импульсах развивается большая мощность, что способствует перекрытию помех при низкой средней мощности. При этом возрастает широкополосность сигналов, что требует применения широкополосных фильтров, имеющих пониженную фильтрационную способность. Повышение скорости передачи при всех видах модуляции ведет к увеличению широкополосность сигналов.

5. Манипуляция

Для передачи дискретных сигналов используется скачкообразное изменение параметра с одного фиксированного значения на другое (манипуляция). Используется амплитудная (АМ), фазовая (ФМ) и частотная (ЧМ) манипуляция.

В цифровых системах передачи информации наиболее часто

применяют частотную манипуляцию (работа на двух длинах волн ω_{S0} и ω_{S1} , соответствующих логическим 0 и 1). Такие РТС позволяют использовать очень узкополосные фильтры, однако при высокой скорости передачи данных полосу пропускания приходится расширять.

8.3. Многоканальные системы передачи информации

Для параллельной передачи многих сообщений используют многоканальные системы. В широкополосных высокочастотных радиотехнических системах передачи информации используют временное и частотное уплотнение каналов.

Телефонные сообщения имеют спектральную полосу $\Delta f=300-6000$ Гц. При несущей частоте 100 МГц можно передавать сигналы со спектральной полосой до 10 МГц и, следовательно, можно передавать параллельно до 3000 телефонных сообщений.

Структура сигналов при спектральном уплотнении каналов показана на рис. 8.1.

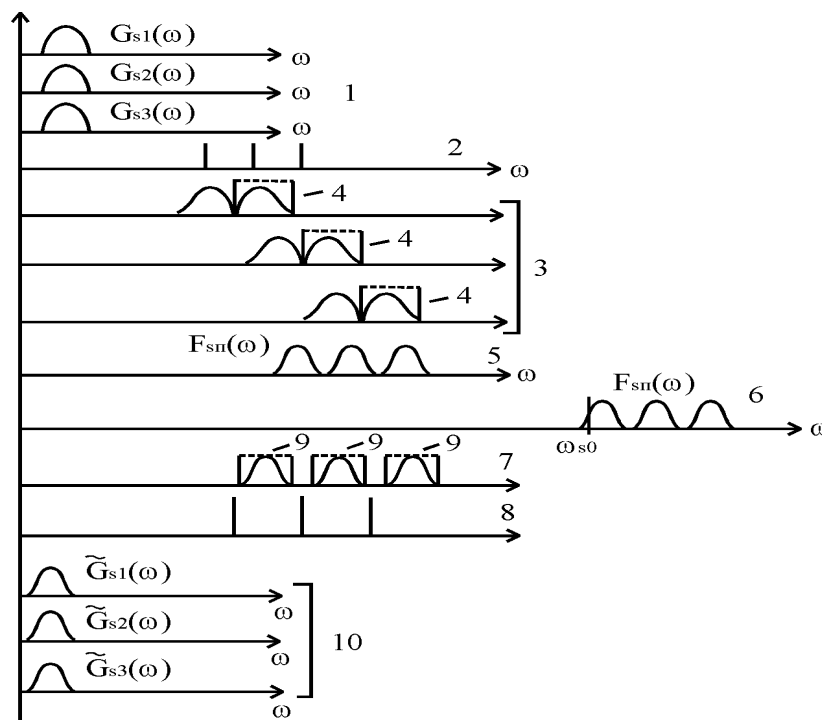


Рис. 8.1. Структура сигналов в частотной области при спектральном уплотнении каналов

На рис. 8.1 приняты следующие обозначения: 1 - спектры 3-х каналов телефонных сообщений; 2 - поднесущие частоты; 3 - спектры модулированных поднесущих; 4 - фильтры выделения боковых полос; 5 - спектр группового сигнала; 6 - спектр радиосигнала на несущей частоте; 7 - спектр группового сигнала на промежуточной частоте гетеродинного приемника; 8 - сетка поднесущих; 9 - фильтры разделения по каналам; 10 - сообщения в каждом из каналов после фильтрации и детектирования.

В радиорелейных многоканальных системах передачи информации существуют унифицированные блоки с группировкой по 12 телефонных каналов как показано в таблице 8.1.

Аналогичные блоки со спектральным уплотнением используются в спутниковых и волоконно-оптических системах передачи информации.

Таблица 8.1

Унифицированные блоки многоканальных систем передачи информации с группировкой по 12 телефонных каналов

Название блоков	Число каналов и групп	Диапазон частот, кГц
К 60	60 (5 групп)	12...252
К120	120 (10 групп)	60...552
К 300	300 (25 групп)	60...1300
К 1920	1920 (160 групп)	312...8527

Следует отметить, что несущая частота, применяемая в радиорелейных линиях, находится в области 3 ГГц, т.е. превосходит верхнюю модуляционную частоту почти в 500 раз.

8.4. Временное уплотнение при цифровой передаче

Временное уплотнение получило широкое распространение в последнее время в связи с развитием быстродействующей цифровой элементной базы. Структура сигналов во временной области при временном уплотнении каналов показана на рис. 8.2.

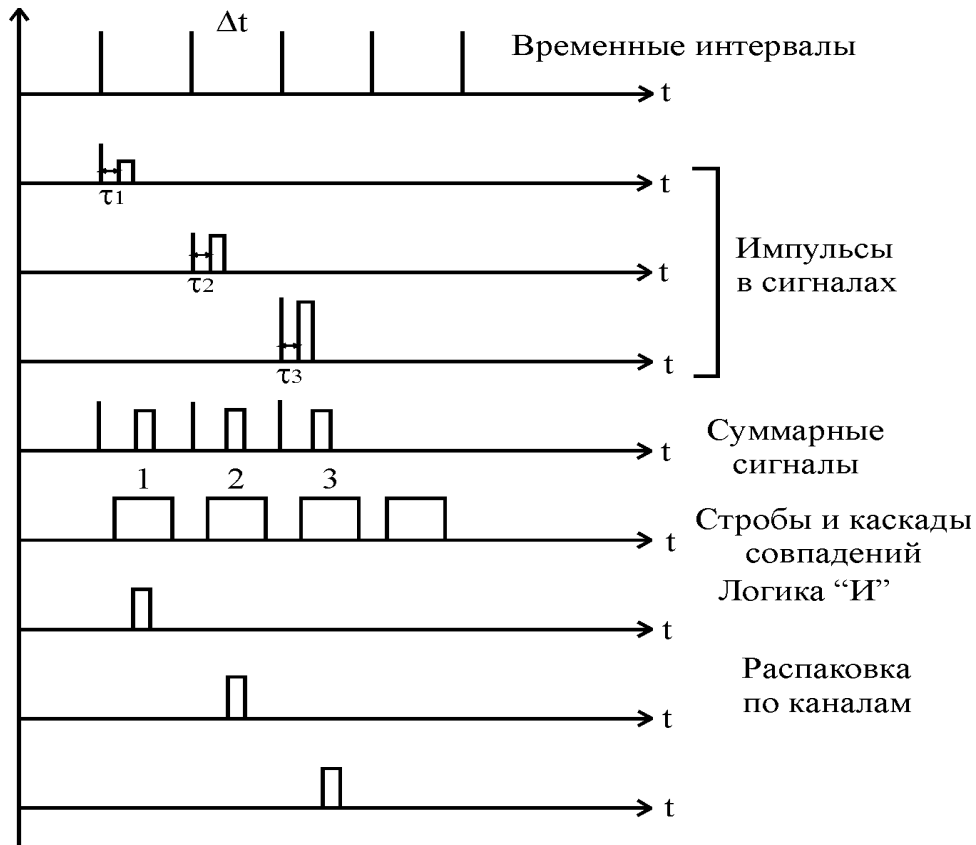


Рис. 8.2. Структура сигналов во временной области при временном уплотнении каналов

Временное уплотнение применяется в дискретных цифровых системах передачи дискретной информации (СПДИ) и системах с импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ).

Длительность многоканального сигнала (пакета сигналов от нескольких источников информации) определяется по формуле:

$$T_S = t_B \cdot k \cdot m ,$$

где t_B - время выборки 1 бита, k - число разрядов в кодовом слове, m - число каналов.

Структура сигналов во временной области при временном уплотнении каналов в режиме ИКМ, при передаче m 4-х разрядных символов, показана на рис. 8.3.

В последнее время синхронизирующие импульсы не вводят, а разделение по времени выполняется благодаря высокой точности кварцевых тактовых генераторов и первому синхронизирующему импульсу.

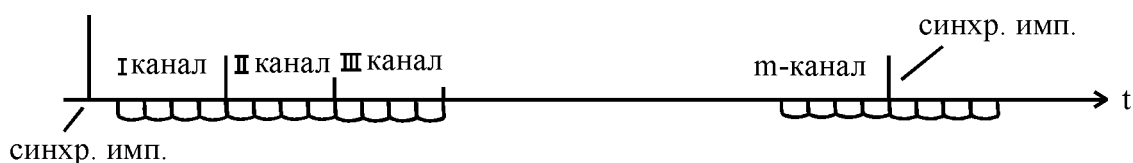


Рис. 8.3. Структура сигналов во временной области при временном уплотнении каналов при ИКМ

Примеры РТС передачи информации.

РТС гражданской авиации осуществляет обмен между пунктами, самолетами и специальными службами.

Система на ОВЧ - для связи в зоне прямой видимости.

Коротковолновая система радиосвязи (голосовая).

Коротковолновая система для больших дальностей - использует код Морзе (или ИКМ) с частотной манипуляцией.

8.4. Системы телевидения

Системы передачи телевизионных сигналов требуют использования несущих частот в диапазоне от метровых до сантиметровых волн (ОВЧ). Это связано с большой информационной емкостью ТВ сигнала и его широкой спектральной полосой. Для передачи черно-белого ТВ сигнала требуется спектральная полоса 8 МГц и, следовательно, несущая частота должна быть не ниже 80 МГц. Для передачи цветного изображения и звука необходима полоса 25 МГц и, следовательно, несущая частота должна быть не ниже 250 МГц. Радио сигналы таких частот плохо огибают земную поверхность и распространяются в зоне прямой видимости.

Схема формирования и передачи черно-белого телевизионного изображения показана на рисунке 8.4.

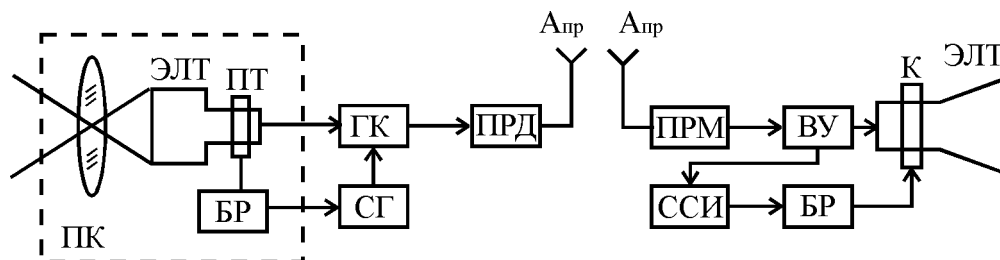


Рис. 8.4. Схема формирования и передачи черно-белого телевизионного изображения.

Используемые обозначения: ПК- передающая камера; ПТ- передающая трубка; БР- блок развертки; СГ- синхрогенератор; ТК - телевизионный канал; ССИ- селектор синхроимпульсов (выделяет синхронизирующие импульсы); ВУ- видеоусилитель; К- катушка управления разверткой.

Особенности передачи телевизионного изображения:

- Частота полукадров - 50 Гц.
- Частота смены кадров - 25 Гц (не воспринимается глазом).
- Число строк в кадре - 625 (стандарт РФ).
- Благодаря черезстрочному способу развертки в каждом полукадре $625 \div 2 = 312$ строк.
- Одновременно передается звуковое сопровождение.
- Ширина спектральной полосы канала - $\Delta f_{\text{канала}} = 8 \text{ МГц}$.

Структура спектра телевизионного канала показана на рис. 8.5.

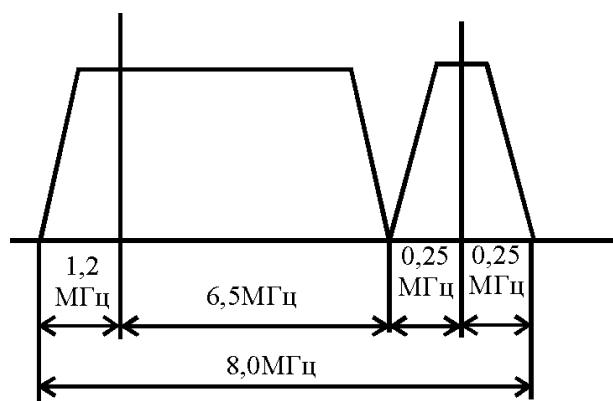


Рис. 8.5. Структура спектра черно-белого TV сигнала.

Для исключения прочерчивания при возвращении луча используется гашение развертки (гасящие импульсы - ГИ).

В конце каждого полукадра передается кадровый синхронизирующий импульс (СИ), и кадровый ГИ запирающие трубку на время обратного хода развертки.

В передаче идет негативное изображение и интенсивное гашение. Снижение мощности передатчика и помехи меньше воспринимаются (воспринимаются как темное пятно).

Цветное телевидение

Система PAL :

В телевизионной камере имеются три фотоприемные трубки с красным, желтым и синим фильтрами. В кинескопе находятся три электронные пушки. Они формируют три цвета изображения: U_R - красный, U_G - зеленый, U_B - синий.

Система SEKAM:

В радиоприемном тракте принимаются:

U_Y - суммарный черно-белый сигнал, U_R - красный, U_B - синий.

Электронная схема формирует яркостной сигнал

$$U_Y = rU_R + gU_G + bU_B$$

$$r + g + b = 1$$

и два цветоразностных сигнала

$$U_{R-Y} = U_R - U_Y ; \quad U_{B-Y} = U_B - U_Y .$$

Эти сигналы, с помощью трех электронных пушек и трех наборов пикселей (точек) из люминофоров разных цветов на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), формируют цветное изображение.

8.6. Многоканальные РТС ПИ на ИСЗ

РТС передачи информации (ПИ) на основе использования искусственных спутников Земли (ИСЗ) получили широкое распространение благодаря охвату больших территорий. Они, как правило, многоканальные, многоадресные.

Наиболее эффективны стационарные ИСЗ. Они имеют угловую скорость такую же, как и угловая скорость вращения Земли, а их линейная скорость позволяет удерживаться на экваториальной орбите. Три таких спутника позволяют создать системы передачи информации, охватывающие всю земную поверхность. На основе таких стационарных спутников строятся межконтинентальные широкополосные многоканальные системы связи, спутниковое телевидение, навигационные системы.

Схемы зон обслуживания РТС ПИ на основе стационарных ИСЗ показаны на рис. 8.6.

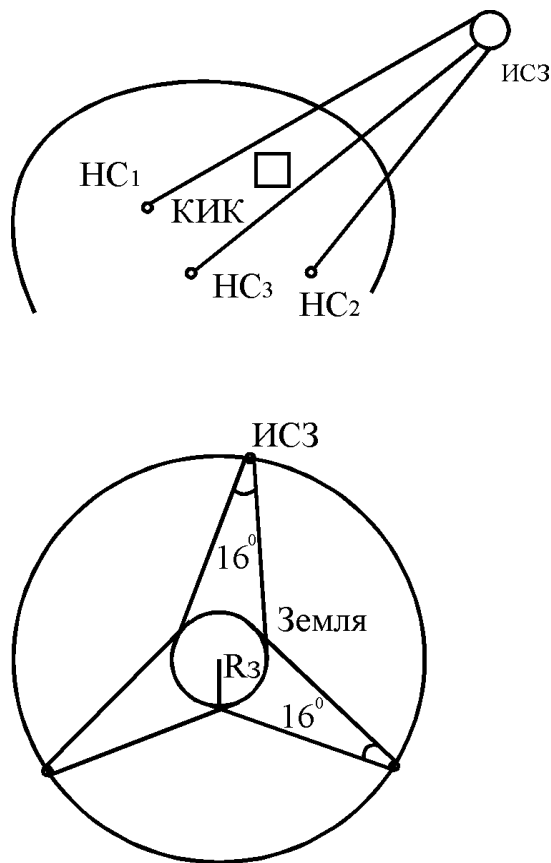


Рис. 8.6. Схемы зон обслуживания в РТС ПИ на основе одного и трех стационарных ИСЗ

Состав аппаратуры РТС ПИ на основе ИСЗ: БУУ- бортовая аппаратура контроля и управления, КИК - командно-измерительный комплекс, НС - наземная станция спутниковой связи (Диапазон УВЧ, СВЧ, ОВЧ), А - антенна с остро направленным излучением.

Зона действия РТС ПИ на основе ИСЗ:

Радиус Земли - $R_з=6400$ км., радиус орбиты - $R_д=36000$ км.

Действующие системы: “Орбита”, ”Интерспутник”, “Москва”, “Экран”, “Радуга”, “Горизонт”, “Стационар”.

В связи с тем, что стационарные спутники могут находиться только на стационарной экваториальной орбите, их допустимое количество ограничено и международными соглашениями каждой из стран, запускающих спутники, выделена определенная квота. По этому многие страны и Россия используют спутники с сильно вытянутой эллиптической орбитой. Особенности траекто-

рии позволяют их использовать почти как стационарные.

Спутники “Молния” - эллиптическая орбита $H_{\min}=500$ км, $H_{\max}>40000$ км. Период обращения такого спутника $T_{\text{обр}}=12$ часов, причем время облета полушария (и работы системы связи) составляет 8 часов.

Спутниковые системы связи очень дороги, однако при больших расстояниях они конкурируют с кабельными системами связи. При расстояниях более 2000 км целесообразно использовать ИСЗ.

Сопоставление стоимости кабельной и спутниковой систем передачи информации приведено на рис. 8.7. Кроме того, на спутнике можно организовать больше каналов связи.

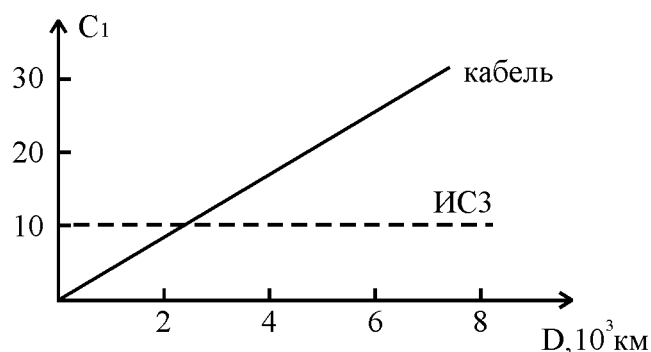


Рис. 8.7. Сопоставление стоимости кабельной системы передачи информации с РТС ПИ на ИСЗ.

8.7. Сотовая телефонная радиосвязь

Сотовая телефонная радиосвязь получила широкое распространение благодаря потребности людей в общении в любое время суток и находясь в любом месте. Особенностью сотовой связи является небольшие мощности передачи сотового телефона. Он может поддерживать связь только на расстоянии 10-15 км (в зависимости от условий распространения). Поэтому создается сеть приемо-передающих ретрансляторных станций, являющихся одновременно и коммутирующими станциями. Коммутирующие устройства, по заданному абонентом набору номера телефона, определяют сотовую станцию, находящуюся в зоне обслуживания второго абонента, осуществляют соединение и поддерживают связь абонентов.

Для обеспечения переговоров многих абонентов необходимо много частотных каналов и они должны быть плотно расположены. По этому радиотелефоны работают на частотах УКВ-диапазона. Многоканальная передача информации между коммутирующими станциями идет в режиме временного уплотнения каналов с применением импульсно-кодовой модуляции.

ГЛАВА 9 РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Радиолокационные системы (РЛС) относятся к радиотехническим системам извлечения информации. Они служат для обнаружения объектов в пространстве, измерения их координат и параметров движения с помощью радиотехнических средств.

Первые РЛС разработаны в 1934-36 г. В 1939 созданы первые серийные РЛС для ПВО. 1940-41 г. под руководством Кобзарев Ю. Б. создана импульсная РЛС, позволяющая определять дальность и координаты цели. В 1942-45 г были разработаны комплексы управления зенитным огнём. В 1950- 60 г. были созданы зенитные системы автоматического наведения на ракеты на цель. В 1970-80 созданы системы автоматической стыковки космических аппаратов, а в 90-х годах - система автоматической посадки космического корабля «Буран».

9.1. Принципы работы РЛС и определения параметров объектов

Принцип определения координат с помощью импульсной РЛС показан на рисунке 9.1. РЛС периодически посылает, через перемещающуюся (сканирующую) параболическую (узко направленную) антенну, зондирующие импульсы в пространство.

Если антенна направлена на объект (цель), то на входе приемника, подключаемого к антенне в промежутке между зондирующими импульсами, появляется отраженный сигнал.

Дальность до цели определяется по формуле:

$$D = c t_3 / 2 , \quad (9.1)$$

где c - скорость света в атмосфере = 298000 км/с, t_3 - время прохождения импульса до цели и обратно (время задержки отраженного импульса относительно зондирующего).

Использование антенны с узко направленным лучом позволяет определить азимут α (угол направления на цель в горизонтальной плоскости относительно направления меридиана на север) и угол места β (угол направления на цель относительно горизонта).

Высота цели определяется по формуле: $H = D \sin \beta$ (рис.9.1).

Координаты цели на горизонтальной поверхности земли определяются по формулам: $X = D \cos \beta \sin \alpha$; $Y = D \cos \beta \cos \alpha$.

Задачи, выполняемые РЛС:

1. Определение координат D , H , X , Y , Z .
2. Определение параметров скорости V .
3. Распознавание цели по сигналам ответчика («свой- чужой») и по габаритам (идентификация).

Обычно РЛС входит в более сложные системы, такие как: управления зенитным огнем, наведения ракеты на цель , управления движением в аэропорту и т.п.

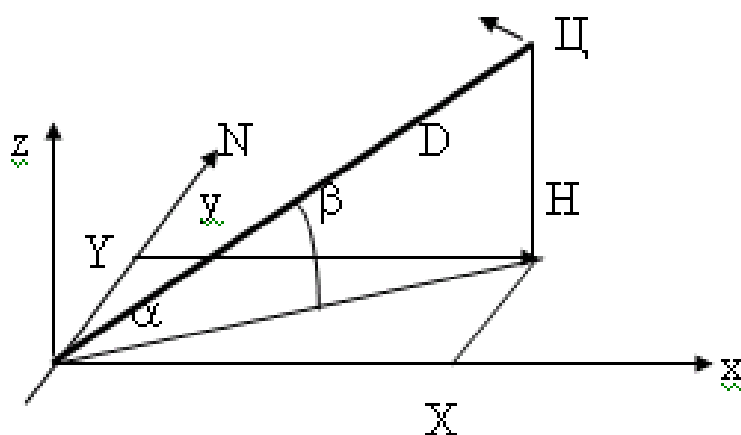


Рис. 9.1. Параметры определения координат цели (D - дальность, H - высота цели, α - азимут, β - угол места, N - направление меридиана на север)

9.2. Классификация РЛС по выполняемым задачам

В зависимости от назначения РЛС делятся на следующие типы:

1. РЛС обзорного типа. Наблюдение воздушного пространства и выявление объектов (целей) и их положения относительно рельефа местности и друг друга. Различают РЛС кругового обзора и секторальные.

2. Координатные РЛС следящего типа. Точное измерение координат и выдача информации о движении. Используются в системах управления зенитными ракетами, в системах управления космическими аппаратами и т.п.

3. Специализированные измерители (радиовысотомеры, доплеровский измеритель вектора скорости).

9.3. Тактические характеристики РЛС

Основными тактическими характеристиками РЛС являются:

1. Зона действия (рабочая зона) - зона в которой РЛС выполняет свое назначение. Обычно подразумевается максимальная дальность действия.

2. Измеряемые координаты и точность измерения.

- Определяются назначением (2-х и 3-х координатные)

- Точность и погрешность измерения координат усложняет конструкцию.

3. Разрешающая способность.

- Возможность раздельного наблюдения близко расположенных целей.

4. Помехозащищенность (способность работать при помехах).

5. Пропускная способность. Определяет плотность потока обрабатываемых целей.

6. Время развертывания (время приведения РЛС в рабочее состояние).

7. Надежность (вероятность выхода из строя или длительность безотказной работы).

Тактические характеристики определяются техническими характеристиками РЛС (мощностью передатчика, чувствительностью приёмника).

Важными характеристиками являются затраты на производство и стоимость РЛС. При высокой стоимости РЛС не будет пользоваться спросом.

9.4. Сигналы и цели в РЛС

А) Определение дальности до цели.

Зондирующий и отраженный сигналы РЛС можно просмотреть на экране осциллографа. Вид сигналов после детектирования (видеосигналов) показан на рис. 9.2.

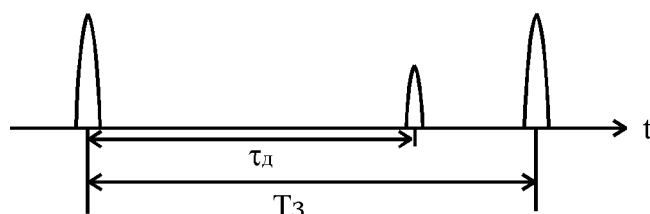


Рис. 9.2. Зондирующие (большие) и отраженный сигналы в РЛС

Зондирующие сигналы следуют с периодом T_z , который называют также периодом следования импульсов T_c . Этот период определяет максимально просматриваемую дальность (зону обзора), которую можно определить, пользуясь формулой 9.1. Время запаздывания отраженного сигнала относительно зондирующих импульсов $t_z = \tau_d$ определяет дальность до цели согласно формуле 9.1.

Б) Определение скорости цели.

Используется доплеровское смещение частоты, которое зависит от скорости движения цели по направлению к РЛС:

$$f_d = f_s \cdot 2V_r / c = 2V_r / \lambda_s, \quad (9.2)$$

где f_s - несущая частота радиосигнала, V_r - радиальная скорость цели, c - скорость света в атмосфере, λ_s - длина волны радиосигнала.

При приближении цели к РЛС доплеровское смещение положительно (частота принимаемого сигнала больше, чем у зондирующего). При удалении цели доплеровское смещение отрицательно.

Движение и повороты цели, а также измерение времени распространения сигнала в пространстве вызывают флуктуацию сигнала, как по амплитуде, так и по частоте.

Флуктуация - медленно меняющийся процесс по сравнению с f_s . Поэтому когерентность сигнала сохраняется. Есть РЛС, которые по флуктуациям определяют характер цели (идентификация цели).

Важной технической характеристикой РЛС является *разрешающая способность* – возможность раздельного наблюдения двух близко расположенных объектов или частот.

Разрешающая способность по дальности определяется длительностью зондирующего импульса τ_s :

$$\delta D = c\tau_s / 2 .$$

Это выражение определяет точность, с которой определяется дальность и координаты цели.

Разрешающая способность по угловым координатам зависит от ширины диаграммы направленности θ .

Разрешающая способность по скорости определяется разрешающей способностью по частоте, которая зависит от длительности наблюдения импульса. Чем больше длительность импульса, тем выше разрешение по частоте. Т.е. $\delta f_{pc} = 1/\tau_s$. разрешение по частоте (скорости, доплеровского смещения).

Используя формулу (9.2) и выражение для δf_{pc} находим разрешающую способность по скорости и точность её определения:

$$\delta V_r = \delta f_{pc} c / 2f_s = c / (2 f_s \tau_s) .$$

Последнее выражение означает, что чем выше частота и больше длительность импульса, тем точнее измеряется скорость. Однако при увеличении длительности импульса теряется разрешающая способность по дальности.

9.5. Общая характеристика зондирующих сигналов

Структура зондирующего сигнала и способ модуляции, имеют большое значение для обеспечения помехоустойчивости и разрешающей способности (по дальности и частоте).

Обнаружение объектов-целей и измерение их параметров осуществляется путем сопоставления принятого сигнала с ожидаемым, который формируется задающим генератором зондирующего сигнала (см. гл.4). Применяются также согласованные (и корреляционные) фильтры.

Виды сигналов РТС, их преимущества и области применения:

1) Импульсные. Высокая мощность импульса, хорошая помехозащищенность, высокое разрешение по дальности, работа на одну антенну. Применяется в РЛС обзорного и координатного типа.

2) Непрерывные (квазинепрерывные). Высокое разрешение по скорости. (Трудность в развязке приемо-передающего тракта, требуется отдельных антенн передатчика и приемника.). Используются в доплеровских измерительных системах и высотомерах.

3) Комбинированный и линейно-частотно модулированный (ЛЧМ) сигналы. Высокое разрешение по дальности и скорости, возможность использования согласованных фильтров, позволяющих выделять сигналы на фоне сильных помех. Используются в РЛС с большой дальностью обнаружения.

9.6. Последовательности (пачки) импульсов в РЛС

При сканировании антенны цель не всегда находится в диаграмме направленности. Только в течение промежутка времени, когда диаграмма «накрывает» цель, на входе приемника появляется последовательность отраженных импульсов, сначала нарастающая, а, затем, убывающая по интенсивности. Эта последовательность называется пачкой импульсов, и она имеет вид, показанный на рис. 9.3.

Особенность появления не одного, а нескольких отражен-

ных импульсов, повторяющихся с периодом равным периоду зондирования, позволяет использовать фильтры накопители и гребенчатые узкополосные фильтры, выявляющие сигналы на фоне сильных помех.

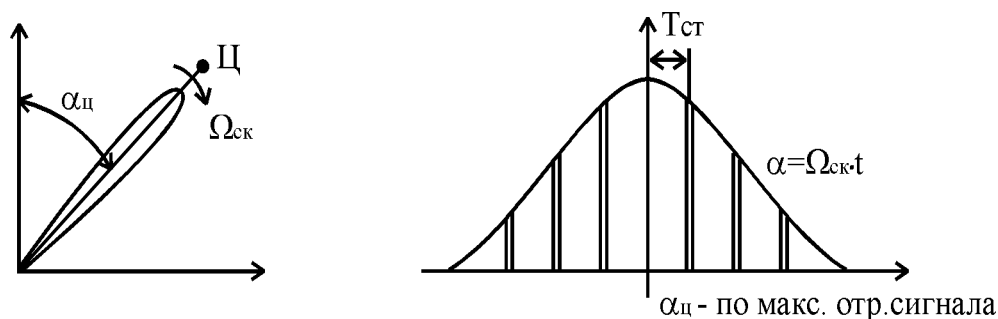


Рис. 9.3. «Накрытие» цели диаграммой и структура пачки отраженных импульсов

Принцип неопределенности

Ширина спектральной полосы сигнала Δf_s связана с длительностью одиночного РЛС импульса τ_s следующим соотношением: $\Delta f_s = 1/\tau_s$.

Его можно записать как: $\Delta f_s \cdot \tau_s = 1$.

Обычно в импульсных РЛС $\tau_s = 0,5$ или 1 мкс

Это соответствует разрешению по дальности с точностью, соответственно: $\Delta D = 75$ и 150 м.

При увеличении точности по дальности падает разрешающая способность по скорости.

В некогерентных системах определяется только дальность и углы (места и азимут).

В когерентных системах $\tau_{сП} = n \cdot \tau_s$ пачка воспринимается как единый сигнал, и это позволяет получить более высокое разрешение по частоте (скорости) и повысить помехоустойчивость.

9.7. Особенности отражения радиоволн от целей

Интенсивность отражения зависит от геометрических размеров и конфигурации цели, физических свойств ее поверхности,

длинны и поляризации падающей волны.

Эффективная площадь рассеяния - это стандартная мера, учитывающая габариты, конфигурацию цели и степень отражения радиоволн. Вместе с тем, это количественная мера, используемая в расчетах, равная площади, не поглощающей и равномерно рассеивающей поверхности, которая, будучи расположенной, нормально лучу, создает в приемной антенне поле той же напряженности, что и цель.

Эффективная поверхность рассеяния самолета может изменяться. Это связано со сложным характером отражений от поверхности и наличием так называемых «блестящих точек» (на округлой поверхности) и «угловых отражателей» (углы поверхностей под прямыми углами, от которых луч отражается точно обратно к РЛС). При маневрах самолета, его эффективная поверхность рассеяния меняется, и интенсивность отраженного сигнала меняется (флуктуирует). Эти изменения можно интерпретировать как флуктуационную помеху со спектром, представленным на рис. 9.4.

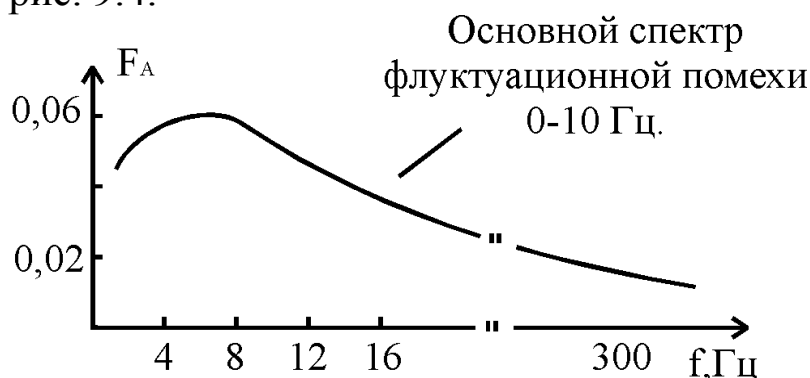


Рис. 9.4. Спектр флуктуационной помехи за счет изменения эффективной поверхности рассеяния самолета при маневрировании

Разрешающая способность и разрешаемый объем РЛС

Разрешающая способность РЛС – способность наблюдать отдельно две близко расположенные цели.

Разрешающая способность РЛС по дальности δD определяется длительностью импульса τ :

$$\delta D_{pc} = c\tau_{ii}/2.$$

Разрешающая способность РЛС по угловым координатам определяется шириной диаграммы направленности θ .

Ширина диаграммы направленности параболической антенны в радианах:

$$\theta_A = \lambda_s / d_A ,$$

где λ_s - рабочая длина волны, d_A - диаметр антенны.

Для расчета в градусах используют формулу: $\theta^\circ = 60\lambda_s / d_A$.

Координатная ошибка составит:

$$\theta_0 = \theta_A (D \pm \delta D_{pc} / 2), \text{ где } D - \text{ дальность до цели.}$$

Разрешаемый объем РЛС (рис. 9.5) - это объем усеченного конуса с высотой δD и основанием $\Phi = \theta(D \pm \delta D_{pc} / 2)$ т.е.:

$$V = \delta D_{pc} \cdot \theta = \theta(D \pm \delta D_{pc} / 2) \cdot c\tau_{ii} / 2$$

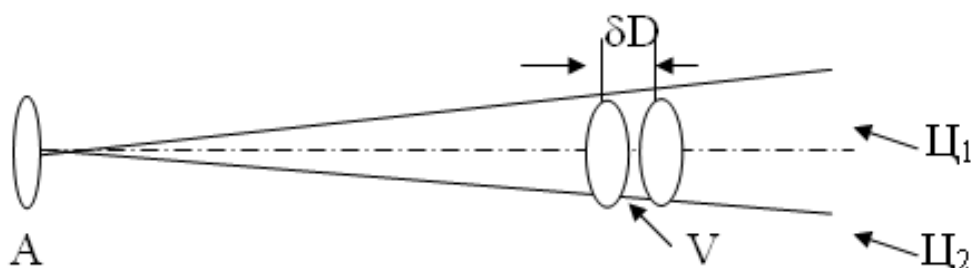


Рис. 9.5. К расчету разрешаемого объема РЛС

ГЛАВА 10 ОПТИМАЛЬНЫЕ ПРИЕМНИКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Особенностью сигналов радиолокационных систем (РЛС) является наличие пачки импульсов.

Фильтрация РЛ- сигналов заключается в следующем:

- а) Выделение из помехи каждого импульса (фильтрация).
- б) Накопление энергии пачки импульсов (суммирование откликов фильтра).

Наряду с простыми сигналами в РЛС используются слож-

ные линейно частотно модулированные (ЛЧМ) и фазоманипулированные (ФМ) сигналы.

10.1. Согласованная фильтрация ЛЧМ-сигналов

Линейно частотно модулированный (ЛЧМ) сигнал – это сигнал с линейным изменением частоты внутри импульса:

$$f_s = f_{s0} + b \cdot t, \quad /t| < Tu / 2$$

где $b = 2 \Delta f_M / Tu$ - крутизна ЛЧМ, Δf_M -девиация частоты.

Вид ЛЧМ сигнала и его сжатая форма показаны на рис. 10.1.

Ширина спектра сигнала определяется девиацией частоты:

$$2 \Delta f_s = 2 \Delta f_M.$$

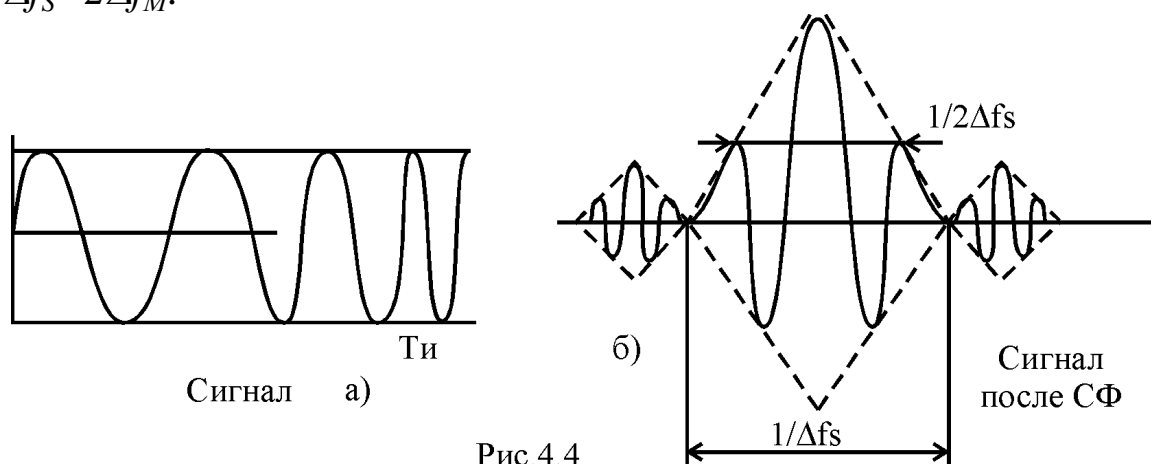


Рис. 4.4

Рис. 10.1. ЛЧМ сигнал и его сжатая форма после согласованного фильтра

АЧХ -сигнала имеет равномерную спектральную плотность:

$$F_s(f) = A_s / 2 \sqrt{T_u / \Delta f_s}$$

Фазовый спектр имеет форму параболы, так как частота нарастает линейно:

$$\varphi_s(f) = \varphi_0 + \pi(f - f_{s0})^2 / b$$

Для АЧХ и ФЧХ согласованного фильтра имеем:

$$K_{сф}(f) = K_0;$$

$$\varphi_{сф}(f) = -\varphi_0 - \pi(f - f_{s0})^2 / b - 2\pi f T_H.$$

$$f_{s0} - \Delta f_s \leq f \leq f_{s0} + \Delta f_s$$

В качестве согласованного фильтра ЛЧМ-сигнала исполь-

зуется дисперсионная ультразвуковая линия задержки (ДУЛЗ). При прохождении ДУЛЗ, играющей роль согласованного фильтра (СФ), обращенный сигнал (у которого частота линейно убывает в импульсе) становится сжатым. В ней на одном конце происходит преобразование радиосигнала, на промежуточной частоте 9-11 МГц, в ультразвуковые колебания, которые распространяются до противоположного конца, где происходит обратное преобразование в электрический сигнал. В дисперсионной УЛЗ ультразвуковые волны разных частот имеют разную задержку такую, которая компенсирует изменение фазы внутри импульса. В результате набега волн одной частоты на другие происходит их интерференция и сжатие импульса с увеличением амплитуды.

Для простого сигнала $\Delta f_s \cdot \tau_s = 1$.

Для сложного сигнала $\Delta f_s \cdot \tau_s \gg 1$.

При сжатии сигнала происходит перераспределение спектра из девиации частоты в спектр сжатого сигнала:

$$\Delta f_{s \text{ сж}} \cdot \tau_{s \text{ сж}} = \Delta f_{s \text{ дев}} \cdot \tau_{s \text{ сж}} = 1, \text{ откуда } \Delta f_{s \text{ сж}} = \Delta f_{s \text{ дев}},$$

где $\Delta f_{s \text{ сж}}$ определяется по уровню 0,7 от максимальной амплитуды сжатого сигнала.

Длительность сжатого сигнала $\tau_{s \text{ сж}} = 1/\Delta f_{s \text{ сж}}$ можно измерить с помощью осциллографа. Отношение $K_{\text{сж}} = \tau_{s \text{ ЛЧМ}} / \tau_{s \text{ сж}}$ называется коэффициентом сжатия. Примерно во столько же раз происходит увеличение амплитуды импульса при сжатии. При этом помехи, проходя через согласованный фильтр в виде ДУЛЗ, сильно ослабляются, и на выходе увеличивается отношение «сигнал/шум». Соответственно с уменьшением $\tau_{s \text{ сж}}$ увеличивается разрешение по дальности.

На выходе согласованного фильтра сигнал имеет следующий вид:

$$z_{\text{сф}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} |F(f)|^2 \cos 2\pi f(t-t_0) df,$$

$t_0 \geq T_{\text{И}}$ -задержка сигнала в СФ.

Интегрируя, получаем:

$$z(t) = \frac{A_s^2 T_H}{2} \frac{\sin 2\pi \Delta f_s (t-t_0)}{2\pi \Delta f_s (t-t_0)} \cos 2\pi f_{s0} (t-t_0)$$

Разрешающая способность по времени будет следующей:

$$T_{H \text{ Вых}} = 1/(2\Delta f_s) \rightarrow \delta t = 1/(2\Delta f_s).$$

Одновременно (при сжатии) увеличивается амплитуда, что позволяет лучше увидеть сигнал при шумах $E_s = A_s^2 T_H / 2$.

Преимущества ЛЧМ- сигналов:

1) Можно уменьшить максимальную мощность импульса (предотвратить пробой антенно-фидерного тракта) и увеличить его энергию за счет большой длительности.

2) Улучшается условие наблюдения сигнала на фоне помехи за счет увеличенной длительности наблюдения и последующего сжатия импульса.

3) После СФ сигнал сжат, имеет увеличенную амплитуду (и импульсную мощность) и, следовательно, увеличены разрешающая способность и отношение «сигнал/шум».

Реализация фильтра с линейной ФЧХ.

Дисперсионная ультразвуковая линия задержки (ДУЛЗ) реализуется на пластине из пьезокварца (вырезанной из синтетического монокристалла кварца). При этом используются поверхностные акустические волны (ПАВ), формируемые встречно-штырьевыми, пьезо-акустическими преобразователями (ВШП). Пример конструкции ВШП на ДУЛЗ показан на рис.10.2

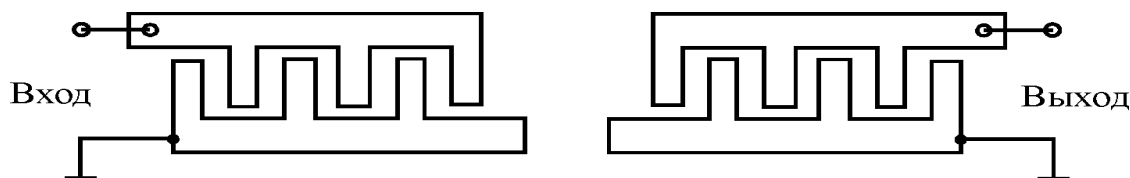


Рис.10.2. Конструкция ВШП ДУЛЗ с использованием ПАВ (Подложка- пьезокварц)

Частотный диапазон линий задержки на ВШП - 9-11 МГц. Т.е. она используется на промежуточной частоте.

10.2. Цифровые согласованные фильтры

В современных РЛС обработка сигналов производится на специальных ЭВМ с быстрой цифровой обработкой и фильтрацией цифровыми методами.

В согласованном аналоговом фильтре откликом является интеграл свертки:

$$y(t) = \int_{-\infty}^t h(\tau)x(t-\tau)d\tau,$$

где $h(\tau)$ - импульсная характеристика СФ.

В частотной области согласованный фильтр реализуют с помощью быстрого преобразования Фурье по этапам:

а) Определение спектра входного сигнала (преобразование Фурье)

$$F_x(jf) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt.$$

б) Определение комплексной частотной характеристики с выхода фильтра

$$F_y(jf) = F_x(jf) \cdot K(jf).$$

в) Определение выходного сигнала СФ (обратное преобразование Фурье)

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(jf)e^{j2\pi ft} df.$$

В цифровом фильтре используют дискретные значения $\eta(n\Delta t)$ и $K(k\Delta f)$, где Δt и Δf - шаг разбиения сигнала по времени и по частоте, n и k - целые числа.

Во временной области:

$$1) y(n\Delta t) = \sum_{m=0}^{N-1} \eta(m\Delta t)x(n\Delta t - m\Delta t)$$

В частотной области:

$$2) F_x(k\Delta t) = \sum_{m=0}^{N-1} x(n\Delta t)W^{nk}, k=0, \dots, N-1 \text{ (Фурье-образ)}$$
$$F_y(k\Delta f) = F_x(k\Delta f) \cdot K(k\Delta f), k=0, \dots, N-1$$

$$y(n\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F_y(k\Delta f) W^{-nk}, \quad n=0, \dots, N-1$$
 (обратное преобразование Фурье), где $W = e^{-j2\pi/N}$.

Цифровой фильтр - это совокупность математических правил (алгоритм и программа) преобразования сигналов, позволяющих вычислить величину выходного сигнала.

Некоторые величины, например, могут быть в ПЗУ. Разработаны алгоритмы - (быстрое преобразование Фурье), позволяющие упростить и ускорить вычисления. Структурная схема цифрового фильтра сигналов РЛС приведена на рис. 10.3.

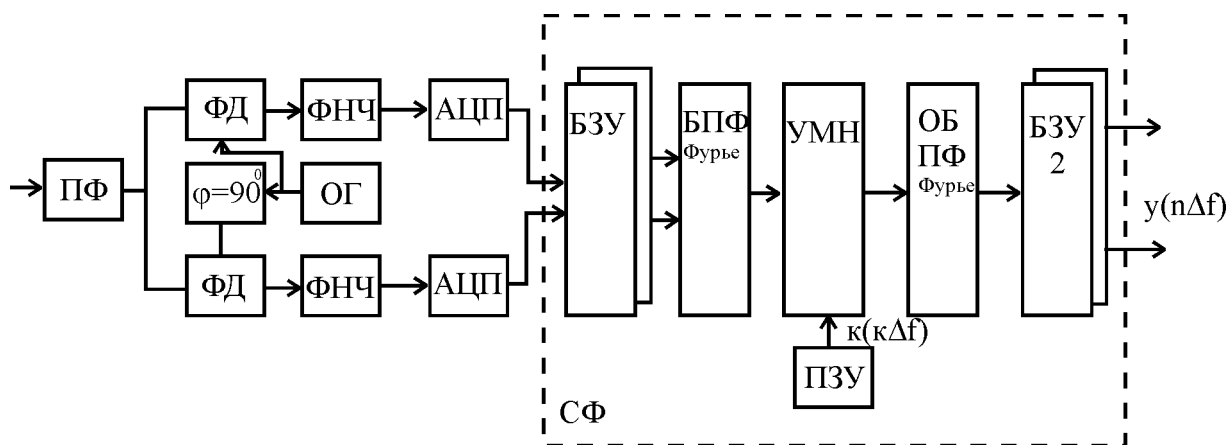


Рис. 10.3. Структурная схема цифрового фильтра

10.3. Накопители для пачек импульсных сигналов

Для выделения сигнала на фоне помех в РЛС используются схемы накопления сигналов пачки.

1) Простейший накопитель ЭЛТ с длительным послесвечением. Яркость нескольких импульсов складывается и возрастает (РЛС- обзорного типа).

2) Накопители с динамической памятью (рециркуляторы) реализуют с помощью ультразвуковой линии задержки (УЛЗ) с длительностью задержки $\tau_3 = T_{сл}$ ($T_{сл}$ - интервал следования импульсов в РЛС, рис 10.4).

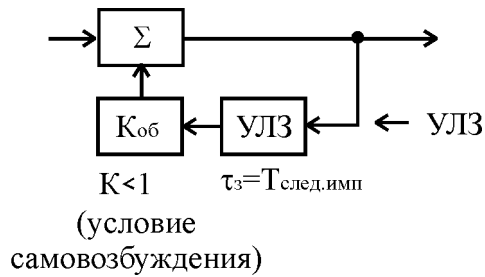


Рис. 10.4. Рециркулятор- накопитель с использованием ультра-
тразвуковой линии задержки (УЛЗ)

Для когерентной пачки импульсов применяют более сложные схемы накопления сигналов с фазовым детектированием и УЛЗ. В этом случае необходим сигнал опорного гетеродина, фазовый детектор и другие сложные устройства. Необходимо также учесть Доплеровского смещения частоты.

10.4. Оптимальный приемник для некогерентной пачки радиоимпульсов

Оптимальный приемник-накопитель для некогерентной пачки радиоимпульсов показан на рис. 10.5. Он включает супергетеродинный приемник с фильтром и фильтр-накопитель для обработки пачки импульсов на УЛЗ.

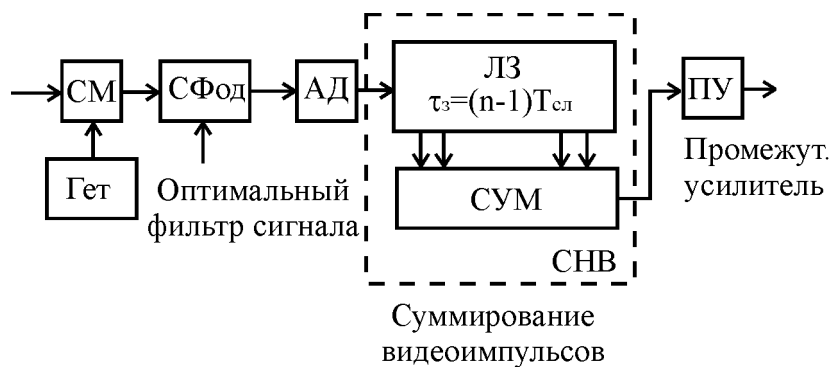


Рис.4.7. Оптимальный приемник-накопитель для некогерентной
пачки радиоимпульсов

Недостатком приемника-накопителя является то, что в нем теряется информация о скорости, которую надо определять отдельным устройством.

ГЛАВА 11

ВЫЧИСЛЕНИЕ КООРДИНАТ И ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ В РЛС

11.1. Цифровые накопители (интеграторы)

Цифровые накопители имеют стабильную задержку и хорошее воспроизведение сигнала. Они могут применяться в когерентных и некогерентных РЛС совместно с цифровыми и аналоговыми согласованными фильтрами.

Элемент цифрового фильтра (ЦФ) некогерентной РЛС - бинарный квантователь (БК), в котором сигналы представляются в двоичной системе «да» (1) или «нет» (0), представлен на рис. 11.1.

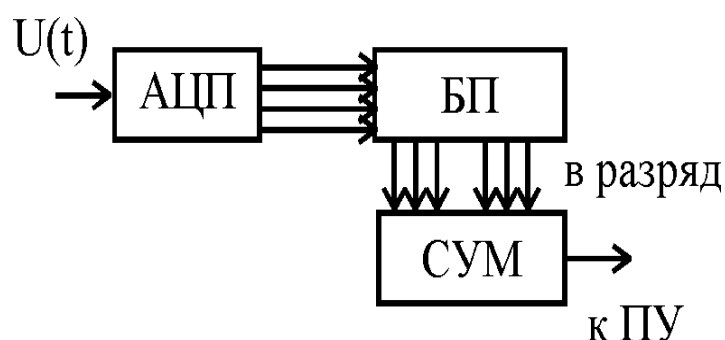


Рис. 11.1. Элемент цифрового фильтра некогерентной РЛС - бинарный квантователь

Особенность бинарного квантователя заключается в наличии логических решений, страхующих от ошибок, обусловленных действием помех. БК принимает решение о начале пачки импульсов, если прошли подряд два (или три) импульса с периодом следования зондирующих импульсов. За конец пачки импульсов принимается момент, когда прошли три пустых интервала подряд.

Структура импульсов и взаимодействие элементов БК показаны на рис. 11.2. Регистрируются только сигналы превышающие пороговый уровень.

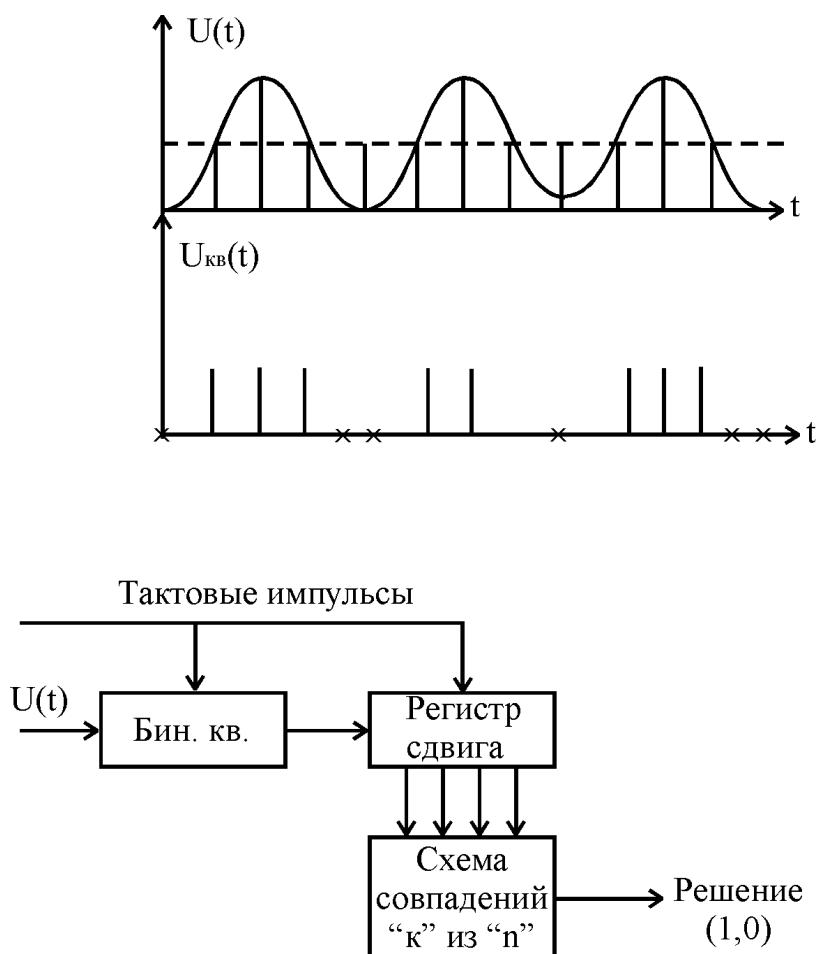


Рис. 11.2. Структура импульсов и их взаимодействие в БК.

11.2. Методы измерения координат и радиальной скорости целей в РЛС

Измерение угловых координат (азимут, угол места):

а) Структурная схема измерителя угловых координат по максимальной амплитуде отраженного сигнала и фазе (в радионавигации) приведена на рис. 11.3.

Точность измерения угловых координат составляет $\approx 0,5 \cdot \theta^\circ$, где θ - ширина диаграммы направленности антенны.

Параболическая антенна РЛС координатного типа имеет узкую диаграмму направленности ($\theta \approx 1^\circ$), следовательно точность изменения угловых координат составляет $\approx 0,5^\circ$.

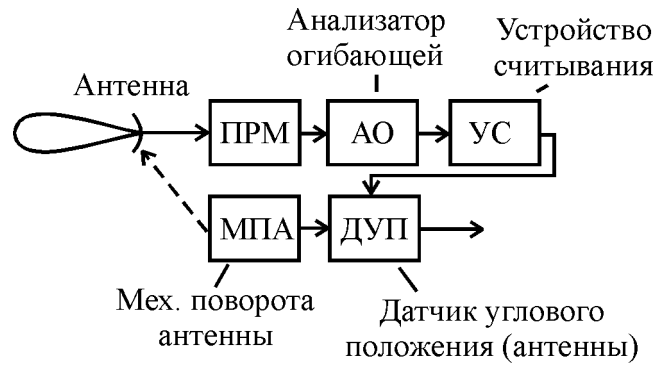


Рис. 11.3. Структурная схема амплитудного измерения угловых координат

б) Для увеличения точности используют метод сравнения в следящей системе (рис.11.4).

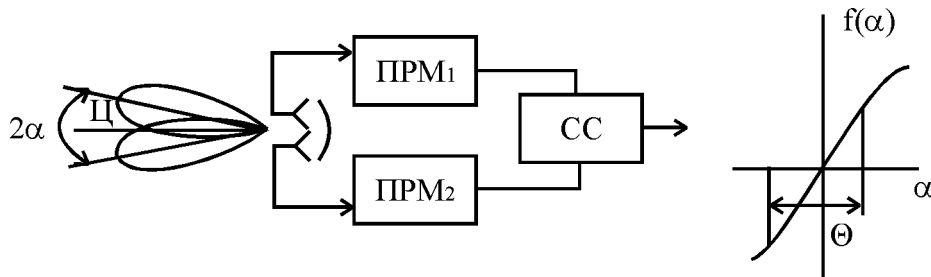


Рис. 11.4. Структурная схема следящей системы измерения угловых координат и её дискриминантная характеристика

в) Цифровой бинарный программный обнаружитель работает по схеме, приведенной на рис. 11.5.

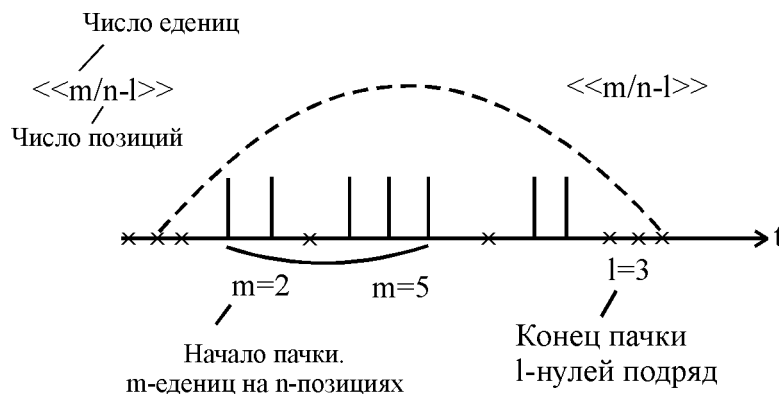


Рис. 11.5. Схема регистрации начала и конца пачки импульсов для точного измерения угловых координат

11.3. Радиоизмерение дальности (импульсный, частотный и фазовый метод)

Импульсный метод

Наиболее употребительный амплитудный импульсный метод по времени запаздывания отраженного τ_3 : $D = \tau_3 c / 2$.

Этот метод широко используется в импульсных РЛС. Для увеличения точности определения дальности по времени прихода фронта импульса применяют схему, приведенную на рис. 11.6. Достоинство схемы заключается в том, что на выходе получают сигнал в цифровой форме.

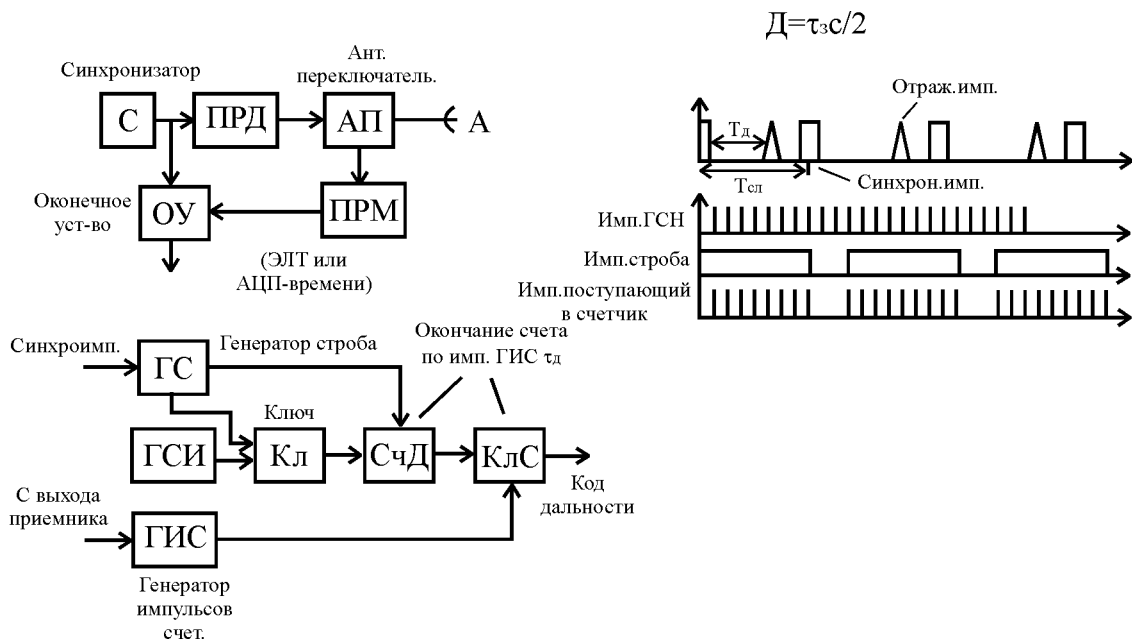


Рис. 11.6. Схема определения дальности подсчетом импульсов.

Фазовый метод определения дальности заключается в скачкообразном (импульсном) изменении фазы узкополосного сигнала. Как и в предыдущем случае, дальность определяется по времени задержки изменения фазы. Преимущество – использование узкополосного фильтра. Недостаток – передача и прием на разные антенны.

Частотный метод

Обычно этот метод применяют в радиовысотомерах малых высот и в радиодальномерах для измерения расстояний до близких целей.

Частотный метод определения дальности заключается в линейном изменении частоты зондирующего сигнала во времени и в выделении разности частот передачи и приема.

Обычно используется пилообразный линейно частотно модулированный (ЧМ) зондирующий сигнал, приведенный на рис. 11.7. Изменение частоты на выходе передатчика имеет следующий вид:

$$f_{ИЗЛ} = f_0 + (4\Delta f_M / T_M)t, \quad kT_M \leq t \leq kT_M + T_M/2, \quad k=1,2,\dots$$

Частота на входе приемника отличается частоты генератора на величину пропорциональную времени запаздывания сигнала.

$$f_{ПР} = f_0 + (4\Delta f_M / T_M)(t - \tau_D)$$

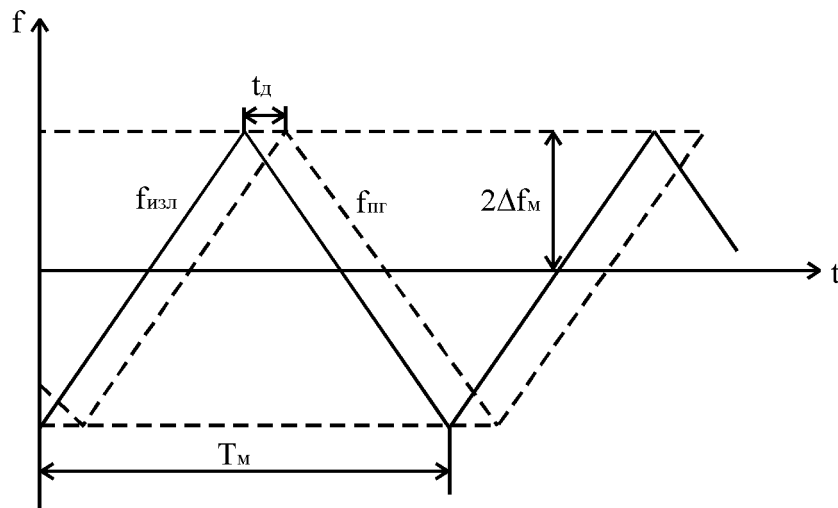


Рис. 11.7. Схема определения дальности частотным методом.

Разностная частота (частота биений), выделяемая супергетеродинным приемником, будет следующей:

$$f_P = |f_{ПР} - f_{ИЗЛ}| = [8\Delta f_M / (cT_M)]D = (8\Delta f_M F_M / c)D.$$

По разностной частоте (частоте биений) при $\tau_0 \ll T_M$ легко определить дальность:

$$D = [c / (8\Delta f_M F_M)]f_P.$$

Структурная схема устройства для определения дальности частотным методом приведена на рис. 11.8. По такой схеме работают радиовысотомеры, используемые практически на всех летательных аппаратах (самолетах и вертолетах). Схема отличается

простотой, хорошей помехоустойчивостью, энергоэкономична. Передача и прием ведутся через две дипольные антенны с широкой диаграммой направленности. Это позволяет «видеть» минимальное расстояние не только по вертикали (вниз), но и до склонов гор (вбок).

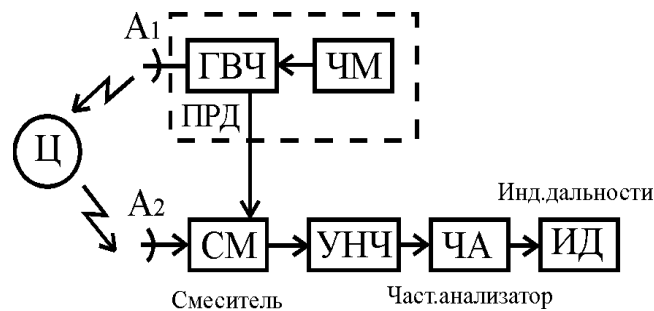


Рис. 11.8. Структурная схема устройства определения дальности частотным методом (А- антенны, Ц - цель, ГВЧ -генератор ВЧ, ЧМ- частотный модулятор, СМ - смеситель, УНЧ - широкополосный усилитель низкой частоты, ЧА - частотный анализатор, индикатор дальности)

11.4. Измерение радиальной скорости

Радиочастотный метод измерения радиальной скорости основан на измерении доплеровского сдвига частоты зондирующего сигнала:

$$f_D = f_s 2v_r / c.$$

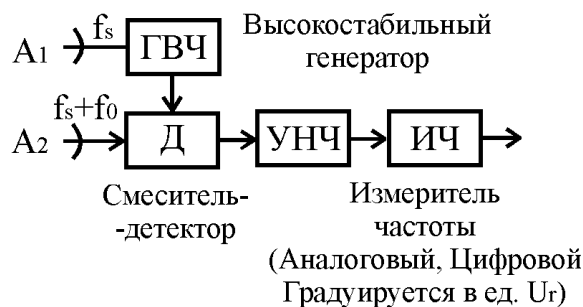


Рис. 11.9. Структурная схема РЛС непрерывного действия для определения скорости целей.

Как видно по структуре, приведенной на рис 11.9, здесь, как

и при определении высоты в радиовысотомере используется супергетеродинная схема, где гетеродинный сигнал «отбирается» из высокостабильного генератора высокой частоты. Разностная доплеровская частота получается в цифровом виде и может быть легко пересчитана в значение радиальной скорости. Векторная скорость движения цели определяется путем определения угловых скоростей по азимуту и углу места, с последующим вычислением тангенциальных составляющих и векторным сложением с радиальной скоростью.

11.5. Дальность действия РЛС

Плотность потока мощности излучения РЛС определяется по формуле:

$$\Pi_1 = \frac{P_{\text{пер}} G_{A \text{ пер}}}{4\pi D^2} \eta_{\text{пер}},$$

где $P_{\text{пер}}$ – мощность передатчика, $G_{A \text{ пер}}$ – коэффициент направленного действия передающей антенны, $\eta_{\text{пер}}$ – КПД антенны.

Мощность сигнала, отраженного от цели, будет пропорциональной её поверхности: $P_{\text{отр}} = \Pi_1 S_{\text{эфф}}$.

Плотность потока мощности у приемной антенны составит:

$$\Pi_2 = P_{\text{отр}} / (4\pi D^2).$$

Мощность, поступающая на вход приемника, будет пропорциональной поверхности приемной антенны и её КПД:

$$P_{\text{прм}} = \Pi_2 S_{A \text{ пр}} \eta_{\text{прм}}.$$

Подставляя выражения для всех предшествующих параметров получим формулу для мощности сигнала на входе приемника в следующем виде:

$$P_{\text{прм}} = \frac{P_{\text{пер}} G_{A \text{ пер}} S_{A \text{ прм}} S_{\text{эфф}} \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{пр}}}{(4\pi)^2 D^4}.$$

Пользуясь полученным выражением и значением пороговой мощности приемника $P_{\text{пор}}$, найдем формулу для максимальной дальности действия РЛС:

$$D_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{ПЕР}} G_{A \text{ ПЕР}} S_{A \text{ ПРМ}} S_{\text{ЭФФ}} \eta_{\text{ПЕР}} \eta_{\text{ПРМ}}}{(4\pi)^2 P_{\text{ПОР}}}} .$$

В импульсной РЛС, работающей на одну антенну

$$G_{A \text{ ПЕР}} = G_{A \text{ ПРМ}} = G_A .$$

Следовательно:

$$S_{A \text{ ПРМ}} = G_{A \text{ ПРМ}} \lambda_s^2 / (4\pi) .$$

В результате подстановки получим:

$$D_{\max} = \sqrt[4]{P_{\text{ПЕР}} G_A^2 \lambda_s^2 S_{\text{ЭФФ}} \eta^2 / (4\pi)^3 P_{\text{ПОР}}} .$$

Порог мощности в оптимальном обнаружителе:

$$P_{\text{ПОР}} = k_n P_0 .$$

В оптимальном обнаружителе пороговое отношение сигнал - помеха составляет: $q = 2E_{s0} / N_{\Pi} , N_{\Pi} = k_B T ,$

где $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - постоянная Больцмана,

T - температура в К. Следовательно

$$D_{\max} = \sqrt[4]{\frac{2E_{\text{ИЗЛ}} G_A^2 \lambda_s^2 S_{\text{ЭФФ}} \eta^2}{(4\pi)^3 k_n q_0^2 k_B T}} .$$

Характерные параметры РЛС следающего и обзорного типов следующие: РЛС обзорного типа - $P_{\text{ПЕР}} \approx 1 \text{ МВт} , D_{\max} = 200-300 \text{ км} ;$
РЛС следающего типа - $P_{\text{ПЕР}} \approx 100-300 \text{ кВт} , D_{\max} = 200 \text{ км} .$

Пример 11.1. Определить максимальную дальность действия РЛС с параметрами: $P_{\text{ПЕР}} = 1 \text{ МВт} , P_{\text{ПОР}} = 1 \text{ мкВт} , G_A = 3000$
 $, \lambda = 3 \text{ см} , S_{\text{ЭФ}} = 10 \text{ м}^2 , S_A = 1 \text{ м}^2 , \eta = 0.9 .$

11.6. Влияние отражений от земной поверхности

При малых углах места β возникает отражение сигнала от поверхности Земли, как показано на рис. 11.10а. В результате при низких углах антенны могут на экране появиться «ложные цели».

Кроме того, происходит интерференция радиоволн - амплитуда увеличивается при синфазных волнах и уменьшается при

противофазных. Разность фаз зависит от угла места цели. Характеристика антенны имеет лепестковый характер, т.е. кроме главного (центрального) лепестка имеются боковые. Первый лепесток отжимается на угол β_1 , что затрудняет выявление низколетящих целей (рис. 11.10).

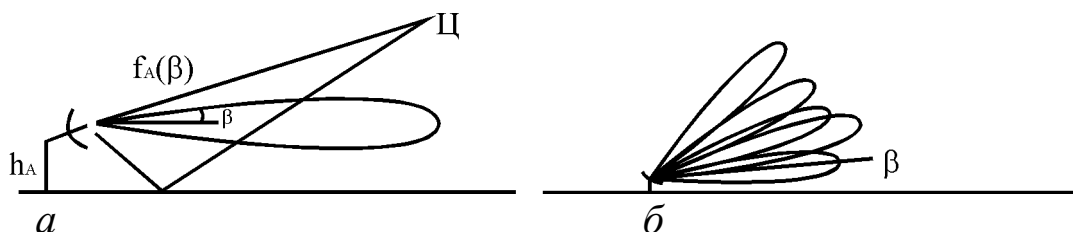


Рис. 11.10. Схемы влияния земной поверхности на сигналы от цели

На дальность действия РЛС влияет сферичность Земли, которая не позволяет видеть низколетящие цели за горизонтом.

Если антенну РЛС приподнять высоко над землей, то можно будет видеть низко летящие цели. Вместе с тем, если цель находится на большой высоте, то её можно будет наблюдать на большем расстоянии. В связи с этим введено понятие радиогоризонта.

Дальность радиогоризонта определяется по формуле:

$$D_{P.GOP} = 4.12(\sqrt{h_A} + \sqrt{H_C}),$$

где h_A и H_C -в метрах, $D_{P.GOP}$ в км.

11.7. Влияние затухания радиосигнала в атмосфере

При наличии рассеивания в атмосфере (дым, снег, облачность, дождь, снег) радиосигналы ослабевают с расстоянием по закону: $P(z) = P_0 \exp(-\alpha z)$.

При этом уменьшается максимальная дальность действия РЛС :

$$D_{max} = D_{CB max} \exp(-\alpha D_{max}),$$

где α - коэффициент затухания, $D_{CB max}$ - максимальная дальность в нормальной атмосфере.

Радиоволны $\lambda_3 > 10$ см имеют хорошее прохождение через атмосферу даже при наличии природного рассеивания (дождь и снег).

Для современных РЛС характерны следующие максимальные дальности:

D_{\max} км	Тип РЛС
75-200 км	Наведения, следящие.
350-500 км	Обнаружения целей.
1000 км	Обнаружения баллистических ракет.

11.8. Виды обзора в РЛС и их особенности

РЛС обзорного типа.

Обычные РЛС обзорного типа осуществляют поиск и обнаружение целей, а более сложные проводят и измерение координат (многих целей).

Используются разные методы обзора: круговой, сканирующий в секторе, полностью заполняющий зону направленного действия. Виды секторального обзора показаны на рис. 11.11.

В РЛС кругового и секторального обзора, при одномерном круговом обзоре (круговой обзор по азимуту), применяют антенну с плоской диаграммой направленности (веерный луч с удлинением по вертикали). Это позволяет «видеть» цели, летящие низко и высоко над горизонтом. Однако при этом резко уменьшается коэффициент направленности антенны и уменьшается дальность обнаружения.

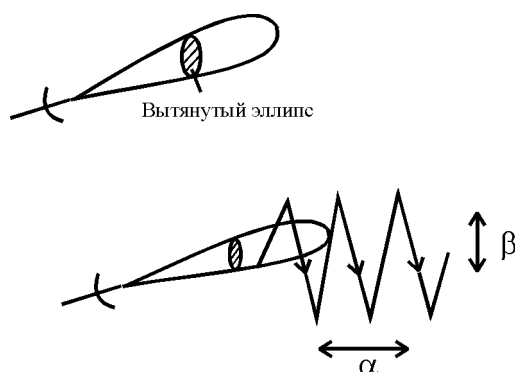


Рис. 11.11. Виды секторального обзора (веерным лучом и зигзагообразно)

Существуют параболические антенны с «козырьком» и вращателем поляризации Фарадея, позволяющие изменять диаграмму направленности с «веерной» на «острую». Первая применяется при ближнем обзоре, а вторая – при дальнем.

«Острая» диаграмма направленности применяется при двухмерном обзоре сектора (растровый обзор).

Обзор по спирали от центра к периферии применяется в РЛС истребителей.

В РЛС координатного типа часто применяют двумерный обзор с использованием двух независимых антенн и приемопередающих систем. Такие РЛС используют в системах радиоуправления зенитными ракетами.

11.9. Фазированные антенные решетки (ФАР)

В настоящее время механически сканирующие антенны заменяют неподвижными ФАР с многими излучателями и электронно управляемыми задержками излучения каждого элемента по фазе. В результате синхронной работы всех излучателей образуется узко направленный луч с возможностью быстрого изменения направления излучения. ФАР может иметь любой тип сканирования и произвольное случайное зондирование пространства.

Следует отметить, что РЛС с ФАР, несмотря на то, что они технические более сложны и дорогостоящи, имеют многие преимущества по сравнению с механически сканирующими антеннами. В них нет механически движущихся устройств, они обладают высоким быстродействием и долговечностью. По этому постепенно РЛС с ФАР все более применяются в военной и авиационной технике.

11.10. Типы РЛС по функциональному назначению

а) Некогерентные РЛС (определение D , α , β).

Подсистемы: синхронизатор, передатчик, приемник, антенно-фидерное устройство, индикаторное устройство, устройство определения координат.

б) Когерентно-импульсные системы селекции движущихся

целей. Разная скорость движения цели и помех позволяет выделить цель по доплеровскому смещению (сравнения основной частоты f_S и частоты отраженного сигнала f_{Π} с определением разностной частоты: $\Delta f_D = |f_S - f_{\Pi}|$).

в) Некогерентная система СДЦ- система череспериодной компенсации. Сигналы задерживаются на период и вычитаются из новых сигналов. Разностный сигнал отмечает движущуюся цель. Для задержки на период повторения сканирования используются электронно-лучевые трубки с накоплением заряда, УЛЗ или ПЗС.

г) Импульсно-доплеровские РЛС. Используются когерентные импульсные сигналы с большой частотой следования. Применяются на летательных аппаратах для выделения движущихся целей на фоне отражения от земной поверхности. Для выделения сигнала с доплеровским смещением используются узкополосные настроенные встык многоканальные фильтры (гребенчатые фильтры). Ширина полосы пропускания каждого фильтра определяет разрешение целей по частоте (скорости).

ГЛАВА 12

РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И СИСТЕМЫ РАДИОУПРАВЛЕНИЯ

12.1. Радионавигационные системы (РНС)

Термин «Радионавигационные системы» происходит от слова «навигация» (вождение).

Радионавигация - вождение самолетов, космических аппаратов, морских кораблей с использованием радиотехнических средств. В основном в навигационных системах требуется определение координат на поверхности Земли или определение правильного направления движения.

Требования к точности определения координат в навигации растут. Ранее в мореплавании определение координат проводилось по солнцу. Сейчас используют звездные угломерные инструменты, ориентиры на маяки и радиомаяки, используют сиг-

налы спутников Земли. Иногда требуется ориентация с большой точностью, в любой точке Земного шара в любых погодных условиях.

Краткая история развития радионавигации.

1986 г. – первая радиостанция А.С.Попова использована в качестве радиомаяка

1915 г. – разработаны радиопеленгационные устройства.

1930 г. - корабельные радиопеленгаторы и береговые маяки.

1940 г. - радионавигационные системы РНС для авиации. Приводные аэродромные радиостанции ПАР, бортовые радиопеленгаторы или радиополукомпасы РПК, автоматические радиоконпасы АРК.

1950 г. - системы “слепой” посадки и точного движения самолетов в районе аэропорта и по маршруту.

1960 г. - системы управления и навигации с помощью космических спутников.

1988 г. - система автоматической посадки возвращаемого космического корабля многоразового использования “Буран”.

1990 г. – спутниковые навигационные системы высокой точности.

2000 г. – навигационные системы высокой точности и широкого пользования.

Сейчас навигационные системы используются на всех морских судах, самолетах, вертолетах. Они используются в системах управления самолетами в зоне аэропорта, в военных системах управления, и даже в системах контроля за движением автобусов, автомобилями скорой помощи, такси и др.

12.2. Подсистемы радионавигационных систем

Системы определение координат на Земной поверхности и скорости движения, отображение информации и управления объектами включают следующие подсистемы:

а) Радионавигационные координаторы (РНК) – осуществляют прием и обработку сигналов, несущих информацию о положении и движении в условиях радиопомех и внешних воздействий.

- б) Устройства обработки информации от РНК с учетом решаемых задач (включают специализированные или универсальные ЭВМ с алгоритмами и программами обработки информации).
 - в) Устройства сопряжения с другими техническими средствами.
 - г) Устройства отображения информации для операторов РНС, или устройства сопряжения с автопилотом.
 - д) Рабочее место оператора управления (диспетчера).
 - е) Рабочие места и стенды операторов технического обслуживания.
 - ж) Устройства контроля состояния системы.
- з) Устройства контроля внешних воздействий, в условиях которых функционирует аппаратура.

12.3. Угломерные (амплитудные) РНС

1) Радиопеленгаторы

Первыми из наиболее эффективных навигационных систем появились радиопеленгаторы, использующие принцип сравнения амплитуд сигнала приходящего под углом к двум, взаимно перпендикулярно направленным антеннам (рис. 12.1).

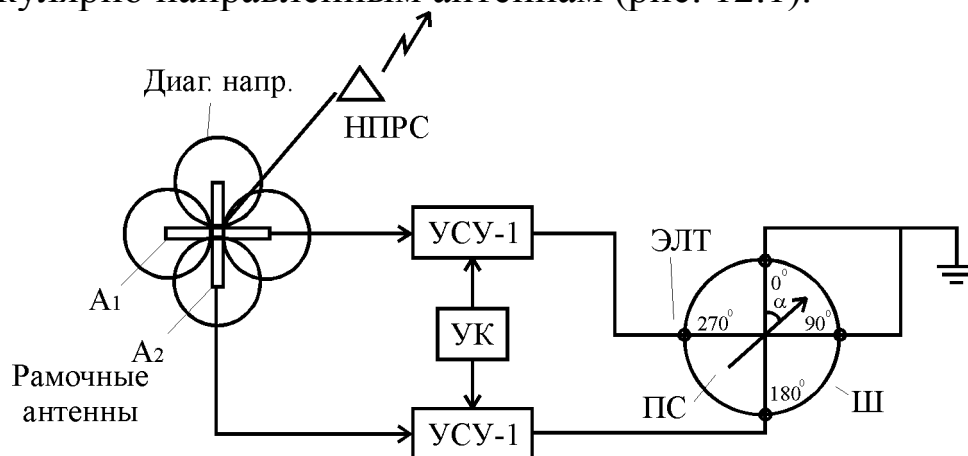


Рис. 12.1. Структурная схема радиопеленгатора

Схематическое изображение радиопеленгатора на рис. 12.1 содержит следующие устройства и обозначения:

УСУ - приемные устройства усиления и выделения сигнала,

ЭЛТ - электронно-лучевая трубка (индикатор), УК - устройство калибровки каналов, Ш – угловая шкала в градусах, ПС - положение следа электронного луча, НПРС - направление прихода радиосигнала.

Радиопеленгатор работает следующим образом. Радиосигнал поступает от каждой из антенн в каналы УСУ, где происходит селекция и усиление. Усиленные сигналы подаются на перпендикулярные управляющие электроды ЭЛТ и разворачивают луч. Амплитуда сигнала каждого из электродов пропорциональна приходящему сигналу и, потому, направление луча соответствует направлению прихода сигнала.

2) Угломерные РНС

Угломерные РНС, основанные на автоматическом пеленговании с использованием модуляции амплитуды. Они основаны на принципе действия радиопеленгатора. Используются в радиоконпасах самолетов и кораблей. Пеленгуют направление на радиомаяки.

Существуют также следящие системы с двумя антеннами малой направленности, которые хорошо захватывают радиолуч и выводят антенны на направление луча (маяка), пока не будет выполнено равенству сигналов от двух антенн.

3) Системы ориентации в пространстве

Используются узконаправленные РЛС обзорного типа. Используются также определение направления на радиомаяки и спутниковые системы.

4) Временные (импульсные) дальномерные устройства.

Применение импульсных радиодальномеров позволяет определить дальность до объекта с большой точностью. Работа передатчика и приемника на одну антенну. Прием-передача запроса. Позволяет использовать “ответчик” “свой - чужой”.

Пауза используется для сообщений.

Позволяет использовать импульсы ответчика для определения его угловых координат.

12.4. Радионавигационные системы на основе ИСЗ

Определение координат с помощью ИСЗ основано на измерении доплеровского смещения при пролете над местом наблюдения (рис.12.2).

При пролете над местом наблюдения доплеровская частота меняет знак с положительной на отрицательную. Траектории спутников известны на много месяцев вперёд и выпускаются в виде таблиц. Каждый из спутников имеет свою рабочую частоту и характерный тип сигнала

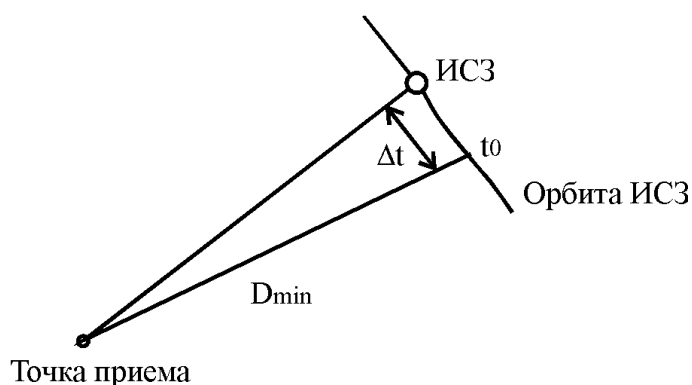


Рис. 12.2. Схема измерения доплеровского смещения при полете спутника

При пролёте ИСЗ доплеровское смещение будет:

$$\Delta f_D(\Delta t) = f_s(\Delta t) - f_{s0} = \frac{f_{s0}}{c} \frac{v_{ИСЗ} \Delta t}{\sqrt{\Delta t^2 + (D_{\min} / v_{ИСЗ})^2}}$$

Координаты на геоиде фиксируются по прохождению $\Delta f_D = 0$ или по смене знака доплеровского смещения..

Другим методом определения координат на геоиде (условно-средней поверхности Земли, отличающейся от сферической), является метод, основанный на определении направлений на спутники, расположенные на геостационарных орбитах (рис. 12.3). Каждый из спутников ведет телевизионное вещание и положение спутников известно с большой точностью.

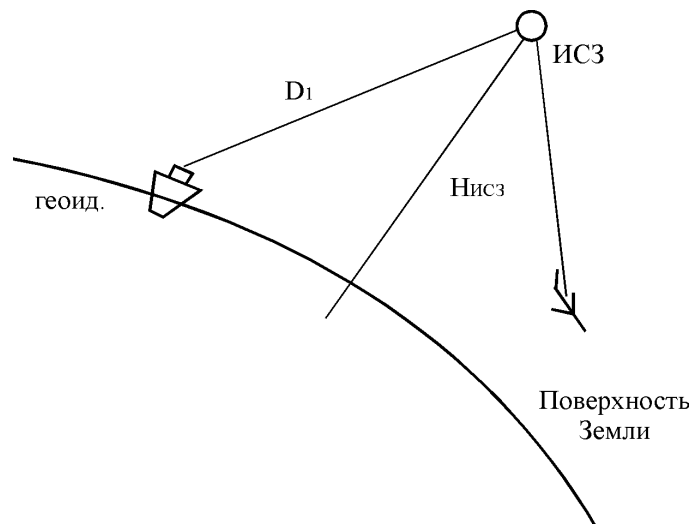


Рис. 12.3. Схема определения координат корабля и самолета с помощью направления на стационарный спутник

Современные радионавигационные системы основаны на измерении специальных сигналов со стационарных или низкоорбитальных спутников. Применение измерителей фазовых соотношений сигналов позволяет определить координаты с точностью до нескольких метров. Точное определение координат производят с помощью специальных спутниковых систем: GPS и НАВСТАР.

Иногда измерительную систему совмещают с портативной персональной ЭВМ, в памяти которой заложены карты местности, и она автоматически вызывает нужную карту и указывает на ней положение измерителя.

12.5. Системы радиуправления

По характерным особенностям радиуправления различают следующие системы радиуправления: ракетами (СУР), спутниками (ИСЗ), космическими аппаратами (КА).

Типы ракет, используемых при радионаведении:

- а) Поверхность- поверхность (Баллистические ракеты).
- б) Воздух – воздух (ВВ)
- в) Поверхность- воздух (ПВ).
- г) Воздух- поверхность (ВП).

Структурная схема системы радиоуправления зенитными ракетами приведена на рис 12.4.

На схеме показано радиоуправление зенитными ракетами при взаимодействии РЛС с ЭВМ, рассчитывающей координаты цели и ракеты, определяющей оптимальную траекторию полета ракеты с упреждением передающей команды управления по командной радиолинии.

В настоящее время системы радиоуправления совершенствуются. Дальность действия достигает 400 км, а скорости управляемых ракет достигают 2 км/с, что позволят использовать их в противоракетных системах.

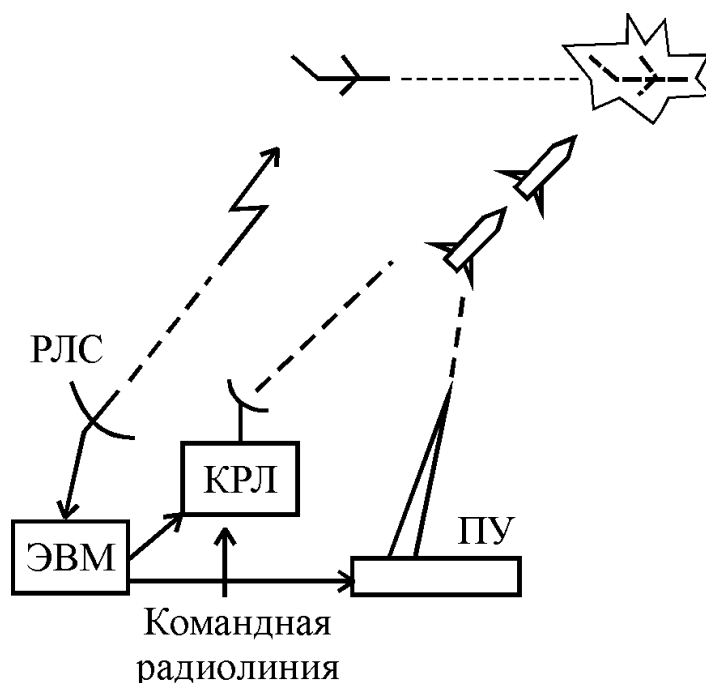


Рис. 12.4. Структурная схема системы радиоуправления зенитными ракетами

Функциональная схема взаимодействия соответствует функциональной схеме радиоуправления, приведенной в главе 1. Следует отметить, что система управления содержит кинематическое звено в виде ЭВМ, в которой рассчитывается оптимальная траектория движения ракеты к цели, и она постоянно корректирует траекторию, учитывая координаты и парамет-

ры скорости цели и ракеты. В динамическом звене системы происходит учет параметров движения и инерционности ракеты.

В системе управления участвует и автопилот ракеты с гироскопом, которые поддерживают заданное направление движения, управляя рулями ракеты, радиосигналы корректируют движение ракеты в соответствии с расчетами в кинематическом и динамическом звене.

В военной технике используются также системы самонаведения ракеты на цель с использованием активного облучения РЛС (рис. 12.5) или с использованием излучения радиотехнических средств самой цели.

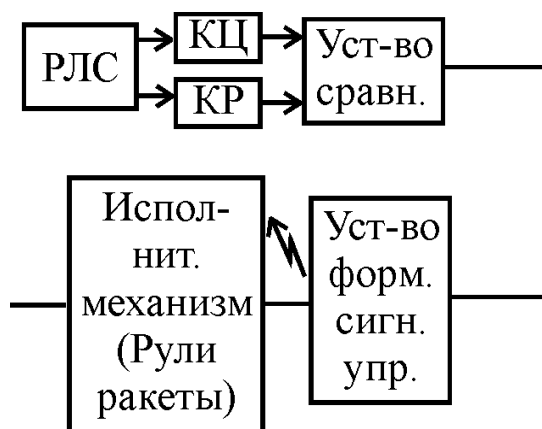


Рис. 12.5. Функциональная схема системы самонаведения с использованием РЛС

В других распространенных системах самонаведения используются инфракрасные датчики, которые отслеживают направление излучения горячих двигателей самолётов, вертолетов и наземной техники.

В связи с развитием полетов космических аппаратов возникла необходимость их стыковки на орбите. В этом случае, также как и в случае управления зенитной ракетой, важен учет законов динамики полета инерционного тела на орбите и выбор оптимальной траектории. Для управления космическими аппаратами разработаны специальные программы, учитываю-

щие динамические особенности летательных аппаратов, энергетические характеристики двигателей и кинематику полета на орбите.

Схематическое изображение системы самонаведения КА со станцией на орбите показано на рис. 12.6.

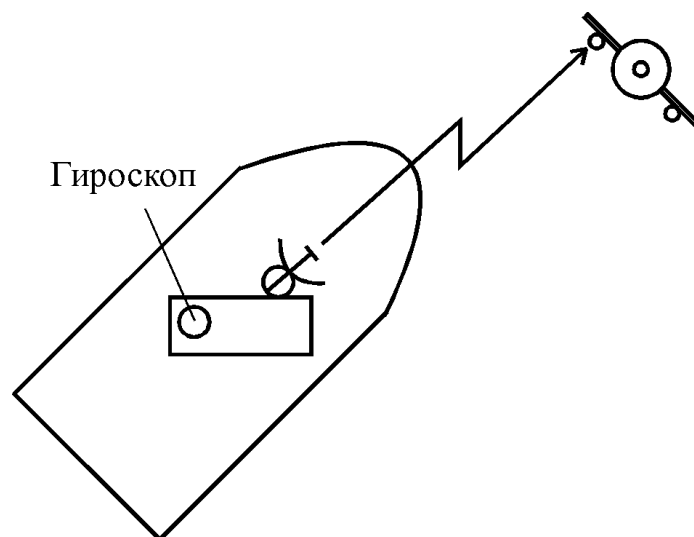


Рис. 12.6. Функциональная схема системы самонаведения КА

В системе управления имеется автопилот с гироскопом, которые поддерживают заданное направление движения, управляя двигателями КА, радиосигналы собственного локатора дают информацию об отклонении от направления на станцию. В кинематическом и динамическом блоках (звеньях) вырабатываются сигналы, корректирующие движение ракеты КА в соответствии с расчетами на оптимальную траекторию движения.

В гражданской и военной авиации разработаны и используются автоматизированные системы радиоуправления посадкой в трудных метеорологических условиях. Система осуществляет сближение траектории самолета с заданной путем воздействия на рули высоты, повороты и крена. При управлении посадкой самолета необходимо учитывать многие факторы: состояние атмосферы, ветер, инерционные силы, скорость и положение. Наиболее ярко такая система проявила себя при посадке космического возвращаемого корабля «Буран».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение хочется отметить, что радиотехнические системы сейчас бурно развиваются и находят все более широкое применение в быту людей. Многие достижения радиотехники, ранее казавшиеся фантастическими, сейчас широко используются. Примерами могут служить сотовая телефонная связь и сеть «Интернет», поддерживаемая спутниковыми системами связи. Спутниковое телевидение не только расширило возможности просмотра многих каналов, но и охватило ранее недоступные районы. Продолжается и непрерывное развитие РТС сбора информации. Налажены аэрологические и спутниковые системы контроля экологической обстановки на поверхности Земли, ведется разведка полезных ископаемых и контроль ледовой обстановки на морях.

Радиотехнические системы передачи информации играют важную роль там, где проводные и волоконно-оптические системы прокладывать сложно и нецелесообразно. Это особенно характерно для регионов Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера. Для этих районов наличие общедоступных спутниковых систем связи является жизненной необходимостью и играет важную роль в народном хозяйстве.

В настоящее время потребность в передаче цифровых сообщений растет в геометрической прогрессии, что требует создания высокоскоростных систем передачи информации с высоким коэффициентом широкополосности. Это требует освоения все более высоких частот сантиметрового и миллиметрового диапазонов, а также оптических диапазонов с волоконными трактами передачи. Параллельное развитие этих направлений открывает возможность создания универсальных локальных абонентских сетей и систем. В таких системах в единую сеть объединяются различные службы, поставляющие информацию, и абоненты её потребляющие. Одно и то же "лицо" может быть в роли и поставщика, и потребителя информации. Предоставляемые услуги - ТВ, телефакс, телефонная связь, электронная почта, сеть "Интернет", передача высококаче-

ственной видео- и аудиоинформации, например, стерео- или даже квадрофонического звучания, просмотр кинофильмов, музейных экспозиций и т.п. Осваиваемые сейчас так называемые «городские локальные сети» рассчитаны на скорость передачи 100 Мбит/с и сотни тысяч абонентов в радиусе нескольких десятков километров.

В качестве развивающихся служебных систем следует отметить быстродействующие локальные вычислительные сети (ЛВС), объединяющие в единое целое банки данных больших вычислительных машин и комплексов. Пользуясь телефаксным каналом, пользователь может работать с вычислительной системой или быстродействующей и хорошо оснащенной ЭВМ с помощью персонального компьютера. В этом случае также возрастает роль широкополосных каналов и открываются большие возможности для радио- и волоконно-оптических линий передачи цифровой информации.

Большой вклад в развитие современных направлений радиотехники внесен учеными России. Работы по теории помехоустойчивости, фильтрации и кодирования проводились академиками В.А. Котельниковым, Ю.В. Гуляевым, А.С. Бугаевым, В.И. Сифоровым. Благодаря их приоритетным исследованиям и разработкам в России успешно внедрены и работают радиорелейные и спутниковые многоканальные системы связи. Известны также результаты работ советских ученых области радиоуправления летательными аппаратами, разработки навигационных систем. Благодаря работам академиков А.М. Прохорова, Ж.И. Алферова, Е.М. Дианова сейчас успешно идет прогресс в области развития волоконно-оптических систем передачи информации. Продолжаются работы и в области развития оборонной радиотехники. Для успешного развития новых направлений в области радиофизики и радиотехники требуется прилив полных сил и знаний молодых специалистов. Следует заметить, что студенты радиотехнических специальностей без труда находят работу по специальности и спрос на специалистов в области радиотехники и электроники постоянно растет.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Радиотехнические системы./ под редакцией Ю. М. Казаринова, -М.: «Высшая школа» 1995 г.
2. П.А. Бакулев. Радиолокационные системы. –М.: Радиотехника, 2004, 234 с.
3. А.Б. Борзов, Р.П. Быстров, Э.А. Засовин и др. Радиотехнические и радиооптические системы. –М.: Изд. Дом «Круглый стол», 2001, 456 с.
4. Чердынцев В. А. «Радиотехнические системы», Минск, «Высшая школа», 1998 286 с. .
5. Каганов В.И. Радиотехнические цепи и сигналы. Учебное пособие. –М.: Форум Инфра-М, 2005, 260 с.
6. Пестряков В.Б., Кузенков В.Д. Радиотехнические системы, - М.: Радио и связь, 1985 360 с.
7. Нефёдов В.И. Основы радиоэлектроники. Учебник для вузов. - М.: Высшая школа, 2000, 399 с.
8. Шувалов В.П., Захарченко В.О., Шварцман В.О. и др. Передача дискретных сообщений. – М.: Радио и связь, 1990 324 с.
9. Андрианов В.И., Соколов А.В. Средства мобильной связи. – СПб.: Радио и связь, 1998 312 с
10. Берикашвили В.Ш., Мировицкий Д.И. Элементная база волоконно-оптических систем передачи информации. – М.: МИРЭА, 2002 124 с.
11. Берикашвили В.Ш., Василенко Е.В., Соколов В.Г. и др. Обнаружение и распознавание радиолокационных объектов. -М.: Изд. предпр. Ж.«Радиотехника», 2005 262 с.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

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

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	4
7.1. Основные определения радиотехники и физические основы использования радиоволн	4
1.2. Системные методы и радиотехнические системы	6
1.3. Жизненный цикл РТС	7
1.5. Классификация РТС по назначению	8
1.5. Структурные и функциональные схемы РТС	8
ГЛАВА 2. КОЛИЧЕСТВО И ХАРАКТЕР ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ	11
2.1. Количественная оценка информации	11
2.2. Вероятностное описание процесса (сообщения)	13
2.3. Описание цифровых сообщений	16
2.5. Классификация РТС по характеру сообщений, циркулирующих в системе	16
2.5. Классификация РТС по используемым частотам	17
2.6. Классификация РТС по модулируемому параметру	18
2.7. Параметры, характеристики и показатели качества РТС	18
ГЛАВА 3. РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА РТС	20
3.1. Системные методы и радиоэлектронная аппаратура	20
3.2. Схемотехническое деление РЭА по содержанию	20
3.3. Экономическая эффективность РТС	22
3.4. Роль конструкторов и технологов в развитии РТС	22
3.5. Системный подход при проектировании РТС	23
3.5. Историческое развитие РТС	24
ГЛАВА 4. ИСКАЖЕНИЯ СООБЩЕНИЙ В РТС, ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ И ОПТИМАЛЬНЫЙ ПРИЕМ	26
4.1. Источники помех и их фильтрация	26
4.2. Искажение информации на выходе фильтра	28
4.3. Искажения импульсных сигналов	30
4.4. Действие помех при приеме цифровых сигналов	31
4.5. Выделение информации при действии помех	31

4.6. Оптимальное распознавание дискретных сигналов	31
4.7. Схема обнаружения сигнала на фоне помех	32
4.8. Схема обнаружения сигнала со случайной фазой	34
ГЛАВА 5. СОГЛАСОВАННЫЕ ФИЛЬТРЫ	35
5.1. Свойства согласованных фильтров	35
5.2. Схемы согласованных фильтров	36
5.3. Реализация СФ и квазисогласованные фильтры	37
5.4. Ошибки при обнаружении и распознавании сигнала с известными параметрами	39
5.5. Ошибки обнаружения сигналов со случайной фазой	40
ГЛАВА 6. ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ	42
6.1. Критерий максимального правдоподобия	42
6.2. Влияние помех на оценку параметра	43
6.3. Оптимизация выделения сообщения из сигнала и помех	44
6.4. Методы борьбы с источниками помех в РТС	46
ГЛАВА 7. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В РТС	47
7.1. Характеристики направленной антенны РТС	47
7.2. Мощности передачи и приема сигналов РТС	48
7.3. Расчет мощности передатчиков	49
ГЛАВА 8. РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ	50
8.1. Назначение и особенности систем передачи информации	50
8.2. Модуляция и демодуляция радиосигнала	51
8.3. Многоканальные системы передачи информации	54
8.4. Временное уплотнение при цифровой передаче	55
8.5. Системы телевидения	57
8.6. Многоканальные РТС ПИ на ИСЗ	59
8.7. Сотовая телефонная радиосвязь	61
ГЛАВА 9. РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ	62
9.1. Принципы работы РЛС и определения параметров объектов	62
9.2. Классификация РЛС	64
9.3. Тактические характеристики РЛС	64

9.4. Сигналы и цели в РЛС	65
9.5. Общая характеристика зондирующих сигналов	67
9.6. Последовательности (пачки) импульсов РЛС	67
9.7. Особенности отражения радиоволн от целей	69
ГЛАВА 10. ОПТИМАЛЬНЫЕ ПРИЕМНИКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ	70
10.1. Согласованная фильтрация ЛЧМ-сигналов	71
10.2. Цифровые согласованные фильтры	74
10.3. Накопители для пачек импульсных сигналов	75
10.4. Оптимальный приемник для некогерентной пачки радиоимпульсов	76
ГЛАВА 11. ВЫЧИСЛЕНИЕ КООРДИНАТ И ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ В РЛС	77
11.1. Цифровые накопители (интеграторы)	77
11.2. Методы измерения координат и радиальной скорости целей в РЛС	78
11.3. Радиоизмерение дальности (импульсный, частотный и фазовый метод)	80
11.4. Измерение радиальной скорости	82
11.5. Дальность действия РЛС	83
11.6. Влияние отражений от земной поверхности	84
11.7. Влияние затухания радиосигнала в атмосфере	85
11.8. Виды обзора в РЛС и их особенности	86
11.9. Фазированные антенные решетки (ФАР)	87
11.10. Типы РЛС по функциональному назначению	87
ГЛАВА 12. РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И СИСТЕМЫ РАДИОУПРАВЛЕНИЯ	88
12.1. Радионавигационные системы (РНС)	88
12.2. Подсистемы радионавигационных систем	89
12.3. Угломерные (амплитудные) РНС	90
12.4. Радионавигационные системы на основе ИСЗ	92
12.5. Системы радиоуправления	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	97
Библиографический список	99
Список сокращений	100

Валерий Шалвович Берикашвили

ОСНОВЫ ТЕОРИИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

КУРС ЛЕКЦИЙ

Редактор Э. А. Засовин

Литературный редактор

Подписано в печать 00.00.2007. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,00. Усл. кр.-отт. 0,00. Уч.-изд. л. 0,0.

Тираж 000 экз. С 00

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
“Московский государственный институт радиотехники,
электроники и автоматики (технический университет)”
119454, Москва, пр. Вернадского, 78