

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Ульяновский государственный технический университет

**В. А. Гульшин**  
**А. С. Садовиковский**

## **Задачник по радиолокации**

Методические указания по практическим занятиям  
для студентов специальности 21030265

Ульяновск 2006

УДК 621.396 (075)  
ББК 32.84 Я 7  
Г 94

Рецензенты: директор Ульяновского отделения  
института радиотехники и  
электроники Российской  
академии наук  
д-р. техн. наук В. А. Сергеев;  
зам. начальника Управления  
Главного конструктора  
- начальника ОКБ ОАО «УМЗ»  
В. П. Кузнецов

Утверждено редакционно-издательским советом  
университета в качестве учебного пособия.

**Гульшин, В. А.**  
Г94 Задачник по радиолокации для студентов специальности 21030265  
«Радиотехника»/ В. А. Гульшин, А. С. Садомовский. – Ульяновск:  
УлГТУ, 2006. – 60 с.  
ISBN 5-89146-800-0

Задачник составлен в соответствии с учебным планом специальности  
21030265 «Радиотехника». Содержит сведения по теории радиолокационных  
систем и 152 задачи из основных разделов радиолокации.

Работа выполнена на кафедре «Радиотехника».

**УДК 621.396 (075)**  
**ББК 32.84 Я 7**

© В. А. Гульшин,  
А. С. Садомовский, 2006  
© Оформление. УлГТУ, 2006

ISBN 5-89146-800-0

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Обнаружение радиолокационных сигналов	4
2. Радиолокационный обзор. Методы обзора пространства	10
3. Радиолокационные методы измерения дальности	16
4. Разрешающая способность РЛС по дальности, направлению и скорости	24
5. Системы селекции движущихся целей	
Измерение радиальной скорости импульсными РЛС	30
6. Основное уравнение радиолокации	37
7. Пассивные помехи РЛС	45
8. Активные помехи РЛС и системам связи	52
Библиографический список	60

## 1. ОБНАРУЖЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

*Обнаружением* называется процесс принятия решения о наличии или отсутствии цели в каждом элементарном разрешаемом объеме РЛС. Проблема обнаружения возникает в тех случаях, когда сигналы принимаются в присутствии помех. В этих условиях передача информации связана с возможными искажениями: при наличии сигнала он может быть замаскирован помехой, а при отсутствии сигнала помеха может быть принята за сигнал. При обнаружении допустимы только два решения: «сигнал есть» или «сигнала нет».

При решении задачи обнаружения возможны два неизвестных и взаимоисключающих условия (гипотезы) при выработке решения:

- условие  $H_1$  - сигнал есть;
- условие  $H_0$  - сигнала нет.

Приемник на основе анализа принятой смеси сигнал/шум должен выработать решение о наличии или отсутствии сигнала:

- $A_1$  - сигнал есть;
- $A_0$  - сигнала нет.

Вероятность события  $A_1$ , вычисленная при условии, что имело место событие  $H_1$ , называется *вероятностью правильного обнаружения*

$$D = P(A_1 / H_1). \quad (1)$$

Вероятность события  $A_0$ , вычисленная при условии, что имело место событие  $H_0$ , называется *вероятностью правильного необнаружения*

$$\bar{F} = P(A_0 / H_0). \quad (2)$$

Аналогично вероятность пропуска цели

$$\bar{D} = P(A_0 / H_1). \quad (3)$$

Вероятность ложной тревоги

$$F = P(A_1 / H_0). \quad (4)$$

Правильное обнаружение и пропуск цели образуют группу несовместных событий

$$D + \bar{D} = 1. \quad (5)$$

Правильное необнаружение и ложная тревога аналогично образуют группу несовместных событий

$$F + \bar{F} = 1. \quad (6)$$

Полные вероятности правильного решения  $P_{np}$  и ошибки при обнаружении  $P_{ош}$  соответственно равны:

$$P_{np} = P(H_1)D + P(H_0)\bar{F}, \quad (7)$$

$$P_{ош} = P(H_1)\bar{D} + P(H_0)F, \quad (8)$$

где  $P(H_1)$ ,  $P(H_0)$  – априорные вероятности соответственно наличия и отсутствия сигнала. Имея в виду наибольшую неопределенность априорных сведений, можно полагать равными априорные вероятности наличия и отсутствия сигнала равными 0,5.

При этом сумма полных вероятностей равна единице

$$P_{ош} + P_{пр} = 1. \quad (9)$$

Для обнаружения сигналов стремятся использовать оптимальные приемники. Количественная оценка качества работы приемников обнаружения осуществляется с помощью характеристик обнаружения, представляющих собой графики зависимости вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги от удвоенного отношения энергии сигнала  $E_c$  к спектральной плотности шума на входе приемника  $N_0$

$$q = 2E_c / N_0. \quad (10)$$

Параметр  $q$  часто называют отношением сигнал/шум по энергии.

Рассмотрение чисто гипотетической ситуации – *обнаружение сигнала с полностью известными параметрами* – позволяет оценить теоретический предел улучшения характеристик обнаружения. При обнаружении указанного сигнала неизвестным является сам факт наличия или отсутствия сигнала.

При обнаружении одиночного сигнала с полностью известными параметрами характеристики обнаружения могут быть оценены с помощью приближенной формулы:

$$q = 2 \left( \sqrt{\ln 1/F - 1,4} + \sqrt{\ln 1/(1-D) - 1,4} \right)^2. \quad (11)$$

Погрешность вычислений по этой формуле не превышает 15% для  $F \leq 0,1$  и  $D \geq 0,9$ , если  $D \rightarrow 1$ , а  $F \rightarrow 0$ , то погрешность вычислений стремится к нулю.

На рис. 1 изображены характеристики обнаружения сигнала с полностью известными параметрами.

Если производится обнаружение не одного, а  $N_c$  одинаковых сигналов, то суммарное отношение сигнал/шум на входе приемника возрастает в  $N_c$  раз и становится равным

$$q_{\Sigma} = 2N_c E_c / N_0, \quad (12)$$

где под  $E_c$  понимается энергия одного импульсного сигнала. При определении вероятностей  $D$  и  $F$  по рабочим

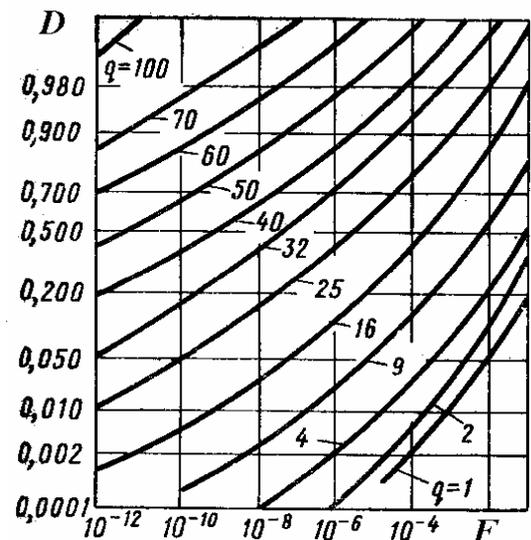


Рис. 1. Характеристики обнаружения сигнала с полностью известными параметрами

характеристикам следует принимать во внимание значение  $q_{\Sigma}$ .

При приеме *одиночного сигнала со случайной начальной фазой* характеристики обнаружения описываются приближенной формулой

$$q = 2 \left( \sqrt{\ln 1/F} + \sqrt{\ln 1/(1-D) - 1,4} \right)^2. \quad (13)$$

Погрешность вычислений по этой формуле не превышает 15% для  $F \leq 0,1$  и  $D \geq 0,9$ .

Если принимается последовательность  $N_c$  импульсных сигналов со случайной начальной фазой, то на характеристику обнаружения существенно влияет наличие взаимосвязи фаз отдельных сигналов. Пачку импульсных сигналов называют *когерентной*, если в пределах всей пачки имеет место определенная зависимость фазы колебаний от времени. Характеристики обнаружения когерентной пачки импульсов со случайной начальной фазой определяются соотношением (13), в котором  $q = q_{\Sigma}$ .

Пачку импульсов называют *некогерентной* в том случае, если начальные фазы отдельных сигналов статистически независимы. После системы обработки результирующее отношение сигнал/шум некогерентной пачки импульсов оказывается меньшим, чем у когерентной (при одинаковой суммарной энергии сигналов на входе приемника). Для  $N_c \gg 1$  характеристики обнаружения сигналов с неизвестной начальной фазой могут быть определены с помощью приближенной формулы

$$q = 2 \sqrt{N_c} \left( \sqrt{2 \ln(1/F) - 2,8} + \sqrt{2 \ln(1/(1-D)) - 2,8} \right)^2. \quad (14)$$

Ошибка вычислений не превышает 2 дБ.

Если принимаемый сигнал характеризуется случайными изменениями не только фазы, но и амплитуды, то имеет место дальнейшее ухудшение характеристик обнаружения по сравнению с полностью известным сигналом. Полагая, что закон распределения начальной фазы сигнала равномерный в пределах от 0 до  $2\pi$ , а распределение амплитуд подчинено закону Релея, то характеристики обнаружения можно найти следующим образом:

$$\bar{q} = 2 \left[ \frac{\ln(1/F)}{\ln(1/D)} - 1 \right], \quad (15)$$

где  $\bar{q} = 2\bar{E}_c/N_0$  определяется средним значением энергии сигнала.

При большом значении вероятности правильного обнаружения и малой вероятности ложной тревоги для обнаружения флуктуирующего сигнала требуется значительно большая его энергия, чем для обнаружения сигнала с известной амплитудой.

При обнаружении пачки  $N_c$  когерентных импульсов с флуктуирующими начальной фазой и амплитудой можно рассчитывать характеристики обнаружения по формуле (15), принимая при этом отношение сигнал/шум равным

$$q = \bar{q}_\Sigma = 2N_c \bar{E}_c / N_0, \quad (16)$$

где  $\bar{E}_c$  – средняя энергия одного импульса.

При обнаружении пачки  $N_c$  некогерентных импульсов с флуктуирующими начальной фазой и амплитудой при  $N_c \gg 1$  справедлива приближенная формула

$$\bar{q}_\Sigma = (2/D) \sqrt{N_c} \sqrt{2 \ln(1/F) - 2,8}, \quad (17)$$

где  $\bar{q}_\Sigma$  характеризует среднюю суммарную энергию пачки. Погрешность вычислений по этой формуле не превышает 15% для  $F \leq 0,1$  и  $D \geq 0,9$ .

В большинстве элементов приемного тракта имеет место уменьшение отношения сигнал/шум на выходе по сравнению с его значением на входе. Это уменьшение отношения сигнал/шум принято называть потерями при обработке  $\alpha_i$ . Потери выражаются либо в разгах, либо в децибелах.

Если в приемнике имеется  $n$  элементов с потерями, то суммарные потери тракта равны

$$\alpha_\Sigma = \prod_{i=1}^n \alpha_i. \quad (18)$$

Для того чтобы обеспечить обнаружение сигналов с заданными вероятностями  $D$  и  $F$ , при использовании реального приемника следует иметь на входе отношение сигнал/шум в  $\alpha_\Sigma$  раз больше значения  $q$ , определяемого по одной из формул (11), (13), (14), (15), (17) или по графику на рис. 1.

Ниже перечислены основные виды потерь:

а) потери  $\alpha_a$  в антенне, возникающие вследствие изменения амплитуды принимаемых сигналов при сканировании антенны. В среднем можно принять  $\alpha_a \approx 1,5$ ;

б) потери  $\alpha_{вч}$  в высокочастотном тракте, вызываемые затуханием энергии сигналов в фидерах и антенных коммутаторах. В среднем  $\alpha_{вч} \approx 1,6$ ;

в) потери  $\alpha_{дет}$  в детекторе зависят от отношения сигнал/шум и количества накапливаемых импульсов. При приближенных расчетах используют усредненную характеристику потерь в детекторе в соответствии с рис. 2;

г) потери  $\alpha_{ко}$ , вызванные заменой оптимального фильтра в приемнике квазиоптимальным, согласованным только по полосе пропускания. Значения

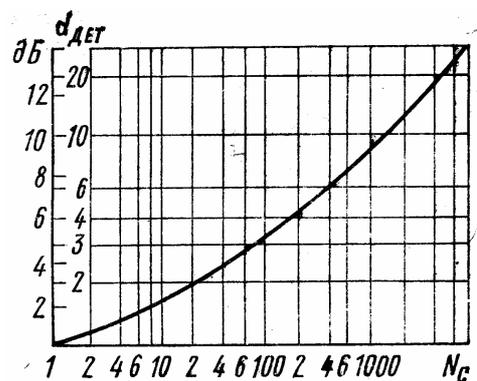


Рис.2. Усредненная характеристика потерь в детекторе

коэффициента  $\alpha_{ко}$  приведены в таблице 1, где  $\Delta f_{\phi}$  – полоса пропускания фильтра по половинной мощности,  $\Delta \tau_u$  – длительность импульса по половине максимального значения напряжения;

Таблица 1

Радиоимпульс	Фильтр	$\Delta f_{\phi} \Delta \tau_u$	$\alpha_{ко}$
Прямоугольный	Идеально прямоугольный	1,37	1,21
То же	Гауссов	0,72	1,26
Гауссов	То же	0,44	1,0
Прямоугольный	Одиночный резонансный контур	0,4	1,24
То же	Два резонансных контура	0,613	1,14
То же	Пять резонансных контуров	0,672	1,12

д) потери оператора  $\alpha_{он}$ , связанные с тем, что для фиксации оператором отметки цели на индикаторе должно иметь место некоторое превышение яркости отметки над шумовым фоном. В среднем можно принять  $\alpha_{он}=1,5$ ;

е) потери  $\alpha_{ас}$  при автоматическом съеме данных, объясняющиеся тем, что отсчет выходного напряжения производится не в тот момент, когда сигнальная составляющая достигает своего максимума. Можно считать, что  $\alpha_{ас}=2$ .

При решении ряда практических задач полезно использовать коэффициент различимости  $k_p$ , представляющий собой отношение энергии  $\bar{E}_c$  одного импульсного сигнала к спектральной плотности  $N_0$  шума при условии обнаружения пачки из  $N_c$  с вероятностями  $D$  и  $F$ :

$$k_p = \frac{q}{2N_0} \prod_{i=1}^n \alpha_i, \quad (19)$$

где  $q$  определяется по одной из формул (11), (13), (15), либо по графику на рис. 1, как если бы принимался один сигнал.

## Задачи

1.1. Проанализировать зависимость полной вероятности ошибки  $P_{ош}$  при обнаружении цели от значений априорных вероятностей наличия  $P(H_1)$  от 0 до 1 и отсутствия цели  $P(H_0)$  от 1 до 0 с шагом 0,1, если:

- а)  $D=0,99$  и  $F=0,01$ ;
- б)  $D=0,9$  и  $F=0,01$ ;
- в)  $D=0,99$  и  $F=0,1$ .

1.2. Приняв, что априорные сведения о наличии цели отсутствуют ( $P(H_1)=P(H_0)=0,5$ ), вероятность правильного обнаружения  $D$  цели может

лежать в пределах от 0,9 до 0,99 и вероятность ложной тревоги  $F$  от 0,01 до 0,1, указать значения  $P_{np}$  и  $P_{ош}$  соответствующие:

а) максимальной вероятности принятия правильного решения при обнаружении цели;

б) максимальной вероятности ошибки.

1.3. Пояснить физический смысл ситуации, соответствующей обнаружению сигнала с полностью известными параметрами. Каково практическое значение анализа ситуации?

1.4. Пользуясь характеристиками обнаружения приемника (см. рис.1), оценить требуемые значения отношения сигнал/шум  $q$  при обнаружении полностью известного сигнала. Принять значение вероятности правильного обнаружения  $D$  равными 0,5, 0,9 и 0,99, а вероятность ложной тревоги  $F$  –  $10^{-3}$  и  $10^{-6}$ .

1.5. Оценить требуемое увеличение отношения сигнал/шум при переходе от обнаружения полностью известного сигнала к обнаружению сигнала с неизвестной начальной фазой и флуктуирующей амплитудой. Принять  $D=0,9$  и  $0,95$ ,  $F=10^{-4}$  и  $10^{-8}$ .

1.6. Оценить, насколько незнание начальной фазы сигнала заставляет увеличить отношение сигнал/шум при  $D=0,5$ ;  $F=0,1$  и  $D=0,9$ ;  $F=10^{-4}$ .

1.7. Пояснить физический смысл значения вероятности ложной тревоги применительно к обнаружению цели на индикаторе с яркостной отметкой.

1.8. Какие параметры принимаемых сигналов и почему нужно считать неизвестными в общем случае обнаружения цели?

1.9. Определить требуемое значение отношения сигнал/шум  $q$  и коэффициента различимости  $k_p$ , если необходимо обеспечить обнаружение цели когерентной РЛС при  $D=0,9$  и  $F=10^{-3}$  по пачке из 2000 импульсов. Произведение всех коэффициентов потерь принять равным 10.

1.10. Определить суммарные потери в импульсной некогерентной РЛС при приеме 25 прямоугольных импульсов и использовании автоматического съема данных. Резонансная характеристика усилителя промежуточной частоты гауссовой формы.

1.11. Определить суммарные потери в импульсной некогерентной РЛС при приеме 50 прямоугольных импульсов и использовании обнаружения цели оператором. Резонансная характеристика усилителя промежуточной частоты формируется одиночным резонансным контуром.

1.12. Определить требуемое значение коэффициента различимости  $k_p$ , если необходимо обеспечить обнаружение цели некогерентной РЛС при  $D=0,95$  и  $F=10^{-6}$  по пачке из 15 прямоугольных импульсов. В РЛС используется автоматический съем данных. Резонансная характеристика усилителя промежуточной частоты имеет идеально прямоугольную форму.

1.13. Где и каким образом накапливаются сигналы от цели в импульсной некогерентной станции с индикаторным выходным устройством при яркостной отметке?

## 2. РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ ОБЗОР. МЕТОДЫ ОБЗОРА ПРОСТРАНСТВА

В большинстве радиолокационных систем, прежде чем производить измерение координат и параметров движения, цель необходимо найти. Процесс поиска радиолокационных целей называется *радиолокационным обзором*. Поиск цели производится перемещением луча в некоторой области, называемой *зоной обзора* станции.

Характеристики радиолокационного обзора в большой степени зависят от вида диаграммы направленности антенны РЛС. *Диаграммой направленности*  $F^2(\varphi_{AZ}, \varphi_{УМ})$  по мощности называется график зависимости плотности мощности  $\rho$  излучаемой волны от направления распространения при постоянном расстоянии до точек наблюдения. На практике часто вместо пространственной диаграммы направленности пользуются плоскими диаграммами, представляющими собой сечение поверхности  $F(\varphi_{AZ}, \varphi_{УМ})$  двумя главными плоскостями – горизонтальной и вертикальной. Угол  $\theta_{0,5}$  – представляет собой ширину диаграммы направленности по уровню половинной мощности.

Антенны РЛС имеют диаграммы направленности двух основных видов: *иглообразные* и *веерные* (плоские). Игообразными называются диаграммы, у которых ширина по уровню половинной мощности приблизительно одинакова для обоих главных сечений. Веерные диаграммы характеризуются существенным различием ширины в главных сечениях.

*Периодом обзора*  $T_{обз}$  называется время, требуемое для однократного облучения всех точек зоны обзора, и обеспечения возможности приема сигналов из этих точек.

*Временем облучения*  $T_{обл}$  точечной цели называется время, протекающее с момента начала излучения радиоволн в направлении данной цели до конца приема сигналов от этой цели. За время  $T_{обл}$  накапливается энергия принимаемых сигналов, необходимая для обнаружения сигналов, оценки их параметров, разрешения и т. д. Соответственно, за время облучения цели  $T_{обл}$  на вход приемника РЛС должно поступить не менее  $N$  отраженных от цели эхо-сигналов. В свою очередь число накопленных эхо-сигналов зависит от периода повторения зондирующих импульсов РЛС  $T_n$

$$T_{обл} = N \cdot T_n . \quad (20)$$

При этом, при условии однозначного измерения дальности, период повторения зондирующих импульсов не может быть меньше, чем максимальное время задержки отраженных эхо-сигналов.

$$T_n \geq t_{з.макс} = 2D_{макс} / c . \quad (21)$$

Теоретически период последовательного обзора равен

$$T_{обз}^0 = T_{обл} D_{макс} \Phi_{AZ} \Phi_{УМ} / \Delta D \theta_{AZ} \theta_{УМ} , \quad (22)$$

где  $\Delta D$  – участок дальности, просматриваемый в каждый данный интервал  $T_{обл}$ ,  $\theta_{AZ}$  и  $\theta_{УМ}$  – значения ширины луча по уровню половинной мощности в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Если за время  $T_{обл}$  просматриваются цели на всей дальности действия РЛС, то теоретически значение периода последовательного обзора равно

$$T_{обз}^0 = T_{обл} \Phi_{AZ} \Phi_{УМ} / \theta_{AZ} \theta_{УМ}. \quad (23)$$

В реальных системах обзора время облучения цели существенно изменяется по зоне обзора (например, вследствие изменения скорости движения луча на краях зоны сканирования). В результате реальный период обзора  $T_{обз}$  часто оказывается большим теоретически необходимого  $T_{обз}^0$ . Отношение этих двух величин называют *относительным периодом обзора*  $K_{обз}$ .

С учетом коэффициента  $K_{обз}$  формулы (22) и (23) для реального периода обзора можно записать следующим образом:

при просмотре дальности по частям отрезками  $\Delta D$

$$T_{обз} = K_{обз} T_{обл} D_{макс} \Phi_{AZ} \Phi_{УМ} / \Delta D \theta_{AZ} \theta_{УМ}, \quad (24)$$

при просмотре всей дальности сразу

$$T_{обз} = K_{обз} T_{обл} \Phi_{AZ} \Phi_{УМ} / \theta_{AZ} \theta_{УМ}. \quad (25)$$

Значения величины  $K_{обз}$  для некоторых видов обзора приведены в таблице 2.

Таблица 2

Методы обзора	$\Phi_{аз,} / \Phi_{ум}$		
	0,5	1	2
Круговой	1	1	1
Секторный	1,5	1,3	1,2
Строчный	2,4 – 2,5	2,4 – 2,5	2 – 2,15
Винтовой	-	-	2
Поступательно-конический	-	-	2,4
Спиральный	-	1,75	-

При *круговом обзоре* плоским лучом период обзора и время облучения соответственно равны:

$$T_{обз} = 360^\circ / \Omega_a, \quad (26)$$

$$T_{обл} = \theta_{AZ} / \Omega_a, \quad (27)$$

где  $\Omega_a$  – угловая скорость вращения луча РЛС, град/с.

При использовании *секторного обзора*, если известно среднее значение угловой скорости  $\Omega_{ср}$  перемещения луча шириной  $\theta_{0,5}$  в требуемом направлении в пределах сектора  $\Phi$ , то

$$T_{обз} = \Phi / \Omega_{ср}, \quad (28)$$

$$T_{обл} = \theta_{0,5} / \Omega_{cp}. \quad (29)$$

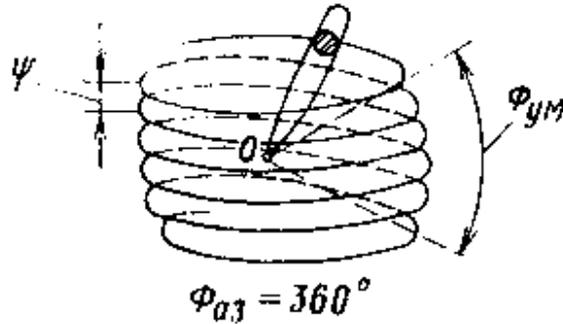


Рис. 3. Винтовой обзор  
иглообразным лучом

При *винтовом обзоре* иглообразным лучом (рис. 3)

$$T_{обз} = 360^\circ (\Phi_{UM} - \theta_{UM}) / \Omega_{гор} \Psi \approx 360^\circ \Phi_{UM} / \Omega_{гор} \Psi, \quad (30)$$

$$T_{обл} = \theta_{Az} / \Omega_{гор}, \quad (31)$$

где  $\Omega_{гор}$  – угловая скорость перемещения луча в горизонтальной плоскости;  $\Psi$  – шаг луча в вертикальной плоскости, т. е. изменение угла места оси луча при его повороте на  $360^\circ$  по азимуту;  $\Psi = (0,5 \dots 0,8)\theta_{UM}$ .

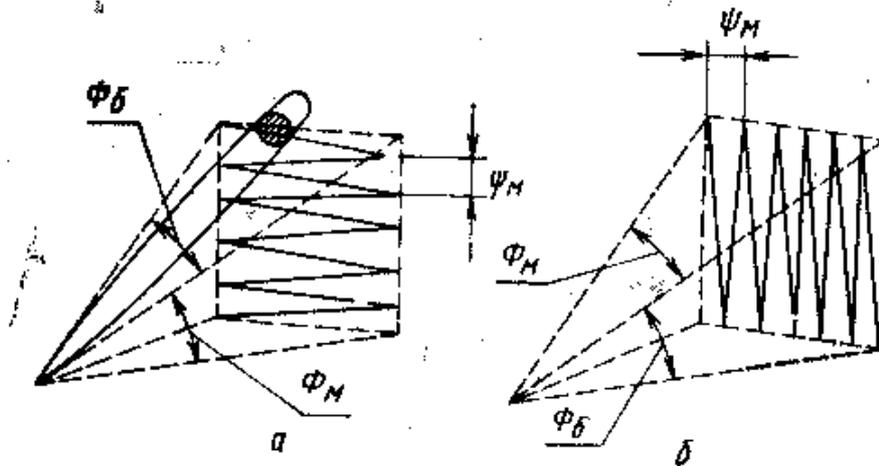


Рис. 4. Строчный обзор иглообразным лучом: а – плавное перемещение по горизонтали, б – плавное перемещение по вертикали

При *строчном обзоре* иглообразным лучом (рис. 4)

$$T_{обз} = (\Phi_M - \theta_M) \Phi_B / \Psi_M \Omega_{cp}, \quad (32)$$

$$T_{обл} = \theta_B / \Omega_{cp}, \quad (33)$$

где  $\Psi_M$  – шаг луча в направлении медленного перемещения;  $\Phi_B, \Phi_M$  – секторы обзора в направлении быстрого и медленного перемещения луча;  $\Omega_{cp}$  – среднее значение угловой скорости быстрого перемещения луча;  $\theta_B, \theta_M$  – ширина диаграммы направленности антенны (ДНА) в направлении быстрого и медленного перемещения.

При спиральном обзоре (рис. 5,а)

$$T_{обз} = T_{вр} (\Phi - 0,5\theta_{0,5}) / 2\Psi \approx T_{вр} \Phi / 2\Psi, \quad (34)$$

где  $T_{вр}$  – период вращения луча вокруг оси  $OO'$ , принимаемый постоянным,  $\Phi$  – половина сектора обзора,  $\theta_{0,5}$  – ширина симметричного иглообразного луча;  $\Psi = (0,5 \dots 0,8)\theta_{0,5}$  шаг луча.

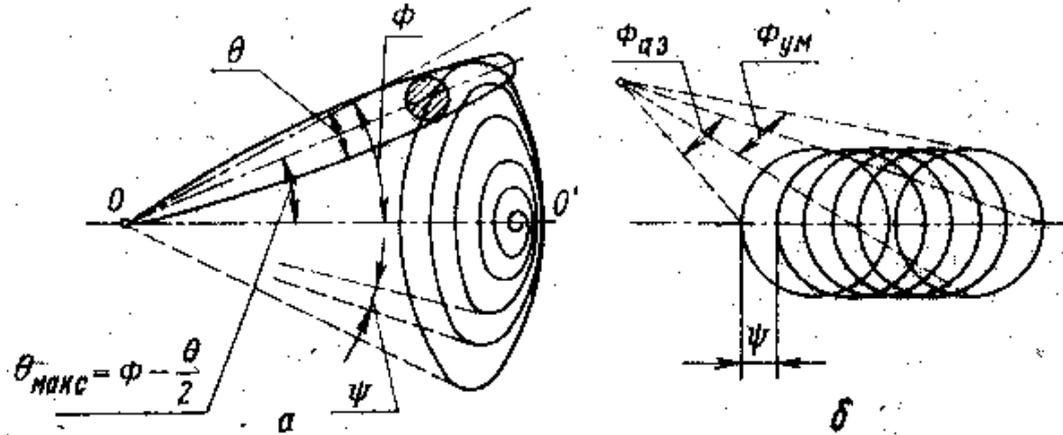


Рис. 5. Обзор иглообразным лучом: а – спиральный, б – поступательно-конический

Угловое перемещение  $\beta$  луча за один оборот вокруг оси  $OO'$  равно:

$$\beta = 360^\circ \sin \alpha, \quad (35)$$

где  $\alpha$  – угол отклонения оси луча от оси  $OO'$ .

Угловая скорость луча

$$\Omega = (360^\circ / T_{вр}) \sin \alpha. \quad (36)$$

Время облучения цели при  $\alpha \geq 0,5\theta_{0,5}$

$$T_{обл} = \theta_{0,5} T_{вр} / 360^\circ \sin \alpha. \quad (37)$$

При поступательно-коническом обзоре (рис. 5, б)

$$T_{обз} = T_{вр} (\Phi_{аз} - \theta_{0,5}) / \Psi \approx T_{вр} \Phi_{аз} / \Psi, \quad (38)$$

где  $T_{вр}$  – период конического вращения;  $\Phi_{аз}$  – сектор обзора по азимуту;  $\theta_{0,5}$  – ширина симметричного иглообразного луча;  $\Psi$  – шаг траектории в направлении поступательного движения, равный  $(0,5 \dots 0,8)\theta_{0,5}$ .

Угловая скорость луча и время облучения цели соответственно находятся по формулам:

$$\Omega = \frac{360^\circ}{T_{вр}} \sin \frac{\Phi_{ум} - \theta_{0,5}}{2}, \quad (39)$$

$$T_{обл} = \theta_{0,5} T_{вр} 360^\circ \sin 0,5(\Phi_{ум} - \theta_{0,5}), \quad (40)$$

где  $\Phi_{ум}$  – сектор обзора по углу места.

## Задачи

2.1. Определить скорость вращения антенны РЛС кругового обзора, если время обзора 6 с.

2.2. Определить время обзора РЛС с круговым методом обзора и количество импульсов, попадающих на цель за время прохода ее лучом, если скорость вращения антенны 15 об/мин, ширина ДНА в азимутальной плоскости  $3,5^\circ$ , частота повторения зондирующих импульсов 700 Гц.

2.3. Определить расстояние, которое пролетает самолет в направлении РЛС кругового обзора за время между двумя очередными отметками импульсов, полученных при облучении цели, если скорость вращения антенны 5 об/мин, а скорость самолета 1200 км/ч.

2.4. Определить частоту повторения зондирующих импульсов РЛС при строчном методе обзора, если ширина ДНА по азимуту равна  $3^\circ$ , а по углу места  $5^\circ$ . Сектор поиска ограничен углами обзора по азимуту  $60^\circ$ , по углу места  $40^\circ$ . На цель должно попасть не менее 20 импульсов за время обзора 5 с.

2.5. Определить количество импульсов, попадающих на цель за время прохода через нее луча в РЛС кругового обзора, если скорость вращения антенны 40 об/мин, ширина ДНА по азимуту  $4^\circ$ , частота повторения зондирующих импульсов 500 Гц.

2.6. В РЛС кругового обзора антенна вращается со скоростью 10 об/мин. Ширина ДНА в азимутальной плоскости  $2^\circ$ . Определить максимальное расстояние, на котором может находиться цель, чтобы за время одного оборота антенны на цель попало не менее 12 импульсов.

2.7. Найти время обзора пространства и минимальное количество импульсов, принятых приемником РЛС, если РЛС винтового обзора имеет следующие характеристики: ширина ДНА по азимуту и углу места  $4^\circ$ , частота повторения зондирующих импульсов 3 кГц, ширина сектора поиска по углу места  $60^\circ$ , а шаг луча в угломестной плоскости равен  $0,8\Theta_B$ . Необходимое время облучения цели 0,01 с.

2.8. Найти время обзора заданного сектора и максимальную дальность до цели РЛС со сканированием по азимуту и углу места, если ширина ДНА по азимуту  $3^\circ$ , по углу места  $4^\circ$ . Сектор поиска цели по азимуту составляет  $50^\circ$ , по углу места  $60^\circ$ . Частота сканирования антенны 0,5 Гц, частота повторения зондирующих импульсов 1 кГц, а количество импульсов, попадающих на цель должно быть не менее 20.

2.9. Определить частоту повторения зондирующих импульсов РЛС при круговом методе обзора, если ширина ДНА по азимуту составляет  $5^\circ$ . На цель должно попасть не менее 10 и не более 50 импульсов за время обзора пространства 1с.

2.10. В РЛС используется винтовой обзор пространства. Определить период обзора при условии, что сектор обзора по углу места равен  $45^\circ$ . Обзор ведется симметричным иглообразным лучом шириной ДНА  $5^\circ$ , частота

повторения зондирующих импульсов 5 кГц, максимальное число импульсов, отраженных от точечной цели равно 10. Определить минимальное число импульсов, принимаемое от цели, если шаг луча в вертикальной плоскости составляет  $0,7\Theta_{\beta}$  ширины ДНА.

2.11. В РЛС сопровождения с коническим сканированием используется луч круглого сечения шириной  $5^\circ$ . Ось вращения отклонена от оси луча на угол  $0,5 \Theta_{0,5}$ . Луч совершает 40 об/с. Определить время облучения цели в течение каждого оборота луча, если принять, что цель отклонена от оси вращения на угол  $0,5 \Theta_{0,5}$ .

2.12. В РЛС для обеспечения разрешения по дальности применяют временное стробирование приемника. Определить период обзора подобной станции, если длительность стробирующих импульсов равна 0,5 мкс, применен секторный обзор (сектор поиска по азимуту равен  $180^\circ$ , ширина ДНА по азимуту составляет  $2^\circ$ ). Время облучения точечной цели равно 0,02 с. Протяженность просматриваемой зоны по дальности 30 км.

2.13. Чему равен угол поворота антенны РЛС за время, равное времени задержки отраженного от цели сигнала. Цель находится на расстоянии 350 км от РЛС. Скорость вращения антенны РЛС составляет 6 об/мин.

2.14. Разрабатывается наземная РЛС для измерения высоты обнаруживаемых самолетов. В станции используется плоский горизонтальный луч (ширина ДНА в угломестной плоскости много меньше, чем ширина ДНА в азимутальной). Как лучше расположить строки обзора: вертикально или горизонтально?

2.15. Определить, достаточное ли количество импульсов будет попадать на цель за один оборот антенны, если ширина диаграммы направленности антенны равна  $3^\circ$ , скорость вращения антенны 28 об/мин, частота повторения зондирующих импульсов 1200 Гц. Цель обнаруживается при накоплении не менее 20 импульсов.

2.16. Какая из двух радиолокационных систем характеризуется меньшим временем обнаружения цели? Первая радиолокационная система имеет узкий иглообразный луч, сканирующий по азимуту на  $360^\circ$  и углу места (винтовой обзор). Вторая состоит из двух РЛС – кругового обзора и высотомера.

2.17. Размер отметки цели на экране индикатора РЛС  $l_{ц}$  соответствует одному километру. В каких пределах может измеряться период обзора  $T_{обз}$ , если требуется обеспечить плавное перемещение отметок по экрану индикатора при скоростях движения целей до 1200 км/ч. Предположить, что для обеспечения плавности перемещения отметка от цели не должна смещаться за период повторения более чем на  $l_{ц}$ .

2.18. Для надежного обнаружения цели на фоне помех оператор РЛС должен трижды увидеть ее отметку. Определить допустимые пределы изменения периода обзора  $T_{обз}$  РЛС обнаружения, если дальность действия станции составляет 100 км; сокращение дальности обнаружения целей,

вызванное трехкратным наблюдением их отметок, не должно превышать  $0,05D_{max}$ ; максимальная скорость целей достигает 3000 км/ч.

2.19. Определить, во сколько раз изменяется время облучения точечной цели при спиральном обзоре, если используется иглообразный луч шириной  $4^\circ$ , а угол отклонения оси луча от оси вращения меняется от  $3^\circ$  до  $35^\circ$ .

2.20. Для просмотра зоны, угловые размеры которой равны  $\Phi_{az}=360^\circ$  и  $\Phi_{ум}$ , можно использовать круговой обзор плоским лучом ( $\Theta_{az} \ll \Theta_{ум}$ ,  $\Theta_{ум} = \Phi_{ум}$ ) и винтовой обзор симметричным иглообразным лучом ( $\Theta_{az} = \Theta_{ум}$ ). Каковы основные характеристики, преимущества и недостатки обоих методов обзора, если произведение угловых размеров луча остается неизменным ( $\Theta_{az} \Theta_{ум} = const$ )?

2.21. При поиске цели по дальности в системе автоматического дальномера за время прохождения каждого временного строба дальномера мимо сигнала цели принимается 20 отраженных импульсов. Чему равно время поиска на интервале 20 км, если ширина стробов равна  $\Delta D = 200$  м, а частота повторения зондирующих импульсов РЛС равна 1400 Гц?

### 3. РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ

Измерение дальности радиолокационными методами базируется на предположении прямолинейного распространения радиоволн с постоянной скоростью. Следовательно, для измерения дальности до цели достаточно измерить время задержки отраженного от цели сигнала относительно излученного радиолокационного сигнала.

Методы измерения дальности подразделяются на *амплитудные*, *частотные* и *фазовые* в зависимости от того, какой из параметров принимаемых радиосигналов используется при измерении времени задержки.



Рис. 6. Функциональная схема импульсного радиолокационного дальномера

Среди РЛС с амплитудным методом измерения дальности наибольшее распространение получили *импульсные станции*. Принцип их действия иллюстрируется схемой на рис. 6. Генератор высокой частоты, управляемый

импульсным модулятором, генерирует короткие высокочастотные импульсы (зондирующие сигналы) с заданным периодом повторения.

Зондирующий сигнал может быть записан следующим образом:

$$u_{\text{ген}}(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \psi_0) \quad \text{при } t_0 \leq t \leq t_0 + \tau_u,$$

где  $t_0$  – начало отсчета на временной оси, совпадающее с началом импульса;  $\tau_u$  – длительность импульса;  $U_0$  – амплитуда колебаний;  $\psi_0$  – начальная фаза колебаний.

На время излучения каждого импульса антенна подсоединяется к генератору с помощью антенного переключателя; все остальное время антенна подключена к приемнику. Отраженные от цели сигналы после преобразования в приемнике поступают к выходному устройству, где путем сопоставления моментов излучения зондирующего импульса и приема отраженного измеряется время запаздывания  $t_D$ . Синхронность процессов в передатчике РЛС и измерительном устройстве обеспечивает синхронизатор.

В качестве выходного устройства в импульсной РЛС может быть использована электронно-лучевая трубка с амплитудной или яркостной отметкой. Развертка луча по экрану трубки, как правило, осуществляется с постоянной скоростью. Работа схемы развертки синхронизирована с работой передатчика РЛС (рис. 7, а). Если на экране трубки расстояние между изображениями излученного и отраженного импульсов равно  $l$  (рис. 7, б), скорость развертки  $v_{\text{разв}}$ , то

$$t_D = l/v_{\text{разв}}. \quad (41)$$

В качестве выходного устройства импульсного дальномера может быть использовано и автоматическое счетное устройство.

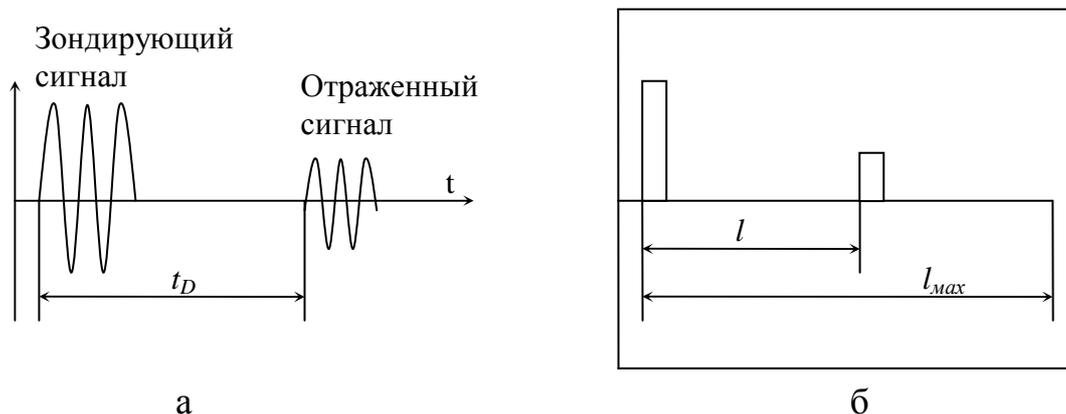


Рис. 7. К импульсному методу измерения дальности: а – эпюры напряжения, б – изображение на экране индикатора

Для импульсных дальномеров диапазон однозначного измерения дальности определяется периодом следования  $T_n$  излучаемых импульсов

$$\Delta D_{\text{одн}} \leq cT_n/2. \quad (42)$$

При частотном методе определения дальности РЛС излучает непрерывные колебания с частотной модуляцией. Время распространения определяется путем измерения разности частот излучаемых колебаний и отраженного сигнала. Схема частотной дальномерной РЛС приведена на рис. 8.

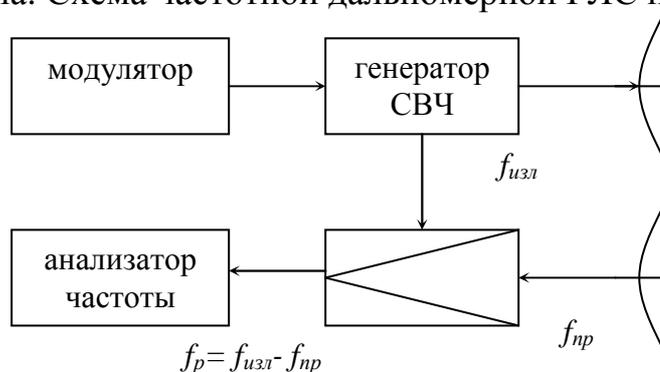


Рис. 8. Функциональная схема частотного дальномера

Передачик формирует частотно-модулированные колебания. На рис.9, а сплошной линией показано изменение частоты излучаемых колебаний по симметричному пилообразному закону. На временных интервалах

$$t_0 + nT_m \leq t \leq t_0 + (2n+1)T_m/2,$$

$$u_{ген}(t) = U_0 \cos [2\pi (f_{мин} t + t^2 \Delta f_M / T_m) + \psi_0],$$

и на интервалах

$$t_0 + (2n + 1) T_m/2 \leq t \leq t_0 + (n + 1) T_m,$$

$$u_{ген}(t) = U_0 \cos [2\pi (f_{макс} t - t^2 \Delta f_M / T_m) + \psi_0],$$

где  $U_0$  — амплитуда колебаний;  $\Delta f_M = f_{макс} - f_{мин}$  — максимальное изменение (девиация) частоты;  $T_m$  — период модуляции;  $n = 0, 1, 2, 3 \dots$

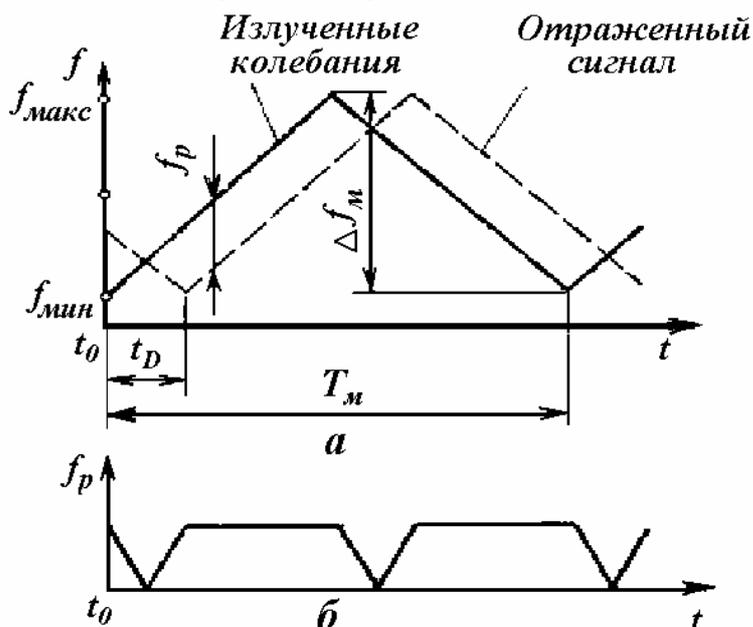


Рис. 9. К частотному измерению дальности:

$a$  — изменение во времени частоты излучаемых и принимаемых колебаний;

$б$  — разностная частота

Изменение частоты отраженного сигнала характеризуется тем же законом, но смещенным по оси времени на  $t_D$  (пунктирная линия на рис.9, а). Принятые и излучаемые колебания подаются в смеситель, на выходе которого образуется разностная частота  $f_p$ . График, характеризующий изменение  $f_p$  во времени, приведен на рис.9, б. Колебания с разностной частотой подводятся к анализатору частоты. Если время запаздывания  $t_D$  много меньше периода модуляции  $T_m$ , а разностная частота много больше частоты модуляции ( $f_p \gg F_m$ ), то с достаточной точностью справедлива формула

$$f_p = 2 \Delta f_m t_D / T_m. \quad (43)$$

Для дальности до цели соответственно получим

$$D = c T_m f_p / 4 \Delta f_m. \quad (44)$$

Интервал однозначного измерения дальности равен

$$\Delta D_{одн} = c T_m / 4. \quad (45)$$

К достоинствам частотных дальномеров с непрерывным излучением следует отнести простоту измерения очень малых расстояний и применение передатчиков относительно малой мощности. Основные недостатки рассмотренных РЛС свойственны всем станциям с непрерывным излучением: использование двух антенн, ухудшение чувствительности приема вследствие попадания в приемный тракт излучения передатчика. Специфическим недостатком является требование весьма высокой линейности изменения частоты для одновременного наблюдения за несколькими целями.

При наличии только одной цели (например, в радиовысотомерах) может быть применена *синусоидальная частотная модуляция*

$$u_{гет}(t) = U_0 \cos(f_{изл}t + \psi_0) = U_0 \cos[2\pi f_0 t + (\Delta f_m / 2F_m) \sin 2\pi F_m t + \psi_0],$$

где  $F_m = 1/T_m$  – частота модуляции;  $T_m$  – период модуляции. В этом случае разностная частота изменяется по синусоидальному закону. Среднее значение модуля разностной частоты  $|f_p|_{cp}$  однозначно связано с дальностью до цели:

$$D = c T_m |f_p|_{cp} / 4 \Delta f_m. \quad (46)$$

*Фазовые методы определения дальности* основаны на измерении разности фаз излучаемых волн и принимаемых отраженных сигналов. Схема простейшего фазового дальномера изображена на рис.10.



Рис. 10. Функциональная схема фазового дальномера

Излучаются немодулированные незатухающие колебания

$$u_{\text{зен}}(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \psi_0) \quad \text{при } 0 \leq t < \infty.$$

В фазовом детекторе осуществляется сравнение фаз принятого сигнала и излучаемых колебаний. С учетом фазового сдвига  $\psi_{\text{отр}}$  волны при отражении от цели и сдвига фаз  $\psi_0$ , образующегося при прохождении сигналов по тракту РЛС, результирующая разность фаз указанных колебаний будет равна

$$\Delta\psi = 4\pi D/\lambda + \psi_{\text{отр}} + \psi_0, \quad (47)$$

где  $\lambda$  – длина волны зондирующего сигнала. Отсюда видно, что разность фаз  $\Delta\psi$  зависит от дальности до цели.

Этот простейший метод имеет существенный недостаток – очень мал диапазон однозначного измерения дальности:

$$\Delta D_{\text{одн}} = \lambda/4 \quad (48)$$

при условии, что диапазон однозначного измерения фазы равен  $\pi$ .

Диапазон однозначного измерения дальности фазовым методом можно резко увеличить, если применять амплитудную модуляцию излучаемых колебаний низкой частотой  $F = c/\Lambda$ ; здесь  $\Lambda$  – длина волны низкочастотных колебаний. В этом случае

$$u_{\text{зен}}(t) = U_0(1 + m \cos 2\pi Ft) \cos(\omega_0 t + \psi_0).$$

Сравнение фаз излученных и принятых колебаний производится на частоте модуляции  $F$ . Изменением фазы при отражении от цели на частоте  $F$  можно пренебречь. Тогда

$$\Delta\psi = 4\pi D/\Lambda = 4\pi F D/c, \quad (49)$$

$$D = (c/4\pi F) \Delta\psi. \quad (50)$$

Диапазон однозначного определения дальности определяется не высокой, а низкой частотой, следовательно,

$$\Delta D_{\text{одн}} = \Lambda/4. \quad (51)$$

Более перспективными следует считать *двухчастотные фазовые дальномеры*. В подобных РЛС (рис. 11), создаются незатухающие колебания на двух близких частотах  $f_1$  и  $f_2$ , которые излучаются в пространство. Принятые сигналы усиливаются каждый в своем тракте и поступают к первому смесителю. На выходе этого смесителя формируется напряжение разностной частоты  $u_c(f_1 - f_2)$ . Аналогично формируется опорное напряжение разностной частоты  $u_{\text{он}}(f_1 - f_2)$ . Напряжения  $u_c(t)$  и  $u_{\text{он}}(t)$  подводятся к фазовому детектору, где сравниваются их фазы. Выходное напряжение  $U_{\text{фд}}$  фазового детектора позволяет определить дальность до цели. Допуская, что фазовые сдвиги при отражении одинаковы вследствие малой разности частот, определяется дальность до цели

$$D = c\Delta\psi_p / 4\pi (f_1 - f_2), \quad (52)$$

где  $\Delta\psi_p$  — разность фаз опорного напряжения и сигнала на разностной частоте, измеряемая фазовым детектором.

Диапазон однозначного измерения дальности равен

$$\Delta D_{\text{одн}} = c / 4(f_1 - f_2). \quad (53)$$

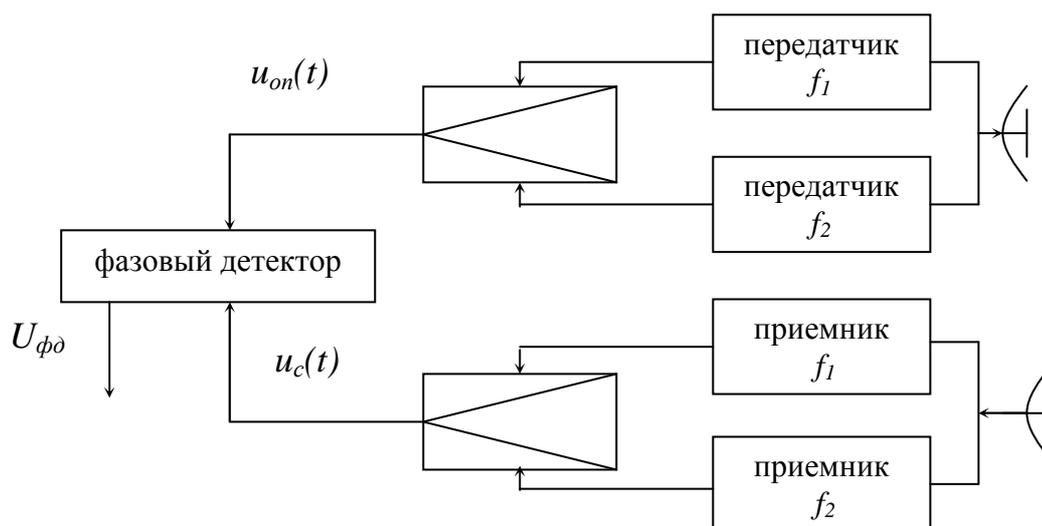


Рис. 11. Функциональная схема двухчастотного фазового дальномера

Общими достоинствами фазовых дальномеров всех типов является относительная простота собственно измерительного устройства и высокая точность измерения. Применительно к двухчастотному методу и методу с амплитудной модуляцией достоинством является большой диапазон однозначного измерения дальности. Фазовым дальномерам свойственны все недостатки, присущие устройствам с непрерывным излучением. Специфическим недостатком фазовых дальномеров является невозможность измерений при одновременном облучении двух и большего числа целей.

### Задачи

3.1. Каким дальностям до целей соответствует время задержки отраженных сигналов 2 мкс, 5 мс, 1 с, 3 мин?

3.2. Определить время задержки отраженного импульса и максимальную частоту повторения зондирующих импульсов при определении дальности до Луны (среднее расстояние до Луны равно 385 000 км).

3.3. Частота повторения зондирующих импульсов РЛС равна 1000 Гц. Показать, как расположатся на линии развертки отметки отраженных от целей импульсов, если момент излучения совпадает с началом развертки, длительность прямого хода развертки 700 мкс, а цели находятся на расстоянии соответственно 50 км, 75 км, 90 км и 125 км.

3.4. Максимальная дальность действия самолетной РЛС составляет 70 км. Определить частоту повторения зондирующих импульсов, если известно, что промежуток времени между концом развертки и началом следующей равен 533,4 мкс.

3.5. Передатчик радиолокационной системы формирует радиоимпульсы длительностью 2 мкс. Максимальная дальность обнаружения РЛС составляет 150 км. Определить суммарное время излучения передатчика РЛС за 8 часов ее работы.

3.6. Длина линии развертки индикатора радиолокационной станции составляет 125 мм. Максимальная дальность действия РЛС 150 км. Определить дальность до цели, если отраженный импульс находится на расстоянии 50 мм от начала линии развертки, а луч перемещается линейно.

3.7. Длительность импульса самолетной радиолокационной системы 2 мкс. Определить, какой участок линии развертки занимает импульс на экране электронно-лучевой трубки, если линия развертки длиной 100 мм соответствует дальности 10 км.

3.8. Максимальная дальность действия радиолокационной станции равна 200 км. Какова скорость движения луча по экрану электронно-лучевой трубки, если длина линии развертки 50 мм?

3.9. В радиолокационной станции используется импульсный метод определения дальности. Определить расстояние до цели, если отметка на экране индикатора дальности находится на расстоянии 40 мм от начала линии развертки, период развертки равен 2000 мкс, развертка прямолинейная и равномерная, рабочий диаметр экрана электронно-лучевой трубки индикатора 100 мм.

3.10. Период повторения зондирующих импульсов РЛС в несколько раз меньше максимального времени задержки отраженных сигналов. Чему равно время задержки отраженных сигналов, измеряемое подобной РЛС? Поясните графически.

3.11. На какой дальности будет находиться отметка от цели на индикаторе кругового обзора, если частота повторения зондирующих импульсов равна 12 кГц, а истинная дальность до цели 18 км?

3.12. Определить абсолютную и относительную ошибки измерения дальности до цели цифровым дальномером (см. рис.12), если цель находится на максимальной дальности обнаружения 120 км. Тактовая частота  $F_{\text{такт}}$ , используемая в дальномере, равна 20 МГц. Объяснить принцип работы цифрового дальномера. Какова должна быть разрядность счетчика дальномера?

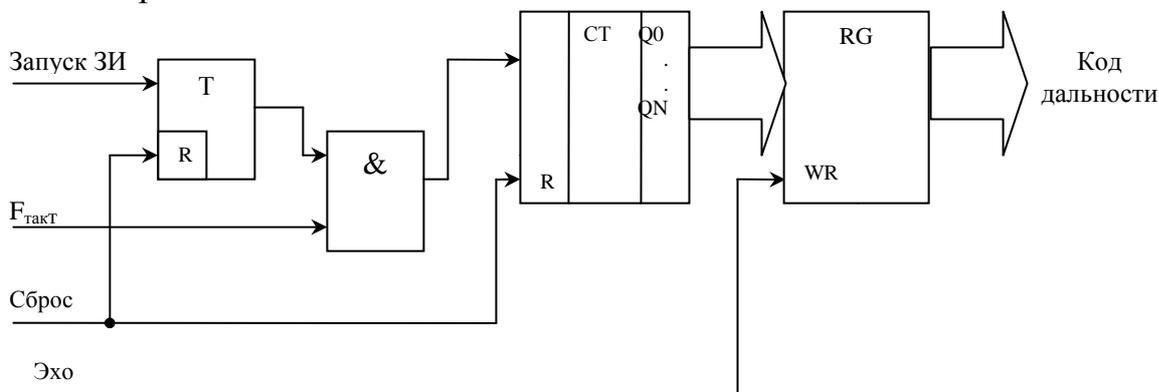


Рис. 12. Функциональная схема цифрового дальномера

3.13. На экране индикатора дальности имеются отметки двух целей. Время запаздывания сигналов одной из них превышает период повторения зондирующих импульсов РЛС, и ее дальность отображается неправильно.

Изменение частоты повторения зондирующих импульсов в небольших пределах позволяет определить, какая из отметок занимает ложное положение на индикаторе дальности, а какая – правильное. Объясните этот эффект.

3.14. В РЛС используется частотный метод определения дальности. Определить дальность до цели, если разностная частота прямого и отраженного сигнала 7200 Гц, девиация частоты 10 МГц, а частота модуляции 120 Гц.

3.15. Радиовысотомер малых высот имеет два диапазона: 0 – 120 м и 0 – 1200 м. Девиация частоты для первого диапазона равна 40 МГц. Определить девиацию частоты для второго диапазона, если период модуляции не изменяется, а разностные частоты прямого и отраженного сигналов одинаковы для обоих диапазонов.

3.16. В радиовысотомере малых высот используется частотная модуляция. При этом частота сигнала равна 60 МГц, частота модуляции равна 150 Гц. Определить разностную частоту на высоте 100 м. Какой должна быть частота модуляции, чтобы на высоте 1000 м разностная частота осталась бы такой же, как на высоте 100 м?

3.17. Для полета в горной местности на самолете установлена РЛС с частотной модуляцией. Станция служит для предупреждения столкновений с препятствиями. Определить ошибку в показаниях РЛС по дальности, обусловленную эффектом Допплера, если радиальная скорость самолета 1260 км/ч, девиация частоты 2 МГц, период модуляции 0,01 с, средняя несущая частота 444 МГц.

3.18. Два радиовысотомера характеризуются равными частотами модуляции 8 кГц и девиацией частоты 7 МГц, но разными законами модуляции: первый – пилообразный симметричный, второй – пилообразный несимметричный. Определить однозначно измеряемую высоту первого и второго радиовысотомеров и значения максимальной разностной частоты при положении самолета на максимальной высоте.

3.19. При использовании двухчастотного фазового дальномера разность фаз колебаний, подводимых к фазовому детектору, составляет  $36^\circ$ , дальность до цели равна 40 км. Определить разность частот дальномера.

3.20. Определить применительно к условиям предыдущей задачи максимально возможные значения несущих частот дальномера, если относительная стабильность генераторов несущих частот равна  $10^{-7}$ , а допустимые ошибки измерения дальности не должны превышать 3%.

3.21. Можно ли использовать двухчастотный фазовый дальномер при наличии нескольких целей?

3.22. Определить наивысшую частоту синусоидальной модуляции незатухающих колебаний фазового дальномера, если максимальная дальность до цели равна 150 км.

#### 4. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ РЛС ПО ДАЛЬНОСТИ, НАПРАВЛЕНИЮ И СКОРОСТИ

*Разрешающая способность* – одна из важнейших характеристик радиолокационных систем, определяющая способность отдельного наблюдения целей, имеющих малое различие в дальности, угловых координатах и скорости.

*Реальная разрешающая способность* РЛС по какой-либо координате может быть представлена в виде

$$\delta(\alpha) \approx \delta(\alpha)_{nom} + \sum_{i=1}^n \delta(\alpha)_i, \quad (54)$$

где  $\delta(\alpha)_{nom}$  – потенциальная разрешающая способность, определяемая формой сигнала и отношением энергии сигналов и шума;  $\delta(\alpha)_i$  – ухудшение разрешающей способности в  $i$ -м узле устройства обработки сигнала;  $n$  – количество узлов устройства обработки сигнала.

Обычно наибольшие ухудшения вносит выходное устройство, поэтому можно принять

$$\delta(\alpha) \approx \delta(\alpha)_{nom} + \delta(\alpha)_{vy}. \quad (55)$$

При использовании в выходных устройствах электронно-лучевых трубок наибольшее ухудшение разрешающей способности вносится за счет конечных размеров пятна на экране (мишени).

При автоматическом съеме координат в устройстве, сопрягающем РЛС с цифровой вычислительной машиной, реальная разрешающая способность определяется ценой интервала эталонных (счетных) импульсов.

*Разрешающая способность по дальности* – минимальное расстояние между двумя целями, имеющими относительно РЛС одинаковые угловые координаты, при котором еще возможно отдельное наблюдение этих целей.

Разрешающая способность по дальности складывается из двух составляющих: а)  $\delta(D)_{nom}$  – потенциальная, т. е. максимально достижимая для данной РЛС разрешающая способность; б)  $\delta(D)_{ind}$  – индикаторная разрешающая способность, обусловленная характеристикой индикатора.

Потенциальная разрешающая способность по дальности  $\delta(D)_{nom}$  определяется длительностью зондирующего сигнала и его формой.

Величина потенциальной разрешающей способности по дальности для прямоугольного сигнала определяется формулой

$$\delta(D)_{nom} = c \tau_u / 2. \quad (56)$$

Величина потенциальной разрешающей способности по дальности для гауссовского сигнала определяется формулой

$$\delta(D)_{nom} = 0,66 \cdot c \cdot \tau_u. \quad (57)$$

Величина потенциальной разрешающей способности по дальности для сигнала в виде импульса гауссовой формы с внутриимпульсной линейной частотной модуляцией равна

$$\delta(D)_{\text{пот}} = 0,66c\tau_u / k_{\text{сж}} = 0,66c / \Delta f_M, \quad (58)$$

где  $\Delta\omega_M = 2\pi\Delta f_M$  – девиация частоты,  $k_{\text{сж}} = \sqrt{1 + (\Delta f_M \cdot \tau_u)} \approx \Delta f_M \cdot \tau_u$  – коэффициент сжатия по длительности.

Индикаторная разрешающая способность по дальности  $\delta(D)_{\text{инд}}$  зависит от размера электронного пятна на индикаторе. Чем меньше размер электронного пятна, тем лучше разрешающая способность. Для индикатора кругового обзора индикаторная разрешающая способность определяется следующим образом:

$$\delta(D)_{\text{инд}} = k \cdot d_{\text{п}}, \quad (59)$$

где  $k = 2D_{\text{max}}/d_{\text{экp}}$ ;  $d_{\text{п}}$  – диаметр рисуемого пятна;  $d_{\text{экp}}$  – диаметр экрана;  $D_{\text{max}}$  – максимальная дальность действия РЛС.

Диаметр рисуемого пятна в свою очередь может быть найден как  $d_{\text{п}} = d_{\text{экp}}/Q$ , где  $Q$  – качество фокусировки электронно-лучевой трубки.

Таким образом, реальная разрешающая способность по дальности определяется следующим образом:

$$\delta(D)_{\text{реал}} = \delta(D)_{\text{пот}} + \delta(D)_{\text{инд}}. \quad (60)$$

*Разрешающая способность по угловым координатам* (азимуту и углу места) – это минимальный угол между двумя целями, находящимися на одной дальности относительно РЛС, при которой еще возможно их раздельное наблюдение.

Аналогично разрешающей способности по дальности, разрешающая способность по угловым координатам складывается из двух составляющих: а)  $\delta(\alpha)_{\text{пот}}$ ,  $\delta(\beta)_{\text{пот}}$  – потенциальной разрешающей способности по азимуту и углу места соответственно и б)  $\delta(\alpha)_{\text{инд}}$ ,  $\delta(\beta)_{\text{инд}}$  – индикаторной разрешающей способности по азимуту и углу места соответственно.

Потенциальная разрешающая способность по угловым координатам для обзорной РЛС при аппроксимации диаграммы направленности гауссовой кривой равна

$$\delta(\alpha)_{\text{пот}} = 1,3\Theta_{0,5}, \quad (61)$$

а при прямоугольной аппроксимации

$$\delta(\alpha)_{\text{пот}} = \Theta_{0,5}, \quad (62)$$

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

Индикаторная разрешающая способность по угловым координатам  $\delta(\alpha)_{\text{инд}}$ ,  $\delta(\beta)_{\text{инд}}$  зависит от дальности цели от начала развертки.

$$\delta(\alpha)_{инд} = 0,573 \frac{D_{шк}}{D_{ц} - D_3}, [\text{град}] \quad (63)$$

где  $D_{шк}$  – отображаемая дальность шкалы индикатора;  $D_{ц}$  – дальность до цели;  $D_3$  – расстояние, соответствующее задержке начала развертки индикатора по дальности. Для уменьшения индикаторной составляющей разрешающей способности может применяться так называемый *открытый центр* развертки индикатора ( $D_3 < 0$ ). В некоторых случаях, например, при нахождении цели на значительной дальности, используется *закрытый центр* развертки ( $D_3 > 0$ ), ухудшающий разрешающую способность (см. рис. 13).

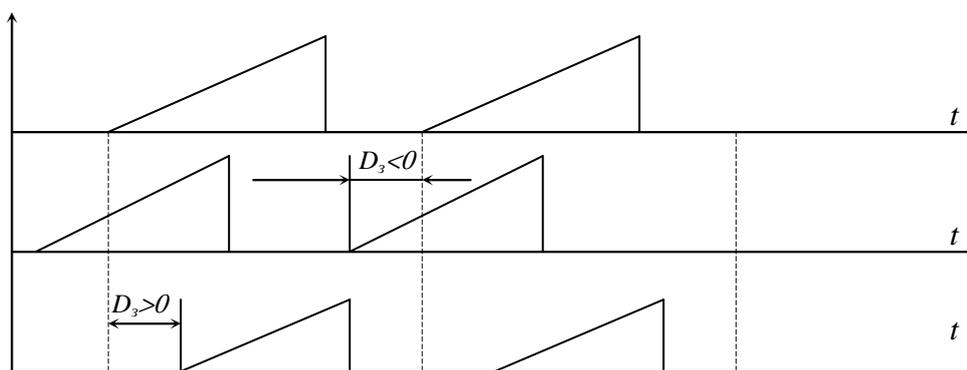


Рис. 13. Формирование открытого и закрытого центров развертки

Таким образом, реальная разрешающая способность по угловым координатам определяется следующим образом:

$$\delta(\alpha)_{реал} = \delta(\alpha)_{пот} + \delta(\alpha)_{инд} . \quad (64)$$

*Разрешающая способность по скорости* – минимальное различие в скоростях двух целей, находящихся на одной дальности и угловых координатах относительно РЛС, при котором еще возможно раздельное наблюдение этих целей.

Разрешающая способность по скорости зависит от ширины спектра сигнала. Чем уже спектр зондирующего сигнала, тем выше разрешающая способность по скорости. В свою очередь ширина спектра сигнала зависит от его длительности.

Если для измерения скорости используется одиночный импульсный сигнал, то потенциальная разрешающая способность по скорости определяется следующим образом:

для сигнала прямоугольной формы

$$\delta(v_p)_{ном} = 0,6 \cdot \lambda / \tau_u , \quad (65)$$

для сигнала в виде импульса гауссовой формы

$$\delta(v_p)_{ном} = 0,66 \cdot \lambda / \tau_u . \quad (66)$$

Для сигнала в виде пачки из  $N_C$  когерентных импульсов разрешающая способность по дальности определяется по формулам для одиночного импульса, а разрешающая способность по скорости

$$\delta(v_p)_{\text{пот}} = 0,5 \cdot \lambda / N_C T_n, \quad (67)$$

где  $N_C$  – количество импульсов в пачке,  $T_n$  – период повторения зондирующих импульсов.

Потенциальную разрешающую способность ухудшают выходные устройства, в качестве которых часто используется либо линейка фильтров Доплера, либо следящий фильтр. В обоих случаях разрешающая способность  $\delta(v_p)_{\text{оф}}$ , определяемая выходным устройством, определяется шириной полосы пропускания фильтров.

Таким образом, реальная разрешающая способность по скорости определяется следующим образом:

$$\delta(v_p)_{\text{реал}} = \delta(v_p)_{\text{пот}} + \delta(v_p)_{\text{оф}}. \quad (68)$$

### Задачи

4.1. Необходимо обеспечить потенциальную разрешающую способность РЛС по дальности не хуже 60 м. Какова должна быть длительность немодулированного зондирующего импульса с прямоугольной и гауссовой огибающей?

4.2. РЛС излучает зондирующие импульсы длительностью 3 мкс. Для обнаружения целей используется индикатор кругового обзора с рабочим диаметром экрана 150 мм. Диаметр электронного пятна на ИКО составляет 0,4 мм. Можно ли раздельно наблюдать отметки от двух целей, летящих одна за другой в направлении РЛС на расстоянии 600 м друг от друга, если наблюдение ведется на шкалах 15 км и 150 км?

4.3. РЛС с индикатором кругового обзора имеет следующие характеристики: длительность зондирующих импульсов 1 мкс, диаметр пятна на ИКО 0,5 мм, диаметр экрана ИКО 200 мм. Определить пределы шкалы дальности для обеспечения разрешения целей, летящих в направлении РЛС на расстоянии 400 м.

4.4. Определить разрешающую способность РЛС по дальности, если известно, что передатчик генерирует радиоимпульсы прямоугольной формы, средняя мощность, потребляемая передатчиком от источника питания, составляет 100 Вт. Мощность радиоимпульса 1000 кВт, средний КПД при преобразовании энергии источника питания в энергию высокочастотных колебаний 0,52. В РЛС применен индикатор кругового обзора с диаметром экрана 300 мм, диаметром электронного пятна 0,5 мм. Максимальная дальность обнаружения целей составляет 400 км.

4.5. Проектируемая радиолокационная станция должна иметь минимальную дальность действия 160 м и разрешающую способность по дальности не хуже 140 м. Определить необходимую длительность импульса,

если время восстановления разрядника, применяемого в качестве антенного переключателя, равно 0,2 мкс.

4.6. Определить возможно наиболее высокую разрешающую способность РЛС по дальности, если длительность прямоугольных импульсов составляет 2 мкс, диаметр экрана индикатора кругового обзора 300 мм, диаметр электронного пятна 0,5 мм. В станции применяется ИКО со шкалами 30, 150 и 300 км.

4.7. Определить разрешающую способность радиолокационной станции по дальности, если уровень средней мощности передатчика по отношению к одному мВт составляет 50 дБ, мощность в импульсе 80 кВт, частота повторения зондирующих импульсов 1200 Гц.

4.8. Требуется обеспечить потенциальную разрешающую способность по дальности не хуже 5 м, причем с точки зрения нужной дальности обнаружения длительность сигналов должна быть не менее 10 мкс. Удовлетворяются ли одновременно этим требованиям при применении немодулированных импульсов? Если нет, то сигнал какого вида следует выбрать для удовлетворения этих требований?

4.9. Будут ли две цели наблюдаться на индикаторе кругового обзора раздельно, если они находятся под углом  $4,5^\circ$  по азимуту относительно друг друга на дальности 50 км. Ширина ДНА РЛС составляет  $3^\circ$ . Дальность, определяемая на индикаторе кругового обзора, составляет 200 км. Какую задержку запуска развертки по дальности необходимо ввести, чтобы обеспечивалось разрешение цели по азимуту.

4.10. На поверхности реки для имитации наличия моста расположили уголкового отражатели с расстоянием между ними 500 м. Разведывательный самолет пролетел сначала под углом  $30^\circ$  по азимуту по отношению к реке, затем поперек нее. Будет ли введен в заблуждение оператор РЛС самолета, если РЛС излучает зондирующие импульсы длительностью 2 мкс? Характеристики ИКО: диаметр экрана индикатора кругового обзора 120 мм, диаметр электронного пятна 0,3 мм. В станции применяется ИКО со шкалой 100 км.

4.11. С помощью когерентно-импульсной радиолокационной станции, работающей на частоте 300 МГц, ведется наблюдение за самолетом, летящим в облаке дипольных отражателей с радиальной скоростью 1100 км/ч. Определить разницу в доплеровских частотах отраженных сигналов, если отражатели сносятся ветром от станции со скоростью 50 км/ч.

4.12. В устройстве инструментального съема данных РЛС кругового обзора используются эталонные импульсы для счета азимута цели с периодом повторения 0,1 с. Какова реальная разрешающая способность РЛС по азимуту, если время обзора равно 10 с, а ширина диаграммы направленности  $2^\circ$ ?

4.13. Автоматический измеритель азимута цели (см. рис. 14) использует опорную частоту 100 Гц и критерий наличия пачки «3 из 3». Определить

составляющую ошибки измерения азимута цели, вызванную применением критерия «3 из 3», если время обзора равно 5 с. Определить разрядность счетчика измерителя азимута.

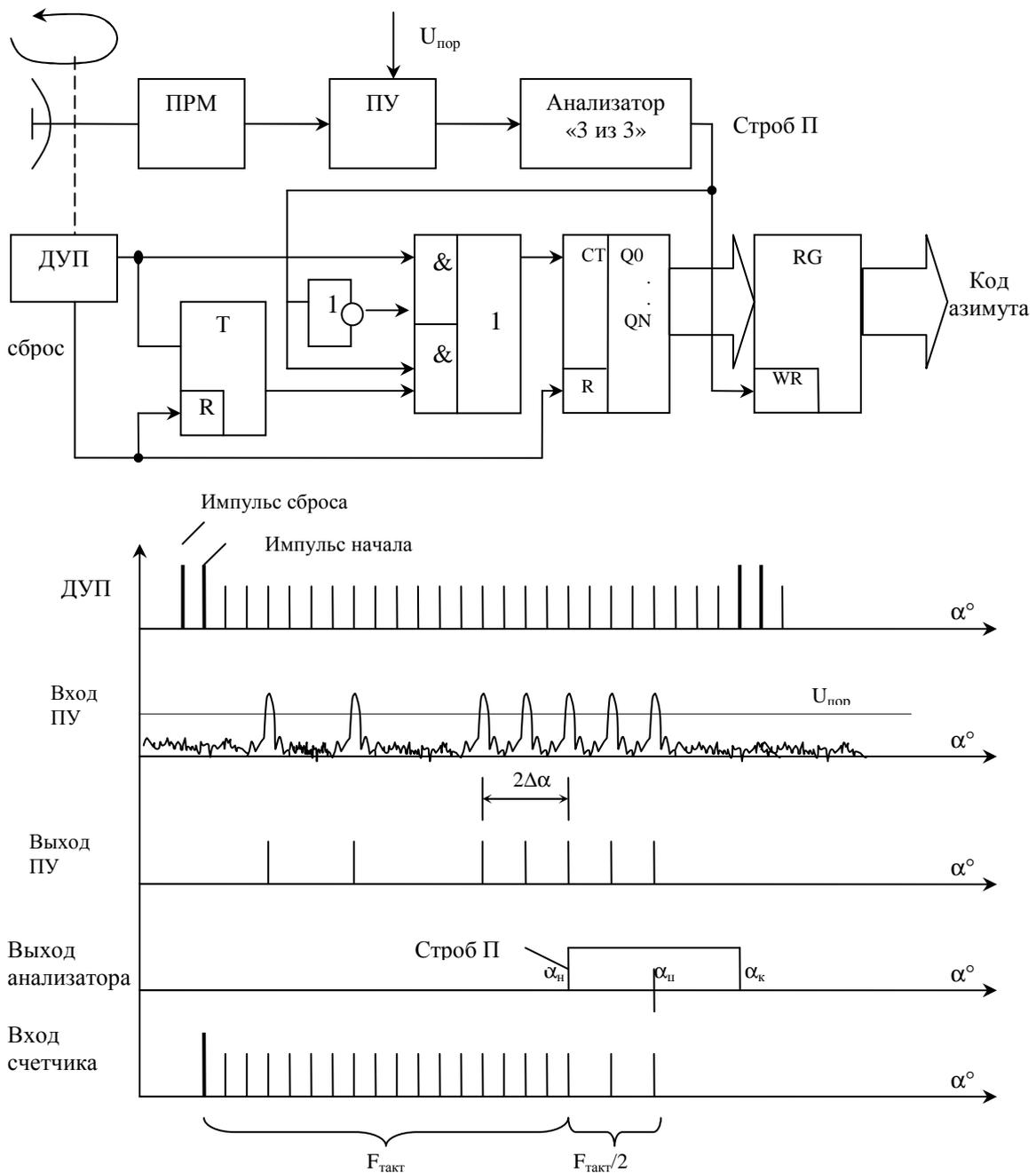


Рис. 14. Функциональная схема автоматического измерителя азимута и временные диаграммы, поясняющие его работу

4.14. Требуется осуществить совместное потенциальное разрешение по дальности 15 м и по скорости 10 м/с. Необходимо выбрать вид сигнала. РЛС работает на длине волны 10 см и имеет частоту повторения зондирующих импульсов 400 Гц.

## 5. СИСТЕМЫ СЕЛЕКЦИИ ДВИЖУЩИХСЯ ЦЕЛЕЙ. ИЗМЕРЕНИЕ РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ЦЕЛИ ИМПУЛЬСНЫМИ РЛС

При обнаружении целей и измерении их координат и параметров движения на фоне местных предметов, гидрометеоров, подстилающей поверхности и умышленных пассивных помех возникает необходимость режекции (фильтрования) мешающих отражений от сигналов движущихся целей. Селекция движущихся целей и измерение радиальной скорости движения цели основаны на использовании эффекта Доплера, заключающегося в том, что частоты излучаемых и принимаемых колебаний различны.

Если приемник перемещается относительно источника излучения, то частоты излучаемых  $f_0$  и принимаемых  $f_{np}$  колебаний при условии  $v \ll c$  связаны соотношением

$$f_{np} \approx f_0 (1 - v_p/c), \quad (69)$$

где  $v$  – модуль скорости движения цели;  $c$  – скорость света.

Величина

$$f_0 v_p/c = v_p/\lambda = F_\Delta \quad (70)$$

представляет собой доплеровское смещение частоты сигнала, а радиальная составляющая скорости цели выражается равенством

$$v_p = \lambda F_\Delta. \quad (71)$$

В радиолокации, где чаще всего используются отраженные от цели сигналы, значение доплеровского смещения приближенно удваивается. Допустив, что передатчик и приемник расположены в одной точке, а цель движется со скоростью  $v$ , получим, что частота принимаемых сигналов при  $v_p \ll c$  равна

$$f_{np} \approx f_0 (1 - 2v_p/c), \quad (72)$$

откуда доплеровское смещение частоты равно

$$F_\Delta = 2f_0 v_p/c = 2v_p/\lambda, \quad (73)$$

а радиальная скорость

$$v_p = 0,5F_\Delta\lambda. \quad (74)$$

На практике сравнение частоты принятых колебаний с частотой опорного генератора производится с помощью фазового детектора, на один вход которого поступает отраженный сигнал с приемника, а на другой вход – опорное напряжение.

На выходе фазового детектора формируются видеоимпульсы, амплитуда которых зависит от разности фаз  $\Delta\psi$  между напряжением сигнала и опорным напряжением. Если цель неподвижна, то этот фазовый сдвиг постоянен и постоянна амплитуда  $U$  импульсов напряжения на выходе фазового детектора (рис.15, а). При движении цели относительно РЛС огибающая видеоимпульсов на выходе фазового детектора оказывается промодулированной некоторой частотой  $F_m$  (рис.15, б).

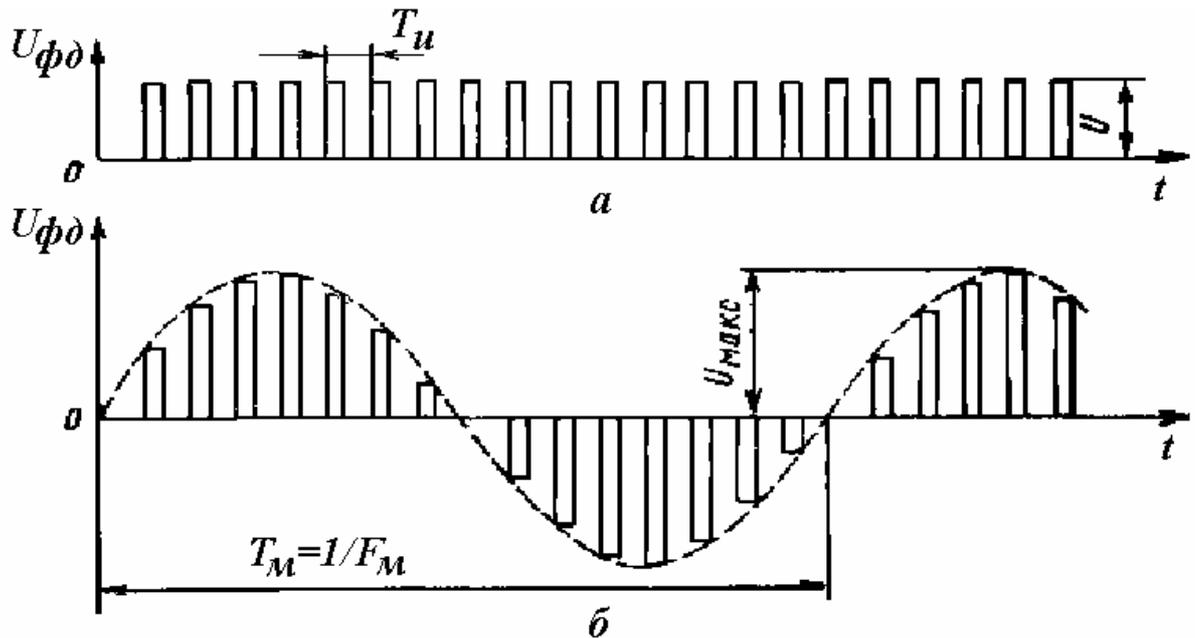


Рис. 15. Видеоимпульсы на выходе фазового детектора: а – при отражениях от местных предметов, б – при отражениях от движущейся цели

Для измерения доплеровских частот отраженных сигналов используются *когерентные радиолокационные станции*, характеризующиеся когерентностью излучаемых колебаний. Колебания называют когерентными, если их начальная фаза либо постоянна, либо изменяется детерминировано.

Когерентные РЛС подразделяются на РЛС с внешней и внутренней когерентностью в зависимости от расположения источника опорного сигнала. В РЛС с внешней когерентностью в качестве опорных применяют сигналы, отраженные от пассивной помехи. Опорный сигнал формируется с помощью помехового гетеродина, фазированного помехой, опережающей полезный сигнал. В РЛС с внутренней когерентностью источником опорного сигнала служит когерентный гетеродин, который может фазироваться сигналом генератора СВЧ (псевдокогерентная РЛС) или служить задающим генератором (истинно когерентные РЛС).

Если передатчик РЛС формирует колебание

$$u_{nep}(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \psi_0) \quad \text{при} \quad 0 \leq t < \infty,$$

то отраженный сигнал на входе приемника

$$u_{np}(t) = U_0 \cos[\omega_0(t - t_D) + \psi_0 + \psi_{omp}],$$

где  $t_D = 2D/c = 2(D_0 - v_p t)/c$  – время запаздывания отраженной волны;  $D$  – текущая дальность до цели;  $D_0$  – дальность до цели в момент начала отсчета при  $t=0$ ;  $\psi_{omp}$  – изменение фазы волны при отражении от цели. Два рассмотренных колебания являются когерентными. Разность фаз излучаемых и принимаемых колебаний равна  $\Delta\psi = -\omega_0 t_D + \psi_{omp}$ .

Если фазу  $\psi_{omp}$  считать постоянной, что справедливо при медленных флуктуациях цели, то разность фаз  $\Delta\psi$  окажется детерминированной функцией времени:

$$\Delta\psi = 2 v_p \omega_0 t/c + const. \quad (75)$$

Сопоставление двух указанных колебаний позволит выделить доплеровскую частоту  $\Omega_d = 2v_p\omega_0/c$  сигнала и определить радиальную составляющую скорости цели.

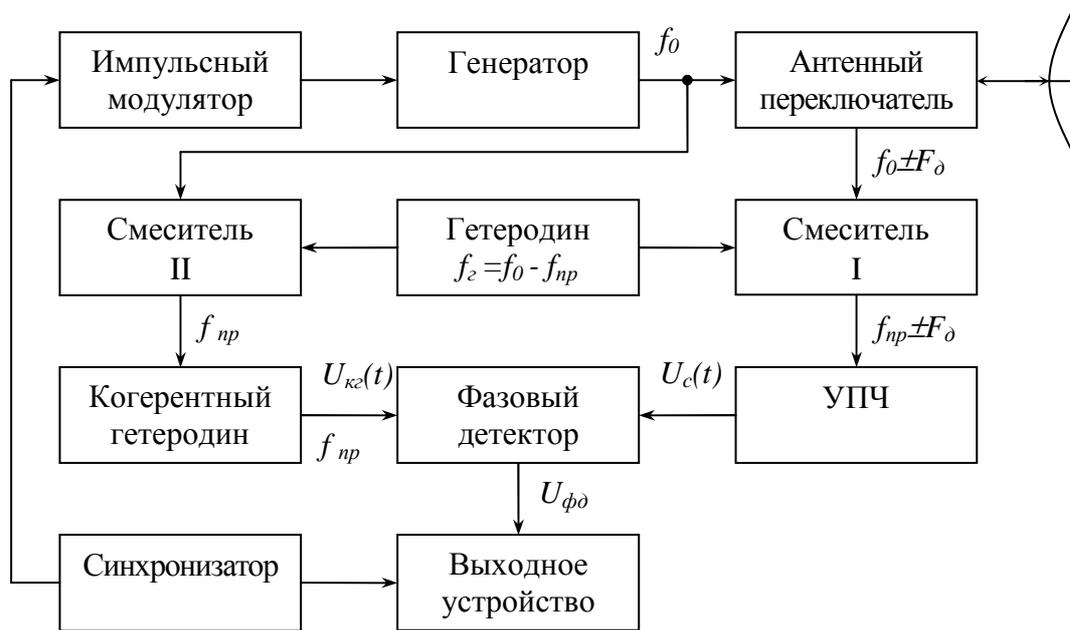


Рис. 16. Функциональная схема псевдокогерентной импульсной РЛС

На рис. 16 изображена схема псевдокогерентной импульсной РЛС с фазируемым когерентным гетеродином. Особенность станций такого типа состоит в том, что импульсы высокочастотного генератора некогерентны, т. к. передатчик РЛС формирует зондирующий сигнал, имеющий случайную начальную фазу:

$$u_z(t) = U_z \cos(\omega_0 t - \psi_{zn}) \quad \text{при} \quad 0 \leq t_n \leq \tau_u,$$

где  $t_n$  – время, отсчитываемое от начала  $n$ -го периода повторения;  $\psi_{zn}$  – фаза  $n$ -го импульса, являющаяся величиной случайной,  $\tau_u$  – длительность импульса.

Эти импульсы фазируют колебания когерентного гетеродина

$$u_{kz}(t) = U_{kz} \cos(\omega_{kz} t_n - \psi_{kzn}), \quad \text{при} \quad 0 \leq t_n \leq T_n.$$

Когерентный гетеродин вырабатывает высокостабильные колебания на промежуточной частоте, используемые в качестве опорных для фазового детектора. Длительность существования этих колебаний должна быть равна времени задержки сигналов, отраженных от цели, находящейся на максимальной дальности действия РЛС. Поэтому период повторения зондирующих импульсов в псевдокогерентных РЛС выбирается исходя из условия однозначного измерения дальности

$$T_n \geq t_{\text{зад.мах}} = 2D_{\text{мах}}/c, \quad (76)$$

где  $t_{\text{зад.мах}}$  – максимальное время задержки отраженного сигнала;  $D_{\text{мах}}$  – максимальная дальность действия РЛС;  $c$  – скорость света.

Особенность когерентно-импульсных станций состоит в том, что линейная зависимость между доплеровской частотой  $F_{\delta}$  и частотой  $F_m$  амплитудной модуляции импульсных сигналов на выходе фазового детектора имеет место лишь при выполнении условия

$$F_{\delta} \leq 0,5F_n, \quad (77)$$

где  $F_n$  – частота следования импульсов РЛС. При возрастании доплеровского смещения  $F_{\delta}$  частоты сигнала изменение частоты  $F_m$  амплитудной модуляции выходных видеоимпульсов происходит по симметричному пилообразному закону (рис.17).

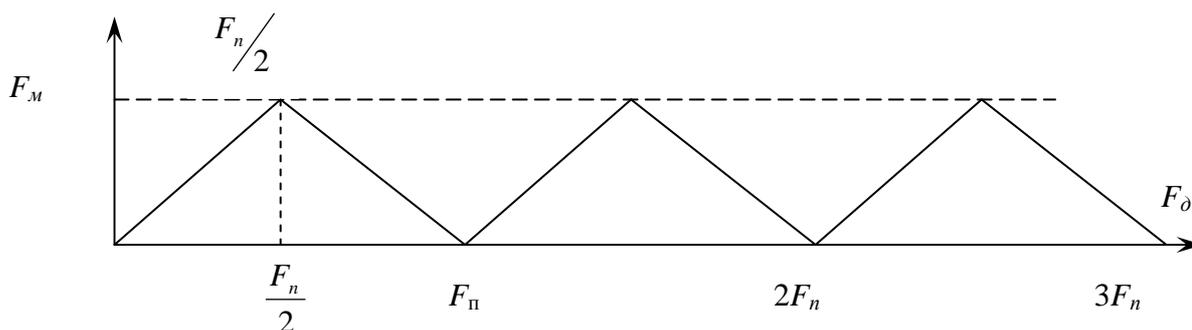


Рис. 17. Зависимость частоты амплитудной модуляции  $F_m$  импульсных сигналов на выходе фазового детектора от доплеровского смещения  $F_{\delta}$

Таким образом, диапазон однозначно измеряемых, доплеровских частот равен  $0,5F_n$ . При использовании когерентно-импульсных РЛС движущаяся цель воспринимается как неподвижная, если доплеровская частота кратна частоте следования импульсов РЛС

$$F_{\delta} = kF_n, \quad (78)$$

где  $k$  – целое число. В этом случае амплитуда импульсов на выходе фазового детектора постоянна.

Из (73) и (78) следует, что движущаяся цель воспринимается как неподвижная при выполнении следующего равенства (рис. 17):

$$(2v/\lambda)\cos\alpha = kF_n. \quad (79)$$

При заданной скорости  $v$  движения цели значения углов  $\alpha$ , для которых справедлива формула (79), называются «слепыми». При заданном направлении движения цели относительно линии «РЛС – цель» формула (79) позволяет определить «слепые» значения скорости полета цели.

Наличие «слепых» скоростей и направлений является существенным недостатком импульсно-когерентных РЛС. В связи с ограниченными возможностями когерентно-импульсных РЛС по измерению радиальной скорости обычно их используют для обеспечения решения задач селекции движущихся целей.

Примером *истинно когерентной импульсной РЛС* является станция, схема которой изображена на рис. 18.

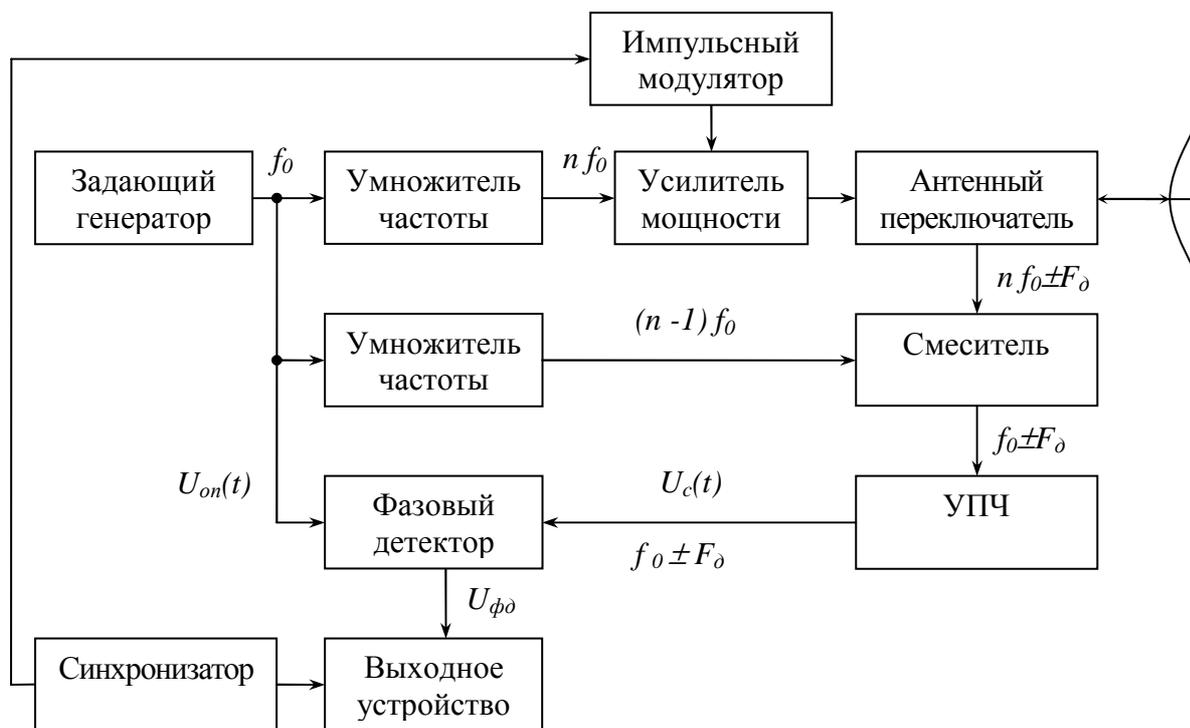


Рис. 18. Функциональная схема истинно когерентной импульсной РЛС

В станциях такого типа задающий генератор работает на частоте, равной промежуточной частоте  $f_{np}$  приемника. Для создания зондирующего сигнала колебания задающего генератора умножаются по частоте в  $n$  раз, усиливаются по мощности и проходят через каскад импульсной модуляции. В качестве гетеродина приемника используется схема умножения частоты задающих колебаний  $(n-1)$  раз. В фазовом детекторе в качестве опорных используются колебания задающего генератора. Для обеспечения когерентности задающий генератор должен характеризоваться высокой стабильностью создаваемых колебаний.

Особенность истинно когерентных РЛС состоит в том, что когерентность зондирующих импульсов между собой позволяет принимать отраженные от цели сигналы в другом периоде зондирования. Таким образом, появляется возможность выбрать частоту повторения зондирующих импульсов исходя из условия однозначного измерения скорости

$$F_n \geq 2 F_{d,max}. \quad (80)$$

Однако в этом случае дальность будет измеряться неоднозначно. Кроме того, при использовании одной антенны, работающей на прием и передачу, возможен эффект «слепых» дальностей. Если отраженный сигнал поступит в антенну в момент излучения зондирующего сигнала, то в связи с тем, что приемник «закрит» антенным переключателем, отраженный сигнал будет потерян.

«Слепые» дальности определяются следующим образом:

$$D_{сл} = n \cdot c \cdot T_n / 2, \quad (81)$$

где  $T_n$  – период повторения зондирующих импульсов;  $n$  – номер периода повторения.

Истинно когерентные импульсные РЛС применяются при необходимости измерения радиальной скорости цели.

## Задачи

5.1. Передатчик УКВ станции самолета, летящего со скоростью 900 км/ч по направлению к неподвижному радиоприемнику, настроен на частоту 180 МГц. Определить частоту Допплера.

5.2. Определить радиальную скорость самолета, летящего в направлении РЛС, если несущая частота РЛС составляет 1 ГГц, а частота Допплера, измеренная на выходе приемника, 800 Гц.

5.3. Выбрать параметры РЛС (несущую частоту и период повторения зондирующих импульсов) таким образом, чтобы РЛС была способна однозначно измерять дальность и радиальную скорость одновременно. Максимальная дальность обнаружения должна быть не менее 50 км, а максимальная радиальная скорость цели – не менее 720 км/ч.

5.4. В направлении импульсно-когерентной РЛС движутся три цели с радиальными скоростями 448 км/ч, 648 км/ч и 925 км/ч соответственно. Сколько целей будет наблюдаться, если РЛС характеризуется рабочей длиной волны 3 см и частотой повторения зондирующих импульсов 4 кГц.

5.5. Будет ли наблюдаться цель, движущаяся в направлении РЛС со скоростью 925 км/ч, если импульсно-когерентная РЛС имеет следующие характеристики: частота повторения зондирующих импульсов 4 кГц, рабочая длина волны 4 см. Полоса режекции фильтра Допплера 500 Гц.

5.6. Определить диапазоны радиальных скоростей, полет с которыми позволит ударному самолету скрытно подойти к импульсно-когерентной РЛС со следующими характеристиками: рабочая длина волны 0,1 м, частота повторения зондирующих импульсов 2 кГц, фильтр Допплера имеет зону режекции 200 Гц. Максимальная скорость ударного самолета 1250 км/ч.

5.7. Определить максимальную радиальную скорость перемещения метеообразований, при которой еще происходит подавление отметок от них импульсно-когерентной РЛС со следующими характеристиками: рабочая длина волны 0,03 м, частота повторения зондирующих импульсов 4 кГц, фильтр Допплера имеет зону режекции 400 Гц.

5.8. Определите «слепые» направления полета и «слепые» скорости самолета, приближающегося к РЛС с максимальной скоростью 1200 км/ч в секторе углов от 0° до 90°. Характеристики РЛС: частота повторения зондирующих импульсов 800 Гц, рабочая длина волны 8 см.

5.9. Разведывательный самолет совершает полет вокруг импульсно-когерентной РЛС по окружности со скоростью 500 км/ч. Будет ли он наблюдаться на экране индикатора, если рабочая длина волны РЛС 0,15 м, а частота повторения зондирующих импульсов 5 кГц?

5.10. При использовании наземной когерентно-импульсной РЛС для обнаружения воздушных целей заранее известно, что цели могут перемещаться со «слепыми» скоростями и по «слепым» направлениям. Каким образом можно обеспечить наблюдение всех целей в режиме СДЦ на фоне отражений от местных предметов?

5.11. Определить полосу пропускания и количество фильтров Доплера, если требуется обеспечить разрешающую способность по скорости 30 км/ч для истинно когерентной РЛС. Рабочая длина волны 0,15 м, максимальная скорость цели равна 1200 км/ч. Имеются ли в данной РЛС «слепые» зоны по дальности, если максимальная дальность обнаружения равна 100 км, длительность зондирующих импульсов 5 мкс?

5.12. Каким способом возможно исключение вредных эффектов «слепых» дальностей в истинно когерентных радиолокационных системах?

5.13. Для защиты РЛС от активных помех используется одновременная работа на двух несущих частотах 3 ГГц и 3,5 ГГц. Для защиты от пассивных помех используется система СДЦ, функциональная схема которой представлена на рис. 19. Определить, какими характеристиками обладает подобная РЛС (возможность измерения дальности, скорости, наличие «слепых» скоростей и дальностей)? Максимальная дальность обнаружения целей 120 км, максимальная радиальная скорость целей 1500 км/ч. Частота повторения зондирующих импульсов 3 кГц.

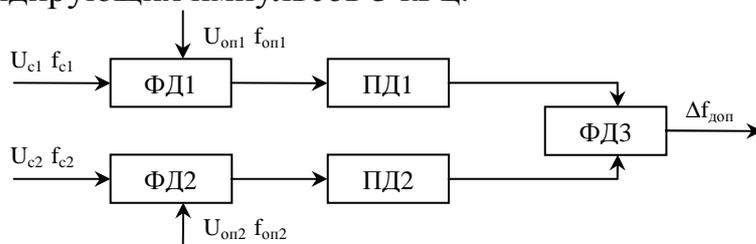


Рис. 19. Функциональная схема системы СДЦ двухчастотной РЛС

5.14. Цель приближается к истинно когерентной РЛС. На каких дальностях цели от РЛС отметки от цели будут отсутствовать, если РЛС имеет следующие характеристики: частота повторения зондирующих импульсов 100 кГц, максимальная дальность обнаружения 20 км.

5.15. Максимальная скорость сближения самолетов может достигать 2500 км/ч. Как нужно выбрать частоту повторения зондирующих импульсов самолетной истинно когерентной РЛС для обеспечения однозначной селекции целей по доплеровской частоте? Как это скажется на измерении дальности до цели? Длина волны РЛС равна 4 см.

5.16. При использовании бортовой истинно когерентной РЛС для обнаружения воздушных целей известно, что имеется неоднозначность при измерении дальности до цели. Каким образом из множества отраженных эхосигналов можно выделить отметку, несущую информацию об истинной дальности до цели?

5.17. Многофункциональная бортовая самолетная РЛС предназначена для работы в двух режимах: режиме поиска воздушной цели, летящей со скоростью до 3000 км/ч, и поиска наземной цели на дальности до 50 км. Длина волны РЛС равна 3 см. Определите частоты повторения зондирующих импульсов при работе РЛС в данных двух режимах.

## 6. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИИ

Максимальной дальностью действия РЛС называется наибольшее расстояние, на котором цель обнаруживается с заданными вероятностями правильного обнаружения  $D$  и ложной тревоги  $F$ . Максимальная дальность обнаружения цели определяется в соответствии с основным уравнением радиолокации. Имеется несколько видов записи основного уравнения радиолокации в зависимости от типа радиолокационной системы.

### Основное уравнение радиолокации с пассивным ответом

Дальность действия РЛС в свободном пространстве, т. е. в случае, когда влиянием подстилающей поверхности можно пренебречь, определяется формулой

$$D_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{прд}} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 k_{\text{ш}} kT \Delta f_{\text{прм}} k_p}}, \quad (82)$$

где  $P_{\text{прд}}$  – импульсная мощность передатчика РЛС;  $G_{\text{прд}}$  – максимальное значение коэффициента усиления антенны передатчика;  $G_{\text{прм}}$  – максимальное значение коэффициента усиления антенны приемника;  $\lambda$  – рабочая длина волны РЛС;  $\sigma$  – среднее значение эффективной отражающей площади цели;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Вт·с/град – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура приемника;  $k_{\text{ш}}$  – коэффициент шума приемника;  $\Delta f_{\text{прм}}$  – полоса пропускания приемника РЛС;  $k_p$  – коэффициент различимости.

Полоса пропускания приемника РЛС выбирается из условия обеспечения согласованного приема  $\Delta f_{\text{прм}} = 1/\tau_u$ .

Выражение  $P_{\text{min.прм}} = kT \Delta f_{\text{прм}} k_{\text{ш}} k_p$  определяет минимальную чувствительность приемника РЛС.

При использовании в РЛС для излучения и приема радиоволн одной антенны будут одинаковыми значения коэффициента усиления при приеме и передаче  $G_{\text{прд}} = G_{\text{прм}}$ . Иногда используется величина эффективной площади антенны  $S$ , связанная с коэффициентом усиления антенны  $G$  соотношением

$$S = G \lambda^2 / 4\pi. \quad (83)$$

На рис. 20 приведены графики, характеризующие значения коэффициента шума малошумящих усилителей высокой частоты.

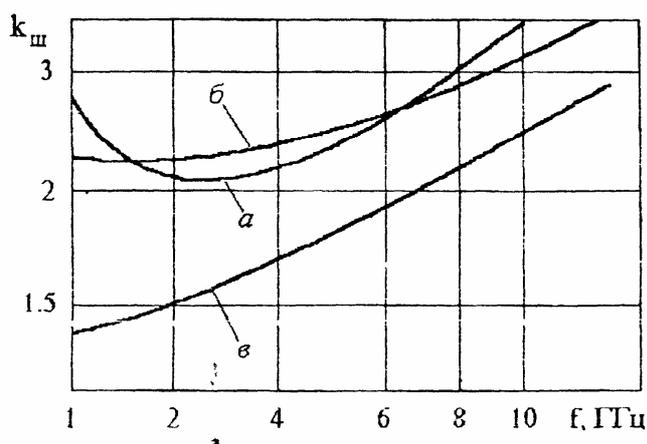


Рис. 20. Зависимость коэффициента шума приемника от частоты принимаемого сигнала: а – для ламп бегущей волны, б – для усилителей на туннельных диодах, в – для параметрических усилителей

*Основное уравнение радиолокации с пассивным ответом с учетом влияния Земли.*

У наземных РЛС метрового диапазона вследствие отражения радиоволн от земной поверхности и их синфазного или противофазного сложения возникает резкое искажение диаграммы направленности в вертикальной плоскости по сравнению с тем, что имело бы место в свободном пространстве (рис. 21). В результате формируется многолепестковая диаграмма направленности антенной системы РЛС и, соответственно, зона видимости.

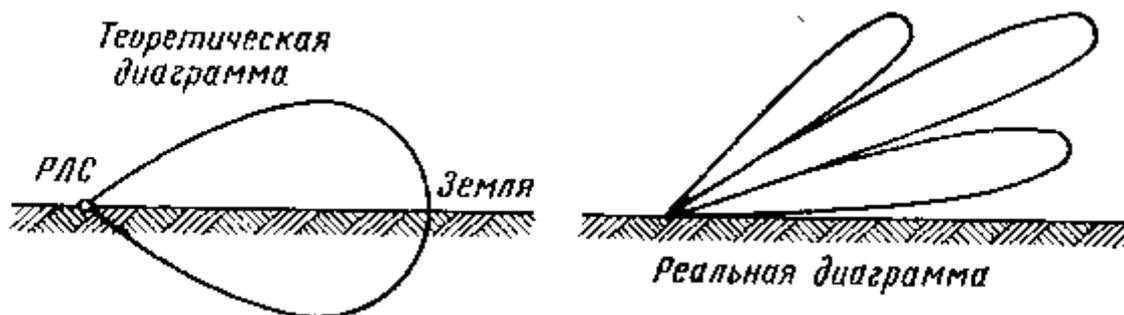


Рис. 21. Влияние подстилающей поверхности на диаграмму направленности антенны РЛС

При малых углах места  $\varphi_{УМ}$  диаграмму видимости РЛС в вертикальной плоскости можно представить следующим образом:

$$D_{\text{max.зем}} = 2 \cdot \sqrt{\pi N h / \lambda} \sqrt{D_{\text{max}}} = 2 \cdot \sqrt{\pi N h / \lambda} \sqrt{\frac{P_{\text{прд}} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 k_{\text{ш}} k T \Delta f_{\text{прм}} k_p}}, \quad (84)$$

где  $N$  – высота цели;  $h$  – высота центра антенны РЛС над земной поверхностью;  $D_{\text{max}}$  – максимальная дальность действия РЛС в свободном пространстве.

Число лепестков диаграммы направленности РЛС с учетом влияния Земли определяется следующим образом:

$$N \leq 2h / \lambda. \quad (85)$$

Угол места  $n$ -го лепестка диаграммы направленности РЛС с учетом влияния Земли равен

$$\beta_n = n\lambda/4h. \quad (86)$$

При перемещении в пространстве диаграммы направленности антенны аналогичным образом перемещается и зона видимости РЛС. Применительно к обзорной РЛС можно считать, что зона видимости совпадает с зоной обзора.

Точки излучения и приема радиоволн могут быть разнесены в пространстве (рис. 22). При этом максимальное значение произведения дальности  $D_{прд}$  от передатчика до цели и  $D_{прм}$  от цели до приемника определяется формулой

$$(D_{прд} \cdot D_{прм}) = \sqrt{\frac{P_{прд} G_{прд} G_{прм} \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 k_{ш} kT \Delta f_{прм} k_p}}. \quad (87)$$

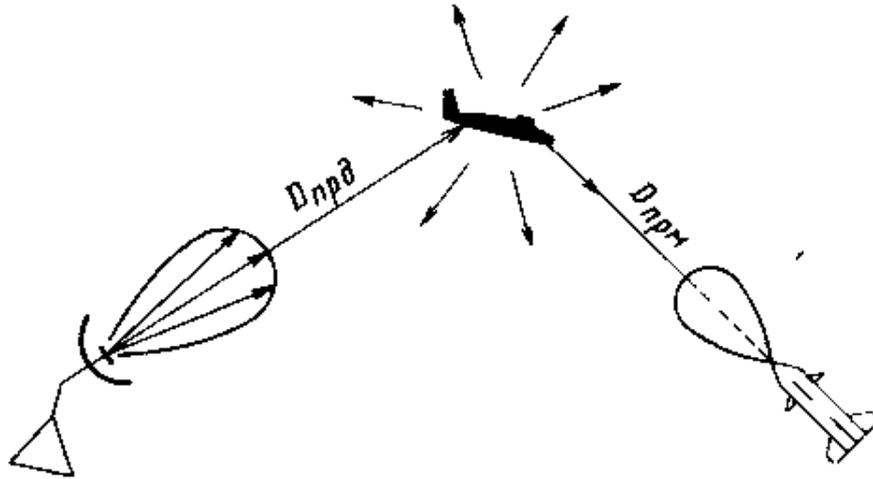


Рис. 22. Схема, характеризующая разнесение в пространстве точек излучения и приема радиоволн

Дальность действия РЛС может быть выражена через *среднюю мощность* излучения  $P_{cp}$  передатчика и параметры зоны обзора:

$$D_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_{cp} T_{обз} S \bar{\sigma}}{4\pi \Omega_0 k_{ш} kT_0 k_p N_C}}, \quad (88)$$

где  $T_{обз}$  – период обзора заданной зоны;  $\Omega_0$  – телесный угол обзора;  $N_C$  – число накапливаемых сигналов при однократном облучении.

В радиолокации с активным ответом на цель устанавливают ретранслятор или ответчик, которые принимают сигналы запроса, излученные радиолокационной станцией или специальным запросчиком, и излучают ответные радиосигналы.

Максимальная дальность действия по каналу запроса равна

$$D_{\text{зап.мах}} = \sqrt{\frac{P_{\text{зап}} G_{\text{зап}} G_{\text{отв}} \lambda^2}{(4\pi)^2 k_{\text{ш.отв}} kT \Delta f_{\text{прм.отв}} k_p}}, \quad (89)$$

где  $P_{\text{зап}}$  – мощность передатчика запросчика;  $G_{\text{зап}}$  – коэффициент усиления антенны запросчика;  $\Delta f_{\text{прм.отв}}$  – полоса пропускания приемника ответчика;  $k_{\text{ш.отв}}$  – коэффициент шума приемника ответчика.

По каналу ответа -

$$D_{\text{отв.мах}} = \sqrt{\frac{P_{\text{отв}} G_{\text{отв}} G_{\text{зап}} \lambda^2}{(4\pi)^2 k_{\text{ш.зап}} kT \Delta f_{\text{прм.зап}} k_p}}, \quad (90)$$

где  $P_{\text{отв}}$  – мощность передатчика ответчика;  $G_{\text{отв}}$  – коэффициент усиления антенны ответчика;  $\Delta f_{\text{прм.зап}}$  – полоса пропускания приемника запросчика;  $k_{\text{ш.зап}}$  – коэффициент шума приемника запросчика.

Параметры запросчика и ответчика выбираются таким образом, чтобы дальность их действия были равны:

$$D_{\text{зап.мах}} = D_{\text{отв.мах}}. \quad (91)$$

РЛС с активным ответом обладает преимуществом по сравнению с РЛС с пассивным ответом в смысле энергетических параметров.

При расчете максимальной дальности действия РЛС следует учитывать поглощение энергии радиоволн в атмосфере.

При поглощении энергии радиоволн в атмосфере максимальная дальность действия оценивается по формулам:

$$D_{\text{мах.п}} = D_{\text{мах}} 10^{-0,05\delta_n l} = D_{\text{мах}} e^{-0,115\delta_n l} \quad (92)$$

или

$$D_{\text{мах.п}} = D_{\text{мах}} 10^{-0,05 \sum_{i=1}^n \delta_{ni} l_i} = D_{\text{мах}} e^{-0,115 \sum_{i=1}^n \delta_{ni} l_i}, \quad (93)$$

где  $D_{\text{мах.п}}$  – дальность действия с учетом поглощения;  $D_{\text{мах}}$  – дальность действия при отсутствии поглощения;  $\delta_n$  – коэффициент поглощения, характеризующий уменьшение плотности потока энергии распространяющейся волны в децибелах на километр;  $\delta_{ni}$  – коэффициент поглощения на  $i$ -м участке трассы;  $l_i$  – длина  $i$ -го участка трассы, в километрах.

На рис. 23 и 24 приведены графики, позволяющие оценить значения коэффициента поглощения в различных атмосферных условиях.



6.2. Определить максимальную дальность радиолокационного наблюдения, если несущая частота РЛС 3000 МГц, мощность в импульсе 500 кВт, коэффициент усиления антенны 1000, чувствительность приемника на 90 дБ ниже уровня 1 мВт, а целью является самолет с ЭПР  $10 \text{ м}^2$ .

6.3. Номинальная мощность в импульсе передатчика РЛС равна 500 кВт, чувствительность приемника минус 110 дБ/Вт, коэффициент усиления антенны 300, рабочая длина волны 20 см. Определить максимальные пределы изменения радиуса зоны обнаружения цели с ЭПР  $15 \text{ м}^2$ , если вследствие нестабильности питающих напряжений и разброса параметров ламп возможны изменения мощности в импульсе в пределах  $\pm 100$  кВт.

6.4. На каких дальностях будут обнаружены истребители F16 с ЭПР  $5 \text{ м}^2$  и F117A с ЭПР  $0,025 \text{ м}^2$ ? Характеристики РЛС: импульсная мощность передатчика – 1000 кВт, длительность импульса 1 мкс, коэффициент усиления антенны – 1000, рабочая длина волны 5 см, коэффициент шума приемника – 10, коэффициент различимости – 5.

6.5. Определить чувствительность приемника РЛС (в дБ/мВт), если цель с ЭПР  $10 \text{ м}^2$  обнаруживается на расстоянии 100 км при коэффициенте усиления антенны 1000, рабочей длине волны 8 см и мощности в импульсе 1000 кВт.

6.6. Определить импульсную мощность передатчика РЛС, необходимую для того, чтобы ракета с ЭПР  $2 \text{ м}^2$  была обнаружена на расстоянии 600 км при чувствительности приемника минус 127 дБ/Вт, коэффициенте усиления антенны 4000 и рабочей длиной волны 50 см. Цель летит на достаточно большой высоте.

6.7. Определить ЭПР цели, если она была обнаружена РЛС на расстоянии 300 км. Импульсная мощность передатчика РЛС 2000 кВт, чувствительность приемника минус 125 дБ/Вт, коэффициент усиления антенны 1800, рабочая длина волны 20 см.

6.8. Определить, во сколько раз и в какую сторону изменится максимальная дальность обнаружения РЛС, если длительность импульса увеличить с 0,3 мкс до 3 мкс. В обоих случаях используется оптимальная полоса пропускания приемника, а мощность в импульсе остается неизменной.

6.9. РЛС контроля скорости автотранспорта непрерывного излучения характеризуется средней мощностью 1 Вт, длиной волны 3 см, коэффициентом усиления антенны 3, коэффициентом шума приемника 20, коэффициентом различимости 10. Определить максимальную дальность измерения скорости РЛС, если максимальная измеряемая РЛС скорость автомобиля равна 300 км/ч.

6.10. Самолет обстреливает РЛС противорадиолокационной ракетой (ПРР) с ЭПР  $0,1 \text{ м}^2$ . Будет ли наблюдаться пуск ПРР на дальности 50 км, если РЛС характеризуется следующими параметрами: импульсная мощность 100 кВт, рабочая длина волны 50 см, коэффициент различимости

20, коэффициент шума приемника 8, коэффициент усиления антенны 400, длительность зондирующего импульса 3 мкс.

6.11. Две РЛС, расположенные на расстоянии 200 км друг от друга, имеют дальности обнаружения цели с ЭПР  $5 \text{ м}^2$  120 км и 150 км соответственно. Возможно ли скрытное преодоление радиолокационного поля самолетом В1В с ЭПР, равной  $0,1 \text{ м}^2$ ?

6.12. К Земле приближается астероид со скоростью 100 тыс. км/ч. Его пытаются обнаружить с помощью РЛС, имеющей рабочую длину волны 25 см, длительность импульсов 5 мкс. Полоса пропускания приемника РЛС согласована с длительностью импульса. Будет ли РЛС наблюдать астероид?

6.13. Разведывательный приемник самолета имеет минимальную чувствительность минус 60 дБ/Вт. Будет ли разведывательный приемник фиксировать излучение РЛС на расстоянии 100 км от нее при следующих характеристиках РЛС: импульсная мощность передатчика 100 кВт, рабочая длина волны 5 см, коэффициент усиления антенны РЛС 2000. Коэффициент усиления антенны разведывательного приемника 5.

6.14. В направлении РЛС летят две пары самолетов. Первая пара с расстоянием 500 м между самолетами. Вторая пара с расстоянием 100 м между самолетами. Будет ли отличаться дальность обнаружения целей, и каким образом, если длительность зондирующих импульсов РЛС равна 2 мкс?

6.15. Вертолет поднимается вертикально вверх, практически оставаясь на неизменной дальности от радиолокационной системы. Определить, на какой высоте он будет обнаружен, если импульсная мощность передатчика 300 кВт, чувствительность приемника минус 125 дБ/Вт, рабочая длина волны 2 м, коэффициент усиления антенны 300, антенна станции поднята на высоту 3 м, ЭПР вертолета  $75 \text{ м}^2$ , а расстоянии от станции до вертолета 70 км.

6.16. Определить число лепестков ДНА и угол наклона максимума нижнего лепестка ДНА РЛС по отношению к поверхности Земли, если антенна, излучающая электромагнитное колебание будет установлена на высоте 6 м, 12 м.

6.17. Захватит ли головка самонаведения (ГСН) полуактивного типа цель, находящуюся от нее на расстоянии 10 км, если цель сопровождается РЛС подсветки с мощностью передатчика 10 кВт, коэффициентом усиления антенны 5000, рабочей длиной волны 0,1 м с дальности 70 км. ЭПР цели равна  $10 \text{ м}^2$ . Минимальная чувствительность приемника ГСН минус 110 дБ/Вт, коэффициент усиления антенны ГСН равен 50.

6.18. На каком расстоянии от цели произойдет захват цели ГСН полуактивного типа, если цель сопровождается РЛС подсветки с мощностью передатчика 25 кВт, коэффициентом усиления антенны 5000, рабочей длиной волны 0,05 м с дальности 50 км. ЭПР цели равна  $10 \text{ м}^2$ . Минимальная чувствительность приемника ГСН минус 125 дБ/Вт, коэффициент усиления антенны ГСН равен 10.

6.19. Определить дальность обнаружения корабля с ЭПР, равной  $2000 \text{ м}^2$ , если уголкового отражателя с квадратными гранями, имеющими стороны длиной 2 м, обнаруживается на расстоянии 120 км. Рабочая длина волны 3 см.

6.20. Определить необходимую мощность радиолокационного запросчика, если запросчик и ответчик имеют рабочую длину волны 0,2 м. Параметры ответчика: коэффициент усиления антенны 0,3, мощность ответчика 100 Вт, минимальная чувствительность ответчика минус 94 дБ относительно уровня 1 Вт. Параметры запросчика: коэффициент усиления антенны 50, минимальная чувствительность ответчика минус 107 дБ относительно уровня 1 Вт. Дальность запроса должна соответствовать дальности ответа.

6.21. Определить необходимую чувствительность ответчика (в дБ/Вт), если запросчик и ответчик имеют рабочую длину волны 7 см. Параметры запросчика: коэффициент усиления антенны 100, минимальная чувствительность приемника запросчика минус 83 дБ относительно уровня 1 Вт, мощность в импульсе 150 Вт. Параметры ответчика: коэффициент усиления антенны 20, мощность ответчика 50 Вт.

6.22. В радиолокационном ответчике несущая частота ответного сигнала вследствие нестабильности меняется в полосе 100 МГц. Соответствующую полосу пропускания имеет приемник радиолокационного запросчика. Длительность ответного сигнала составляет 1 мкс. Определить, во сколько раз и в какую сторону изменится максимальная дальность действия ответчика, если стабилизировать его несущую частоту и согласовать полосу пропускания приемника запросчика со спектром ответного сигнала.

6.23. До какого предела целесообразно увеличивать дальность действия наземной РЛС обнаружения самолетов, если максимальная высота полета целей составляет 25 км? Поглощение в атмосфере не учитывать.

6.24. Какова дальность обнаружения наземной радиолокационной станцией искусственного спутника Земли, летящего на высоте 400 км над земной поверхностью?

6.25. На какой высоте должен лететь самолет дальней радиолокационной разведки, оснащенный РЛС обнаружения низколетящих целей, для того чтобы была полностью использована максимальная дальность действия РЛС, равная 250 км? Высота полета целей – не менее 100 м.

6.26. Какой характер имеет зависимость  $P_{\text{нр}} = f(\lambda)$  требуемой мощности передатчика РЛС от ее длины волны при заданной дальности действия станции в свободном пространстве и постоянных значениях прочих технических показателей?

6.27. Самолетная РЛС с учетом поглощения энергии радиоволн в атмосфере должна иметь дальность действия 50 км. Какова должна быть дальность действия в свободном пространстве, если длина волны равна 1,5 см и учитывается поглощение в дожде интенсивностью 4 мм/ч и в кислороде воздуха на всей дальности действия РЛС?

## 7. ПАССИВНЫЕ ПОМЕХИ РЛС

Пассивные помехи можно условно разделить на два типа: *естественные* и *организованные* (умышленные).

К *естественным пассивным помехам* можно отнести мешающие отражения от подстилающей поверхности Земли, морской поверхности, местных предметов, гидрометеоров и т. п. *Организованные пассивные помехи* – это дипольные отражатели, металлизированные ленты и различного рода искусственные отражатели.

Основной характеристикой радиолокационных целей и пассивных помех является эффективная площадь рассеяния цели (ЭПР) и закон ее распределения. ЭПР характеризует отражающие свойства цели.

Пассивные помехи, как правило, имеют значительную эффективную площадь рассеяния и затрудняют обнаружение целей на своем фоне.

По методу определения ЭПР все цели можно разделить на *элементарные* и *сложные*. ЭПР элементарных целей может быть определена аналитически. Такой расчет возможен лишь для некоторых объектов простейшей формы (металлические шар, лист, вибратор, уголкового отражатели и некоторые другие тела). ЭПР сложных целей может быть определена только экспериментально и описана статистически. К сложным целям относится подавляющее большинство реальных целей.

С точки зрения разрешающей способности сложные цели, в свою очередь, могут быть разделены на *точечные* и *распределенные*.

Распределенными целями называют такие, линейные и угловые размеры которых значительно больше элементов разрешения РЛС по дальности и угловым координатам. Распределенные цели могут быть поверхностными (земная и водная поверхность) и объемными (облака пассивных отражателей, дождевые облака, туман, дождь, снег).

Размер элемента разрешения цели по плоскости

$$\delta S = \frac{c \cdot \tau_u \cdot D \cdot \theta_{аз} [рад]}{2 \cos \varphi} \quad (95)$$

Размер элемента разрешения цели по объему

$$\delta V = \frac{\pi \cdot c \cdot \tau_{и} \cdot D^2 \cdot \theta_{аз} \theta_{ум} [рад]}{8}, \quad (96)$$

где  $\theta_{ум}$ ,  $\theta_{аз}$  – ширина луча антенны на уровне 0,5 в плоскости угла места и азимута соответственно.

Точечными называют такие цели, линейные и угловые размеры которых значительно меньше элементов разрешения РЛС по дальности и угловым координатам.

При обнаружении цели на фоне пассивных помех условие подавления РЛС может быть записано следующим образом:

$$K_n \leq \overline{\sigma_{nn}} / \sigma_{ц}, \quad (97)$$

где  $\bar{\sigma}_m$  – среднее значение эффективной площади рассеяния средств создания пассивных помех, расположенных в элементарном разрешаемом объеме;  $\bar{\sigma}_y$  – среднее значение эффективной площади рассеяния цели;  $K_n$  – коэффициент подавления, при котором цель еще может быть обнаружена.

В таблице 3 приведены значения  $\bar{\sigma}_y$  типовых целей для сантиметрового диапазона волн.

Таблица 3

Наименование цели	$\bar{\sigma}_y, \text{ м}^2$
Реактивный истребитель	5 – 8
Реактивный бомбардировщик	15 – 20
Истребитель F117A	0,025
Большой реактивный пассажирский самолет	20 – 25
Крылатая ракета	0,3 – 0,8
Головка баллистической ракеты	$10^{-3} - 1$
Рыболовецкий траулер	750
Крейсер	14000
Катер	100
Малая подводная лодка в надводном положении	140
Рубка подводной лодки	1
Легковой автомобиль	5 – 10
Человек	0,5 – 1,2

Среднее значение ЭПР распределенной цели или пассивной помехи находится как сумма средних значений всех элементарных отражателей, попадающих в элемент разрешения РЛС  $\delta S$  или  $\delta V$ . При расчетах  $\sigma_m$  вводится понятие удельной эффективной отражающей площади  $\sigma_0$ .

Среднее значение эффективной отражающей площади распределенной цели находят по формулам

$$\bar{\sigma}_y = \sigma_{0\text{пов}} \delta S \quad (98)$$

для поверхности цели и

$$\bar{\sigma}_y = \sigma_{0\text{об}} \delta V \quad (99)$$

для объемной цели, причем  $\sigma_{0\text{пов}}$  и  $\sigma_{0\text{об}}$  – соответственно удельные отражающие площади поверхностей и объемной целей.

В некоторых случаях для характеристики поверхностных целей наряду с удельной эффективной отражающей площадью вводится понятие коэффициента обратного отражения  $\gamma$ , который представляет собой эффективную отражающую площадь, отнесенную к проекции элемента разрешения  $\delta S$  на плоскость, перпендикулярную падающему лучу:

$$\gamma = \bar{\sigma}_m / \delta S \sin \varphi = \sigma_{0\text{пов}} / \sin \varphi, \quad (100)$$

где  $\varphi$  – угол облучения цели (см. рис. 25).

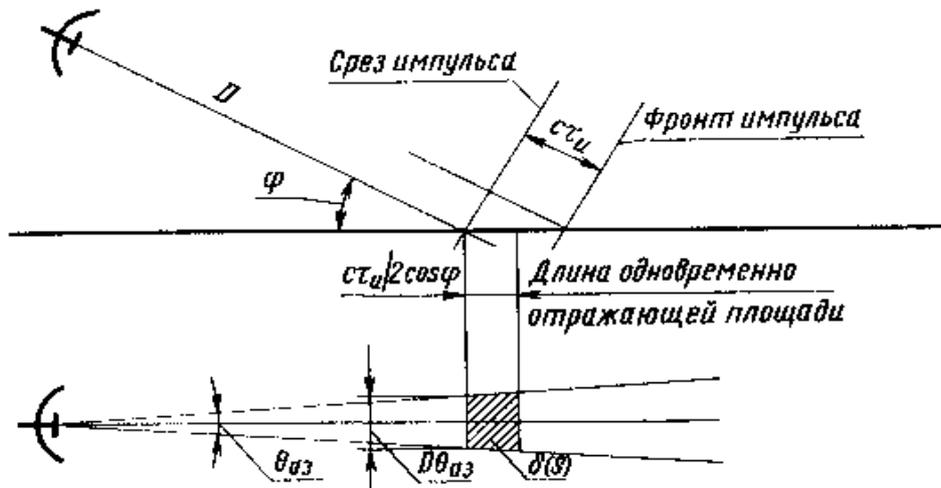


Рис. 25. К расчету элемента разрешения поверхностной цели для импульсной РЛС

При использовании коэффициента обратного отражения формула (98) приобретает вид

$$\bar{\sigma}_{mi} = \gamma \delta S \sin \varphi. \quad (101)$$

Характер отражения от поверхности суши зависит от степени ее шероховатости, определяемой отношением  $h_n/\lambda$ , где  $h_n$  – высота неровностей.

На рис. 26 приведены зависимости  $\gamma=f(\varphi)$  для некоторых видов шероховатой земной поверхности.

В сантиметровом диапазоне даже при очень малых углах облучения ( $\varphi < 3^\circ$ ) гладкими поверхностями могут считаться лишь асфальтовые и бетонные покрытия и спокойная водная поверхность.

На рис. 27 приведены зависимости  $\gamma=f(\varphi)$  для бетонного и гравийного покрытия дорог, а также для песчаной почвы, занимающей промежуточное положение между шероховатыми и гладкими поверхностями.

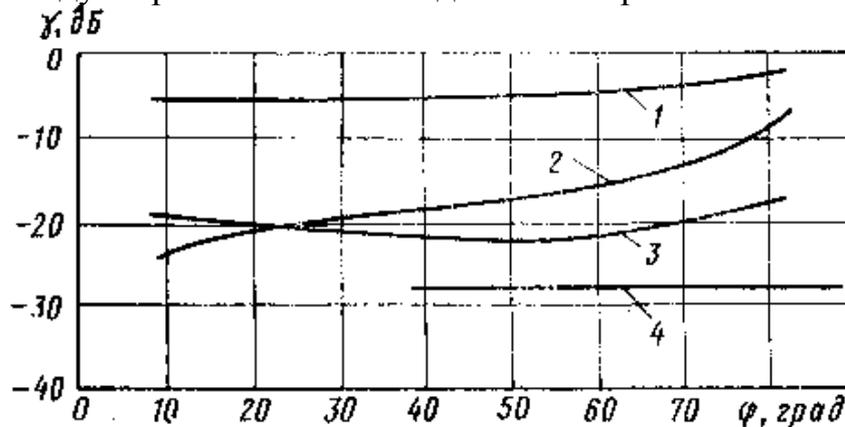


Рис. 26. Коэффициент обратного отражения для различных видов земной поверхности ( $\lambda=3$  см): 1 – молодой лес, 2 – почва, покрытая сухой травой, 3 – почва, покрытая молодой травой, 4 – пашня



Элементарными отражателями при тумане, дожде и облаках являются капли воды, сферические по форме.

На рис. 30 приведены зависимости  $\sigma_{об}$  для дождя и зависимости от его интенсивности  $\rho$  и длины волны РЛС.

При расчете маскирующей способности организованных пассивных помех - дипольных отражателей необходимо учесть, что длина диполя должна быть согласована с рабочей длиной волны РЛС:

$$l = k\lambda / 2, \quad (102)$$

где  $\lambda$  – рабочая длина волны РЛС;  $k$  – коэффициент укорочения, обычно принимается равным 0,9.

Эффективная площадь рассеяния одного отражателя определяется по формулам:  
максимальное значение

$$\sigma_{max} = 0,86\lambda^2, \quad (103)$$

среднее значение ЭПР одного диполя:

$$\bar{\sigma}_1 = 0,17\lambda^2. \quad (104)$$

Суммарное значение ЭПР облака дипольных отражателей определяется

$$\bar{\sigma}_\Sigma = n \cdot \bar{\sigma}_1, \quad (105)$$

где  $n$  – количество дипольных отражателей, размещающихся в импульсном объеме разрешения РЛС.

Для формирования непрерывных областей маскирования дипольными отражателями необходимо сбрасывать их с определенной периодичностью  $t_0$ .

$$t_0 \leq \delta D / v_p, \quad (106)$$

где  $\delta D$  – разрешающая способность РЛС по дальности;  $v_p$  – радиальная скорость постановщика пассивных помех - дипольных отражателей.

На практике часто возникает задача реализовать искусственную цель со значительной ЭПР, которую можно использовать в качестве, например, навигационного знака или ложной цели. Наиболее полно отвечают требованиям, предъявляемым к искусственным целям, уголкового отражатели. Они имеют большое значение  $\sigma$  при относительно малых размерах и малую зависимость  $\sigma$  от направления облучения. ЭПР

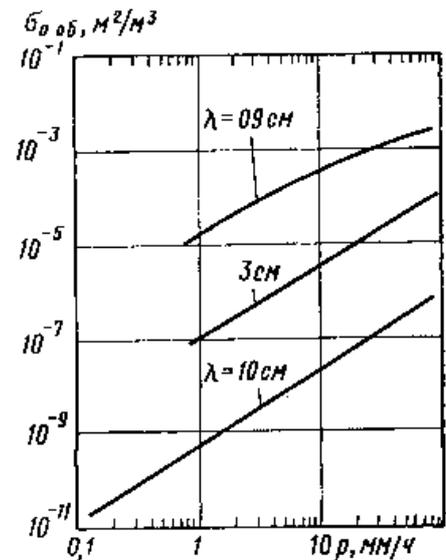


Рис. 30. Удельная отражающая площадь дождя

трехгранного уголкового отражателя определяется в соответствии с формулой

$$\sigma_{\text{ц}} = \frac{4}{3} \pi \frac{a^4}{\lambda^2}, \quad (107)$$

где  $a$  – длина грани уголка.

Эффективная площадь рассеяния уголкового отражателя с секторными и квадратными гранями соответственно в 4 и 9 раз больше, чем ЭПР уголкового отражателя с треугольными гранями. Однако они обладают узкой диаграммой обратного рассеяния, что ограничивает их применение.

В качестве искусственных целей могут использоваться и отражатели других типов, например, линза Люнеберга. Эффективная площадь рассеяния линзы Люнеберга определяется следующим выражением:

$$\sigma_{\text{ц}} = 4\pi^3 \frac{R^4}{\lambda^2}, \quad (108)$$

где  $R$  – радиус линзы Люнеберга.

Линза Люнеберга обладает более широкой диаграммой обратного рассеяния.

### Задачи

7.1. РЛС имеет рабочую длину волны 10 см, симметричный луч с шириной ДНА  $5^\circ$ , длительностью зондирующего импульса 3 мкс. Дальность наблюдения составляет 50 км. Определить ЭПР дождя интенсивностью 5 мм/ч.

7.2. Определить дальность обнаружения самолета - истребителя в дожде интенсивностью 10 мм/ч, если РЛС имеет рабочую длину волны 3 см, симметричный луч с шириной ДНА  $3^\circ$ , длительностью зондирующего импульса 5 мкс. Дальность наблюдения составляет 30 км. Обнаружение происходит при равенстве ЭПР самолета и дождя.

7.3. Определить ЭПР морской поверхности, наблюдаемой с помощью самолетной РЛС со следующими характеристиками: рабочая длина волны 3 см, длительность зондирующего импульса 2,5 мкс, ширина ДНА в азимутальной плоскости  $4^\circ$ . Дальность наблюдения равна 50 км. Высота полета самолета 15 км.

7.4. Определить, на какой дальности будет обнаружена рубка подводной лодки на фоне мешающих отражений от моря при умеренном волнении, если используется РЛС с теми же характеристиками, что и в условии задачи 3.

7.5. Определить ЭПР для случая наблюдения земной поверхности с помощью самолетной РЛС при следующих условиях: длина волны 3 см, длительность импульса 0,5 мкс, ширина диаграммы направленности антенны в азимутальной плоскости  $5^\circ$ , дальность наблюдаемого участка 70 км, высота полета 10 км. Характер наблюдаемой поверхности: а) местность, поросшая молодым лесом, б) бетонное покрытие.

7.6. Решить предыдущую задачу, приняв дальность наблюдаемого участка 20 км.

7.7. Во сколько раз помехозащищенность по отношению к пассивным помехам РЛС метрового диапазона, имеющей длительность импульса 7 мкс и ширину ДНА  $25^\circ$ , меньше помехозащищенности РЛС сантиметрового диапазона, имеющей длительность зондирующего импульса 1 мкс и ширину ДНА  $3^\circ$ . Сравнение провести для двух случаев – только для азимутальной плоскости (веерный луч) и в двух угловых координатах (симметричный луч).

7.8. Определить несущие частоты РЛС, для подавления которых наиболее эффективное действие оказывают дипольные отражатели длиной 180 и 90 см, 9 и 18 мм. Коэффициент укорочения равен 0,9.

7.9. Сколько дипольных отражателей должно входить в пачку, предназначенную для создания области помех с эффективной площадью рассеяния  $50 \text{ м}^2$  для РЛС, имеющей рабочую длину волны 5 см.

7.10. На экране РЛС, имеющей длительность зондирующих импульсов 1 мкс, необходимо создать сплошное изображение помех. Определить минимально допустимый интервал во времени сбрасывания пачек дипольных отражателей, если относительная скорость самолета 1200 км/ч.

7.11. На индикаторе РЛС, характеризующейся длительностью импульсов 10 мкс, видны изображения помех от сброшенных дипольных отражателей, причем расстояние на индикаторе между изображениями пачек равно одной пятой длины изображения одной пачки отражателей. Определить: 1) на сколько надо уменьшить интервал сбрасывания пачек диполей, чтобы создать сплошное изображение помех на индикаторе РЛС; 2) при какой длительности зондирующих импульсов РЛС интервал между изображениями помех возрастет вдвое. Радиальная скорость самолета составляет 1080 км/ч.

7.12. Ударный самолет в зоне ПВО для предотвращения поражения должен производить отстрел ложных целей – искусственных отражателей. Определить наиболее оптимальный с точки зрения минимизации размеров тип искусственного отражателя. ЭПР ложной цели должна быть не менее ЭПР самолета, равного  $5 \text{ м}^2$ .

7.13. Найти количество дипольных отражателей в  $1 \text{ м}^3$ , требуемое для маскировки самолета с ЭПР, равной  $20 \text{ м}^2$ , наблюдаемой РЛС со следующими характеристиками: длина волны 3 см, ширина ДНА  $4^\circ$  по азимуту и углу места, длительность зондирующего импульса 0,5 мкс на дальности 30 км.

7.14. Найти количество дипольных отражателей, требуемое для маскировки самолета с ЭПР, равной  $5 \text{ м}^2$ , наблюдаемой РЛС со следующими характеристиками: длина волны 0,9 см, ширина ДНА  $3^\circ$  по азимуту и углу места, длительность зондирующего импульса 0,25 мкс на дальности 20 км в условия дождя интенсивностью 4 мм/ч.

## 8. АКТИВНЫЕ ПОМЕХИ РЛС И СИСТЕМАМ СВЯЗИ

*Активными помехами* называются радиосигналы и электрические сигналы, мешающие нормальной работе радиотехнических средств обнаружения и связи.

По своему происхождению активные помехи могут быть разделены на две группы: *естественные* и *организованные* (умышленные).

К естественным относятся космические радиоизлучения, собственные шумы приемников, сигналы других радиотехнических средств и т. п. Организованные помехи создаются умышленно с помощью средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) и имеют целью помешать нормальной работе радиотехнических средств противника.

Активные помехи, как правило, не приводят к физическому уничтожению радиотехнических средств противника. Они призваны уменьшить количество получаемой информации или исказить ее.

В соответствии со структурой активной помехи на входе приемника РЛС можно различать большое количество видов активных помех. Наиболее универсальными помехами для РЛС являются: непрерывные шумовые, хаотические импульсные, детерминированные импульсные помехи.

*Непрерывные шумовые помехи* эффективно действуют на РЛС всех назначений, работающих в любых режимах и на всех частотах. Помехи этого вида позволяют маскировать полезные сигналы по дальности, по скорости и по угловым координатам. Активные помехи естественного происхождения имеют очень широкие спектры: ширину их спектра во многих случаях можно считать бесконечно большой. Искусственные активные помехи характеризуются ограниченной шириной  $\Delta F_n$  спектра.

*Хаотические импульсные помехи (ХИП)* в самом общем виде представляют собой последовательность радиоимпульсов, частота заполнения, амплитуда, длительность и период следования которых являются величинами случайными. Искусственно создаваемые ХИП характеризуются постоянством амплитуды и частоты заполнения, случайным образом изменяются лишь длительность импульсов и интервал между ними.

*Детерминированные импульсные помехи* образуются как искусственным, так и естественным путем. Они представляют собой радиоимпульсы, синхронные с зондирующими сигналами импульсной РЛС, возникшие либо при отражении радиоволн от каких-нибудь объектов (элементов земной поверхности, дипольных отражателей), либо созданные передатчиками помех.

Воздействие помех ухудшает основные тактические показатели РЛС (дальность действия, точность, разрешающую способность, пропускную способность). При создании организованных помех считается, что помехи достигают своей цели, если имеет место заданное ухудшение показателей РЛС. Минимально необходимое значение отношения мощности помехи  $P_n$  к мощности сигнала  $P_c$  на входе приемника, при котором достигается необходимый эффект подавления РЛС, называется *коэффициентом*

подавления  $K_n$ :

$$K = \left( \frac{P_n}{P_c} \right)_{\text{вх}} \geq K_n . \quad (109)$$

Указанное соотношение мощностей помехи и сигнала должно существовать в течение всей длительности сигнала. Для каждой конкретной ситуации значение коэффициента подавления может быть вычислено с помощью *основного уравнения противорадиолокации*. Основное уравнение противорадиолокации для случая воздействия помехи из зоны барражирования имеет вид

$$K_n = \frac{P_n}{P_c} = \frac{P_n G_n 4\pi D_c^4}{P_c G_c \sigma_{\text{ц}} D_n^2} F^2(\Theta, \Phi) \frac{\Delta f_{\text{нр}}}{\Delta F_n} \gamma_n , \quad (110)$$

где  $P_n$  – мощность передатчика помех;  $D_n$  – дальность от РЛС до постановщика помех;  $G_n$  – коэффициент направленного действия передатчика помех;  $\Delta F_n$  – ширина спектра помехового сигнала;  $\gamma_n$  – коэффициент, учитывающий различие в поляризации антенны передатчика помех и подавляемой РЛС;  $\sigma_{\text{ц}}$  – ЭПР прикрываемого самолета;  $D_c$  – дальность от РЛС до прикрываемого самолета;  $P_c$  – мощность подавляемой РЛС;  $G_c$  – коэффициент направленного действия подавляемой РЛС;  $\Delta f_{\text{нр}}$  – ширина полосы пропускания приемника РЛС;  $F^2(\Theta, \Phi)$  – функция, описывающая нормированную диаграмму направленности РЛС.

Если передатчик помех установлен на цели, то уравнение противорадиолокации называется *уравнением противорадиолокации для помехи самоприкрытия* и принимает вид

$$K_n = \frac{P_n}{P_c} = \frac{P_n G_n 4\pi D_c^2}{P_c G_c \sigma_{\text{ц}}} \frac{\Delta f_{\text{нр}}}{\Delta F_n} \gamma_n . \quad (111)$$

Отсюда следует важный вывод: *при уменьшении расстояния между РЛС и целью на некоторой критической дальности  $D_{\text{кр}}$  действие помехи становится неэффективными.*

*Основными путями повышения помехозащищенности отдельной радиолокационной станции являются: увеличение энергетического потенциала радиолокационной станции; расширение спектра зондирующих сигналов; применение методов селекции, основанных на различии значений параметров сигналов и помех; борьба с перегрузкой приемного тракта помехами; изменение оптимальным образом значений параметров и режимов работы РЛС при наличии помех (адаптация), использование источника помех для получения необходимой информации о цели.*

Увеличение энергетического потенциала  $P_c G_c \tau_c$  является одним из самых эффективных путей борьбы с активными помехами.

При наличии поляризационных различий сигналов и помех для повышения помехозащищенности РЛС может быть использована *поляризационная селекция*.

*Частотная селекция* может быть использована для борьбы с помехами при различии спектров сигнала и помехи.

При борьбе с шумовыми активными помехами весьма эффективной является перестройка РЛС по частоте от импульса к импульсу. Даже если в передатчике помех используются приборы, позволяющие практически мгновенно осуществлять настройку на частоту разведанного сигнала РЛС, то изменение частоты РЛС от импульса к импульсу резко снижает эффективность помехи. При указанном законе изменения частоты РЛС прицельные по частоте помехи (ширина спектра помехи сравнима с полосой пропускания приемника РЛС) закрывают от радиолокационного наблюдения пространство только за постановщиком помех; пространство же между РЛС и постановщиком помех прицельной по частоте помехой прикрито быть не может. Из этого вытекает второе важное обстоятельство: нельзя скрыть дальность постановщика с помощью помех, создаваемых им самим.

При перестройке частоты РЛС от импульса к импульсу эффективны заградительные по частоте помехи; у заградительных помех ширина спектра должна быть не меньше полосы перестройки частоты РЛС. Однако это увеличение эффективности помехи достигается ценой значительного увеличения мощности передатчика помех.

*Возможна селекция импульсных сигналов по частоте повторения*. Она включает в себя линию задержки на период следования  $T_n = 1/F_n$  и схему совпадения. Подобные схемы эффективны при борьбе, например, с хаотическими импульсными помехами.

Для повышения помехоустойчивости может быть использована также *селекция импульсов по длительности*.

При различии амплитуд сигналов и помех может быть использована *амплитудная селекция импульсов*.

Для борьбы с помехами находит применение *также селекция сигналов по времени их прихода*. Так, например, в импульсных РЛС применяется стробирование приемника следящими импульсами дальномера. При этом приемник, все время запертый, отпирается только на время прихода сигналов сопровождаемой цели.

При попадании помех в приемный тракт РЛС очень опасной является *перегрузка* усилительных и преобразовательных каскадов, а также индикаторных приборов. Если помеха вызывает перегрузку какого-либо каскада, то даже при большом превышении по напряжению помехи сигналом выделить сигнал во многих случаях окажется невозможным. Для борьбы с

перегрузками используются два пути. Это применение, во-первых, усилителей с логарифмической амплитудной характеристикой

$$U_{\text{вых}} = k \ln a U_{\text{вх}}, \quad (112)$$

где  $k$  и  $a$  – коэффициенты пропорциональности, и, во-вторых, различного рода быстродействующие автоматические регулировки усиления (БАРУ), мгновенная автоматическая регулировка усиления (МАРУ), временная автоматическая регулировка усиления (ВАРУ).

При борьбе с искусственно создаваемыми помехами большое значение имеет возможность изменять параметры РЛС во время работы, приспособляясь к конкретно существующим условиям. Так, например, в секторах сильного воздействия непрерывных шумовых помех имеет смысл уменьшить скорость обзора или даже остановить луч РЛС, что позволит существенно увеличить отношение сигнал/помеха и снизить тем самым эффективность помехи. В ряде ситуаций при воздействии помех целесообразно изменять вид излученного сигнала (например, расширить его спектр путем введения внутриимпульсной частотной модуляции), деформировать диаграмму направленности антенны (например, для исключения проникновения помехи по боковым лепесткам) и т. д.

В отличие от помех радиолокационным системам, активные помехи радиолиниям управления и связи позволяют полностью решить задачу радиопротиводействия. Действительно, если в контуре наведения зенитной управляемой ракеты задействована радиолиния командного управления, то ее подавление ведет к полному срыву наведения, тогда как при создании помех РЛС имеется возможность определения по крайней мере угловых координат источника помехи. В этом случае возможно наведение ракеты на источник помехи.

Радиолиниям управления и связи могут создаваться помехи двух видов: шумовые и хаотические импульсные помехи (ХИП), имитационные помехи.

Первый вид помех предназначен для маскировки команд управления. Второй вид помех представляет собой помеховый сигнал, аналогичный полезному сигналу, но несущий ложную информацию. Иногда эти помехи называют *диверсионными*.

Общее уравнение радиопротиводействия для радиолиний связи и управления имеет вид:

$$K_n = \frac{P_n}{P_c} = \frac{P_n G_n}{P_c G_c} \left( \frac{D_c}{D_n} \right)^2 F^2(\Theta, \Phi) \gamma_n \frac{\Delta f_{np}}{\Delta F_n}, \quad (113)$$

где  $P_c$  – мощность передающего устройства радиолинии;  $G_c$  – коэффициент направленного действия передающей антенны радиолинии;  $D_c$  – расстояние между передающим и приемным устройствами;  $P_n$  – мощность передатчика помех;  $G_n$  – коэффициент направленного действия передатчика помех;  $D_n$  –

дальность между передатчиком помех и приемным устройством;  $F^2(\Theta, \Phi)$  – нормированная диаграмма направленности антенны приемного устройства;  $\gamma_n$  – коэффициент, учитывающий различия в поляризации антенны передатчика помех и приемника радиолинии;  $\Delta f_{np}$  – полоса пропускания приемника;  $\Delta F_n$  – ширина спектра помехи.

Уравнение радиопротиводействия для линий связи и управления не изменится, если цель и постановщик помех совмещены в пространстве (т. е. передатчик помех работает на борту прикрываемого объекта на самоприкрытие).

### Задачи

8.1. Коэффициент усиления антенны РЛС увеличили на 4 дБ. Определить, как изменится отношение мощности сигнала к мощности помехи на входе приемника РЛС?

8.2. Дальность от РЛС до цели с совмещенным передатчиком помех уменьшилась в 4 раза. Определить, как изменится отношение мощности сигнала к мощности помехи на входе приемника РЛС?

8.3. Потенциал радиолокационной станции возрос в 10 раз. Как изменится при этом минимальное расстояние между РЛС и целью, при котором еще осуществляется ее подавление?

8.4. При неизменных характеристиках антенн РЛС и системы РЭБ и мощностях излучения рабочая длина волны уменьшается в 2 раза. Определить, как изменится отношение мощности сигнала к мощности помехи на входе приёмника РЛС, если в обоих случаях используется оптимальная полоса пропускания приемника?

8.5. Как изменится отношение сигнал/помеха на входе приемника РЛС, если при прочих равных условиях длительность зондирующего импульса уменьшилась в 5 раз? Полоса пропускания приемника РЛС согласована с соответствующей длительностью импульса. Система РЭБ совмещена с целью и формирует заградительную широкополосную помеху с равномерной спектральной плотностью мощности.

8.6. Источник помех обеспечивает создание заградительной шумовой помехи с равномерной спектральной плотностью мощности в полосе частот 10 МГц. Во сколько раз изменится спектральная плотность мощности шумовой помехи и дальность действия передатчика помех, если помеху создавать в полосе 5 МГц при той же мощности передатчика?

8.7. Требуемый для нормальной работы РЛС коэффициент различимости равен 2. Самолет с совмещенным передатчиком помех находится на расстоянии 100 км от РЛС. При этом отношение сигнал/помеха на входе приемника равно 0,5. Определить, на какой дальности будет обнаружен самолет?

8.8. Чему равно максимальное число накапливаемых при обнаружении цели импульсов, если луч РЛС остановлен, цель движется на РЛС со скоростью  $v_c$ , частота повторения зондирующих импульсов  $F_n$ ?

8.9. Определить дальность обнаружения самолета с передатчиком помех, если импульсная мощность передатчика РЛС 500 кВт, мощность передатчика помех 100 Вт, коэффициент усиления антенны РЛС 1000, коэффициент усиления антенны системы РЭБ 100, ЭПР цели  $50 \text{ м}^2$ , допустимое отношение мощности сигнала к мощности помехи равно 0,5. Передатчик помех излучает прицельную по частоте помеху.

8.10. Определить дальность обнаружения самолета с ЭПР  $10 \text{ м}^2$  РЛС со следующими характеристиками: импульсная мощность передатчика 100 кВт, коэффициент усиления антенны 4000, длительность импульса 0,2 мкс. Самолет прикрывается заградительной шумовой помехой спектральной плотностью мощности 10 Вт/МГц. Коэффициент усиления антенны передатчика помех равен 5. Обнаружение происходит при соотношении сигнал/помеха не менее 2.

8.11. Будет ли наблюдаться цель с ЭПР  $10 \text{ м}^2$ , находящаяся на дальности 20 км на индикаторе РЛС, если она прикрывается заградительной помехой в полосе частот 1000 МГц? Мощность передатчика помех 1 кВт, коэффициент усиления антенны передатчика помех равен 1. Характеристики РЛС: мощность передатчика 500 кВт, коэффициент усиления антенны 1500, длительность зондирующего импульса 0,5 мкс. Обнаружение цели происходит при соотношении сигнал/помеха не менее 2.

8.12. В направлении РЛС приближаются два самолета: В2 с ЭПР  $0,1 \text{ м}^2$  и F16 с ЭПР  $6 \text{ м}^2$  под прикрытием помехи из зоны барражирования со следующими характеристиками: мощность передатчика помех 100 Вт, коэффициент усиления антенны 2, дальность до постановщика помех 100 км. Помеха вводится в приемник РЛС через боковой лепесток ДНА с уровнем минус 18 дБ от максимального. На какой дальности будут обнаружены цели, если обнаружение производится РЛС со следующими характеристиками: мощность передатчика 1000 кВт, коэффициент усиления антенны 5000, требуемый коэффициент различимости не менее 2.

8.13. Будет ли РЛС наблюдать самолет с ЭПР  $5 \text{ м}^2$ , находящийся на дальности 20 км, если он приближается под прикрытием заградительной помехи из зоны барражирования. Дальность до помехопостановщика составляет 100 км. Помеха вводится через первый боковой лепесток ДНА РЛС. Характеристики РЛС: мощность передатчика РЛС 70 кВт, коэффициент усиления антенны 2000, уровень первого бокового лепестка минус 15 дБ, длительность зондирующего импульса 0,25 мкс, коэффициент подавления РЛС равен 2. Характеристики системы РЭБ: мощность передатчика помех 100 Вт, коэффициент усиления антенны 0,5, полоса помехи 100 МГц.

8.14. Две РЛС кругового обзора, находящиеся на дальности 200 км друг от друга, имеют дальности обнаружения 160 км каждая по цели с

ЭПР, равной  $1 \text{ м}^2$ . Определить зону невидимости самолета В2, имеющего ЭПР  $0,1 \text{ м}^2$  и ставящего помеху самоприкрытия, уменьшающую отношение сигнал/помеха на входе приемника РЛС в 3 раза.

8.15. В схеме защиты РЛС от несинхронных импульсных помех (НИП) время задержки импульсов увеличилось на время, равное половине длительности импульсов РЛС. Объяснить, какие изменения произойдут с импульсами на выходе данной схемы (см. рис. 31)?

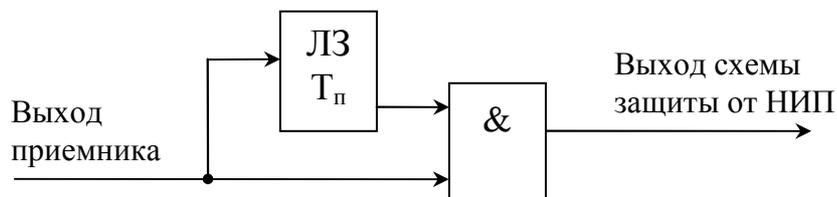


Рис. 31. Функциональная схема защиты от несинхронных импульсных помех

8.16. В схеме защиты РЛС от несинхронных импульсных помех задержка импульсов увеличена на период повторения зондирующих импульсов. Что произойдет с отметкой от цели на индикаторе РЛС?

8.17. На выходе разведывательного приемника системы РЭБ принимаются сигналы двух РЛС, имеющих огибающие сигналов на видеочастоте, изображенные на рисунке 32. Какой РЛС необходимо поставить помеху в первую очередь и почему? Какой тип помехи целесообразно применить?

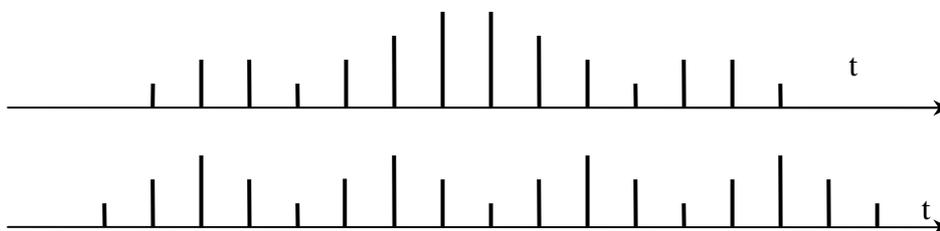


Рис. 32. Сигналы РЛС на видеочастоте на выходе разведывательного приемника системы РЭБ

8.18. Определить спектральную плотность мощности шумовой, прицельной по частоте помехи, если передатчик помех имеет мощность 50 Вт, а сигнал на выходе разведывательного приемника системы РЭБ имеет вид, изображенный на рисунке 33.

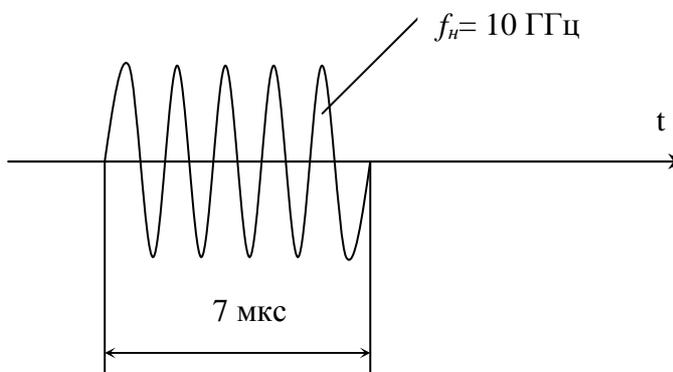


Рис. 33. Сигнал РЛС на выходе разведывательного приемника системы РЭБ

8.19. Какова должна быть мощность передатчика помех, чтобы вывести из строя входные цепи РЛС измерения скорости автотранспорта на дальности 200 м? Характеристики РЛС: максимально допустимая входная мощность сигнала  $10^{-4}$  Вт, коэффициент усиления антенны 3. Коэффициент усиления антенны системы помехопостановки равен 7.

8.20. Радиовзрыватель приводится в действие передатчиком мощностью 0,1 Вт. Полоса пропускания приемника радиовзрывателя составляет 25 кГц. Требуемый коэффициент различимости равен 2. На какой дальности будет эффективно подавляться приемник радиовзрывателя, если сигнал передатчика передается с дальности 10 км, 200 м? Характеристики системы помехопостановки: полоса помехи 500 кГц, мощность передатчика помех 10 Вт.

8.21. Какой мощностью должен быть передатчик помех для подавления радиостанции «Свобода», имеющей мощность передатчика 100 кВт и вещающей с дальности 2000 км, чтобы заглушить ее сигнал в области радиусом 500 км? Коэффициент подавления должен быть не менее 3.

8.22. Как будет выглядеть экран индикатора кругового обзора РЛС при применении многократных ответных детерминированных импульсных помех?

8.23. Имеются две радиолокационные станции с идентичными техническими характеристиками. Их различие состоит в том, что коэффициент усиления приемника одной РЛС зафиксирован применительно к условиям обнаружения цели на максимальной дальности действия, а в приемнике другой применена временная автоматическая регулировка усиления (ВАРУ) с тем же максимальным усилением (система ВАРУ обеспечивает изменение коэффициента усиления приемника  $K_{yc}$  приблизительно пропорционально квадрату времени после излучения каждого зондирующего импульса РЛС:  $K_{yc}=at^2$ ). В чем состоит различие эффекта воздействия на указанные РЛС непрерывных шумовых помех?

8.24. На импульсную РЛС воздействует многократная ответная помеха; в ответ на каждый облучающий импульс РЛС создается серия высокочастотных импульсов помехи, имеющих постоянную амплитуду, длительность, частоту повторения и несущую частоту. Каковы возможные пути защиты от такой помехи?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чердынцев, В. А. Радиотехнические системы/В. А. Чердынцев. – Минск: Вышэйшая школа, 1988.
2. Радиотехнические системы: [учеб. для вузов по спец. «Радиотехника»/Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов и др.]; под ред. Ю. М. Казаринова. – М.: Высшая школа, 1990. – 495 с.: ил.
3. Бакулев П. А. Методы и устройства селекции движущихся целей / П. А. Бакулев, В. М. Степин. – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с.: ил.
4. Вакин С. А. Основы радиопротиводействия и радиотехнической разведки/ С. А. Вакин, Л. Н. Шустов. – М.: Советское радио, 1968. – 448 с.: ил.
5. Защита от радиопомех/ под ред. Максимова М. В. – М.: Советское радио, 1976. – 496 с.: ил.
6. Васин В. В. Справочник-задачник по радиолокации/ В. В. Васин, Б. М. Степанов. – М.: Советское радио, 1977. – 320 с.: ил.

Учебное издание

Гульшин Владимир Александрович  
Садомовский Александр Савинович

**Задачник по радиолокации**

Редактор Н. А. Евдокимова

Подписано в печать 30.05.2006. Формат 60x84/16. Бумага тип.№1.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 3,56. Уч. – изд. л. 3,00. Тираж 100 экз.  
Заказ .

Ульяновский государственный технический университет  
432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.

Типография УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.