

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра радиотехнических систем

***ИССЛЕДОВАНИЕ СЛЕДЯЩИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ  
НАПРАВЛЕНИЯ***

Методическое руководство  
к лабораторной работе  
по курсу «Системы радиолокации»  
для студентов специальностей «Радиотехника», «Радиоэлектронные  
системы» и «Радиоэлектронная защита информации»  
дневной формы обучения

Минск 2006

УДК 621.396.96 (075.8)  
ББК 32.95 я 73  
И 85

Составитель : Е. В. Кереселидзе

**Исследование** следящих измерителей направления: Метод. руководство к лабораторной работе по курсу «Системы радиолокации» для студ. спец. «Радиотехника», «Радиоэлектронные системы» и « Радиоэлектронная защита информации» дневн. формы обуч. / Сост. Е. В. Кереселидзе. — Мн. : БГУИР, 2006. — 23 с. : ил.

В методическом руководстве дана классификация методов пеленга и кратко изложены основные принципы построения следящих измерителей направления. Приведены функциональные схемы измерителей, использующих различные методы пеленга и диаграммы сигналов, поясняющих их работу. Даются рекомендации по выполнению лабораторной работы, требования к содержанию отчета и контрольные вопросы.

Предназначено для студентов вузов радиотехнических специальностей.

**УДК 621.396.96 (075.8)**  
**ББК 32.95 я 73**

## СОДЕРЖАНИЕ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ.....	4
1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ПЕЛЕНГА .....	4
2. ОДНОКАНАЛЬНЫЙ СЛЕДЯЩИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ НАПРАВЛЕНИЯ С КОНИЧЕСКИМ СКАНИРОВАНИЕМ .....	5
3. МОНОИМПУЛЬСНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ .....	15
4. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИРУЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ .....	21
5. ЗАДАНИЯ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ.....	22
6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА.....	22
7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	22
ЛИТЕРАТУРА .....	22

Библиотека БГУИР

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение методов измерения угловых координат, исследование пеленгационных характеристик угломерных систем.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ПЕЛЕНГА

Измерение угловых координат целей является одной из важнейших функций, выполняемых РЛС различного назначения. Измеряемые угловые координаты цели закодированы в углах прихода к антенне РЛС отраженного сигнала. От углового рассогласования между направлением прихода отраженного сигнала и направлением диаграммы направленности приемной антенны могут зависеть как амплитуда, так и фаза принимаемого сигнала [2].

Вид этой зависимости определяется структурой антенной системы, т.е. методом угловой пеленгации, примененным в угломере. Поэтому структура оптимальных угломерных систем будет существенно зависеть от метода угловой пеленгации. На рис. 1 представлены применяемые методы пеленга.

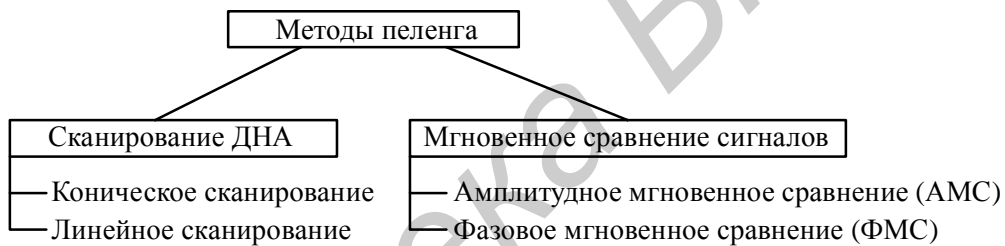


Рис. 1. Классификация методов пеленга

Задачей следящего измерителя направления (СИН) является непрерывное совмещение опорного направления антенны измерителя с направлением прихода волны, т.е. на объект слежения. Таким образом, СИН имеет два канала, осуществляющих слежение по азимуту и по углу места.

Каждый канал содержит угловой дискриминатор, экстраполятор и синтезатор поворота, образующие замкнутую следящую систему. Угловой дискриминатор вырабатывает сигнал, пропорциональный рассогласованию между направлением на объект и опорным направлением. Экстраполятор преобразует сигнал рассогласования, обеспечивая требуемое управление синтезатором поворота, совмещающим опорное направление с направлением на объект.

Поворот опорной оси может осуществляться непосредственно поворотом антенной системы или ее элементов с помощью электродвигателя, являющегося в этом случае синтезатором поворота и одновременно последним, а иногда и единственным интегратором в схеме экстраполятора.

Автоматические следящие измерители направления нашли широкое применение в радиолокационных станциях орудийной наводки, самолетных станциях перехвата и прицеливания, в радиолокационных устройствах наведения и самонаведения управляемых снарядов и т. п.

## 2. ОДНОКАНАЛЬНЫЙ СЛЕДЯЩИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ НАПРАВЛЕНИЯ С КОНИЧЕСКИМ СКАНИРОВАНИЕМ

Наиболее просто пояснить принцип действия одноканальной системы сопровождения на примере системы с переключением луча. Луч скачком занимает положение I или II (рис. 2, а). Когда излучающий источник расположен на равносигнальном направлении (РСН), принятые сигналы оказываются равными по амплитуде. При смещении источника излучения в одну сторону от этого направления, например вверх, сигнал, принимаемый по лучу I, будет больше, чем по лучу II. При смещении вниз, наоборот, – по лучу II больше, чем по лучу I. Таким образом сравнение амплитуд указывает величину углового смещения от РСН и, что самое важное для систем сопровождения, направление этого смещения. Переключение луча позволяет определить направление отклонения источника излучения от РСН теоретически по каждой паре импульсов [4].

Зависимость сигнала ошибки на выходе приемника от угла рассогласования  $\Delta\alpha$  между РСН и направлением прихода отраженного сигнала называется пеленгационной характеристикой. Пеленгационная характеристика системы с переключением луча представлена на рис. 2б. Она определяется как разность сигналов принятых по первому и второму лучу. Однако, несмотря на простоту метода, в связи с необходимостью быстрого переключения антенного луча, возникает множество технических проблем. Кроме того, метод переключения луча в простейшей форме обеспечивает определение направления источника излучения от РСН только в одной плоскости. Определение направлений в двух плоскостях связано с переключением луча в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

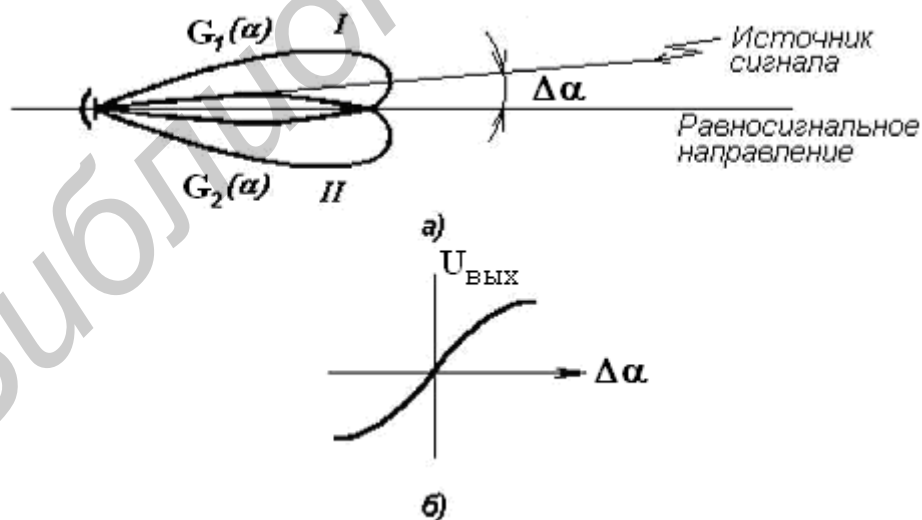


Рис. 2. Формирование равносигнального направления в системе с переключением диаграммы направленности:

- а) пространственное представление;
- б) пеленгационная характеристика.

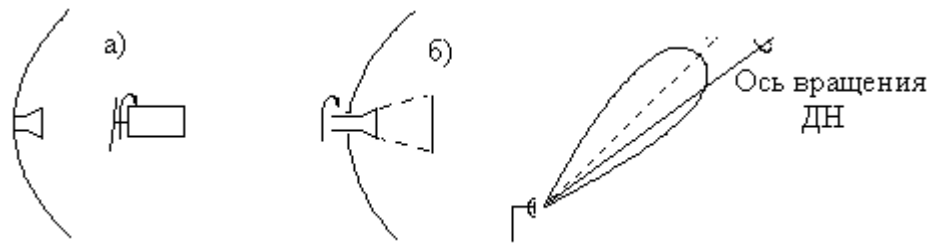


Рис. 3. Методы вращения диаграммы направленности: а) путем вращения наклонного зеркала; б) путем вращения облучателя относительно раскрыва антенны;

Технически наиболее просто направление отклонения цели от РСН в двух плоскостях определяется при использовании метода конического сканирования.

При этом ось диаграммы направленности антенны (ОДН) смещена относительно продольной оси за счет смещения облучателя из фокуса зеркала либо за счет смещения зеркала относительно облучателя (рис. 3). Первый способ конструктивно легче выполняется и потому он более распространен. При вращении облучателя (в первом случае) или антенны (во втором) ось радиолуча описывает в пространстве коническую поверхность. Движением облучателя в процессе сканирования луча антенны может быть как вращение, так и нутация. При вращении облучатель вращается в соответствии с перемещением по окружности, вследствие чего плоскость поляризации также вращается. При нутации облучателя плоскость поляризации не вращается. Движение облучателя подобно

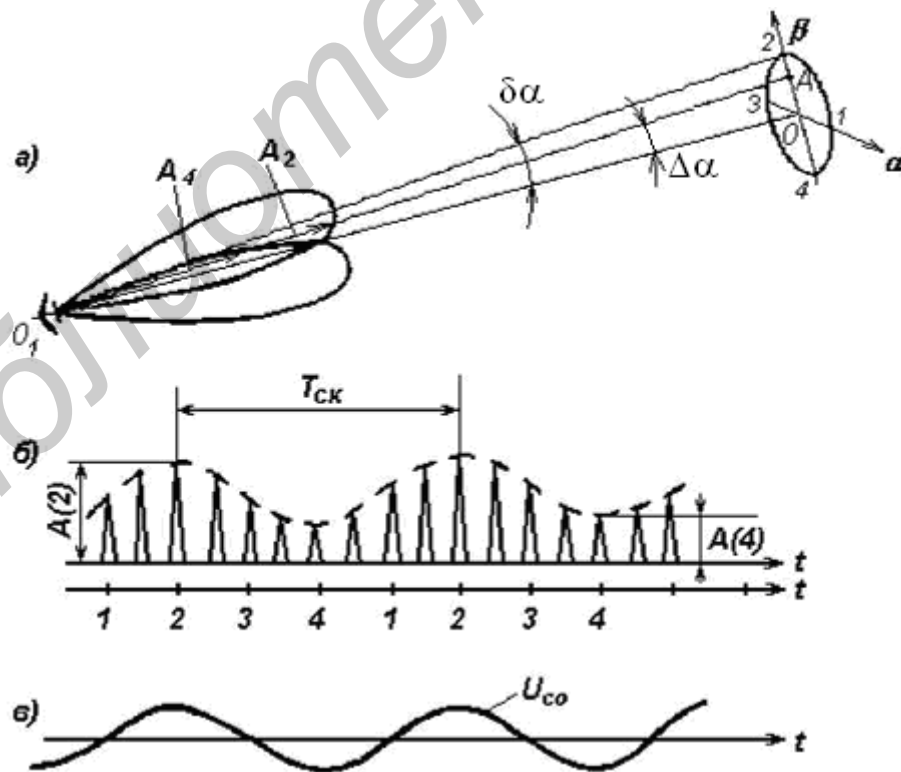


Рис. 4. Формирование сигнала ошибки при методе конического сканирования

круговому перемещению руки.

В пределах ширины диаграммы направленности имеется направление, совпадающее с осью вращения, на котором интенсивность излучаемого и принимаемого сигналов при вращении антенного луча не меняется. Это направление называется равносигнальным. Если цель расположена на равносигнальном направлении, то отраженный сигнал, принятый РЛС, будет состоять из последовательности импульсов одинаковой величины.

Если цель расположена под некоторым углом относительно оси вращения, то отраженные импульсы модулируются по амплитуде с частотой вращения антенны, причем глубина модуляции пропорциональна величине углового смещения цели относительно равносигнального направления, а фаза огибающей определяется направлением смещения цели в пространстве относительно некоторого направления, принятого за начало отсчета.

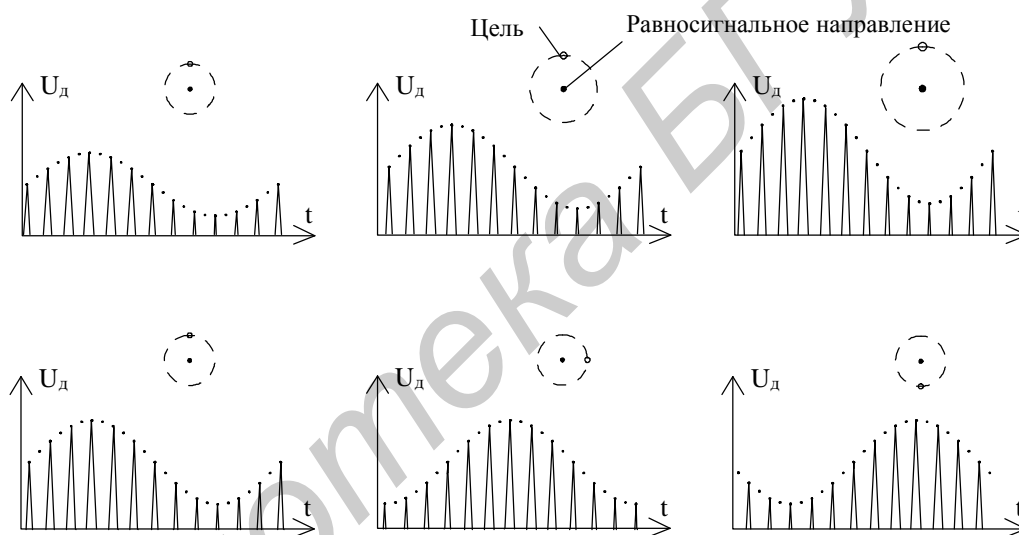


Рис. 5. Временные диаграммы сигналов на выходе детектора при различных положениях цели относительно РСН

На рис. 5 показаны временные диаграммы сигналов на выходе детектора приемника при различных положениях цели относительно равносигнальной зоны [3]. На верхних графиках показано изменение амплитуды принятых сигналов за один период вращения при различном отклонении цели от равносигнальной зоны. Нижние графики характеризуют изменение фазы огибающей при одинаковом отклонении цели от оси вращения, но для ее различных пространственных положений. Графики показывают, что амплитуда огибающей характеризует величину отклонения цели, а фаза – направление этого отклонения.

Рассмотрим автоматическое сопровождение цели радиолокатором [4]. Диаграмма направленности быстро вращается вокруг оси  $00_1$  (рис. 4, а). Максимум диаграммы отклонён от оси вращения на угол  $\delta\alpha$ , поэтому он вращается по окружности 1–2–3–4. Ось диаграммы описывает

коническую поверхность. Сигналы, отражённые от цели, находящейся в точке А внутри конуса сопровождения, оказываются модулированными по амплитуде. В момент, когда ось антенны направлена в точку 2 (рис. 4), сигнал от цели А(2) – максимален, в момент 4 – сигнал А(4) – минимален. Амплитуда сигналов определяется длиной векторов  $A_2$  и  $A_4$ . Модулированные по амплитуде импульсы с выхода детектора показаны на рис. 4 б. Период модуляции  $T_{ск}$  определяется интервалом времени, в течение которого антенна совершит один оборот по окружности 1–2–3–4. Глубина модуляции пропорциональна величине отклонения цели от оси вращения антенны. Модулирующая кривая показана отдельно на рис. 4 в. При небольших отклонениях цели относительно оси ( $\alpha < \delta\alpha$ ) модулирующая кривая близка к синусоиде. Её называют сигналом ошибки, так как содержащаяся в амплитуде и фазе информация позволяет доворачивать ось антенны (ось конуса сопровождения) так, чтобы свести эту ошибку к нулю, то есть совместить ось антенны с направлением на цель.

Напряжение огибающей может использоваться для управления антенной системой и автоматического совмещения оси вращения с направлением на цель. Так как в общем случае цель относительно равносигнальной зоны может быть смещена и по углу места, и по азимуту, то автоматическое сопровождение должно осуществляться с помощью двух следящих систем, одна из которых осуществляет сопровождение в вертикальной, а другая в горизонтальной плоскостях.

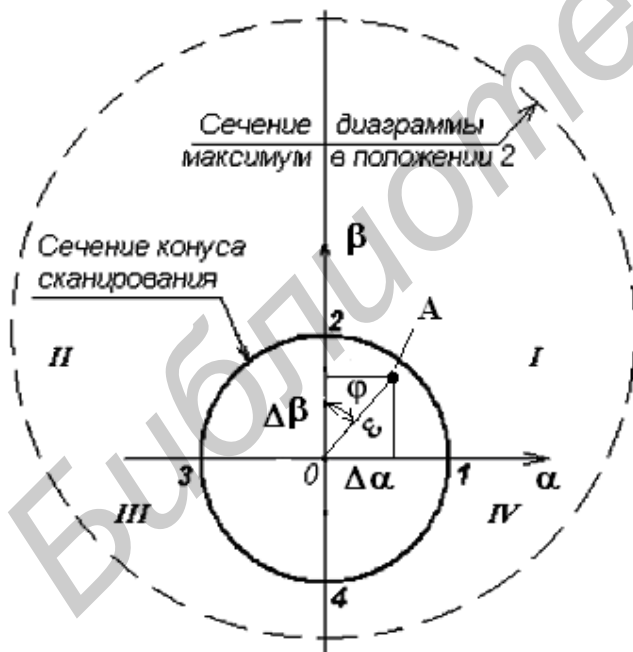


Рис. 6. Сечение конуса сопровождения плоскостью, совпадающей с системой координат  $(\alpha, \beta)$ ;

Рассмотрим образование сигнала ошибки подробнее. На рис. 6 показано сечение конуса сопровождения плоскостью, совпадающей с системой координат  $(\alpha, \beta)$  (окружность 1–2–3–4). Максимум диаграммы совершает быстрое вращение по окружности, проходя через направления точек 1,2,3,4. Пунктиром на рисунке показано сечение диаграммы для случая, когда её ось совпадает с направлением 2. Если на этом направлении находится цель, то принимаемый от неё сигнал будет максимально возможным. Для любого другого положения цели внутри конуса (круга) при

данном положении диаграммы принимаемый сигнал будет меньше. Точнее, величина сигнала будет тем меньше, чем больше будет расстояние от точки, определяющей положение максимума диаграммы в данный мо-



мент, до точки, определяющей направление цели. Например, для цели А глубина модуляции сигнала будет определяться расстоянием  $OA$  ( $\varepsilon$ ), а начальная фаза углом  $\varphi$ , если за опорное направление выбрано направление 2.

Таким образом, существует однозначная связь между положениями максимумов (минимумов) огибающей на временной оси по отношению к опорным точкам 1,2,3,4 и направлением рассогласования цели на плоскости  $\alpha, \beta$ .

Следящий измеритель направления с коническим сканированием включает в себя антенну с приводом вращения луча, приемник выдающий нормированную огибающую  $U_{co}(t)$ , каналы управления поворотом антенны по азимуту и углу места и схему разложения напряжений рассогласования  $U_{co}(t)$  на две составляющие. Под воздействием сигналов рассогласования  $U_\alpha$  и  $U_\beta$  привод антенны совмещает ось вращения диаграммы направленности (опорное направление) с направлением на цель.

Приемник открывается следящим импульсом системы автосопровождения по дальности (АСД) только для сигнала отслеживаемой цели, который нормируется с помощью схемы АРУ. В импульсных системах детектор огибающей (пиковый детектор) из последовательности импульсов с амплитудами  $U_m(t)$  выделяет первую гармонику огибающей  $U_{co}(t)$ . Высшие гармоники подавляются в пиковом детекторе с помощью цепи отрицательной обратной связи, в которую включен режекторный фильтр, настроенный на первую гармонику.

Закон модуляции амплитуды сигнала ошибки при малых отклонениях цели  $\varepsilon$  от оси вращения близок к гармоническому:

$$U_m(t) \approx U_{m0} [1 + m \cos(\Omega t - \varphi)].$$

Глубина модуляции  $m$  практически линейно зависит от угла отклонения, а фаза огибающей  $\varphi$  соответствует направлению отклонения цели от оси вращения. Таким образом, нормированная огибающая

$$U_{co}(t) = m \cos(\Omega t - \varphi)$$

определяет направление приема и может служить в качестве напряжения рассогласования. Параметры  $m$  и  $\varphi$  огибающей  $U_{co}(t)$  однозначно указывают направление прихода сигнала цели в полярной системе координат  $\varepsilon, \varphi$ . Для перехода от координат  $\varepsilon$  и  $\varphi$  к азимуту  $\Delta\alpha = \varepsilon \cdot \sin \varphi$  и углу места  $\Delta\beta = \varepsilon \cdot \cos \varphi$  сигнал рассогласования  $U_{co}(t) = m \cos(\Omega t - \varphi)$  подают на амплитудно-фазовые различители (АФР) азимута и угла места. Опорные напряжения амплитудно-фазовых различителей  $U_{0\alpha} = \sin \Omega t$ , ( $U_{0\beta} = \cos \Omega t$ ) вырабатываются генератором опорных напряжений (ГОН) (например, сельсин-трансформатором), механически связанным с приводом вращения диаграммы направленности.

Действие амплитудно-фазового различителя эквивалентно перемножению входных сигналов и выделению постоянной составляющей произведения. В результате перемножения сигнала  $U_{co}(t)$  с  $U_{0\alpha}(t)$  и  $U_{0\beta}(t)$  получают напряжения

$$m \cos(\Omega t - \varphi) \cdot \sin \Omega t = 0,5(m \sin \varphi + m \sin (2\Omega t - \varphi))$$

$$m \cos(\Omega t - \varphi) \cdot \cos \Omega t = 0,5(m \cos \varphi + m \cos (2\Omega t - \varphi))$$

после фильтрации которых выделяют постоянные составляющие

$$U_{\alpha} = 0,5 m \cdot \sin \varphi \sim \varepsilon \cdot \sin \varphi = \Delta \alpha$$

$$U_{\beta} = 0,5 m \cdot \cos \varphi \sim \varepsilon \cdot \cos \varphi = \Delta \beta$$

которые и являются сигналами рассогласования по азимуту и углу места соответственно.

Обычно в результате усиления и ограничения опорным напряжениям придают вид прямоугольных колебаний, а амплитудно-фазовый различитель выполняют в виде четырех коммутируемых этими напряжениями усилительных каскадов. Напряжение рассогласования  $U_{co}(t)$  подается на входы каскадов, а с низкочастотных фильтров выходных цепей снимаются сигналы рассогласования по азимуту и углу места.

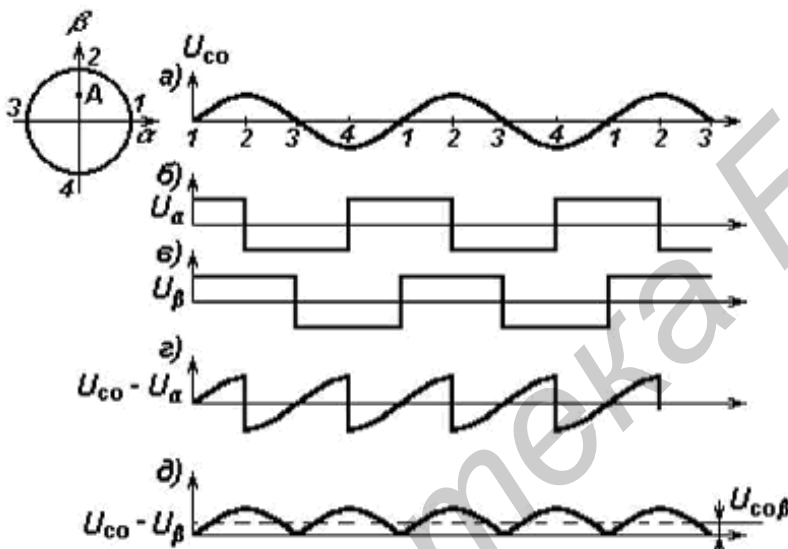


Рис. 7. Временные диаграммы сигнала ошибки для случая, когда цель отклонена от РСН строго вверх

Временные диаграммы на рис. 7 иллюстрируют выделение сигнала ошибки для случая, когда цель отклонена от РСН строго вверх, максимум напряжения  $U_{co}$  наблюдается в точке 2. Умножение на прямоугольные опорные напряжения эквивалентно стробированию с изменением полярности сигнала ошибки на участках, где опорное напряжение отрицательно.

Как видно из рис. 7, постоянная составляющая сигнала ошибки по углу места положительна, а по азимуту ошибка равна нулю.

На рис. 8 и 9 изображены упрощённая функциональная схема станции с коническим сканированием луча и временные диаграммы, поясняющие работу системы. Синхронизатор запускает передатчик, развёртку индикатора и схему автоматического сопровождения по дальности (АСД).

Импульсы передатчика через антенный переключатель (АП) передаются в антенну и излучаются. Облучатель смещён относительно фокуса параболоида и вращается с помощью мотора конического сканирования, поэтому диаграмма направленности смещена относительно оси параболоида и совершает коническое вращение вокруг этой оси.

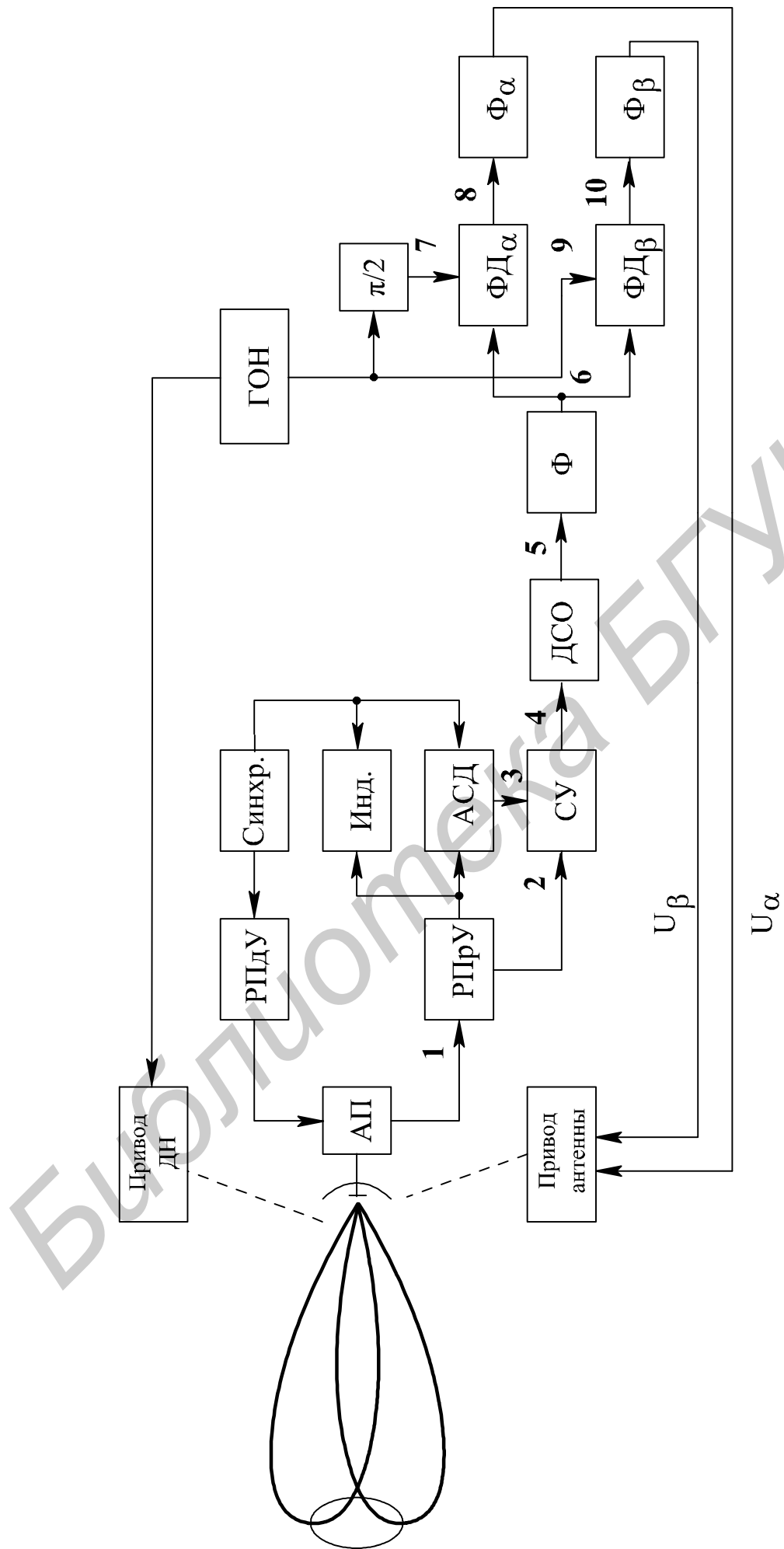


Рис. 8. Функциональная схема станции сопровождения с коническим сканированием луча

Отражённые импульсы, модулированные частотой вращения при излучении, модулируются при приёме еще раз, и через АП поступают на приёмник

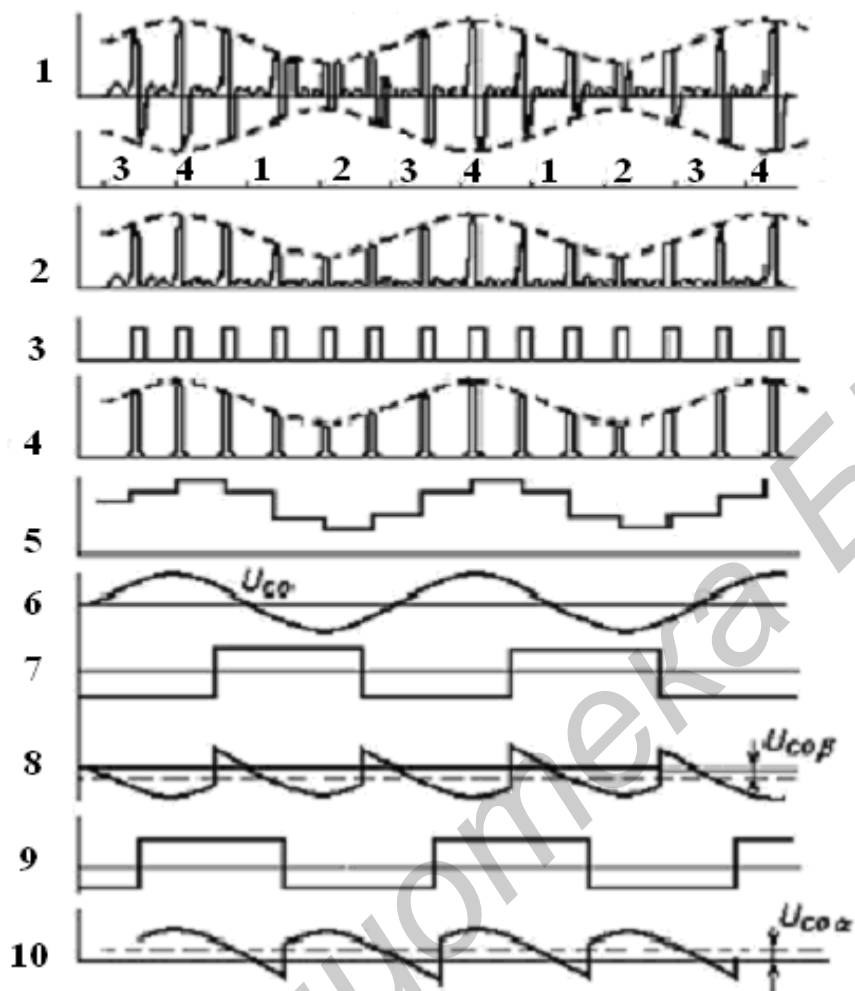
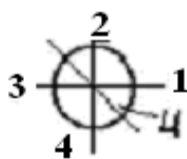


Рис. 9. Временные диаграммы сигналов, поясняющие работу станции сопровождения с коническим сканированием луча

(диаграмма 1), где усиливаются и детектируются (2). Импульсы (3) поступают на второй вход селекторного усилителя (СУ), выделяя на дистанции цель, выбранную АСД для сопровождения (4). (Целей в конусе сканирования может находиться несколько). Модулированные импульсы с выхода СУ подаются на детектор сигнала ошибки – ДСО (пиковый детектор), где выделяется огибающая (5).

После фильтра (Ф) сигнал ошибки сглаживается (6) и подаётся на фазовые детекторы (ФД) азимута и угла места, на другие входы подаются опорные напряжения (7,9) от генератора опорных напряжений (ГОН), связанного с мото-

ром конического обзора. Опорные напряжения являются прямоугольными разнополярными импульсами, отличающимися от функций  $\cos \Omega t$  и  $\sin \Omega t$ . Это упрощает реализацию фазовых детекторов, хотя и приводит к появлению на их выходах дополнительных гармоник частоты сканирования. Напряжения с выходов фазовых детекторов сглаживаются в фильтрах  $\Phi_\alpha$  и  $\Phi_\beta$ , при этом сглаживаются гармоники частоты сканирования и уменьшаются флуктуации. На выходе фильтров формируются сигналы ошибки  $U_\alpha$  и  $U_\beta$ . Данные сигналы являются управляющими для антенного привода, моторы которого, являясь интеграторами ошибки, управляют механизмом поворота антенны. Поворот заканчивается, когда равносигнальное направление совместится с целью и сигналы ошибок будут равны нулю.

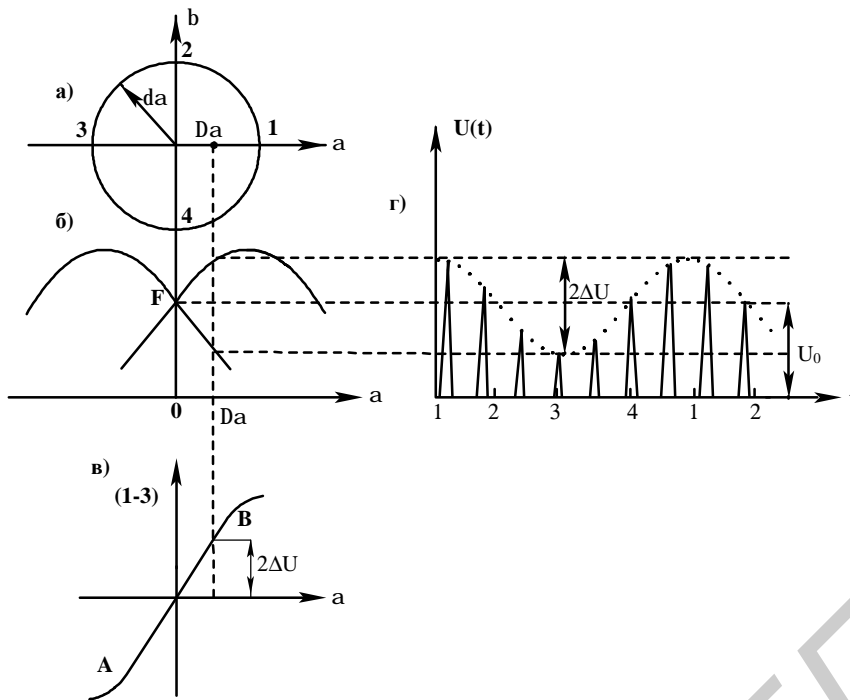


Рис. 10. Диаграммы, поясняющие влияние ДНА на величину сигнала ошибки и форму пеленгационной характеристики

**Выбор ширины конуса сопровождения.** На рис. 10, а цель находится внутри конуса сопровождения и отклонена от РСН вправо на угол  $\Delta\alpha$ . Максимальная величина сигнала принимается в момент 1, минимальная — в момент 3. Сечения диаграммы плоскостью, проходящей через ось РСН и ось  $\alpha$  в моменты 1 и 3, показаны на рис. 10, б в декартовой системе координат.

Величина сигнала ошибки  $2\Delta U$  (рис. 10, в, г) может быть найдена по характеристике углового различителя (пеленгационной характеристике), полученной вычитанием сечений 1 и 3. Участок АВ разностной кривой определяет чувствительность системы к ошибкам сопровождения. Чувствительность тем лучше, чем выше крутизна этого участка. Величина

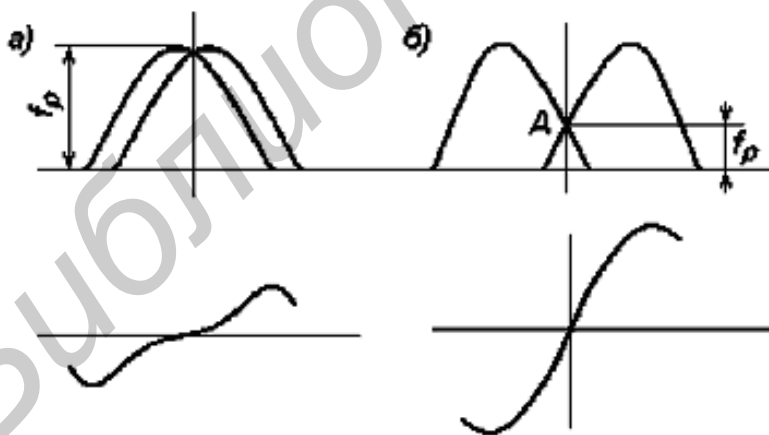


Рис. 11. Диаграммы, поясняющие влияние угла сканирования на крутизну пеленгационной характеристики

$$K_{\alpha} = \left. \frac{dU_{co}(\Delta\alpha)}{d\Delta\alpha} \right|_{\Delta\alpha=0}$$

называется крутизной пеленгационной (дискриминационной) характеристики, которая является важнейшим параметром любой следящей системы. При малых углах конуса  $\delta\alpha$

кривые (рис. 11, а) пересекаются в окрестностях максимумов, где крутизна мала, поэтому мала крутизна характеристики углового различителя. С увеличением угла  $\delta\alpha$  крутизна характеристики углового различителя

увеличивается (рис. 11, б). Однако слишком большой ширины конуса сканирования выбирать нельзя. При больших углах  $\delta\alpha$  уменьшается уровень сигнала от цели, находящейся вблизи РСН. Точка А (рис. 11, б) является важнейшей на характеристике, так как в режиме слежения цель удерживается вблизи её. При этом при увеличении угла  $\delta\alpha$  в значительной степени уменьшается отношение сигнала ошибки к величине флуктуации на выходе детектора приёмника (детектор является нелинейным элементом).

Обычно ширину конуса сканирования выбирают примерно равной ширине диаграммы направленности  $2\delta\alpha \approx \theta_\alpha$ , где  $\theta_\alpha$  – ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности.

**Выбор частоты сканирования луча.** Частота сканирования равна числу оборотов луча (по конусу) за одну секунду. Максимально возможное её значение ограничивается частотой повторения импульсов радиолокатора. Для качественного выделения огибающей сигнала ошибки необходимо, чтобы период сканирования примерно в десять раз превышал период повторения РЛС ( $T_{ск} > 10T_p$ ).

Выбор низких частот сканирования нежелателен, так как система становится более инерционной, возрастают динамические ошибки. Информацией об ошибке сопровождения является изменение амплитуды эхо-сигнала во времени. Другие факторы, вызывающие изменения амплитуды эхо-сигнала, обусловленные, например, флуктуацией ЭПР цели, могут явиться причиной ложной информации об ошибке сопровождения. Частота нежелательных флуктуаций, создающих трудности, обычно того же порядка, что и частота сканирования. Поскольку энергия флуктуаций ЭПР самолета сосредоточена в области более низких частот, чем 100 Гц (особенно создающая помеху модуляция, вызванная вращением винта самолета), желательно по возможности повышать частоту сканирования. Максимально возможной частотой является 1/4 частоты повторения импульсов, при которой на один период сканирования приходится четыре импульса: по одному импульсу сверху, снизу; справа и слева. Максимальная частота повторения импульсов и, следовательно, максимальная частота сканирования ограничены максимальной дальностью целей, которые должна сопровождать РЛС. При частоте повторения импульсов 1000 Гц однозначная дальность составляет около 150 км (при такой дальности эхо-сигнал возвращается в момент передачи следующего импульса).

Большая скорость сканирования антенн больших размеров с помощью механических поворотных устройств трудноосуществима. Поэтому используются различные методы электронного сканирования. В небольших РЛС таких, например, как используемые в головках самонаведения ракет, чаще применяется антенна с параболическим зеркалом, установленным под углом и вращающимся с большой скоростью. Часто используется скорость вращения порядка нескольких сот оборотов в минуту. В ряде случаев число оборотов в минуту достигает 2400. В головках само-

наведения допустима соответствующая этой частоте частота повторения импульсов, так как цель находится на небольшой дальности. С появлением реактивных самолетов возникли и дополнительные проблемы переключения и конического сканирования лучей, так как реактивный двигатель создает значительную модуляцию на высоких частотах в диапазоне, соответствующем максимально используемым скоростям механического или электронного управления лучом.

Отметим некоторые особенности работы СИН с коническим сканированием.

Для того чтобы из последовательности импульсов можно было без искажений выделить их огибающую, необходимо, чтобы на один период вращения диаграммы направленности приходилось не менее десяти импульсов. Поэтому постоянная времени фильтра в детекторе огибающей должна быть равна нескольким десяткам периодов повторения. При низкой частоте повторения это накладывает определенные ограничения на динамические свойства СИН (скорость отслеживания), так как возникают динамические ошибки.

Угловой дискриминатор СИН с коническим сканированием является суммарно-разностным, поэтому угол смещения диаграмм направленности берется меньше оптимального ( $\delta\alpha \approx \theta_\alpha$ ) при работе по сигналу прямого излучения и  $\delta\alpha = (0,5 - 0,7) \theta_\alpha$  при работе по отраженному сигналу.

Такие недостатки СИН с коническим сканированием, как снижение точности или срыв слежения при воздействии модулирующих помех, а также динамические ограничения, явились причиной перехода к более совершенным, моноимпульсным СИН, в которых формирование сигнала рассогласования происходит практически мгновенно и указанные недостатки отсутствуют. Однако СИН с коническим сканированием широко применяются ввиду простоты аппаратуры.

### **3. МОНОИМПУЛЬСНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ**

Принципиально устранение влияния флуктуации амплитуды сигнала возможно при сравнении амплитуд или фаз сигналов, одновременно принятых по двум или нескольким каналам. При импульсном сигнале метод одновременного сравнения амплитуд и фаз сигналов на выходах каналов называется моноимпульсным, а РЛС и системы управления, в которых применяется этот метод – моноимпульсными.

Моноимпульсные системы, разработанные первоначально как средство устранения погрешностей СИН из-за флуктуации амплитуды сигнала, обнаружили свойства, позволившие расширить область их применения. Оказалось, например, что моноимпульсная система позволяет одновременно измерять координаты нескольких объектов, находящихся в пределах ДНА. В моноимпульсной системе возможно также применение компенсационных методов подавления помех.

При определении направления в одной плоскости моноимпульсная

система должна иметь две пересекающиеся и формируемые одновременно ДНА. Каждой из них соответствует свой приемно-усилительный канал. Сравнение амплитуды или фазы сигналов на выходе каналов позволяет найти направление на источник сигнала. Возможно также использование для формирования напряжения рассогласования суммы и разности сигналов, образуемых на выходе антенной системы и обрабатываемых двумя

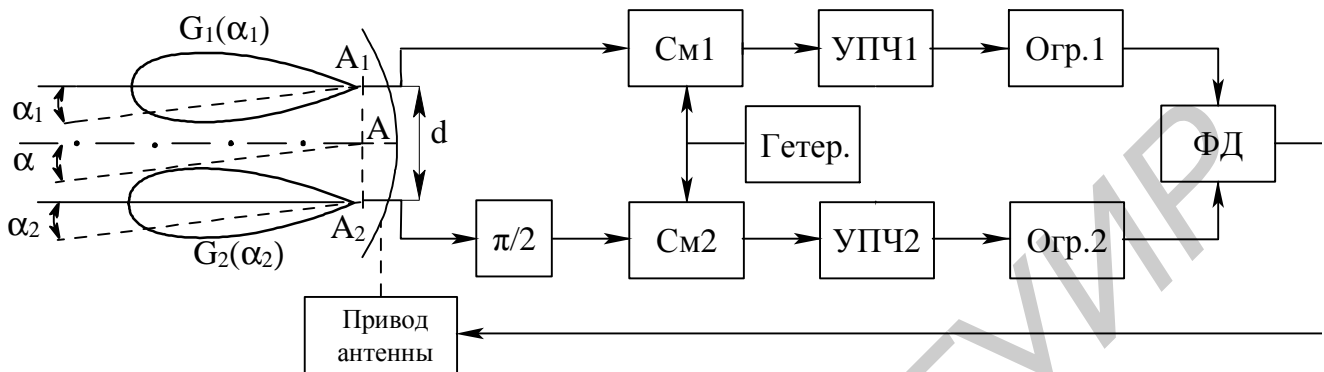


Рис. 12. Функциональная схема системы с фазовым мгновенным сравнением сигналов

приемными каналами: суммарным и разностным. В зависимости от используемого метода сравнения сигналов и выделения сигнала рассогласования моноимпульсные системы имеют три разновидности: фазовые, амплитудные и суммарно-разностные [1].

Система с фазовой пеленгацией (рис. 12) имеет антенную систему с двумя разнесенными на некоторое расстояние фазовыми центрами. Практически два фазовых центра могут быть получены, например, с помощью двух разнесенных на расстояние  $d$  антенн. При этом оси диаграмм направленности параллельны. Если пеленгование производится в азимутальной плоскости, а ДНА одинаковы и описываются функциями  $G(\alpha_1)$  и  $G(\alpha_2)$ , то напряжения на выходе антенн первого и второго каналов

$$u_1 = U_{m1} \sin(2\pi ft + \varphi/2) = kG(\alpha_1) \sin(2\pi ft + \varphi/2);$$

$$u_2 = U_{m2} \sin(2\pi ft + \varphi/2) = kG(\alpha_2) \sin(2\pi ft + \varphi/2);$$

где  $U_{m1} = kG(\alpha_1)$ ,  $U_{m2} = kG(\alpha_2)$  – амплитуды сигналов;  $k$  – коэффициент, зависящий от направленности антенны и мощности сигнала;  $\varphi$  – разность фаз сигналов в фазовых центрах  $A_1$  и  $A_2$ . При большом расстоянии до источника сигнала можно принять  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ . Тогда  $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \alpha$ .

Для получения пеленгационной характеристики с центральной симметрией во втором канале осуществляется дополнительный фазовый сдвиг на угол  $\pi/2$ , с учетом которого напряжения на выходах приемных каналов

$$u_1 = kG(\alpha_1) \sin(2\pi ft + \frac{\pi}{\lambda} d \sin \alpha);$$



$$u_2 = kG(\alpha_2) \sin\left(2\pi ft + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{\lambda} d \sin \alpha\right);$$

Сигналы с выходов каналов подаются на фазовый детектор. Для уменьшения влияния неодинаковости и нестабильности усиления каналов сигналы ограничиваются на уровне  $U$ . Напряжение на выходе фазового детектора

$$U_{\text{фд}} = k_{\text{фд}} U \cos(\varphi - \pi/2) = k_{\text{фд}} U \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \alpha\right).$$

В режиме автоматического слежения за целью угол рассогласования мал и, следовательно,  $\sin \alpha \approx \alpha$ , а

$$U_{\text{фд}} \approx k_{\text{фд}} U \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} d \alpha\right).$$

Полученная зависимость аналогична характеристике дискриминатора. Равносигнальному направлению, перпендикулярному базе и проходящему через ее середину, соответствует нулевое рассогласование  $\alpha = 0$ . При неидентичных и нестабильных фазовых характеристиках каналов равносигнальное направление определяется с погрешностью, что является недостатком фазового метода.

Сигнал рассогласования с выхода ФД подается на следящую систему, которая непрерывно совмещает равносигнальную ось с направлением на сопровождаемый объект. При относительно небольших изменениях  $\alpha$  слежение осуществляют путем изменения фазового сдвига в одном из каналов с помощью фазовращателя. При этом антенная система остается

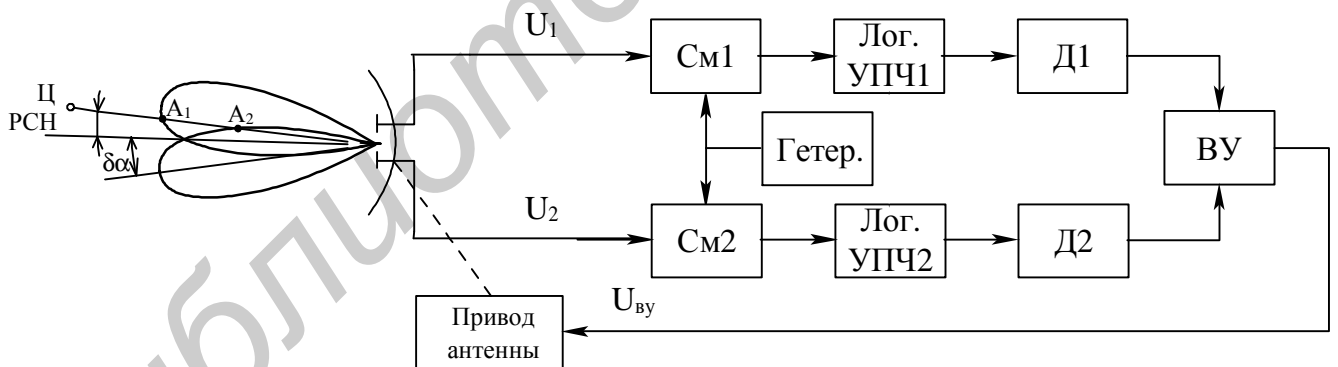


Рис. 13. Функциональная схема системы при методе АМС с двумя расстроенными по углу каналами и вычитанием

неподвижной, что позволяет снизить инерционность системы и обеспечить ее высокое быстродействие, точность и устойчивость. С помощью ферритового фазовращателя управляют фазовым сдвигом путем изменения магнитного поля. В этом случае из следящей системы исключаются двигатели, что способствует повышению ее быстродействия и дает возможность сделать систему компактной, легкой, надежной и экономичной, а также бесшумной.

Моноимпульсный измеритель с амплитудной пеленгацией (рис. 13)

имеет антенну, формирующую две пересекающиеся ДНА, образующие равносигнальное направление, совпадающее с осью антенны.

Если направление на источник сигнала лежит в азимутальной плоскости и отклонено от равносигнальной оси на угол  $\Delta\alpha$ , то разность амплитуд сигналов  $u_1$  и  $u_2$  на входе приемных каналов является мерой угла рассогласования  $\Delta\alpha$ . Для уменьшения влияния изменений интенсивности принимаемого сигнала, а также коэффициента усиления каналов на значение измеряемого угла применяется вычитание сигналов, усиленных УПЧ с логарифмической амплитудой характеристикой и протектированных линейным детектором. В этом случае мерой углового рассогласования является отношение амплитуд сигналов на выходе приемных каналов:

$$u_{\text{вы}} = K_{\text{вы}}(U_0 \ln U_{m1} - U_0 \ln U_{m2}) = K_{\text{вы}} U_0 \ln \frac{U_{m1}}{U_{m2}} = K_{\text{вы}} U_0 \ln \frac{G(\delta\alpha - \alpha)}{G(\delta\alpha + \alpha)}$$

где  $\delta\alpha$  – угол смещения первой и второй ДНА;  $K_{\text{вы}}$  – коэффициент передачи вычитающего устройства (ВУ);  $U_0$  – начальное напряжение на выходе логарифмического усилителя.

Таким образом, крутизна пеленгационной характеристики зависит от крутизны ДНА в окрестности равносигнального направления, коэффициента передачи вычитающего устройства и характеристики логарифмического усилителя. При использовании логарифмических усилителей зависимость измеряемого угла от интенсивности принимаемого сигнала исключается. Однако неравенство коэффициентов усиления каналов и их нестабильность приводят к погрешностям в определении равносигнального направления, на что указывает зависимость сигнала рассогласования от начального напряжения на выходе усилителей.

Разность фаз сигналов  $u_1$  и  $u_2$  не влияет на  $u_{\text{вы}}(\alpha)$ , так как сигналы детектируются (Д1, Д2) до вычитания логарифмов их амплитуд.

При автоматическом сопровождении совмещение равносигнальной оси с направлением на объект производится поворотом антенны с помощью следящей системы. Управление положением равносигнальной оси в небольших пределах также можно осуществлять изменяя коэффициент усиления одного из каналов обратно пропорционально напряжению сигнала рассогласования на выходе вычитающего устройства.

Суммарно-разностный вариант моноимпульсного измерителя является наиболее совершенным, так как теоретически позволяет исключить влияние изменений амплитуды и фазы принимаемых сигналов на стабильность равносигнального направления и пеленгационной характеристики и тем самым обеспечить наибольшую точность определения направления. При суммарно-разностной обработке сравниваются амплитуды сигналов. Для исключения влияния неравенства и нестабильности коэффициентов усиления каналов сравнение амплитуд производится до

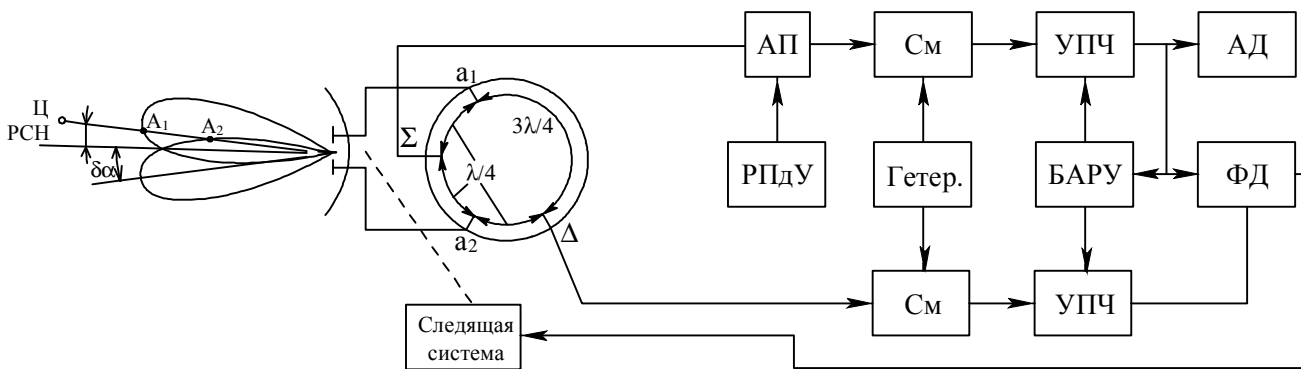


Рис. 14. Функциональная схема системы при методе АМС с суммарно-разностной обработкой и перемножением

приемных каналов непосредственно после облучателей антенны с помощью высокочастотных мостовых схем, выполняемых на волноводах или коаксиальных линиях в зависимости от рабочего диапазона системы.

Принцип действия суммарно-разностного измерителя поясняет структурная схема на рис. 14. Излучатели  $A_1$  и  $A_2$ , симметрично смещенные относительно фокуса зеркала, как и в амплитудном варианте измерителя, подсоединены к точкам  $a_1$  и  $a_2$  суммарно-разностного моста. Расстояния от точек  $a_1$  и  $a_2$  до суммарного входа-выхода ( $\Sigma$ ) одинаковы и равны  $\lambda/4$ , поэтому при излучении импульса энергии высокочастотных колебаний от передатчика распределяется поровну между излучателями  $A_1$  и  $A_2$ , они работают синфазно, формируя суммарную ДНА  $G_{\Sigma}(\alpha)$  (рис. 15).

В режиме приема сигналы, принятые излучателями  $A_1$  и  $A_2$ , приходят на выход  $\Sigma$  (рис. 14) моста с сохранением относительного фазового сдвига и суммируются. При этом зависимость суммарного напряжения  $u_{\Sigma}$  от угла рассогласования аналогична суммарной ДНА при излучении.

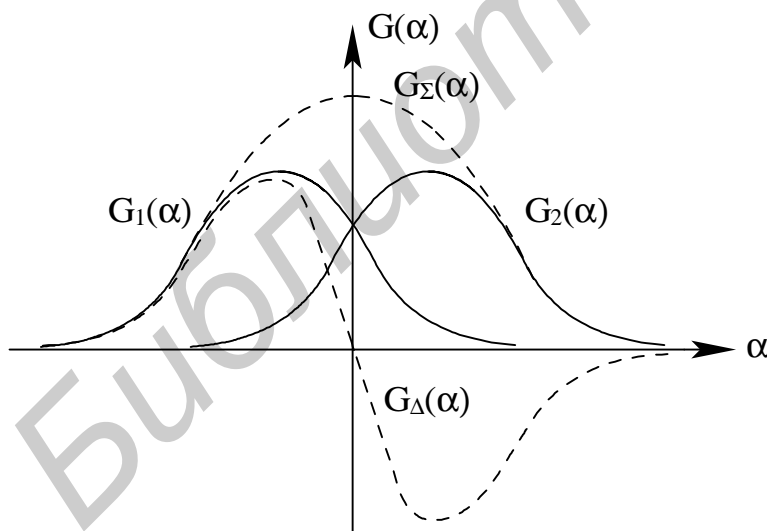


Рис. 15. Формирование амплитудных характеристик суммарного и разностного каналов

В точке  $\Delta$  моста образуется разностное напряжение  $u_{\Delta}$ , так как сигналы приходят сюда со сдвигом на  $180^\circ$  (разность расстояний от  $a_1$  и  $a_2$  до точки  $\Delta$  равна  $\lambda/2$ ). Суммарный и разностный сигналы поступают на входы суммарного и разностного приемных каналов. Зависимость  $u_{\Delta}(\alpha)$  отображает разностную диаграмму  $G_{\Delta}(\alpha)$ , представленную на рис. 15 в прямоугольной системе координат.

В точке  $\Delta$  моста образуется разностное напряжение  $u_{\Delta}$ , так как сигналы приходят сюда со сдвигом на  $180^\circ$  (разность расстояний от  $a_1$  и  $a_2$  до точки  $\Delta$  равна  $\lambda/2$ ). Суммарный и разностный сигналы поступают на входы суммарного и разностного приемных каналов. Зависимость  $u_{\Delta}(\alpha)$  отображает разностную диаграмму  $G_{\Delta}(\alpha)$ , представленную на рис. 15 в прямоугольной системе координат.

Если объект отклоняется от равносигнального направления в сторону  $A_1$ , то фаза разностного сигнала противоположна фазе суммарного, а если в сторону  $A_2$ , то фазы сигналов  $u_\Sigma$  и  $u_\Delta$  совпадают. При расположении объекта на равносигнальной оси  $u_\Delta=0$ . Таким образом, разностная диаграмма аналогична дискриминационной характеристике и характеризует значение и знак рассогласования.

Для выявления размера и знака рассогласования в разностном канале применяется фазовый детектор, в котором в качестве опорного используется сигнал на выходе УПЧ суммарного канала. После амплитудного детектирования суммарный сигнал позволяет также обнаружить объект и измерить его дальность.

Для исключения влияния изменения амплитуды сигнала на крутизну пеленгационной характеристики системы применяется быстродействующая АРУ (БАРУ), которая изменяет усиление каналов обратно пропорционально входному напряжению суммарного канала. При этом напряжение на выходе суммарного канала остается постоянным, а выходное напряжение разностного канала изменяется обратно пропорционально напряжению  $u_\Sigma$  на входе суммарного канала. Поскольку выходное напряжение ФД пропорционально среднему значению произведения напряжений  $u_\Sigma \cdot u_\Delta$  на выходе суммарного и разностного каналов, при эффективной работе БАРУ напряжение рассогласования на выходе ФД оказывается пропорциональным отношению разностного и суммарного напряжений на входе каналов:

$$U_{\text{фд}} \approx \frac{u_\Delta}{u_\Sigma} = \frac{G(\delta\alpha - \alpha) - G(\delta\alpha + \alpha)}{G(\delta\alpha - \alpha) + G(\delta\alpha + \alpha)}$$

Таким образом, пеленгационная характеристика суммарно-разностного измерителя определяется отношением разности сигналов к их сумме, вследствие чего неидентичность амплитудных характеристик влияет только на крутизну характеристики, но не на положение равносигнальной оси. Это существенно уменьшает влияние флуктуации амплитуды сигналов. Фазовые нестабильности также мало влияют на точность, поскольку в системе производится сравнение амплитуды сигналов.

Большая стабильность равносигнального направления и связанная с этим высокая точность являются существенным достоинством суммарно-разностного метода, обеспечившим его широкое применение в моноимпульсных СИН.

При двумерном слежении по азимуту и углу места измеряются рассогласования по  $\alpha$  и  $\beta$ . Антенна имеет четыре излучателя  $A_1$  и  $A_2$ ,  $A_3$  и  $A_4$  симметрично смещенных относительно фокуса зеркала. В измерителе три суммарно-разностных моста: два – для образования разностных сигналов по  $\alpha$  и  $\beta$ , третий – для формирования общего суммарного сигнала. Разностный выход третьего моста замкнут на поглощающую нагрузку. Приемное устройство содержит соответственно три приемных канала: суммарный и два разностных.

Выделенные на выходе фазовых детекторов напряжения рассогласования по  $\alpha$  и  $\beta$  с помощью следящих систем управляют положением равносигнальной оси, непрерывно совмещая ее с направлением на сопровождаемый объект.

В заключение отметим, что моноимпульсная система может быть использована также для поиска цели и для одновременного измерения координат нескольких целей. В этих случаях сигнал на выходе углового дискриминатора является мерой угла отклонения направления на цель от равносигнальной оси. Для измерения угловых отклонений производится предварительная калибровка системы. Полученные данные могут быть введены в память ЭВМ при автоматических измерениях или использованы оператором при измерении углов с помощью индикатора.

При поиске целей и измерении угловых координат нескольких целей иногда необходимо их разрешение в пределах ДНА. Такое разрешение можно осуществить селективированием сигнальных импульсов по дальности, если объекты расположены на различных дальностях. При этом можно измерять угловые координаты каждого объекта по выходному напряжению фазового детектора соответствующего канала.

#### **4. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИРУЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ**

Описанные в предыдущих разделах СИИ смоделированы в программной оболочке FLASH MX, и представлены в виде структурных схем с указанием контрольных точек, где могут наблюдаться сигналы. Средством наблюдения является виртуальный осциллограф, в котором предусмотрена возможность изменения масштаба времени и амплитуды наблюдаемых сигналов, а, следовательно, возможность измерения амплитуды и длительности сигналов.

Каждая из смоделированных систем может работать в следящем (система замкнута) и не следящем (система разомкнута) режимах. В следящем режиме изменение пространственного положения объекта наблюдения влечет за собой изменение положения антенны, по угловому направлению которой можно судить об угловых координатах объекта. Информация о координатах объекта отображается на виртуальном экране с осями азимут  $\alpha$ , угол места  $\beta$  либо азимут  $\alpha$ , дальность  $D$ , а также в цифровом виде. Сравнивая полученную информацию об угловых координатах с истинным положением объекта можно определить ошибку сопровождения. Используя, данный режим оценивается зависимость ошибки сопровождения от отношения сигнал/шум. Положение наблюдаемого объекта изменяется либо вручную, либо автоматически. Для автоматического управления задается траектория и скорость перемещения объекта, что позволяет оценить динамические свойства следящей системы.

Разомкнутый режим работы систем предназначен для исследования пеленгационных характеристик. В этом режиме антенна не изменяет своего положения, а изменение координат объекта приводит к изменению сигнала ошибки. Измеряя, уровень сигнала ошибки при фиксированных значениях угловой координаты получают пеленгационную характеристику.

## 5. ЗАДАНИЯ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Для выполнения лабораторной работы студентам необходимо: ответить на вопросы теста; исследовать сигналы в контрольных точках, указанных на функциональных схемах следящих измерителей; снять пеленгационные характеристики; исследовать влияния угла  $\delta\alpha$  и базы  $d$  на крутизну пеленгационной характеристики; исследовать влияния помехи на функционирование следящего измерителя.

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

1. Изображения сигналов в контрольных точках исследуемых систем.
2. Таблицы с внесенными расчетными и экспериментальными данными.
3. Семейство графиков пеленгационных характеристик.
4. Выводы по работе.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите методы измерения угловых координат.
2. Дайте определение пеленгационной характеристики.
3. Изобразите пеленгационную характеристику при методе сравнения.
4. Поясните физические принципы, лежащие в основе построения следящих измерителей направления при коническом сканировании.
5. Поясните работу следящего измерителя направления по структурной схеме.
6. Изобразите пеленгационную характеристику при методе конического сканирования.
7. Поясните методику снятия пеленгационной характеристики.
8. Охарактеризуйте ошибки, возникающие при измерении угловых координат методом конического сканирования ДНА и методом мгновенного сравнения сигналов.
9. Поясните принцип формирования амплитудных характеристик суммарного и разностного каналов при методе АМС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Радиотехнические системы: / Под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Высш. шк., 1990. –496 с.: ил.
2. Охрименко А.Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. – М.: Воениздат, 1983. – 456 с.: ил.
3. Теоретические основы радиолокации /Под ред. В.Е. Дулевича, М.: Сов. радио, 1978.
4. Радиотехнические методы измерения угловых координат. : Метод. руководство к лабораторной работе по курсу «Системы радиолокации»/Сост. В.П. Пашкевич –Л.: ЛИАП, 1985. –41 с.: ил.

Учебное издание

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СЛЕДЯЩИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ НАПРАВЛЕНИЯ**

Методическое руководство  
к лабораторной работе  
по курсу «Системы радиолокации»  
для студентов специальностей «Радиотехника», «Радиоэлектронные  
системы» и «Радиоэлектронная защита информации»  
дневной формы обучения

Составитель:  
**Кереселидзе Евгений Владимирович**

В авторской редакции  
Отв. за выпуск С.Н. Воробьева

---

Подписано в печать 08.11.2006.  
Гарнитура «Таймс».  
Уч.-изд. л. 1,5.

Формат 60x84 1/16.  
Печать ризографическая.  
Тираж 200 экз.

Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 1,51.  
Заказ 82.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.  
220013, Минск, П. Бровки, 6