

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»**

Кафедра радиоэлектронных устройств и систем

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ СИСТЕМ И КОМПЛЕКСОВ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ БОРЬБЫ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ №3,4 для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения

УДК 621.38(075)
ББК 32.844я7

Основы теории систем и комплексов радиоэлектронной борьбы: методические указания к выполнению лабораторных работ №3,4 для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения/ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: Р.В. Кузьменко. - Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022. – 40 с.

В соответствии с рабочей программой дисциплины приведены описания методов измерений и методик выполнения лабораторных работ, изложены теоретические сведения, лежащие в основе теории систем и комплексов радиоэлектронной борьбы. По каждой лабораторной работе в описание включены: цель, используемое оборудование и приборы, схема лабораторной установки, порядок подготовки и проведения работы, таблицы для экспериментальных данных, перечень положений, которые необходимо отразить в выводах, и контрольные вопросы.

Издание предназначено для студентов очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле методуказания ОТСиКРБ Лабы 3-4.docx

Библиогр.: 3 названия

УДК 621.391.083.92
ББК 32.811.3

Рецензент: Доктор технических наук, заведующий кафедрой
«Конструирования и производства радиоаппаратуры»
Башкиров А.В.

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

СОДЕРЖАНИЕ

3. ОБНАРУЖЕНИЕ ЦЕЛЕЙ И ИЗМЕРЕНИЕ КООРДИНАТ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИЕЙ В РЕЖИМЕ ОБЗОРА	4
1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ	4
2. КРАТКОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ	4
2.1. Общие сведения о построении РЛС	4
2.2. Основные тактико-технические параметры РЛС	9
3. ПОИСК, ОБНАРУЖЕНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ЦЕЛИ	10
3.1. Поиск и обнаружение целей	10
3.2. Определение наклонной дальности	10
3.3. Определение азимута	11
4. КРАТКОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ИМИТАТОРА ЦЕЛЕЙ И ПОМЕХ	11
4.1. Назначение имитатора	11
4.2. Функциональная схема	11
4.3. Работа с имитатором	12
4.4. Конструктивное оформление имитатора	13
4.5. Имитация вращения антенны	13
5. ВЛИЯНИЕ ИНДИКАТОРНЫХ УСТРОЙСТВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РЛС	14
6. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ РЛС	18
7. ЗАДАНИЕ НА РАБОТУ	22
8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	23
9. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	23
4. ИССЛЕДОВАНИЕ САМОЛЕТНОГО РАДИОВЫСОТОМЕРА РВ-20	24
1. ВВЕДЕНИЕ	24
2. СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ	24
3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, НАЗНАЧЕНИЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА РАДИОВЫСОТОМЕТРА	30
3.1. Принцип измерения высоты	30
3.2. Назначение радиовысотомера РВ-20	31
3.3. Характеристики радиовысотомера РВ-20	32
4. ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ	36
5. ЗАДАНИЕ НА РАБОТУ	38
6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	40
7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА	40
8. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	40

ОБНАРУЖЕНИЕ ЦЕЛЕЙ И ИЗМЕРЕНИЕ КООРДИНАТ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИЕЙ В РЕЖИМЕ ОБЗОРА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- 1.1. Изучение принципов построения типовой радиолокационной станции (РЛС) кругового обзора, предназначенной для измерения координат воздушных целей.
- 1.2. Ознакомление с особенностями измерения дальности и азимута в режиме кругового обзора по азимуту.
- 1.3. Исследование характеристик обнаружения РЛС. Лабораторная установка состоит из измерительной системы, выполненной на основе приёмно-индикаторного канала типовой РЛС метрового диапазона (типа П-14) и имитатора целей и помех.

2. КРАТКОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

2.1. Общие сведения о построении РЛС

РЛС, приёмно-индикаторная часть которой составляет основу измерительной установки, предназначена для обнаружения самолетов и определения их текущих координат: азимута и наклонной дальности.

Текущая высота самолетов определяется радиовысотомером, работающим в комплексе с РЛС. Укрупнённая функциональная схема станции приведена на рис. 2.1.

В состав станции входят следующие основные блоки, каждому из которых присвоен номер:

- | | | |
|-----|---|-------|
| 1) | щит сигнализации | № 4; |
| 2) | передатчик | № 20; |
| 3) | индикатор контроля | № 21; |
| 4) | блок видеосигналов | № 24; |
| 5) | синхронизатор | № 25; |
| 6) | калибратор | № 29; |
| 7) | входной блок череспериодной компенсации (ЧПК) | № 31; |
| 8) | блок первого потенциалоскопа | № 32; |
| 9) | выходной блок ЧПК | № 33; |
| 10) | блок второго потенциалоскопа | № 34; |
| 11) | блок спиральной развёртки | № 35; |
| 12) | блок стробов | № 36; |
| 13) | блок когерентного гетеродина | № 37; |
| 14) | блок компенсации скорости ветра | № 38; |
| 15) | пульт перестройки несущей частоты | № 44; |
| 16) | блок дискриминаторов | № 47; |

- | | | |
|-----|--|--------|
| 17) | блок быстроскоростной авторегулировки усиления (БАРУ)..... | № 49; |
| 18) | датчик азимутальных стробов..... | № 58; |
| 19) | сервоусилитель индикатора кругового обзора (ИКО) | № 60; |
| 20) | блок трубки (ИКО)..... | № 122; |
| 21) | блок развёртки..... | № 123; |
| 22) | пульт управления вращением антенны | № 143; |
| 23) | блок усилителя промежуточной частоты (УПЧ)..... | № 148; |
| 24) | пульт дистанционного управления..... | № 187; |
| 25) | блок питания БАРУ | № 210. |

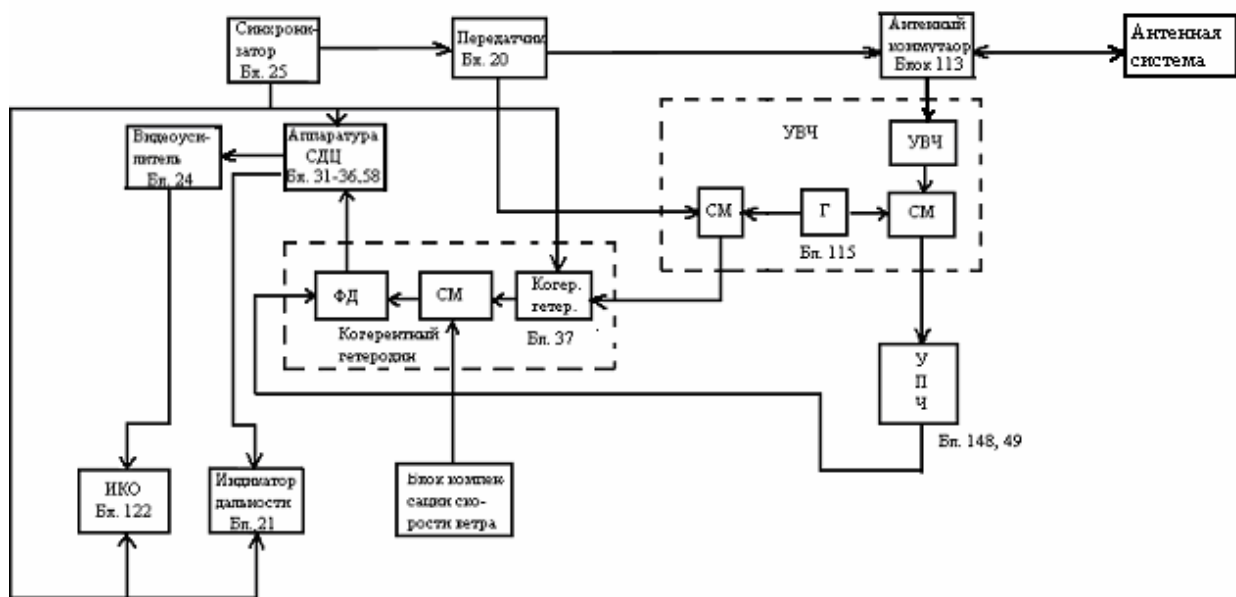
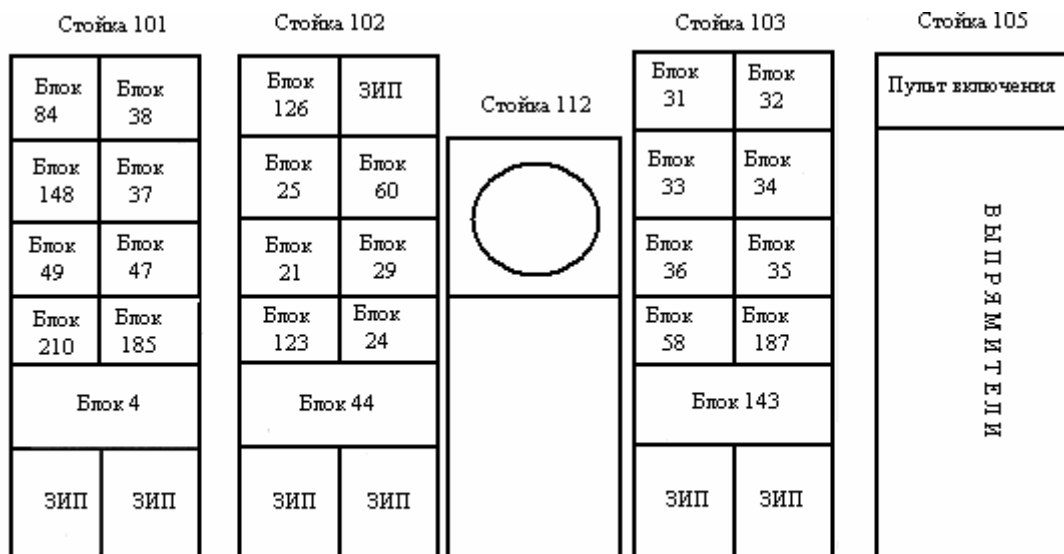


Рис. 2.1. Укрупненная функциональная схема РЛС

Расположение блоков в аппаратных стойках показано на рис. 2.2. Блоки передатчика, антенного коммутатора и УВЧ в состав измерительной установки не входят и на рис. 2.2 не показаны.

В станции используется импульсный метод измерения дальности. Наклонная дальность до цели может быть измерена с помощью индикатора кругового обзора (блока № 122) или индикатора контроля (блок № 21), который попользуется как вспомогательной индикатор дальности (ИД). Для излучения и приёма электромагнитных колебаний в станции используется одна и та же антенная система, которая с помощью антенного коммутатора (блок № 113) поочередно подключается к генератору высокочастотных зондирующих импульсов или приёмнику.

Вследствие несовершенства коммутирующего устройства часть энергии зондирующего импульса проходит в приёмник и формирует изображение на экранах индикаторов в блоках 21 и 22, обеспечивая этим начало отсчёта по дальномерным шкалам.



цели на дальности до 800 км участками по 100 км, что повышает возможность разрешения целей. Переключение масштабов осуществляется соответствующими органами управления на блоках 21 и 123 для ИД и ИКО, соответственно.

Защита станции от помех осуществляется при помощи специальной аппаратуры селекции движущихся целей (блоки 31-36, 58).

В станции предусмотрена защита от пассивных и активных помех.

Пассивная помеха может быть двух видов:

- 1) отражения от неподвижных местных предметов;
- 2) отражения от металлизированных диполей, движущихся со скоростью ветра.

Для защиты от пассивных помех применяется когерентно- импульсный метод. Сигнал, когерентный с излученным, формируется когерентным гетеродином, которому навязывается фаза излученного сигнала, и который сохраняет ее в течение периода следования импульсов. Сравнение излученного и принятых колебаний производится на фазовом детекторе, расположенном в блоке когерентного гетеродина. С выхода фазового детектора видеоимпульсы поступают на амплитуду СДЦ, где производится компенсация сигналов от неподвижных целей путем однократного или двукратного (по выбору оператора) череспериодного вычитания.

В качестве активной помехи могут быть:

- 1) несинхронные сигналы от близкорасположенных работающих РЛС;
- 2) преднамеренные активные помехи заградительные по частоте.

В отсутствии помех сигналы с выхода УПЧ (блок 148) без каких-либо преобразований через блок 31 аппаратуры СДЦ подаются непосредственно на вход обоих индикаторов.

Управление вращением антенны производится при помощи органов управления на блоке 143. Азимут цели определяется по индикатору кругового обзора (блок 122), имеющему электронно-лучевую трубку с магнитным отклонением. Отклоняющие катушки трубки с помощью синхронно- следящего электропривода (ССП) вращаются синхронно с антенной системой, в результате чего радиальная развертка, созданная пилообразным током катушек, также вращается синхронно с антенной системой.

Функциональная схема ИКО приведена на рис. 2.3. Отраженные от цели импульсы, принятые антенной системой и усиленные приемником, поступают на управляющий электрод трубки, вызывая свечение экрана. Отраженные сигналы поступают в каждый период излучения передатчика.

Вследствие вращения антенны отраженные импульсы от цели на экране изображаются в виде яркой дужки, угловые размеры которой равны, примерно, ширине диаграммы направленности.

Направление от центра экрана трубки на центр дужки (от метки до цели) соответствует азимуту цели, который считывается непосредственно с азимутальной шкалы индикатора.

Изображение на экране трубки сохраняется в течение одного оборота антенны благодаря послесвечению флюоресцирующего слоя экрана и таким образом на экране

ИКО наблюдаются отметки всех целей, находящихся в зоне обнаружения станции.

В составе лабораторной установки антенная система, передатчик, антенный коммутатор и УВЧ отсутствуют. Сигналы на вход УПЧ поступают от имитатора целей. Также в составе лабораторной установки имеется имитатор вращения антенны.

В станции применена параболическая антенна, состоящая из зеркала – рефлектора и облучателя. Облучатель состоит из трех симметричных полуволновых вибраторов с рефлекторами. Диаграмма направленности антенны в горизонтальной плоскости (рис. 2.4) имеет вид узкого луча, ширина которого в небольших пределах изменяется по диапазону.

57

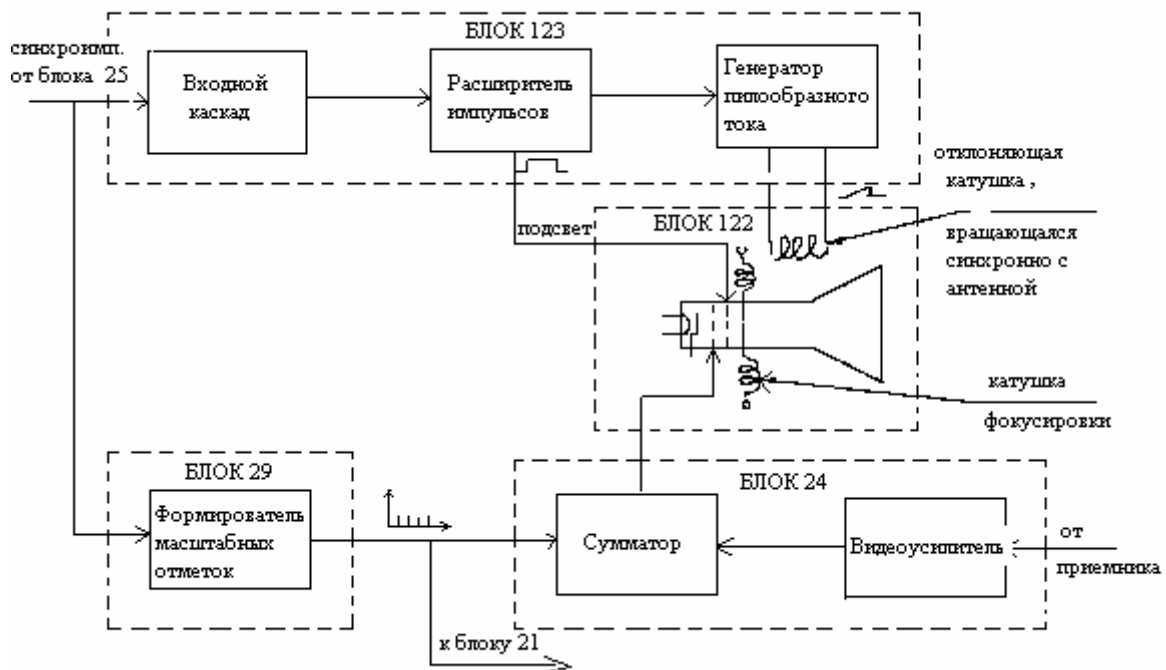


Рис. 2.3. Увеличенная функциональная схема ИКО

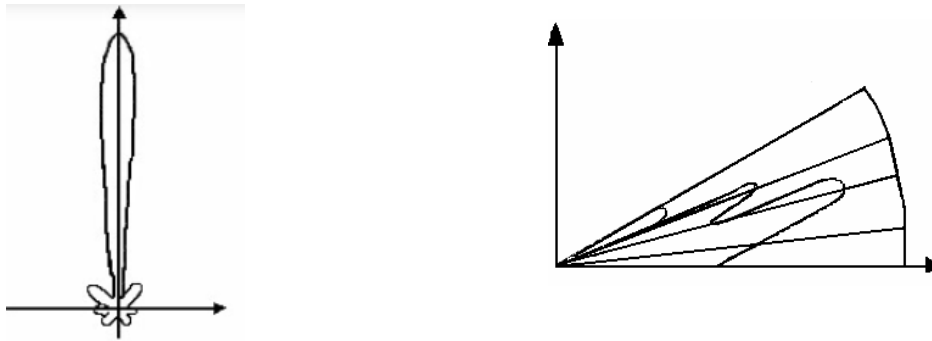


Рис. 2.4. Диаграмма направленности антенной системы в горизонтальной плоскости и диаграмма направленности антенной системы в вертикальной плоскости

Форма диаграммы направленности в вертикальной плоскости (рис. 2.5) зависит от высоты подъёма антенны над землёй, от наклона антенны относительно плоскости горизонта и от положения облучателя.

Угол между фокальной осью параболоида и плоскостью горизонта составляет 6° . В результате наклона антенны амплитуда отраженной волны оказывается меньше амплитуды прямой волны, чем достигается отсутствие глубоких провалов в диаграмме.

2.2. Основные тактико-технические параметры РЛС

РЛС П-14 имеет следующие тактико-технические параметры:

диапазон частот перестройки станции от 160 до 200 МГц;

основная рабочая частота f_0 180 МГц;

частота повторения импульсов F_n – от 185 до 200 Гц;

дальность обнаружения (Д) одиночного самолета при полёте в направлении на станцию:

на высоте 500 м не менее 80 км;

на высоте 10000 м не менее 300 км;

на высоте 20000 м не менее 400 км;

обзор по углу места (при высоте полёта 10000 м) -12° ;

параметры диаграммы направленности (ДН):

направление максимума ДН по углу места не выше $2^\circ 40'$;

направление первого минимума – в пределах $(4-6)^\circ$;

ширина ДН антенны в горизонтальной плоскости (на уровне 0,5 от максимального значения мощности) – не более $4^\circ 20'$;

уровень боковых лепестков ДН в диапазоне рабочих частот – 2,5%;

импульсная мощность передатчика – 700. кВт;
 длительность импульса – (10 ± 1) мкс;
 промежуточная частота приёмника – 10 МГц $\pm$ 50 кГц;
 ширина полосы пропускания УПЧ, измеренная на уровне 0,7 – (150 ± 50) кГц;
 чувствительность (при четырехкратном превышении сигнала над шумами) – 4 мкВ;
 ошибки определения координат целей при работе в амплитудном (незащищенном) режиме на дальностях 100–200 км не более:
 по наклонной дальности – ± 1500 м;
 по азимуту – $\pm 1,5^\circ$;
 разрешающая способность станции (на дальностях более 100 км):
 по дальности не хуже – 3,5 км;
 по азимуту не хуже – 8° .

3. ПОИСК, ОБНАРУЖЕНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ЦЕЛИ

3.1. Поиск и обнаружение целей

В РЛС П-14 для обнаружения целей применяется круговой поиск. Обнаружение целей производится визуально операторами по ИКО и индикатору дальности.

При появлении самолета в зоне обнаружения на экранах индикаторов на соответствующих расстояниях и азимуте появится отраженный сигнал в виде дужки на индикаторе кругового обзора и в виде треугольного импульса на индикаторе дальности.

Оператор станции обязан знать картину местных предметов (их азимут и дальность), изображаемую на экранах индикаторов, а также характер сигналов, чтобы во время работы не путать их с сигналами от целей.

3.2. Определение наклонной дальности

Определение координат цели производится при соответствующем положении переключателя масштабов ИКО в зависимости от места нахождения цели.

При считывании координат целей с экранов индикаторов точность определения координат зависит от масштаба развертки.

Наклонная дальность определяется оператором по ИКО как расстояние от начала развертки до ближнего края дужки (отметки цели).

Расстояние до цели считывается по электрическим масштабным отметкам дальности (по масштабным кольцам).

Переключатель рода работы на блоке видеосигналов (блок 24) должен при этом находиться в положении: ЭХО-ЗАПР.

+МАСШТ.

Определение наклонной дальности в любом случае может быть произведено и по индикатору контроля, для чего переключатель рода работы

необходимо поставить в положение ЭЗ+М+З (ЭХО ЗАЩИЩЕННОЕ + МАСШТАБ + ЗАПРОС).

Дальность по этому индикатору также считывается оператором по электрическим масштабным отметкам дальности. Дальность определяется по левому краю основания сигнала.

3.3. Определение азимута

Азимут цели определяется оператором по индикатору кругового обзора путём визуального отсчёта азимута середины дужки (цели) с помощью электрических азимутальных отметок.

4. КРАТКОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ИМИТАТОРА ЦЕЛЕЙ И ПОМЕХ

4.1. Назначение имитатора

Имитатор целей и помех предназначен для тренировки расчётов радиолокационной станции «П-14» как при включенном, так и при выключенном передатчике; при этом работа может производиться как при вращении антенны, так и при имитации вращения антенны.

Имитатор создаёт на экранах индикаторов импульсы по своей форме подобные импульсам, отраженным от реальных целей и пассивных помех.

Имитируются следующие цели и помехи:

- 1) две одиночные цели;
- 2) две групповые цели;
- 3) две «свои» цели;
- 4) пассивная помеха;
- 5) активная помеха.

Примечание. В связи с тем, что в составе лабораторной установки отсутствует УВЧ, имитатор активной помехи не задействован.

4.2. Функциональная схема

Функциональная схема имитатора приведена на рис. 4.1.

Имитатор состоит из пяти блоков:

- 1) блок имитатора групповых целей (блок 80);
- 2) блок имитатора одиночных целей (блок 81);
- 3) блок имитатора «своих» целей (блок 82);
- 4) блок имитатора помех (блок 83);
- 5) блок имитатора эффекта Доплера (блок 84).

Все блоки имитатора запускаются импульсом синхронизации станции от блока 25. В каждый из блоков имитатора поступает информация об ориентации антенны или имитатора вращения антенны от системы вращения и передачи азимута (СВПА).

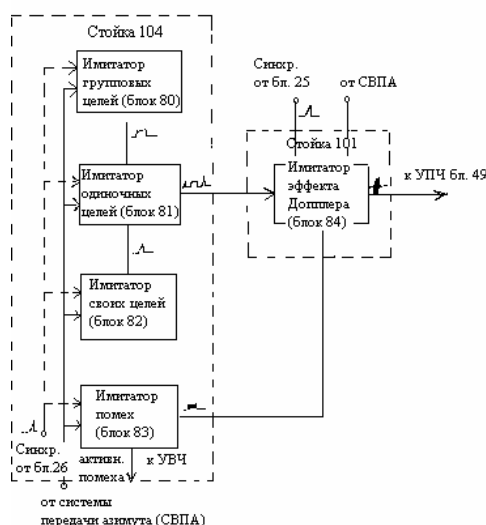


Рис. 4.1. Укрупненная функциональная схема имитатора

Блоки имитатора 80, 81, 82 и 83 вырабатывают видеосигналы двух групповых целей, двух одиночных целей, двух «своих» целей и пассивной помехи соответственно.

Видеосигнал «своей» цели представляет собой два импульса, следующих друг за другом, один из которых является импульсом, отраженным от «своей» цели, а второй – импульс, переизлученный самолетным автоответчиком. На ИКО видеосигналы «своих» целей выглядят в виде двойной дужки.

Под пассивной помехой подразумеваются сигналы, отраженные от неподвижных местных предметов, а также сигналы, отраженные от объемно-распределенной цели, движущейся со скоростью ветра, какой является металлизированные диполи, сброшенные с самолета.

Видеосигналы целей и пассивной помехи поступают в блок имитатора эффекта Доплера (блок 84), где преобразуются в сигналы промежуточной частоты. Кроме того, в блоке 84 производится сдвиг промежуточной частоты на десятки Герц, что позволяет получать эффект движения целей и помех. Величина сдвига промежуточной частоты зависит от ориентации антенны либо имитатора вращения.

4.3. Работа с имитатором Имитатор групповых целей

В этом блоке имитируются две групповые цели. Количество самолетов в группе может изменяться при помощи регулировки КОЛИЧ. ЦЕЛЕЙ (блок 80) от двух до шести.

Обе групповые цели всё время находятся на одинаковой дальности, но разнесены по азимуту. Групповые цели движутся по маршруту, задаваемому автоматическим курсозадающим устройством (АКУ). Скорость движения задаётся регулировкой СКОРОСТЬ, (блок 80). Уровень сигнала групповых

целей устанавливается регулировкой АМПЛИТУДА (блок 80), Азимут и дальность одной из целей индицируется на соответствующих шкалах блока.

Имитатор одиночных целей

В этом блоке имитируются две одиночные цели. Ручкой ДАЛЬНОСТЬ-АЗИМУТ (блок 81) можно изменять дальность до целей (вращение против часовой стрелки), либо азимут целей (вращение по часовой стрелке). Дальность изменяется от 40 до 400 километров, а азимут от нуля до 360°.

Как и в имитаторе групповых целей в данном блоке обе цели находятся на одной и той же дальности и разнесены по азимуту. Уровень сигнала задаётся регулировкой АМПЛИТУДА (блок 81).

Азимут и дальность одной из целей индицируются на соответствующих табло блока.

Имитатор «своих» целей

В этом блоке имитируются две "свои" цели, находящиеся на одинаковой дальности и разных азимутах. Дальность и азимут изменяются при помощи соответствующих органов управления (блок 62). Дальность в пределах от 40 до 400 км, а азимут в пределах от нуля до 360°. Уровень сигнала целей регулируется ручкой АМПЛИТУДА, (блок 82).

Имитатор помех

Этот блок вырабатывает сигналы пассивной помехи.

При помощи соответствующих органов управления (блок 83) можно изменять протяженность помехи, сектор, занимаемый помехой на экране ИКО, амплитуду помехи, а также азимут и дальность помехи. Азимут и дальность помехи изменяются в тех же пределах, как и у одиночных целей.

4.4. Конструктивное оформление имитатора

Имитатор целей и помех выполнен в виде отдельной стойки (стойка 104) со своим выпрямителем и пультом включения. В состав имитатора входит блок имитации эффекта Доплера, расположенный в стойке 101. Расположение блоков имитатора в аппаратных стойках показано на рис. 4.2.

4.5. Имитация вращения антенны

Вращение антенны имитируется двумя способами:

1) при установке тумблера СЛЕЖЕНИЕ - ИМИТАТОР на блоке сервоусилителя ИКО (блок 60) в положение ИМИТАТОР имитация вращения достигается путём подачи управляющего напряжения непосредственно на обмотку двигателя ИКО;

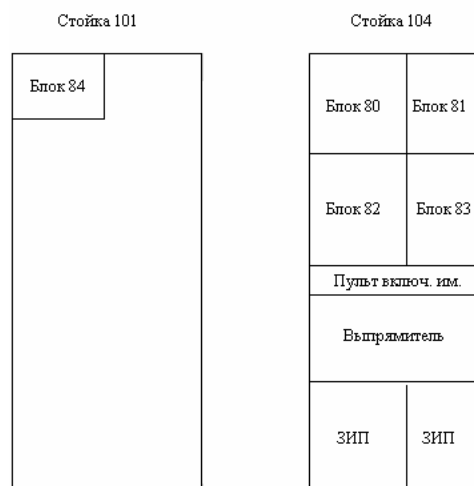


Рис. 4.2. Расположение блоков имитатора в аппаратных стойках

2) при установке того же тумблера в положение СЛЕЖЕНИЕ имитация вращения обеспечивается при помощи имитатора вращения антенны, состоящего из двигателя и двух сельсин-приемников, расположенных в блоке ИКО и связанных с его двигателем. Управление имитатором вращения обеспечивается с помощью переключателя СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ на щитке сигнализации (блок 4), посредством его установки в положение «2», «4» и «6», что соответствует скорости вращения антенны, 2, 4 и 6 оборотов в минуту, соответственно. При установке переключателя в положение «О» вращение отключается, т. е. таким образом можно остановить радиальную развертку ИКО на любом азимуте.

5. ВЛИЯНИЕ ИНДИКАТОРНЫХ УСТРОЙСТВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РЛС

Визуальное обнаружение и оценка координат электронно-лучевыми индикаторами дальности и кругового обзора имеют ряд характерных особенностей, которые обусловлены свойствами электронно-лучевых трубок, психофизиологическими возможностями оператора и условиями наблюдения. Оператор совместно с индикатором образуют общую часть системы обработки информации и выполняют функции накопителя энергии сигналов пачки, порогового устройства и устройства отсчета координаты.

Рассмотрим кратко влияние системы оператор-индикатор на основные характеристики РЛС.

Оператор на основании анализа получаемой информации с учетом априорных сведений, полученных в процессе обучения и тренировок, принимает решение о наличии или отсутствии целей. При этом возможны два режима работы оператора:

1) режим визуального накопления, при котором световые возбуждения в трубке, имеющей малое послесвечение, следуют настолько часто (с периодом 01 с и менее), что глаз оператора (без участия сознания) реализует визуальное накопление. Указанный режим накопления характерен для работы оператора на индикаторе дальности (ИД) с амплитудной отметкой.

Экран трубки ИД имеет послесвечение, равное сотым долям секунды и интегрирование выполняет глаз оператора, постоянная времени которого составляет около 0,1 с, то есть существенно больше периода следования импульсов, равного 0,01 с. Исследования показывают, что система оператор – ИД по своим свойствам практически эквивалентна свойствам идеального интегратора, обеспечивающего накопление без потерь за время облучения цели, которое у типовых РЛС обзора обычно не более десятых долей секунды;

2) режим визуальной корреляции, характерный при работе оператора ИКО. Особенность ИКО состоит в том, что траектории движения электронного луча в последовательных развертках по дальности не совпадают вследствие кругового вращения луча. Постоянная времени послесвечения экрана ИКО существенно больше, чем у ИД. Яркостная отметка сигнала при этом оставляет на экране близко расположенные следы, которые оператор благодаря особенностям памяти обнаруживает лучше, чем обычную яркостную отметку, формируемую наложением разверток. Указанный способ «накопления» не эквивалентен простому суммированию и называется визуальной корреляцией. Экспериментальные исследования показывают, что эффект накопления при визуальной корреляции находится по своему значению между когерентной и некогерентной обработкой слабых сигналов (рис. 5.1).

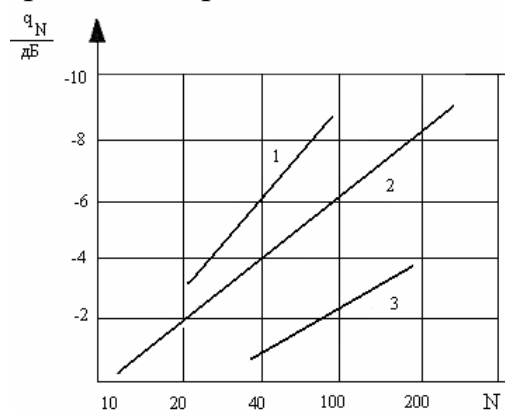


Рис. 5.1. Зависимость порогового отношения сигнал/шум q_N от числа интегрируемых импульсов N для вероятности правильного обнаружения $D = 0,5$: 1 – при когерентной обработке; 2 – при визуальной корреляции; 3 – при некогерентной обработке и идеальном интегрировании

Преимущество ИКО состоит в большей информативности, поскольку он обеспечивает двухкоординатную панорамную индикацию. Важной характеристикой индикатора для наземных и в особенности самолетных РЛС обзора является наблюдаемость целей, которая зависит от контрастности

изображения.

Для яркостных индикаторов типа ИКО контрастность, определяется динамическим диапазоном изменений яркости свечения, составляющим для ИКО довольно малую величину - 10–15 дБ. Практически достаточной считается наблюдаемость, при которой обеспечивается различение сигналов от морской поверхности, земли и цели, т. е. индикатор имеет три градации:

«темный» – гладкая морская поверхность; «серый» – земля;

«белый» – цель.

Сопряжение диапазона изменений уровня сигнала на входе приёмника РЛС, а он может достигать величины 80–100 дБ, с диапазоном ЭЛТ реализуется в трехтоновых видеоусилителях, осуществляющих сжатие динамического диапазона.

Точность

Суммарная среднеквадратическая погрешность измерения координаты при условии независимости ошибок от различных факторов вычисляется по формуле

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\text{вн}}^2 + \sigma_{\text{ш}}^2 + \sigma_{\text{АПП}}^2},$$

где $\sigma_{\text{вн}}, \sigma_{\text{ш}}, \sigma_{\text{АПП}}$ – среднеквадратические ошибки, обусловленные тремя факторами, соответственно, внешней средой, влиянием шума приемно-усилительных устройств и аппаратурой станции. Индикаторное устройство вносит существенный вклад в аппаратурную погрешность. Величина вклада определяется, в основном, масштабом шкалы и применяемым методом отсчета.

В случае измерения дальности, из равенства максимального времени задержки зондирующего сигнала и времени движения луча по экрану следует что

$$\frac{2D_{\text{шк}}}{c} = \frac{I_{\text{шк}}}{v_p}, D_{\text{шк}} = M_D L_{\text{шк}}, M_D = \frac{c}{2v_p}, \quad (5.1)$$

где $D_{\text{шк}}, I_{\text{шк}}$ – соответственно максимальная дальность, считываемая по шкале и длина шкалы (рабочей части экрана индикатора); M_D – масштаб шкалы по дальности. Оценка дальности до цели

$$D_{\mu} = M_D I_{\mu}, \quad (5.2)$$

где I_{μ} – оценка расстояния по шкале до отметки от цели.

Ошибки в знании величины M_D – ошибки масштаба, как следует из (5.1) зависят от стабильности скорости распространения радиоволн и скорости развертки v_p . Величина ошибок масштаба обычно мала в сравнении с ошибками отсчета (ошибки оценки l^*), которые возникают вследствие

интерполяции положения отметки цели между делениями шкалы и параллакса (при механической шкале). Практически установлено, что ошибки интерполяции и параллакса при оценке положения отметки по механической шкале

$$\sigma(D_{\mu}) = 0,15M_D\Delta l \quad (5.3)$$

где Δl – расстояние между делениями шкалы и

$$\sigma(D_{\mu}) = (0,1 - 0,05)M_D\Delta l \quad (5.4)$$

при оценке по электронной шкале.

Оценим ошибку отсчета вследствие конечности размеров пятна. Максимальное значение ошибки в оценке расстояния составляет половину размера пятна d_n

$$(\Delta D_{\mu})_{\max} = (I_{\mu} - I_{\mu})_{\max} = 0,5d_n, \quad (5.5)$$

где I_{μ} – истинное значение расстояния до отметки по шкале. Согласно (5.1) максимальная ошибка оценки дальности

$$\Delta D_{\mu_{\max}} = \Delta I_{\mu_{\max}} M_D = 0,5 \frac{d_n D_{\text{шк}}}{I_{\text{шк}}} = 0,5 \frac{D_{\text{шк}}}{Q}, \quad (5.6)$$

где $Q = \frac{I_{\text{шк}}}{d_n}$ эквивалентная разрешающая способность трубки, которая учитывает размер $I_{\text{шк}}$ рабочей части экрана трубки

Разрешающая способность

Мерой разрешения двух целей по некоторой пространственной координате x является наименьшая разность их координат, при которой обеспечивается раздельное наблюдение целей. При этом полагают, что цели "точечные" и различаются только по координате x . В качестве критерия раздельного наблюдения часто используют критерий, введенный Релеем в оптике: отклики прибора от двух источников различны, если спад интенсивности изображения (яркости или амплитуды на экране индикатора) при переходе от одного максимума к другому равен некоторой заданной величине. Обоснованных рекомендаций по выбору величины спада при использовании критерия Релея для задач разрешения радиолокационных целей в литературе не приводится. Практически достаточным для разрешения целей считают величину спада не менее 3 дБ.

Потенциальная разрешающая способность в смысле критерия Релея соответствует идеальным условиям приёма, справедливым при большом отношении сигнал/шум и идеальной фокусировке изображения. Реальная разрешающая способность в РЛС с визуальной индикацией целей снижается за счет конечности размеров пятна на ИД и ИКО.

В практических расчетах полагают, что снижение разрешающей способности за счет индикатора равно значению размера пятна по координате x

$$d(x)_{инд} = d_n M_x,$$

где M_x – масштаб шкалы индикатора по координате. Определим масштаб ИКО по азимуту. Составим пропорцию

$$\frac{360^\circ}{2pl_{ц}} = \frac{d_n^\circ}{dn} = M_a \quad (5.7)$$

где $l_{ц}$ – расстояние от центра экрана до отметки от цели;

d_n° – размер отметки в градусах. Поскольку $D_{ц} = M_D l_{ц}$ для масштаба азимутальной шкалы ИКО получим

$$M_a = \frac{180}{\pi D_{ц}} M_D \quad (5.8)$$

Особенность ИКО состоит в том, что при заданном масштабе по дальности, величина (5.8) не остается постоянной для различных дальностей. Изображение сжимается по углу при приближении к центру экрана.

6. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ РЛС

Качественные показатели радиолокационного обнаружения определяются величинами вероятностей ложной тревоги F правильного обнаружения D .

Вероятность ложной тревоги F равна вероятности превышения шумовым сигналом $F(t)$ порогового уровня U_0 . Полагая, что детектор работает в линейном режиме и, принимая распределение вероятностей огибающей шума в форме Релея, получим

$$F = P\{E > U_0\} = \int_{U_0}^{\infty} \frac{E}{\sigma_{ш}^2} e^{-\frac{E^2}{2\sigma_{ш}^2}} dE = e^{-\frac{U_0^2}{2\sigma_{ш}^2}}$$

где $\sigma_{ш}^2$ – мощность (дисперсия) флуктуации напряжения шума. Процесс появления ложных тревог иллюстрирует рис. 6.1.

Для оценки вероятности ложной тревоги можно использовать следующие соотношения. В приёмнике без стробирования с шириной полосы пропускания ΔF интервал корреляции шума приближенно равен $1/\Delta F$. Поэтому за время наблюдения T_H на вход порогового устройства поступает приблизительно $n = \Delta F \cdot T_H$ независимых шумовых выбросов, каждый из которых может превысить или не превысить порог. Оценкой вероятности ложной тревоги F^* может служить величина частоты превышения порога при большом времени наблюдения

$$F \cdot = \lim_{T_H \rightarrow \infty} \frac{n_{\text{Л.Т.}}}{\Delta F T_H} \quad (6.2)$$

где $n_{\text{Л.Т.}}$ – количество превышений порога на интервале T_H .

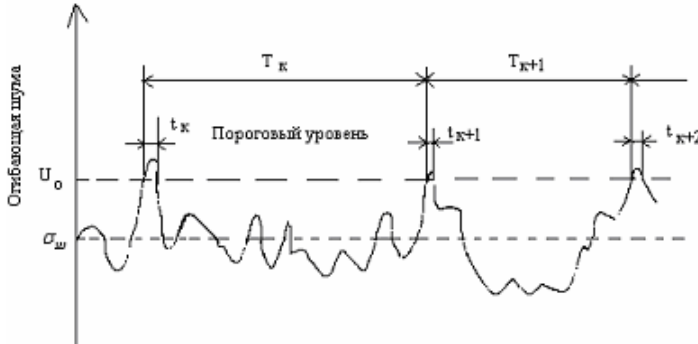


Рис. 6.1. Иллюстрация появления ложных тревог

Вероятность ложной тревоги можно оценить через период ложных тревог, T_F определяемый как среднее значение временного интервала между превышениями порога шумовыми выбросами

$$T_F = \lim_{T_H \rightarrow \infty} \frac{1}{n_{\text{Л.Т.}}} \sum_{K=1}^{n_{\text{Л.Т.}}} T_K = \overline{T_K}. \quad (6.3)$$

Тогда для оценки ложной тревоги получим

$$F \cdot = \lim_{T_H \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n_{\text{Л.Т.}}} \sum_{K=1}^{n_{\text{Л.Т.}}} t_K}{\frac{1}{n_{\text{Л.Т.}}} \sum_{K=1}^{n_{\text{Л.Т.}}} T_K} = \frac{\overline{t_K}}{\overline{T_K}}, \quad (6.4)$$

где $\overline{t_k}$ и $\overline{T_k}$ определены на рис. 6.1.

Полагая, что средняя длительность шумового выброса $\Delta \overline{t_k} \approx \frac{1}{\Delta F}$, из формул (6.3) и (6.4) получим

$$F \cdot = \frac{1}{T_F \Delta F}. \quad (6.5)$$

Приравнявая (6.1) и (6.5), получим

$$T_F = \frac{1}{\Delta F} e^{-\frac{U_0^2}{2\sigma_{\text{ш}}^2}}. \quad (6.6)$$

т.е. средний период ложных тревог экспоненциально зависит от величины нормированного порога $U_0/\sigma_{\text{ш}}$. Так, например, при ширине полосы пропускания $\Delta F = 1$ МГц величина $U_H = 101g(U_0^2/2\sigma_{\text{ш}}^2) = 12,95$ дБ приводит к периоду ложной тревоги $T_F = 6$ мин, а значение $U_H = 14,75$ дБ,

отличающееся на 1,8 дБ, приводит к возрастанию периода ложной тревоги до 1000 минут.

Для экспериментальной оценки вероятности ложной тревоги удобно использовать соотношение (6.2), при этом $n_{л.т.}$ можно определить с помощью счетчика импульсов. Для повышения надёжности измерений следует проводить несколько измерений при фиксированном времени наблюдения, определяя затем F как среднее по совокупности 10–15 опытов.

При наличии полезного сигнала с амплитудой A плотность распределения вероятностей огибающей смеси сигнала и шума определяется обобщенным законом Релея, и для вероятности правильного обнаружения получаем соотношение

$$D = \int_{U_0}^{\infty} \frac{E}{\sigma_{ш}^2} I^{-\frac{E^2+A^2}{2\sigma_{ш}^2}} I_0\left(\frac{AE}{\sigma_{ш}^2}\right) dE, \quad (6.7)$$

Где $I_0(x)$ - модифицированная функция Бесселя.

Статистические свойства смеси сигнала с шумом отличаются от статистических свойств только шума. В частности, наличие регулярного сигнала изменяет среднее значение огибающей на выходе детектора, а также мощность её флуктуаций (дисперсию), что и показано на рис. 6.2, где $W_{ш}(E)$ –плотность вероятности огибающей шума; $W_{сш}(E)$ – соответствующая функция для смеси сигнала и шума. Значения вероятностей F и D , равные интегралам (6.1) и (6.7) показаны на этом рисунке в виде соответствующих площадей под кривыми. Видно, что увеличение порога U_0 в целях уменьшения F ведёт к уменьшению величины D .

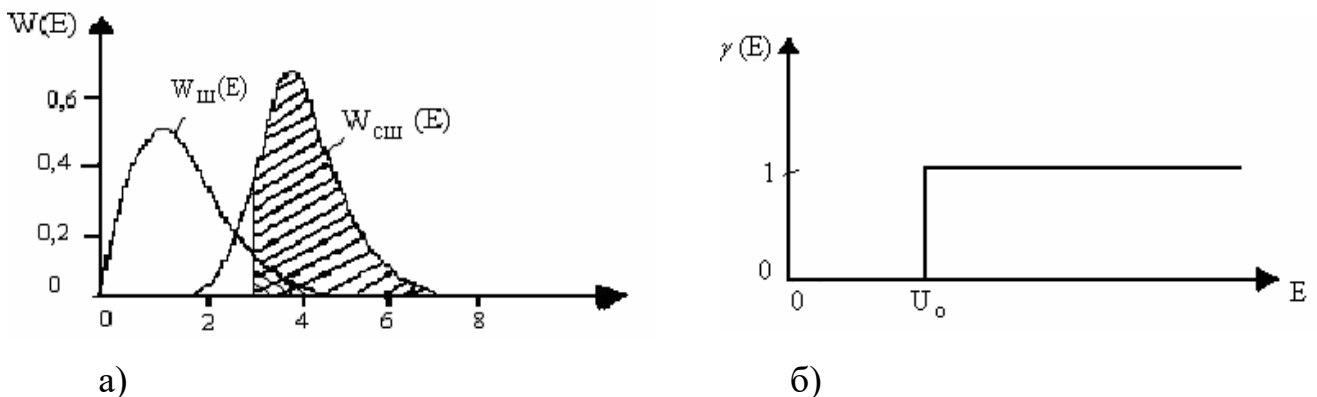


Рис. 6.2. Иллюстрация процесса порогового обнаружения
а) плотность вероятности шума $W_{ш}(E)$ и смеси сигнал-шум $W_{сш}(E)$ при $A/s_{ш} \approx 3$; б) функция решения $g(E)$

Вероятность правильного обнаружения D можно оценить, если при известном количестве сигнальных импульсов на входе приёмника подсчитать количество импульсов, превысивших порог ограничения. Считая, что общее количество импульсов на выходе порогового устройства равно сумме

импульсов цели и шумовых импульсов, для оценки величины D имеем

$$D * = \frac{n_{\Sigma} - n_{\text{л.т.}}}{n} \quad (6.8)$$

где n_{Σ} – суммарное количество импульсов на выходе порогового устройства;

$n_{\text{л.т.}}$ – количество ложных тревог (шумовых импульсов);

n – количество импульсов цели за время измерения.

Оценку D следует получать как среднее по серии 10–15 опытов.

Семейство функций $D = f\left(\frac{A^2}{2\sigma_{\text{ш}}^2}; F\right)$, где F -параметр, называют характеристиками обнаружения.

Вид характеристик обнаружения зависит от статистических свойств сигнала и шума, а также, что более важно, от способа построения приёмного тракта, т.е. от тех преобразований, линейных и нелинейных, которые реализованы в приёмнике до порогового устройства.

На рис. 6.3 приведены характеристики обнаружения одиночного радиоимпульса со случайной начальной фазой в приёмном тракте с линейным детектором.

В случае приёма нескольких радиоимпульсов от цели, а это имеет место при работе РЛС в режиме сканирования ДН, целесообразно использовать все принятые от цели сигналы для улучшения ее обнаружения.

Обычно в приёмных трактах РЛС реализуют внутриимпульсную обработку сигналов (т.е. обработку одиночного импульса) и последующую междуимпульсную обработку, цель которой накопление (интегрирование) n сигналов, принятых за время облучения.

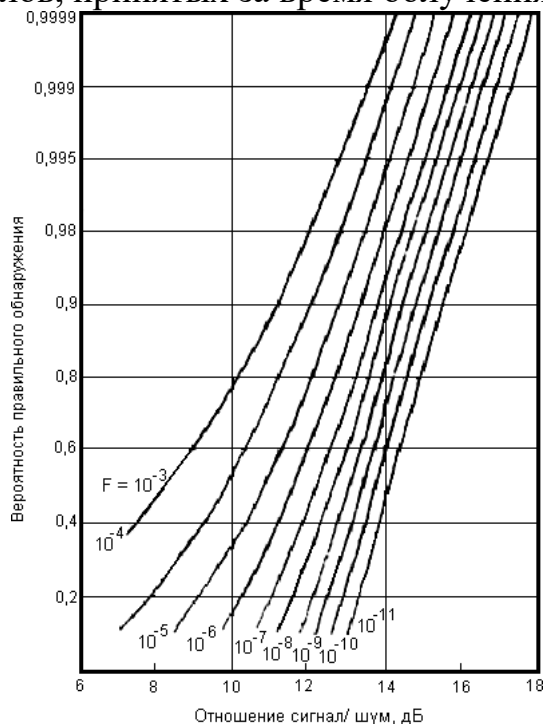


Рис. 6.3. Характеристики обнаружения радиоимпульса со случайной начальной фазой

7. ЗАДАНИЕ НА РАБОТУ

- 7.1. Экспериментально определить максимальную однозначно измеряемую дальность РЛС. Для измерений использовать осциллограф СИ-68.
- 7.2. Экспериментально определить разрешающую способность по дальности ИКО и индикатора дальности (ИД), при различных масштабах разверток. Считать, что видеоимпульсы на экране ИД разрешаются, если они перекрываются не более чем наполовину.
- 7.3. Используя теоретические соотношения подраздела 5.3, рассчитать разрешающую способность индикаторов по дальности при различных масштабах разверток. По результатам п.п. 7.2 и 7.3 заполнить табл. 7.1 и построить графики зависимости $\delta(D_{ИКО}) = f(M_D)$.

Таблица 7.1

Масштаб, км		50	200	400	600	800	1200
$\delta(D_{ИКО})$, км	Расчет						
	Измерен.						
$\delta(D_{ИД})$, км	Расчет						
	Измерен.						

- 7.4. Экспериментально определить разрешающую способность ИКО по азимуту при различных масштабах развертки по дальности.
- 7.5. Используя соотношения подраздела 5.3, рассчитать разрешающую способность ИКО по азимуту при различных масштабах развертки. По результатам п.п. 7.4 и 7.5 заполнить табл. 7.2 и построить графики зависимости $d(a) = f(M_D)$.

Таблица 7.2

Масштаб, км		200	400	600	800	1200
$\delta(a)$, град	Измерен.					
$\delta(a)$, град	Расчет.					

- 7.6. Экспериментально снять зависимость разрешающей способности ИКО по азимуту от дальности до цели при масштабе развертки 600 км.
- 7.7. Пользуясь соотношениями подраздела 5.3 рассчитать зависимость $\delta(a) = f(D_{ц})$ при масштабе развертки $M_D = 600$ км.

По результатам п.п. 7.6 и 7.7 заполнить табл. 7.3 и построить графики зависимости $\delta(a) = f(D_{ц})$.

Таблица 7.3

Дальность, км		50	100	200	400	500
$d(a)$, град	Расчет.					
$d(a)$, град	Измерен.					

- 7.8. Снять характеристики обнаружения РЛС для трех значений порога. Порог изменять при помощи переключателя ПОРОГ на блоке 24 (положение переключателя «Р» соответствует ручной регулировке порога). Измерения производить при помощи счетчика ЧЗ-32 на выходе порогового устройства (гнездо Г 2.1 на блоке 24, Г 1.0 – корпус) при положениях переключателя ПОРОГ 1,2 и 3.

Регулировки блока 24 МЕТКИ ДАЛЬНОСТИ и МЕТКИ АЗИМУТА во время измерений должны находиться в крайнем левом положения. Отношение сигнал/шум изменять регулировкой АМПЛИТУДА на блоке 81, т.е. при снятии характеристик обнаружения использовать отметку цели, формируемую блоком 81.

По результатам измерений построить характеристики обнаружения.

- 7.9. По результатам работы сделать выводы.

8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 8.1. Объясните физические принципы измерения дальности и азимута, используемые в РЛС П-И4.
- 8.2. Объясните методику экспериментальной оценки вероятности правильного обнаружения.
- 8.3. Перечислите способы уменьшения аппаратурной погрешности измерения дальности, реализованные в РЛС.
- 8.4. Какие по Вашему мнению можно предложить дополнительные меры с целью увеличения разрешающей способности по дальности и азимуту?
- 8.5. Какие по Вашему мнению недостатки имеет данная РЛС, если предъявлять к ней требования как к современным РЛС подобного назначения?
- 8.6. Объясните особенности работы оператора в режиме обнаружения цели на индикаторе дальности и ИКО.

9. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 9.1. Бакулев П. А. Радиолокационные системы. Изд. «Радиотехника». М., 2004. – 320 с.
- 9.2. Радиотехнические системы /Под ред. Ю. М. Казаринова. – М.: Советское радио, 1990.
- 9.3. Денисов В. П., Дудко Б. П. Радиотехнические системы. Изд-во ТУСУР, Томск, 2006 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ САМОЛЕТНОГО РАДИОВЫСОТОМЕРА РВ-20

1. ВВЕДЕНИЕ

Приборы, использующие частотный метод измерения дальности, нашли широкое применение для точного измерения высоты летательных аппаратов. Такие высотомеры имеют ряд преимуществ перед импульсными: отсутствие мертвой зоны, малый уровень излучаемой мощности, отсутствие сложных модуляторов наносекундных импульсов и др. Работа посвящена изучению частотного радиовысотомера РВ-20.

2. СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

В частотных дальномерях, как и во всех активных системах, дальность до объекта наблюдения измеряется по задержке принятого сигнала относительно зондирующего. Зондирующий сигнал – непрерывный, с частотной модуляцией. Задержка измеряется по изменению частоты между моментами приема и передачи (рис. 2.1).

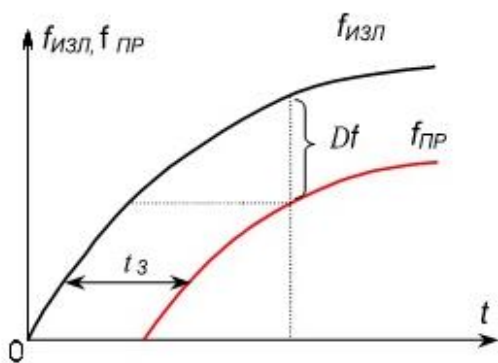


Рис. 2.1. Пояснения к принципу действия частотного дальномера

Для нахождения связи между изменением частоты Δf и задержкой Δt положим, что на интервале задержки частота изменяется линейно $-\Delta f = \frac{df}{dt} \Delta t$. Тогда $t_3 = \Delta t = \frac{\Delta f}{df/dt}$, откуда

$$R = \frac{c}{2} * \frac{\Delta f}{df/dt}$$

Разница частот выявляется как частота биений при подаче на нелинейный элемент (смеситель, детектор) принятого и зондирующего сигналов: $\Delta f = f_{\text{б}}$ (рис. 2.2). На рисунке УЧБ – усилитель частоты биений. Частота биений измеряется частотомером. По ней находится дальность до объекта наблюдения.

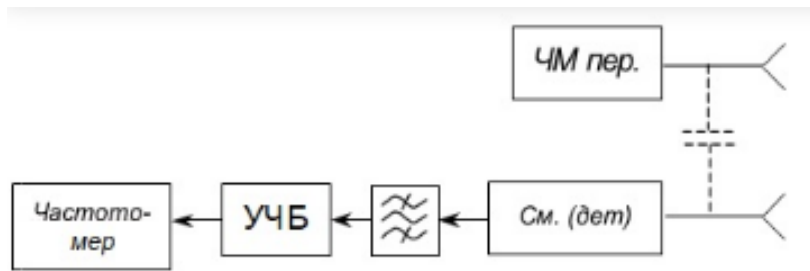


Рис. 2.2. Упрощенная структурная схема частотного дальномера

Закон изменения частоты излучаемых колебаний может быть различным, в частности, гармоническим или пилообразным. Изменение частоты обязательно должно быть знакопеременным, так как частота – ограниченный природный ресурс.

В радиовысотомере РВ-20 применяется модуляция частоты по симметричному пилообразному закону. Применение пилообразного, а не гармонического как в первых образцах отечественных высотомеров, закона модуляции вызвано необходимостью обеспечения разрешающей способности по дальности [1]. Разрешающая способность используется для выделения частоты биений, соответствующий истинной высоте самолета из спектра частот, обусловленного отражениями сигналов от всей области земной поверхности, облучаемой передатчиком. Этот факт особенно важен при измерении высоты во время приема самолета.

Рассмотрим частотный дальномер, выполненный по схеме, представленной на рис. 2.2, и имеющий симметричный пилообразный закон частотной модуляции (рис. 2.3, а).

Как видно из рисунка частота биений остается постоянной большую часть периода модуляции T_M и изменяется только в так называемых зонах обращения, длительность которых равна задержке принятого сигнала относительно зондирующего τ_3 . Обычно период модуляции выбирают значительно большим, чем максимальная ожидаемая задержка $\tau_{3\text{MAX}}$: $\tau_{3\text{MAX}} < (0,01 - 0,02)T_M$. Поэтому измеряемая частота биений f_6 определяется плоскими участками кривой на рис. 2.3, б. Для этих участков нетрудно получить, используя выражение (2.1)

$$R = \frac{f_6 c T_M}{2 \cdot 2 \Delta f_M} = \frac{f_6 c}{4 F_M \Delta f_M} \quad (2.2)$$

Оказывается, что дальность прямо пропорциональна частоте биений, поэтому частотомер можно проградуировать в единицах дальности.

Частотный метод измерения расстояния широко применяется в самолетных высотомерах, где используется его важное достоинство –

отсутствие мертвой зоны.

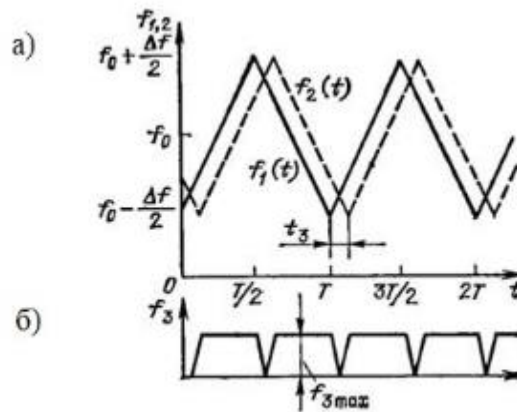


Рис. 2.3. Частотные соотношения к схеме рис. 2.2:

а – частоты зондирующего и принимаемого сигналов; б – частота биений

Отметим, что схема частотного дальномера подобна схеме корреляционного измерителя, поэтому дисперсию шумовой составляющей погрешности измерения временной задержки найдем по формуле для дисперсии эффективной оценки

$$\sigma_{t^* \Delta \Phi}^2 = \frac{1}{\frac{2E}{N_0} \Delta f_{\text{СК}}^2},$$

Где $\Delta f_{\text{СК}} = \frac{\Delta f_M}{2\sqrt{3}}$ – среднеквадратическая ширина спектра сигнала;

$E = P_{\text{пр}} T_{\text{изм}}$ – энергия сигнала за время измерения.

Погрешность измерения R зависит также от точности измерения, девиации частоты и частоты модуляции. Частота модуляции имеет кварцевую стабильность, а девиация имеет большую погрешность, в лучшем случае 10^{-3} .

Соответствующая погрешность вычисляется по формуле

$$\left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{\Delta f_M} = - \frac{\Delta(\Delta f_M)}{\Delta f_M}$$

Для выяснения погрешности, связанной с неточностью измерения частоты биений, представим основную формулу частотного дальномера в виде

$$R = \frac{c}{4\Delta f_M} * \frac{T_M}{T_6} = N \frac{c}{4\Delta f_M}$$

Обозначим

$\frac{T_M}{T_6} = N$ – число периодов биений за период модуляции. Из последних

формул следует, что в качестве частотомера можно поставить счетчик числа периодов биений на периоде 86 модуляции. При этом может возникнуть

ошибка на ± 1 биение из-за наличия зон обращения, где характер биений зависит от фазовых соотношений между принятым и опорным сигналами;

$\Delta R_{\text{Диск}} = \frac{c}{4\Delta f_M}$ -ошибка дискретности (постоянная ошибка частотного дальномера).

Ошибка дискретности – это принципиальная ошибка частотного метода измерения дальности при использовании периодического зондирующего сигнала с постоянным периодом T_M . Как следствие сигнал биений также периодический с периодом T_M , и его спектр состоит из гармоник частоты F_M . Поэтому частота может быть измерена только с точностью до дискрета, равного F_M .

Снижение самолета или набор высоты приводит к появлению доплеровского смещения частоты принимаемого сигнала относительно излучаемого:

$$f = f_0 \frac{2V_R}{c}.$$

Рассмотрим влияние эффекта Доплера на работу частотного дальномера. Возможны два случая работы системы.

1. $f_D < f_6$ (рис. 2.4)

На рис. 2.4 штрих-пунктирной линией показано изменение частоты принимаемого сигнала от неподвижного объекта наблюдения. Разность между ней и сплошной линией, которая представляет частоту зондирующего сигнала, равна частоте биений f_6 соответствующей дальности до объекта. Пунктирная линия смещена относительно штрих-пунктирной вниз на частоту Доплера f_D и характеризует частоту сигнала, принятого от подвижного объекта. Из рисунка видно, что в течение одной половины периода модуляции частота биений принимает значение

$$f_{61} = f_6 - f_D$$

а в течение другой

$$f_{62} = f_6 + f_D$$

Частотомер измеряет среднюю частоту биений за период модуляции

$$f_{6.ср} = \frac{f_{61} + f_{62}}{2} = f_6$$

Таким образом $f_D < f_6$ доплеровское смещение частоты не влияет на среднюю частоту биений $f_{6.ср}$, которая и измеряется частотомером. Иными словами, движение объекта не влияет на измерение дальности до него.

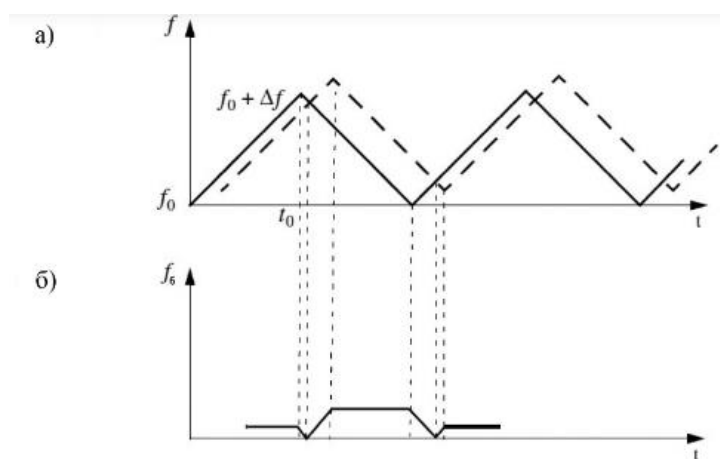


Рис. 2.4. Частотные соотношения к схеме рис. 2.2 при работе по движущейся цели ($f_{\text{д}} < f_{\text{с}}$): а – частоты зондирующего и принимаемого сигналов; б – частота биений

2) $f_D > f_0$ (рис. 2.5)

На рис. 2.5 сохранены те же обозначения, что и на рис. 2.4. Из него следует, что в течение одной половины периода модуляции частота биений равна

$$f_{b1} = f_D - f_0,$$

а в течение другой

$$f_{b2} = f_D + f_0$$

Средняя частота биений $f_{b,ср}$, измеряемая частотомером, равна

$$f_{b,ср} = \frac{f_D + f_0}{2} = f_0$$

Таким образом, в данном случае дальномер измеряет не дальность, а радиальную скорость. Нетрудно подсчитать, что в условиях работы самолетных высотомеров всегда выполняется условие $f_D < f_0$. Поэтому эффект Доплера не влияет на их работу. Отметим, что этот факт является следствием симметрии примененного закона частотной модуляции, когда половину периода модуляции частота излучаемого сигнала возрастает, а половину – убывает.

На выбор несущей частоты сигнала передатчика влияет требуемая величина девиации частоты, условия отражения сигнала от земной поверхности, конструктивные характеристики дальномера, его допустимые габариты (особенно размеры антенных систем).

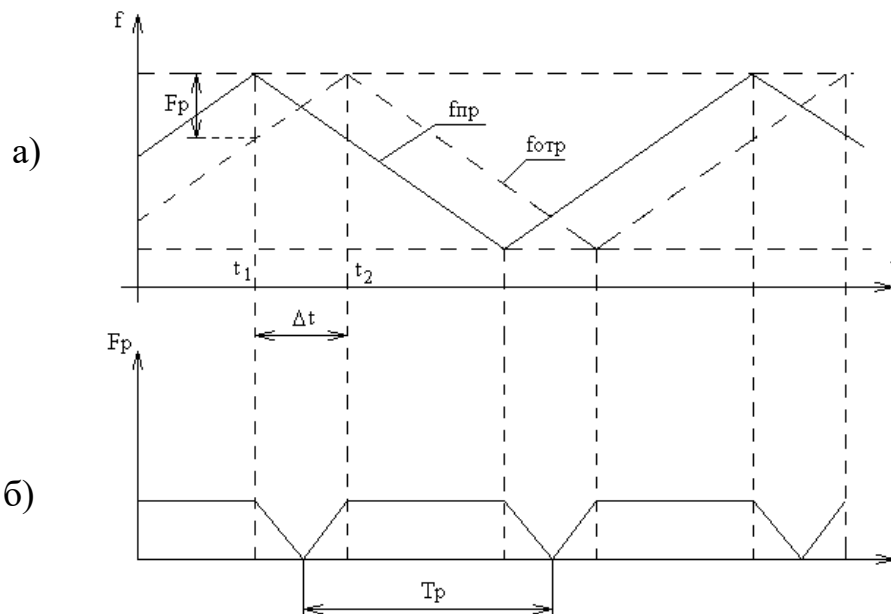


Рис. 2.5. Частотные соотношения к схеме рис. 2.2 при работе по движущейся цели ($f_D > f_0$): а – частоты зондирующего и принимаемого

сигналов; $\bar{b}$ – частота биений

3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, НАЗНАЧЕНИЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА РАДИОВЫСОТОМЕТРА

3.1. Принцип измерения высоты

В радиовысотомере РВ-20 измерение высоты осуществляется за счет изменения периода частотной модуляции сигнала передатчика T_M при постоянных значениях девиации частоты Δf_M и частоты биений $f_{\bar{b}}$.

Запишем основное уравнение частотной радиолокации (2.2) в виде

$$R = H = \frac{f_{\bar{b}} T_M c}{4 \Delta f_M} \quad (3.1)$$

где H – высота самолета.

В радиовысотомере РВ-20 девиация частоты фиксирована, а частота биений поддерживается постоянной $f_{\bar{b}} = f_{\bar{b}0}$ за счет соответствующего изменения периода модуляции T_M с помощью следящей схемы. Из формулы (3.1) следует, что если частота биений и девиация частоты постоянны, то высота H пропорциональна периоду модуляции T_M .

Это соотношение и используется для измерения высоты в данном высотомере.

Рисунок 3.1 иллюстрирует, что при фиксированных девиации частоты Δf_M и частоте биений $f_{\bar{b}}$ период модуляции T_M действительно линейно связан с временем задержки τ_3 отраженного сигнала относительно излученного.

Соотношения, имеющие место в высотомере РВ-20 отличаются от представленных на рис. 3.1 тем, что в нем применена симметричная частотная модуляция.

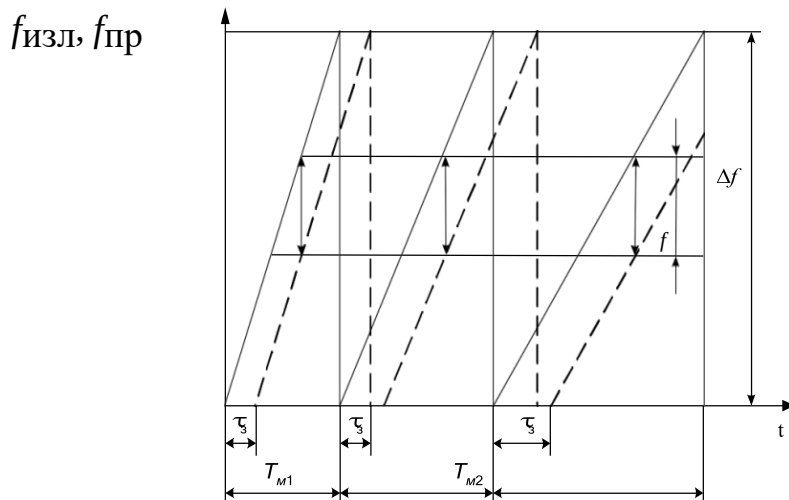


Рис. 3.1. Временные соотношения в частотном дальномере, где период модуляции «следит» за изменением задержки принятого сигнала относительно излученного

3.2. Назначение радиовысотомера РВ-20

Радиовысотомер РВ-20 предназначен для систем автоматической посадки самолетов по третьей категории Международной организации гражданской авиации ИКАО и служит для измерения истинной высоты полета и скорости её изменения. Радиовысотомер выдает экипажу на приборную доску, а также в систему автоматической посадки и в другие бортовые системы следующую информацию:

- 1) данные о текущей высоте в диапазоне высот 0–1500 м;
- 2) данные о вертикальной скорости;
- 3) три разовых сигнала при снижении самолета до трех фиксированных высот;
- 4) сигнал «Исправность» при нормальной работе высотомера;
- 5) сигнал, соответствующий высоте принятия решений;
- 6) сигнал «Предупреждение» при отсутствии радиолокационного контакта с землей;
- 7) флажковый сигнал при возникновении неисправности;
- 8) сигнал «Высота» при полете ниже высоты, установленной на указателе высоты.

3.3. Характеристики радиовысотомера РВ-20

Тактические характеристики

Диапазон измеряемых высот – 0-1500 м.

Погрешность измерения при полете над гладкой водной поверхностью и взлетно-посадочной полосой:

- 1) по автоматическому выходу – в диапазоне высот до 30 м – 0.45 м; в диапазоне высот от 30 до 150 м – $0.02H$; в диапазоне высот от 150 до 1500 м – $0.05H$;
- 2) по стрелочному указателю высоты – в диапазоне высот до 10 м – 0.85 м; в диапазоне высот до 30 м – $0.04H \pm 0.45$ м; в диапазоне высот от 150 м – $0.06H$; в диапазоне высот до 1500 м – $0.09H$.

Диапазон измеряемой скорости до ± 50 м/с.

Погрешность измерения скорости – по автоматическому выходу – $\pm (0.5 \pm 0.01H + 0.1v)$ м/с, по стрелочному прибору – $(0.3 \pm 0.05H)$ м/с.

Постоянная времени радиовысотомера – 0.1 с по автоматическому выходу и 0.5 с по указателю высоты.

Достоверность результатов технического состояния радиовысотомера – 0.999.

Технические характеристики

Режим работы – непрерывное излучение сигнала с частотной модуляцией.

Диапазон рабочих частот – 4200-4400 МГц.

Формамодулирующего напряжения – симметричное пилообразное.

Девияция частоты – 130 МГц.

Измерение высоты производится в режиме автоматического слежения за частотой биений с изменением периода модуляции.

Ширина диаграммы направленности антенны в полостях H и E – 45°.

Коэффициент усиления – 10 дБ. Мощность передатчика – 150 мВт.

Чувствительность приёмника – 0.4 мкВ.

Полоса пропускания усилителя низкой частоты – 13 кГц. Частота настройки следящего дискриминатора – 30 кГц.

Эксплуатационные характеристики

При полетах на малых высотах над толстым слоем сухого льда или снега высотомер может измерять высоту до нижней поверхности льда, т.е. будет давать ошибку; при полетах над густым лесом аналогично может быть измерена высота до верхней кромки деревьев.

При полете над горной местностью с большим перепадом высот высотомером пользоваться не рекомендуется, т.к. резкие изменения высоты могут выходить за пределы измеряемых высот.

При углах крена и тангажа более 40° высотомером пользоваться не следует.

Время непрерывной работы радиовысотомера – 6 часов.

Устройство радиовысотомера

Функционально радиовысотомер состоит из следующих блоков (рис. 3.2):

- 1) канала измерения высоты;
- 2) канала измерения вертикальной скорости;
- 3) канала автоматической подстройки периода модуляции;
- 4) канала автоматической калибровки;
- 5) канала автоматического контроля исправности высотомера;
- 6) узла питания.

Режим проверки антенно-фидерной системы включается автоматически через 1 с после потери отраженного сигнала. Длительность режима проверки 0.35 с, период повторения около 1 с. В этом режиме сигнал с передающей антенны передается на принимающую антенну. В случае наличия сигнала на выходе приемника дается сигнал исправности высотомера и сигнал

предупреждения о потере отраженного сигнала, в противном случае подается сигнал о неисправности высотомера.

В режиме автокалибровки сигнал передатчика поступает на эталонную линию задержки. Если измеренное значение эквивалентной высоты отличается от 15 м, то вырабатывается управляющий сигнал, который изменяет девиацию частоты до требуемого значения. В этом режиме время модуляции устанавливается фиксированным.

Передатчик собран по схеме – задающий генератор, усилитель мощности, умножитель частоты. Несущая частота передатчика – 4350 МГц, мощность передатчика 150 мВт, крутизна модуляционной характеристики – 10 МГц/В, девиация частоты – 130 МГц, частота модуляции – от десятков герц до нескольких килогерц.

На входе приемника стоит смеситель, на который подается часть мощности передатчика для создания стабильного опорного сигнала. С выхода смесителя сигнал биений поступает на усилитель низкой частоты, имеющий среднюю частоту 30 кГц и полосу пропускания 13 кГц. Общее усиление приемного тракта около 140 дБ – 40 дБ в предварительном усилителе, 60 дБ в усилителе с регулируемым коэффициентом усиления и 40 дБ в конечном усилителе.

Коэффициент усиления УНЧ изменяется автоматически на 60-10 дБ под воздействием управляющего напряжения, формируемого в блоке коррекции для того, чтобы поддерживать примерно постоянным выходной сигнал при изменении высоты самолета.

С выхода УНЧ сигнал поступает на два частотных дискриминатора – контрольный и следящий.

Контрольный дискриминатор работает в режиме поиска и захвата сигнала и включает работу цепи слежения.

В режиме слежения напряжение с выхода следящего дискриминатора, представляющего собой по существу частотный детектор, построенный на частоту $f_{60} = 30$ кГц, через интегратор и схему коррекции поступает на генератор пилообразного напряжения (ГПН), служащий модулятором передатчика. Период модуляции изменяется под действием регулирующего напряжения, поступающего на модулятор от блока коррекции.

Если частота сигнала с выхода УНЧ не равна f_{60} , следящий дискриминатор вырабатывает сигнал ошибки e , изменяющий период модуляции T_M так, чтобы это равенство соблюдалось.

Частотная характеристика следящего дискриминатора представлена на рис. 3.3 б).

Таким образом радиовысотомер включает в себя контур автоматического слежения за частотой биений, включающий в себя модулятор передатчика с управляемым периодом модуляции УМ-передатчик, среду распространения радиоволн, смеситель, частотный детектор, интегратор, схему коррекции.

В этой цепи интегратор устраняет статическую ошибку в определении

равенства частоты биений величине f_6 (кольцо слежения является системой автоматического регулирования с астатизмом первого порядка), а также выполняет фильтрующие свойства в кольце слежения. Схема коррекции представляет собой устройство, коэффициент передачи которого

$$kAe^{-au},$$

где A , a – постоянные коэффициенты,

u – напряжение интегратора.

Схема коррекции позволяет компенсировать зависимость коэффициента передачи контура слежения от времени задержки сигнала на трассе распространения τ_3 , что улучшает динамические характеристики радиовысотомера.

Напряжение с выхода схемы коррекции используется также для регулировки коэффициента усиления УНЧ, так чтобы его выходные сигналы мало зависели от высоты полета самолета.

Как следует из рис. 3.3б) система автоматического слежения за частотой f_6 работает только в том случае, если она попала в полосу пропускания следящего дискриминатора.

Для поиска и обнаружения сигнала биений при первоначальном включении радиовысотомера или при потере сигнала служит устройство поиска и обнаружения.

Устройство обнаружения сигнала биений состоит из контрольного дискриминатора и схемы поиска и захвата.

Поиск заключается в последовательном изменении периода модулирующего сигнала, как показано на рис. 3.1 под действием напряжения, формируемого блоком поиска и захвата, до тех пор, пока частота биений с выхода УНЧ не попадет в полосу пропускания контрольного дискриминатора (см. рис. 3.4а)) и его выходной сигнал не превысит некоторый пороговый уровень.

При превышении порога поиск сигнала прекращается и включается схема слежения за частотой сигнала биений, которая устраняет ошибку e , обусловленную неравенством f_6 и f_{60} .

В формирователе импульсов (см. рис. 3.2) формируется импульс, длительность которого равна длительности пилообразного напряжения. Это напряжение поступает в устройство, называемое линейным периодометром. В нем формируется напряжение, прямо пропорциональное длительности пилы, а, следовательно, и высоте. Это напряжение идет в цепи измерения высоты (до высот 150 м) и в схему измерения вертикальной скорости, которая определяется как производная от дальности.

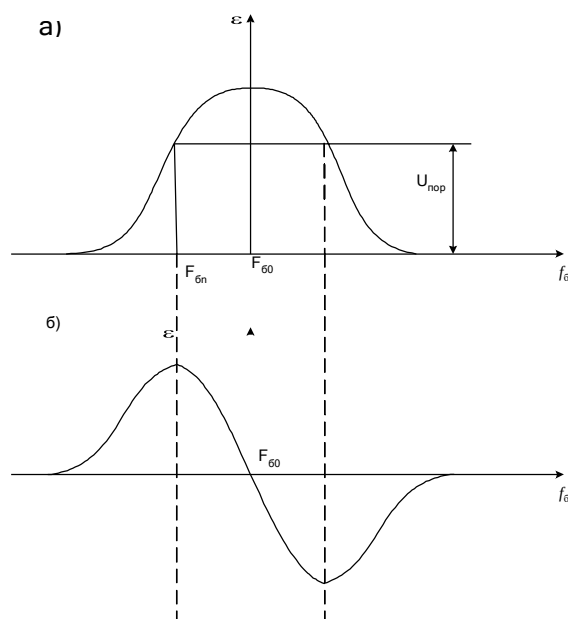


Рис. 3.3. а) – напряжение на выходе контрольного дискриминатора;
 б) – напряжение на выходе следящего дискриминатора

Кроме линейного, имеется еще и нелинейный измеритель периода модуляции с квазилогарифмической зависимостью выходного напряжения от высоты. Этот измеритель работает в диапазоне высот 150 – 1500 м. С выхода измерителя напряжение подается в систему индикации высоты и на устройство, формирующее разовые сигналы при достижении самолетом некоторых фиксированных высот.

В состав радиовысотомера входит также устройство управления автокалибровкой и устройство автоматического контроля, выдающее разрешающий сигнал для измерения в случае исправности высотомера. Вероятность правильной выдачи сигнала исправности – 0.999.

4. ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 4.1.

Функциональная схема состоит из следующих блоков:

- 1) собственного радиовысотомера, включающего передатчик, приемник и измерительные цепи;
- 2) контрольно-проверочной аппаратуры, создающей сигналы, имитирующие рабочие сигналы радиовысотомера;
- 3) линии задержки с калиброванным ослаблением (прибор К-5);
- 4) осциллографа;
- 5) стрелочного индикатора высоты;
- 6) щитка включения питания КПРВ-5.

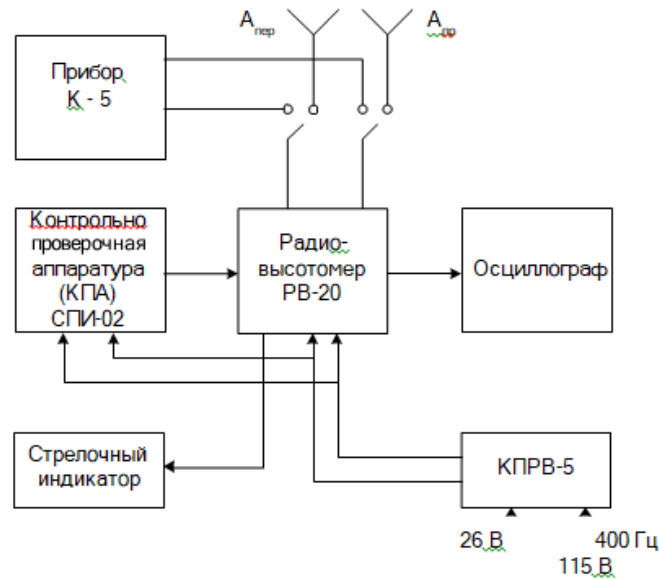


Рис. 4.1. Схема экспериментальной установки

Обозначения на панели прибора СПИ-02

Для прибора СПИ-02 приняты следующие условные обозначения и сокращения:

РВ	- радиовысотомер;
Ни	- имитируемая высота;
Кст	- коэффициент стоячей волны по напряжению;
$U_{\text{откл. УРЧ}}$	- напряжение отключения усилителя разностной частоты;
$U_{\text{захвата}}$	- напряжение захвата;
$U_{\text{вкл. СИ}}$	- напряжение включения сигнала исправности;
$U_{\text{уст. Ни}}$	- напряжение имитации скорости изменения высоты;
$U_{\text{уст. Ни}}$	- напряжение имитации высоты;
$U_{\text{лин.}}$	- напряжение высоты по линейному выходу;
$U_{\text{уст. Нув}}$	- напряжение имитации показаний указателя;
$U_{\text{н лин}}$	- напряжение высоты по нелинейному выходу;
$U_{\text{вых. Н}}$	- напряжение скорости изменения высоты;
ЦКА.ЦКБ	- цифровой выход изделия по высоте;
ЗС ТлфН	- низкоомный выход звукового сигнала;
ЗС ТлфВ	- высокоомный выход звукового сигнала;
ЗС общ.	- звуковой сигнал, вывод общий;
ИмСО	- сигнал имитации отказов;
ЧКл	- частота калибровки;
ПРС	- первый разовый сигнал;
2РС	- второй разовый сигнал;
3РС	- третий разовый сигнал;

- Н опас. - сигнал опасной высоты;
 ИСПР. - сигнал исправности;
 ПРЕДУПР. - сигнал предупреждения;
 БЛОКИР. - сигнал блокировки;
 РВ ГОДЕН - сигнал годности радиовысотомера;
 ТЕСТ. - режим контроля радиовысотомера;
 РЭ - работа изделия на эквивалент высоты;
 РС СИНХР.- разовый сигнал синхронизации.

Обозначение контрольных гнезд

- А1 - общий;
 А2 - напряжение на выходе смесителя;
 А4 - напряжение на выходе второго каскада усилителя сигнала биений (УСБ);
 А6 - напряжение на выходе ограничителя;
 А8 - напряжение на выходе схемы, управляющей коэффициентом усиления второго каскада УСБ;
 Б1 - напряжение на выходе генератора пилообразного напряжения;
 Б2, Б3 - сигнал синхронизации.

5. ЗАДАНИЕ НА РАБОТУ

- 5.1. Ознакомиться с экспериментальной установкой.
 5.2. Включить питание радиовысотомера и прибора КПА на щитке КПРВ-5.
 5.3. Проверить работу радиовысотомера по собственной линии задержки. Для этого нужно нажать красную кнопку КОНТРОЛЬ на щитке стрелочного указателя высоты. При этом показания высотомера должны лежать в пределах 15-20 м.
 5.4. Просмотреть сигнал с выхода генератора пилообразного напряжения и снять зависимость времени модуляции T_M в зависимости от высоты H $T_M = T_M(H)$. Для этого на контрольно-испытательном приборе КПА переключатель РОД РАБОТЫ поставить в положение УСТАН.Н; тумблер «РВ-УВ» – в положение «РВ»; тумблер УСТ.Н – в положение РУЧН. Осциллограф включить на внешнюю синхронизацию; сигнал синхронизации снимать с клеммы Б2 или Б3.
 5.5. Не изменяя режима работы КПА, посмотреть сигнал биений на выходе ограничителя и снять зависимость длительности сигнала биений t_6 от высоты H $t_6 = t_6(H)$. Замерить частоту сигнала биений. Данные п.п. 5.4, 5.5 поместить в таблицу 5.1.

Таблица 5.1

Н, м	15	50	100	150	500	1000
------	----	----	-----	-----	-----	------

T_M , мВ						
t_6 , мс						

- 5.6. Построить на одном графике зависимости $T_M = T_M(H)$ и $t_6 = t_6(H)$. Объяснить результаты.
- 5.7. В том же режиме работы установки установить на стрелочном индикаторе высоты опасную высоту перемещения желтого флажка. Изменяя высоту на КПА, убедиться, что при прохождении опасной высоты на приборе загорается соответствующая лампочка. Замерить значения фиксированных высот; моменты прохождения фиксированных высот определяются по загоранию лампочек 1РС; 2РС; 3РС.
- 5.8. Снять зависимость изменения управляющего напряжения U_y от высоты H $U_y = U_y(H)$ и замерить минимальное значение высоты $H_{\min}$, начиная с которого меняется значение управляющего напряжения. Данные поместить в таблицу 5.2.

Таблица 5.2

H , м	15	50	100	150	500	750	1000
U_y , В							

Примечание: значение U_y замерить по осциллографу.

- 5.9. Определить чувствительность радиовысотомера. Для этого переключатель РОД РАБОТЫ поставить в положение «РЭ». Определить высоту по стрелочному указателю высоты, соответствующую задержке прибора К-5. Изменяя положение аттенюатора, определить значение ослабления, при котором происходит срыв слежения за сигналом; при этом на стрелочном приборе появляется красный флажок и на КПА загорается сигнал предупреждения. По градуировочной кривой прибора определить реальную чувствительность радиовысотомера, учитывая, что значения уровня входного сигнала даны в дБ относительно одного милливатта. Принимая сопротивление антенны $R_A = 50$ Ом, рассчитать минимальный уровень входного сигнала $U_{c \min}$, при котором радиовысотомер начинает нормально работать.
- 5.10. Поставить тумблер УСТАН.Н в положение «АВТ». Подать на осциллограф напряжения пилы с клеммы Б1. Просмотреть изменение модулирующего напряжения при работе высотомера в режиме поиска отраженного сигнала. Зарисовать осциллограммы. Замерить период поиска. Выключить питание высотомера, подсоединить к высотомеру передающую и приемную антенны; включить питание.
- 5.11. Переключатель РОД РАБОТЫ поставить в положение «РЭ». Измерить время модуляции T_M . Рассчитать по измеренному значению T_M высоту до земли. Сравнить расчетные данные с показанием стрелочного

индикатора.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Объясните принцип измерения высоты, используемый в радиовысотомере РВ-20.
- 6.2. Поясните работу высотомера по функциональной схеме.
- 6.3. Назовите основные тактико-технические характеристики высотомера.
- 6.4. Для чего и каким образом изменяется коэффициент усилителя низкой частоты?
- 6.5. Запишите формулу, по которой определяется дальность в радиовысотомере РВ-20.
- 6.6. Объясните причину возникновения дискретности отсчета дальности. От чего зависит величина дискретности?

7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

- 7.1. Функциональная схема экспериментальной установки.
- 7.2. Результаты работы в виде таблиц и графиков с объяснением полученных результатов, результаты расчетов.
- 7.3. Осциллограммы напряжений, полученных при выполнении работы.
- 7.4. Выводы по работе.

8. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 8.1. Денисов, В. П. Основы теории систем и комплексов радиоэлектронной борьбы: Курс лекций [Электронный ресурс] / В. П. Денисов. — Томск: ТУСУР, 2019. — 194 с.
- 8.2. Основы радиоэлектронной борьбы: учебник / Б. А. Никольский. — Самара: Изд-во Самарского университета, 2018. — 268 с.: ил.

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ СИСТЕМ И КОМПЛЕКСОВ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ БОРЬБЫ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ №3,4 для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения

Составитель:
д. ф.-м.н. Кузьменко Р.В.

Компьютерный набор Р.В. Кузьменко

Подписано к изданию _____
Уч-изд. л. _____

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14