

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»

А.В. Володько

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ
И КОМПЛЕКСОВ**

ПРАКТИКУМ И СБОРНИК ЗАДАЧ

Утверждено учебно-методическим советом
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2018

УДК 621.396(075.8)

ББК 32.95я7

В68

Рецензенты:

*кафедра информационной безопасности и систем связи
Международного института компьютерных технологий
(зав. кафедрой канд. техн. наук О.С. Хорпяков);
д-р техн. наук, проф. А.В. Останков*

Володько, А.В.

Основаы теории радиолокационных систем и комплексов. Практикум и сборник задач: учеб. пособие / А.В. Володько. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2018. – 160 с.

ISBN

Учебное пособие содержит необходимые материалы и задания для проведения практических занятий по дисциплине «Основы теории радиолокационных систем и комплексов».

Первая часть пособия представляет собой задачник по теории и технике радиолокации. В сжатой форме представлены минимальные теоретические сведения, необходимые для освоения материала, приведены примеры решения типовых задач радиолокации, список задач и вопросы для самоконтроля. Во второй части пособие содержит описание лабораторно-практических занятий, проводимых с привлечением специального лабораторного оборудования.

Учебное пособие составлено в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по программе курса «Основы теории радиолокационных систем и комплексов» предназначенного для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» (специализация «Радиоэлектронные системы передачи информации»).

Табл. 15. Ил. 37. Библиогр.: 13 назв.

УДК 621.396(075.8)

ISBN

© Володько А.В., 2018
© ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», 2018

ВВ **ИЕ**

Настоящее учебное пособие составлено в соответствии с программой курса «Основы теории радиолокационных систем и комплексов» для специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

Пособие разбито на две части, первая из которых составляет задачник по теории и технике радиолокации. В краткой форме, в виде справочника, описаны основные положения, принципы и методы радиолокации. Приведены решения типовых задач радиолокации, касающихся обнаружения, разрешения и измерения параметров радиолокационных сигналов. Каждый раздел содержит вопросы для самопроверки.

Вторая часть посвящена описанию лабораторно-практических занятий, проводимых с привлечением специального оборудования, таких как авиационный радиокompас АРК-9, авиационный радиолокатор РБП-3, радиолокационный оптимальный приемник (согласованный фильтр) сигнала с линейной частотной модуляцией, а также оригинальной ультразвуковой установки изучения эффективной поверхности рассеяния локационных целей.

При составлении учебного пособия автор старался сочетать сжатое и доходчивое изложение начальных базовых сведений, необходимых для изучения дисциплины, с практикумом типовых теоретических и утилитарных задач радиолокации.

Издание содержит авторские иллюстрации.

ЧАСТЬ 1. СБОРНИК ЗАДАЧ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ И ПРОВЕДЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

1. Физические основы радиолокации

1.1. Необходимые теоретические сведения

Цель занятия: изучение физических принципов радиолокации, в том числе:

- объектов радиолокационного наблюдения;
- основных преимуществ радиолокационных систем;
- методов получения информации о целях;
- задач, решаемых радиолокацией;
- состава типовой радиолокационной станции (РЛС);
- основных типов РЛС;
- технических показателей РЛС;
- трехуровневой системы обработки сигналов РЛС;
- методов измерения дальности и положения цели в пространстве;
- принципов действия загоризонтных РЛС;
- радиолокационных систем с активным ответом.

В процессе подготовке к занятиям следует пользоваться литературой [1-4].

Краткие теоретические сведения [1].

1. Радиолокацией называется область радиоэлектроники, назначением которой является использование отражения, переизлучения или собственного излучения радиоволн различными объектами для обнаружения этих объектов, измерения их координат и параметров движения, а также для оценки свойств объектов.

2. Объекты радиолокационного наблюдения (или, как их обычно называют, **цели**) могут быть аэродинамическими (самолеты, вертолеты), баллистическими или космическими

(искусственные спутники Земли, головки баллистических ракет), наземными и надводными (автомшины, танки, корабли), а также иметь естественное происхождение (участки земной и водной поверхности, облака, планеты).

3. Основные преимущества радиолокационных методов получения информации об объектах наблюдения определяются:

- возможностью вести наблюдения в любое время суток, через облака, дождь и туман;
- большой дальностью действия;
- возможностью измерения параметров движения целей с высокой точностью.

4. В радиолокации используется несколько методов получения информации о целях. Наиболее распространенным является **метод активной радиолокации**, основанный на облучении целей радиоволнами и приеме отраженных радиосигналов. Устройства активной радиолокации могут быть совмещенными и разнесенными. В первом случае радиопередатчик, предназначенный для облучения целей, и радиоприемник, служащий для приема отраженных сигналов, располагаются в непосредственной близости и обычно входят в состав одной радиолокационной станции. Во втором случае точки излучения и приема радиоволн располагаются на удалении друг от друга. Активную радиолокацию с разнесенными точками излучения и приема радиосигналов называют также **полуактивной радиолокацией**.

В радиолокации часто используется **метод активного ответа**, который характеризуется применением ретрансляторов или ответчиков, устанавливаемых на объектах наблюдения и предназначенных для приема облучающих цель радиоволн и излучения ответных кодированных радиосигналов.

Радиолокация, использующая прием собственного радиоизлучения целей, носит название **пассивной радиолокации**.

5. С помощью радиолокационных устройств можно решить следующие **задачи**:

- обнаружить присутствие объектов наблюдения (целей);
- измерить их пространственные координаты (дальность, угловые координаты, высоту над поверхностью Земли и др.);
- определить скорости изменения координат и абсолютные скорости движения целей;
- определить производные координат целей по времени более высокого порядка;
- выявить траектории движения целей на интервале наблюдения и прогнозировать их;
- оценить некоторые свойства обнаруживаемых целей (размеры кораблей или летательных аппаратов, структуру облаков или поверхности планет и др.);
- определить государственную принадлежность наблюдаемых целей.

6. **Радиолокационными станциями** (РЛС) или радиолокаторами называются технические средства получения радиолокационной информации. Основными составными частями РЛС являются:

- радиопередатчик, предназначенный для формирования сигналов, зондирующих пространство;
- антенное устройство, предназначенное для излучения и приема радиоволн;
- радиоприемник, предназначенный для селекции, усиления и необходимого преобразования сигналов, несущих информацию о целях,
- выходное устройство, позволяющее представить имеющуюся информацию о целях в виде, удобном для получателя (электронно-лучевой индикатор или преобразователь электрических сигналов приемника в код, используемый в электронной вычислительной машине);
- управляющее устройство, предназначенное для создания управляющих электрических сигналов, определяющих вид излучаемых колебаний и их

периодичность, а также характер обработки принятых сигналов в приемнике и выходном устройстве.

7. По **назначению** радиолокационные станции можно разделить на следующие основные группы.

Наземные РЛС:

1) станции управления воздушным движением в районе аэродрома;

2) станции посадки самолетов;

3) станции обзора летного поля;

4) станции обнаружения воздушных целей и наведения на них истребителей;

5) станции обнаружения баллистических ракет и искусственных спутников Земли и слежения за ними;

6) станции целеуказания, используемые для выбора цели при стрельбе зенитной артиллерии или зенитными управляемыми ракетами;

7) станции орудийной наводки и наведения зенитных управляемых ракет;

8) станции разведки движущихся наземных целей, предназначенные для наблюдения за передвижением войск и техники противника в прифронтовой полосе на поле боя;

9) загоризонтные станции обратного рассеяния, предназначенные для обнаружения низко летающих самолетов и запусков баллистических ракет как наземными установками, так и с подводных лодок и кораблей;

10) метеорологические станции, предназначенные для измерения скорости и направления ветра на различных высотах, определения интенсивности, формы, направления и скорости перемещения ливневых и грозовых очагов; обнаружения зон инверсий температуры и влажности, а также зон повышенной турбулентности; оперативного наблюдения за тайфунами, торнадо, шквалами.

Корабельные РЛС:

1) навигационные станции, обеспечивающие кораблевождение и позволяющие, в частности, определять истинный курс и истинную скорость корабля;

2) станции, обеспечивающие вход, выход и маневрирование в узостях (например, в портах, проливах и т. п.), а также предотвращающие столкновения кораблей в плохих метеоусловиях и ночью;

3) станции наблюдения за воздушной обстановкой;

4) станции обнаружения надводных и низколетящих целей кораблей, самолетов, ракет;

5) станции обнаружения баллистических ракет и искусственных спутников Земли и слежения за ними.

Самолетные и ракетные бортовые РЛС:

1) радиолокационные дальномеры, используемые совместно с оптическими и инфракрасными прицелами для точного измерения дальности целей;

2) станции перехвата и прицеливания, используемые для обнаружения целей, осуществления сближения с ними и атаки, а также для выхода из атаки;

3) бортовые станции управляемых ракет, используемые для управления полетом ракеты при выводе ее в точку встречи с целью;

4) радиолокационные взрыватели, предназначенные для подрыва боевого заряда при нахождении ракеты вблизи цели;

5) радиолокационные прицелы, предназначенные для обнаружения воздушных целей, атакующих данный самолет, и управления стрельбой по этим целям;

6) станции предупреждения об облучении самолета радиолокационными станциями противника;

7) самолетные панорамные станции, предназначенные для получения изображения земной поверхности, над которой пролетает самолет;

8) станции бокового обзора, предназначенные для наблюдения земной поверхности при высокой разрешающей способности по угловой координате.

9) радиолокационные высотомеры, предназначенные для точного измерения истинной высоты полета самолета;

10) станции измерения скорости полета самолета;

11) станции, предназначенные для предупреждения экипажа самолета о грозовых образованиях, зонах повышенной турбулентности атмосферы, а также о наземных препятствиях (горы, высокие сооружения и т. п.);

12) станции дальнего обнаружения надводных и низколетающих целей.

8. Любая РЛС характеризуется следующими показателями:

– назначением;

– размерами области пространства, в пределах которой осуществляется наблюдение целей (зона обзора);

– временем, требующимся для осмотра заданной зоны обзора (период обзора);

– измеряемыми координатами целей и их производными по времени;

– точностью измерения координат;

– разрешающей способностью;

– эксплуатационной надежностью;

– помехозащищенностью.

Зона обзора РЛС ограничивается максимальной и минимальной дальностью обнаружения целей, а также секторами обзора в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Измеряемыми координатами целей чаще всего являются их дальность и две угловые координаты – азимут и угол места; широкое применение находят также измерения высоты полета целей, радиальной составляющей их скорости, угловых скоростей их перемещения в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

При оценке точности измерений, осуществляемых с помощью РЛС, обычно принимают во внимание лишь случайные составляющие ошибок. В качестве характеристик

точности чаще всего используют среднеквадратическое значение или дисперсию ошибки измерения.

Разрешающая способность РЛС характеризует возможность раздельного наблюдения целей, которые различаются значениями координат или их производных. Так, разрешающая способность РЛС по дальности определяется тем минимальным расстоянием между двумя целями, имеющими одинаковые угловые координаты и скорость перемещения, при котором эти цели еще наблюдаются раздельно. Разрешающая способность по угловой координате определяется минимальным углом между направлениями на две цели из точки расположения РЛС, при котором еще возможно раздельное наблюдение этих целей. Иногда разрешающую способность РЛС характеризуют **элементарным разрешаемым объемом**, размеры которого определяются таким образом, что две цели, находящиеся в центрах соседних элементарных объемов, наблюдаются раздельно. Если расстояние между целями меньше размера элемента разрешения, то эти цели воспринимаются радиолокационной станцией как одна.

Эксплуатационной надежностью РЛС называется свойство выполнять возложенные на нее функции в реальных условиях эксплуатации. Обычно эксплуатационную надежность станции характеризуют вероятностью безотказной работы в течение заданного времени или средним значением времени работы между двумя последующими отказами.

9. Показатели каждой РЛС определяются ее **техническими характеристиками**. К основным техническим характеристикам РЛС относятся:

- вид и параметры излучаемых колебаний (закон модуляции, временные показатели и т. д.);
- способ обработки сигналов в приемнике;
- несущая частота или длина волны излучаемых колебаний;
- средняя и пиковая мощность излучения;

– форма и ширина диаграммы (направленности антенны, а также значения эффективной площади антенны и ее коэффициента усиления;

– закон перемещения в пространстве диаграммы направленности антенны;

- время облучения точечной цели;
- чувствительность приемного устройства;
- способ выдачи выходных данных РЛС.

10. По виду зондирующих (облучающих цели) сигналов станции активной радиолокации могут быть разделены на две большие группы: РЛС с импульсным и непрерывным излучением.

Представителями **импульсных** РЛС являются:

- некогерентные импульсные станции;
- когерентно-импульсные станции с большой скважностью;
- когерентно-импульсные станции с малой скважностью;
- станции с внутриимпульсной частотной модуляцией;
- станции с внутриимпульсной фазовой манипуляцией.

В РЛС с **непрерывным** излучением могут использоваться:

- немодулированные незатухающие колебания;
- частотно-модулированные колебания;
- непрерывные шумоподобные сигналы.

Главными достоинствами импульсных РЛС являются простота измерения дальности до цели, в том числе и при наличии многих целей, и несложность использования одной антенны для приема и передачи.

К недостаткам импульсных РЛС относятся необходимость применения больших пиковых мощностей излучаемых колебаний и сложность измерения скорости цели, особенно с высокой точностью.

РЛС с непрерывным излучением позволяют:

- эффективно различать цели путем селекции по скорости;
- однозначно измерять скорость в широком диапазоне ее возможных изменений;
- измерять очень малые расстояния;

– работать при относительно малой мощности излучения.

К недостаткам РЛС с непрерывным излучением следует отнести сложность развязки приемного и передающего трактов, а также сложность выходных устройств, особенно при необходимости вести наблюдение за многими целями по нескольким параметрам.

11. Радиолокационные сигналы могут последовательно подвергаться *трехкратной обработке*.

При *первичной обработке*, предназначенной для обнаружения цели и определения ее координат, источником информации являются высокочастотные радиосигналы, поступившие в приемник радиолокационной станции за время одного облучения цели. В результате первичной обработки принятые сигналы фиксируются с помощью индикаторных устройств того или иного вида, а также кодируются, т. е. преобразуются в форму, удобную для их дальнейшей обработки и передачи по каналам связи.

При *вторичной обработке* используются сигналы, полученные в течение нескольких периодов обзора радиолокационной станции. Эта обработка имеет целью повысить достоверность информации, уменьшить влияние естественных и искусственных помех. Вторичная обработка позволяет также расширить объем получаемой информации путем вычисления скорости и курса цели или ее траектории.

Третичная обработка представляет собой совместную обработку сигналов, поступающих от нескольких радиолокационных станций (здесь предполагается наличие радиолокационной системы). Функциональное взаимодействие средств, образующих систему, создает гораздо более широкие технические возможности, чем простое суммирование этих средств. По существу, образование системы органически взаимодействующих радиолокаторов создает новое качество при выделении полезной информации. Так, имеет место резкое увеличение помехозащищенности и

пропускной способности РЛС в системе, возрастание их дальности действия и точности измерения координат целей.

12. Основными тенденциями развития радиолокационных систем являются:

- усложнение формы зондирующих сигналов, в частности использование шумоподобных сигналов;
- использование антенн с электронным сканированием, в том числе широкое использование активных фазированных антенных решеток;
- применение цифровых методов фильтрации сигналов;
- объединение РЛС с ЦВМ с целью обеспечения адаптации характеристик РЛС применительно к конкретной быстро меняющейся обстановке;
- снижение веса и габаритов аппаратуры путем внедрения микроминиатюризации.

13. Физические принципы радиолокации. Как правило, для определения пространственного положения целей используются *сферическая* или *цилиндрическая* системы координат.

На рис. 1.1 представлена сферическая система координат. Здесь x , y , z являются ортогональными осями координат. Начало координат – точка O соответствует положению РЛС, точка M положению цели в пространстве, а точка L – проекции цели на горизонтальную плоскость xOy . К сферическим координатам наблюдаемой цели относятся: D – радиус-вектор (в радиолокации дальность до цели), $\varphi_{аз}$ – долгота (в радиолокации азимут), $\varphi_{ум}$ – угол места.

В цилиндрической системе координат принято обозначать аппликата z (в радиолокации высота цели H) и полярные координаты $\varphi_{аз}$ – азимут и ρ – расстояние от начала координат до проекции цели на горизонтальную плоскость xOy (в радиолокации – горизонтальная дальность).

14. При использовании средств активной радиолокации в предположении постоянства скорости и прямолинейности распространения радиоволн *дальность до цели D* однозначно

связана с временем распространения (временем запаздывания) радиоволн t_D от РЛС до цели и обратно

$$D = 0,5ct_D. \tag{1.1}$$

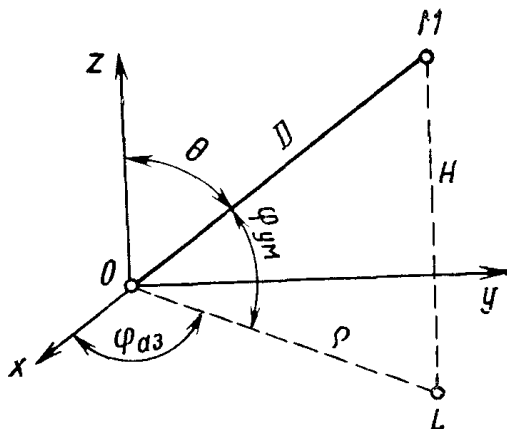


Рис. 1.1. Сферическая система координат [1]

Здесь c – скорость распространения радиоволн, принимаемая обычно равной 300 000 км/с. Действительное значение скорости распространения радиоволн в вакууме составляет $299\,792 \pm 0,4$ км/с. Скорость распространения радиоволн над земной поверхностью изменяется случайным образом в зависимости от метеоусловий. Отношение среднеквадратического значения изменения этой скорости к ее среднему значению можно приблизительно считать равным $5 \cdot 10^{-5}$.

15. Методы измерения дальности подразделяются на **амплитудные, частотные и фазовые** в зависимости от того, какой из параметров принимаемых радиосигналов играет основную роль при измерении времени распространения радиоволн.

Среди РЛС с амплитудным методом измерения дальности наибольшее распространение получили **импульсные станции**. Принцип их действия иллюстрируется

схемой на рис. 1.2. Генератор высокой частоты, управляемый импульсным модулятором, генерирует короткие высокочастотные импульсы с заданным периодом повторения.

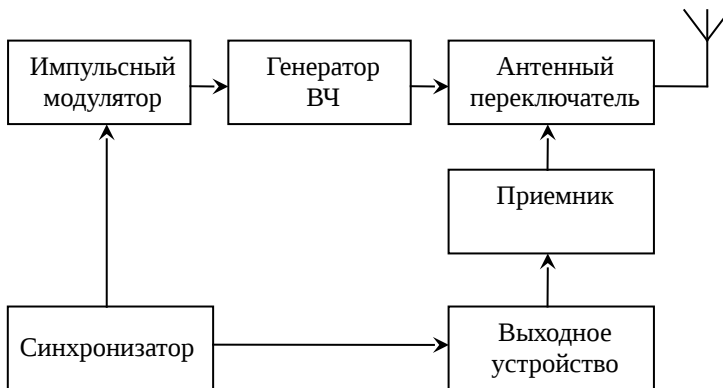


Рис. 1.2. Структурная схема импульсного дальномера

Генерируемый сигнал может быть записан следующим образом:

$$U_{ГЕН}(t) = U_0 \cos(\omega t + \varphi_0) \quad \text{при } t_0 \leq t \leq t_0 + \tau_{И}. \quad (1.2)$$

где t_0 – начало отсчета на временной оси, совпадающее с началом импульса; $\tau_{И}$ – длительность импульса; U_0 – амплитуда колебаний; φ_0 – начальная фаза колебаний. На время излучения каждого импульса антенна подсоединяется к генератору с помощью антенного переключателя; все остальное время антенна подключена к приемнику. Отраженные от цели сигналы после преобразования в приемнике поступают к выходному устройству, где путем сопоставления моментов излучения зондирующего импульса и приема отраженного измеряется время запаздывания t_D . Синхронность импульсных процессов в передатчике РЛС и измерительном устройстве обеспечивают управляющие сигналы синхронизатора.

В качестве **выходного устройства** в импульсной РЛС может быть использована **электронно-лучевая трубка** с амплитудной или яркостной отметкой. Развертка луча по экрану трубки, как правило, осуществляется с постоянной скоростью.

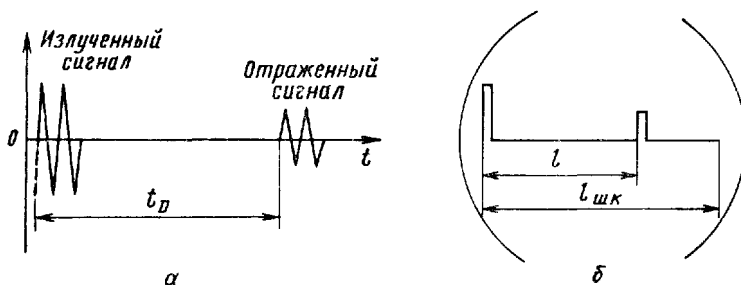


Рис. 1.3. Импульсный метод измерения дальности: а) эпюры напряжения; б) изображение на экране электронно-лучевой трубки [1]

Работа схемы развертки синхронизирована с работой передатчика РЛС. Если на экране трубки расстояние между изображениями излученного и отраженного импульсов равно l (рис. 1.3), скорость развертки $v_{разв}$, то

$$t_D = l / v_{разв} . \quad (1.3)$$

16. Положение цели в пространстве определяется как точка пересечения линий или поверхностей положения, соответствующих измеренным значениям координат. **Поверхностью положения** называется геометрическое место точек в пространстве, для которых измеренная РЛС координата цели (или параметр движения) имеет постоянное значение. Например, для РЛС, измеряющей только дальность D до цели, поверхностью положения является сфера радиусом D .

Линией положения называется геометрическое место точек на плоскости, характеризующееся постоянным значением измеренной координаты или параметра движения.

Так, при измерении РЛС двух угловых координат цели – азимута и угла места – линией положения является прямая, положение которой в пространстве определяется значениями указанных углов.

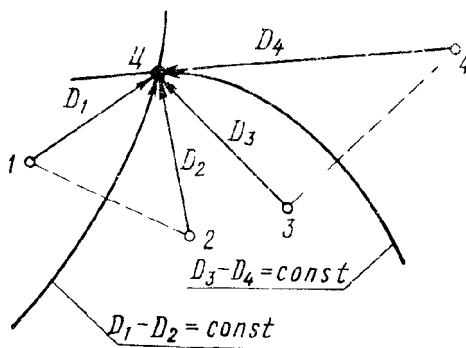


Рис. 1.4. Разностно-дальномерный метод определения местоположения целей [1]

Перечисляемые ниже методы определения местоположения целей находят в настоящее время широкое применение.

Дальномерно-угломерный метод характеризуется тем, что положение цели находится на пересечении сферы радиусом D и прямой линии, положение которой определяется значениями двух угловых координат – угла места $\varphi_{ум}$ и азимута $\varphi_{аз}$. Этот метод широко распространен, так как позволяет определить положение цели из одной точки пространства, где расположена РЛС.

Угломерный метод позволяет определить положение цели как точку пересечения двух линий измеренных пеленгов. Используется в тех случаях, когда РЛС позволяют определять только угловые координаты целей.

Дальномерный метод применяется в тех случаях, когда РЛС позволяют измерять только дальность. Положение цели

определяется точкой пересечения трех сфер или окружностей, центры которых совпадают с местами расположения трех РЛС, а радиусы равны измеренным дальностям D_1, D_2, D_3 .

Разностно-дальномерный метод основан на использовании линий положения, представляющих собой гиперболы, параметром которых является разность расстояний до двух радиолокационных станций; точки расположения РЛС являются фокусами гипербол. Для определения положения цели используются две пары радиолокационных станций (рис. 1.4), создающих два семейства пересекающихся гипербол. Измерение дальности до цели первой парой РЛС (1 и 2) позволяет определить одну из гипербол, проходящую через цель и характеризуемую параметром

$$\Delta D_1 = D_1 - D_2 = const. \quad (1.4)$$

Две другие станции (3 и 4) используются для определения второй гиперболы, проходящей через ту же цель, но имеющую параметр

$$\Delta D_2 = D_3 - D_4 = const. \quad (1.5)$$

Точка пересечения двух указанных гипербол и определяет местоположение цели на плоскости.

Суммарно-дальномерный метод базируется на использовании линий положения, представляющих собой эллипсы; параметром этих эллипсов является постоянство суммы расстояний до двух РЛС, располагающихся в фокусах эллипсов. Каждая пара РЛС дает свое семейство эллипсов. Местоположение цели определяется точкой пересечения эллипсов, принадлежащих различным парам РЛС.

16. В подавляющем большинстве современные радиолокационные станции работают на ультракоротких волнах (длина волны λ от 1 до 300 – 400 см, частота f от 75 до 30000 МГц). Эти волны распространяются почти прямолинейно, и поэтому не позволяют обнаруживать цели, расположенные в области так называемой «радиотени», образующейся из-за кривизны земной поверхности. На рис. 1.5 показаны границы обнаружения целей в вертикальной

плоскости с помощью радиолокационной станции УКВ диапазона, помещенной в точке A земной поверхности.

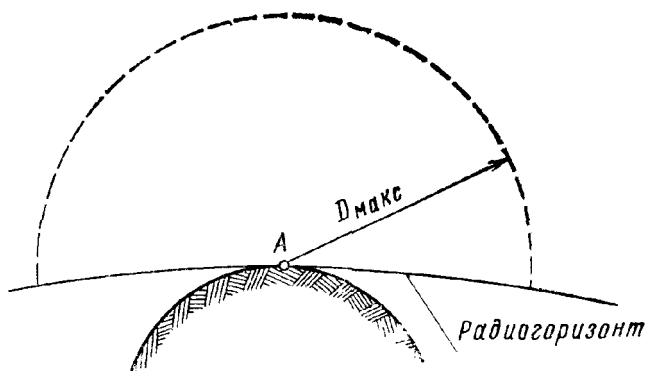


Рис. 1.5. Зона обнаружения РЛС УКВ.

Здесь $D_{\text{МАКС}}$ – максимальная дальность действия РЛС [1]

В настоящее время разработаны **загоризонтные радиолокационные станции** (ЗГ РЛС) в диапазоне коротких радиоволн ($\lambda=10 \dots 50$ м, $f=6 \dots 30$ МГц). Эти волны, отражаясь от ионосферы, огибают Землю, что позволяет облучать цели, находящиеся за горизонтом, и принимать отраженные ими сигналы.

Различают два типа ЗГ РЛС: **обратного и прямого рассеяния**.

Станции, использующие обратное рассеяние, работают следующим образом (рис. 1.6). Зондирующий сигнал передатчика РЛС, излученный под небольшим углом ϵ к горизонту, распространяется прямолинейно до одного из слоев ионосферы. Отразившись от ионосферы в точке A , волна направляется к земной поверхности, где происходит вторичное отражение в сторону ионосферы и т. д. Расстояние $D_{\text{СК}}$ по земной поверхности от точки излучения волны до точки ее возвращения к Земле после однократного отражения от ионосферы называют дальностью скачка. В зависимости от

значений угла ϵ и высоты отражающего слоя дальность скачка изменяется от 1500 до 3500 км.

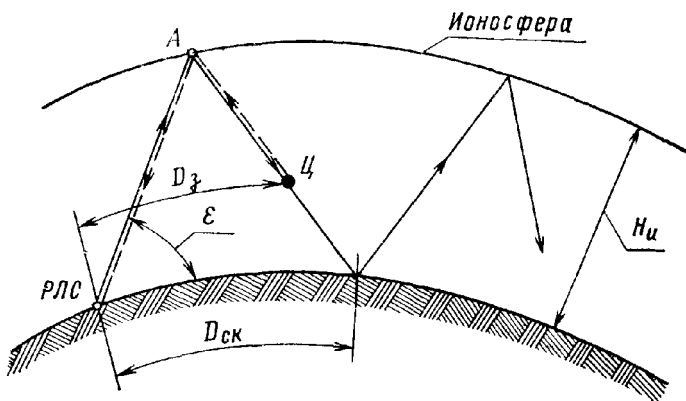


Рис. 1.6. Распространение сигналов при использовании загоризонтной РЛС с обратным рассеянием [1]

Если распространяющаяся волна встретит на своем пути цель $Ц$, то возникает отраженная волна, распространяющаяся тем же путем, но в обратном направлении (пунктирная линия на рис. 1.6).

Обработка отраженного сигнала позволяет оценить расстояние D_z до цели по ломаной линии $ОАЦ$ и азимут цели. Зная угол ϵ , под которым излучаются радиоволны, и высоту $H_{и}$ отражающего ионизированного слоя можно по расстоянию $D_{ц}$ рассчитать дальность D_z до цели по проекции траектории луча на земную поверхность. Графики для подобного пересчета приведены на рис. 1.7.

Для измерения дальности используется импульсный режим работы передатчиков РЛС. Частота следования зондирующих импульсов, определяемая условием однозначного измерения дальности, не должна превышать нескольких десятков герц. Для обеспечения измерения

азимута целей применяются антенны направленного действия и, в частности, фазированные антенные решетки.

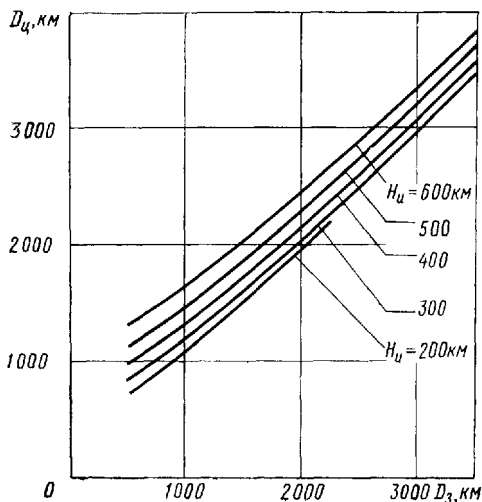


Рис. 1.7. Зависимость между дальностью $D_{ц}$ до цели, определяемой загоризонтной РЛС с обратным рассеянием и дальностью $D_{з}$ по земной поверхности; $H_{и}$ – высота отражающего ионосферного слоя [1]

Особенностью ЗГ РЛС является большой уровень помех естественного происхождения, на фоне которых принимаются полезные сигналы. К помеховым сигналам относятся отражения от ионосферы, земной поверхности, гидрометеоров, всякого рода частиц космического происхождения. Для повышения помехозащищенности приема используются когерентные РЛС с внешней и внутренней когерентностью и схемами фильтрации по доплеровскому частотному смещению. Как правило, в ЗГ РЛС используется высокостабильный задающий генератор (синтезатор) колебаний, с помощью которого создается сетка стабильных рабочих частот в диапазоне, например, от 3 до 50 МГц.

В загоризонтной РЛС прямого рассеяния передатчик и приемник разнесены далеко на поверхности Земли (рис. 1.8).

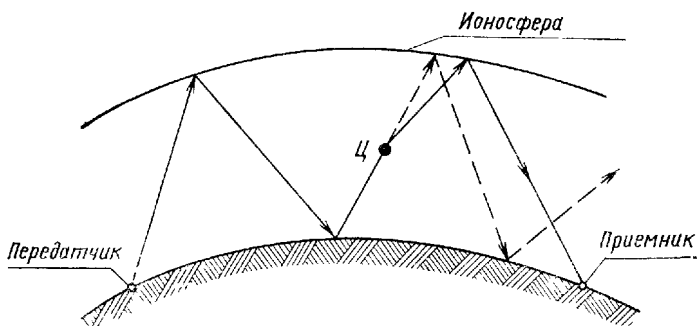


Рис. 1.8. Распространение сигналов при использовании загоризонтной РЛС прямого рассеяния [1]

Излученная волна, встречающая после отражения от ионосферы цель, изменяет несколько траекторию и, продолжая распространяться дальше, после отражения от ионосферы попадает к приемнику (сплошная линия на рис. 1.8). Прямой сигнал от передатчика (штриховая линия на рис. 1.8) либо не достигает приемника, либо попадает в приемник очень сильно ослабленным. Для обработки полезных сигналов и выделения их на фоне помех в приемнике с помощью высокостабильных гетеродинов создается когерентное опорное напряжение. Высокочастотное напряжение гетеродинов синхронизируется с колебаниями, создаваемыми передатчиком ЗГ РЛС, с помощью сигналов службы единого времени.

РЛС прямого рассеяния позволяет фиксировать наличие цели и определить ее азимут из точки приема. Для определения дальности до цели используют многопозиционные радиолокационные станции, в состав которых входит один передатчик и несколько разнесенных в пространстве приемников. Дальность при этом определяется

угломерным методом. В станциях прямого рассеяния могут использоваться как импульсные, так и непрерывные зондирующие сигналы.

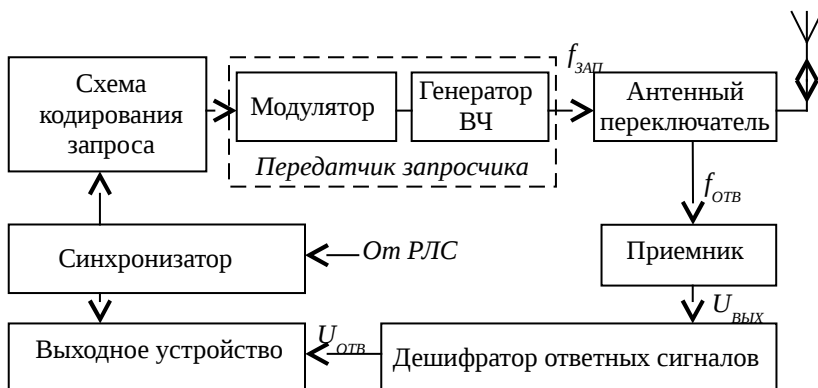


Рис. 1.9. Структурная схема радиолокационной системы с активным ответом

17. При использовании радиолокационных систем с **активным ответом** (рис.1.9) роль запросчиков могут играть РЛС обнаружения целей или специальные радиопередатчики.

Система называется **совмещенной**, если роль запросчика выполняет РЛС обнаружения. Достоинства совмещенной системы заключаются в относительной простоте используемой аппаратуры (дополнительно к РЛС необходимо иметь только ответчики); в высокой разрешающей способности системы по угловым координатам, определяющейся тем, что РЛС обычно имеют узкий луч; в простоте сопоставления и привязки сигналов ответчиков и отраженных от целей сигналов. К недостаткам совмещенной системы следует отнести, во-первых, ненужное излучение сигналов ответа при каждом облучении цели радиолокационной станцией, что приводит и к демаскированию своих целей и к перегрузке выходных устройств РЛС, и, во-вторых, необходимость установки на каждом объекте наблюдения целого комплекта ответчиков,

которые должны работать на всех возможных частотах запроса.

В автономных системах с активным ответом сигналы запроса посылаются специальным приемопередатчиком, работа которого синхронизируется РЛС. Преимущество автономной системы перед совмещенной состоит, прежде всего, в возможности унификации ответчиков. Вторым преимуществом систем этого типа является возможность включения аппаратуры только на то время, когда необходимо ее использовать. Основной недостаток автономных систем - низкая разрешающая способность по угловым координатам, так как запросчики, как правило, имеют антенны небольших размеров с широкой диаграммой направленности.

Комбинированные системы отличаются тем, что запрос осуществляется одновременно сигналами РЛС и автономного запросчика; ответчик срабатывает только при получении обоих запрашивающих сигналов, совпадающих по времени. При некотором усложнении аппаратуры комбинированные системы обладают основными преимуществами как автономных, так и совмещенных систем.

1.2. Вопросы для самоконтроля

1. Каковы основные понятия и определения, методы радиолокации?

2. На каких физических основах базируется радиолокация?

3. Поясните угломерный и дальномерный радиотехнические методы определения местоположения объекта.

4. Поясните разностно-дальномерный, комбинированный угломерно-дальномерный радиотехнические методы определения местоположения объекта.

5. Поясните фазовый метод измерения дальности на несущей частоте.

6. Поясните фазовый метод измерения дальности с применением частотой модуляции
7. Частотный метод измерения дальности.
8. Импульсный метод измерения дальности.
9. Поясните взаимодействие узлов РЛС кругового обзора.
10. Какие фазовые методы применяются для измерения угловых координат.

1.3. Задачи

1. Каким дальностям до целей соответствует время запаздывания отраженных сигналов 1 мкс, 1 мс, 1 с, 1 мин?
2. Для измерения дальности используется электронно-лучевая трубка с линейной разверткой. На какой интервал по дальности сместится отметка цели, характеризующаяся временем запаздывания 60 мкс, если вследствие нестабильности работы длина развертки изменяется от 100 до 95 мм?
3. В электронно-лучевом индикаторе дальности (с линейной разверткой) случайные изменения длительности развертки достигают ± 5 мкс. В каких пределах лежат изменения измеряемой дальности?
4. Считая среднее расстояние между Луной и Землей равным 385 000 км, определить максимальное значение частоты посылок импульсов передатчиком РЛС при однозначном измерении дальности до Луны?
5. В момент противостояния Венеры и Земли расстояние между ними составляет приблизительно 40 млн. км. Какова абсолютная и относительная погрешность измерения дальности до Венеры, если ошибка измерения времени запаздывания составляет 1 мс?
6. РЛС обнаружения воздушных целей имеет максимальную дальность действия 300 км. Определить скорость развертки, если длина шкалы дальности равна 150 мм.
7. С самолета, летящего на высоте 10 км, производится наблюдение земной поверхности. Считая траекторию

распространения радиоволн прямолинейной, определить протяженность участка земной поверхности, находящегося в радиолокационной тени холма высотой 100 м. Наибольшее удаление самолета от вершины холма составляет 300 км.

8. Насколько близко к наземной аэродромной РЛС могут располагаться местные предметы, высота которых не превышает 10 м, если РЛС должна обнаруживать самолеты под минимальным углом места 1° ? Высота центра антенны над поверхностью Земли равна 2 м.

9. РЛС обнаружения имеет дальность действия 20 км. Каково наибольшее число m отраженных сигналов, принимаемых станцией за время облучения цели, равное 1,2 мс (предполагается, что дальность измеряется однозначно)?

10. Период следования T_C импульсов РЛС в несколько раз меньше максимального времени t_0 запаздывания отраженных сигналов. Чему равно время запаздывания сигналов $t_{D \text{ изм}}$, измеряемое такой станцией?

11. Цель удалена от РЛС на 75 км. Какую дальность до цели покажет индикатор станции, если период следования импульсов равен 300 мкс?

12. На экране индикатора дальности имеются отметки двух целей. Время запаздывания сигналов одной из них превышает период $T_{и}$ следования импульсов РЛС и ее дальность указывается неправильно. Небольшое изменение частоты следования импульсов РЛС (например, на 10%) позволяет установить, какая из отметок занимает ложное положение, а какая правильное. Объясните это.

13. Имеется наземная радиолокационная станция с вращающимся вокруг вертикальной оси плоским вертикальным лучом; измеряются дальность и азимут целей. Какие данные можно получить с помощью этой станции о целях, перемещающихся по наземной или водной поверхности?

14. Максимальная скорость сближения самолетов может достигать 2000 км/ч. Как нужно выбрать частоту следования

импульсов самолетной когерентно-импульсной РЛС для обеспечения однозначной селекции целей по доплеровской частоте? Как это скажется на измерении дальности цели? Длина волны РЛС равна 3 см.

15. Наземная когерентно-импульсная станция обнаруживает воздушные цели, летящие со скоростью 1000 км/ч. Определить «слепые» направления полета целей в секторе углов от 0 до 90° , если частота следования импульсов РЛС равна 400 Гц и длина волны 10 см.

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

17. Самолеты движутся точно на наземную когерентно-импульсную станцию. Для каких условий полета движущуюся цель нельзя отличить от неподвижной? Частота следования импульсов РЛС равна 300 Гц, длина волны 1,5 м, максимальная скорость сближения 2000 км/ч, а минимальная – 200 км/ч; считать, что дальность до цели намного превышает высоту ее полета.

18. Каким принципиальным недостатком характеризуется метод измерения угловых координат, основанный на коническом сканировании диаграммы направленности антенны? Какая система пеленгации свободна от такого недостатка?

19. Считая допустимыми ошибки оценки дальности до цели с помощью загоризонтной РЛС обратного рассеяния $\Delta D < 0,05 D_L$, где D_L – дальность по лучу, указать пределы изменения D_L , в которых эту дальность можно считать равной дальности D_3 по земной поверхности. Принять высоту отражающего ионизированного слоя равной 400 км.

20. При распространении коротких волн различие времени Δt прохождения волной пути 3Г РЛС – ионосфера –

цель и обратно измеряется долями миллисекунд. Определить наибольшее изменение измеренной дальности ΔD цели, если $\Delta t < 0,25$ мс.

21. Для обнаружения самолетов на фоне неподвижных объектов используется наземная когерентно–импульсная РЛС, у которой после фазового детектора включен электронно-лучевой индикатор с амплитудной отметкой. Что нужно сделать в такой станции для обеспечения надежного обнаружения целей на фоне дипольных отражателей или дождевых капель, перемещающихся относительно РЛС с радиальной скоростью v_p ? Длина волны РЛС равна λ .

2. Отношения правдоподобия. синтез обнаружителей сигналов

Цель занятия – освоить методику составления отношения правдоподобия, научиться определять основные качественные показатели при распознавании гипотез (вероятности правильного и неправильного распознавания, ложной тревоги), приобрести навыки использования правила отношения правдоподобия для решения задачи синтеза обнаружителей детерминированных и случайных сигналов.

При подготовке к занятию повторить следующие разделы дисциплин «Основы статистической радиотехники» и «Радиотехнические системы»:

1. Определения плотности вероятности и закона распределения случайных величин.

2. Числовые характеристики случайных величин: математическое ожидание, дисперсия, ковариация. Определения и их основные свойства.

3. Методы определения плотности распределения функции одной или двух случайных величин.

4. Понятие стационарности и эргодичности случайного процесса. Функция корреляции процесса. Белый шум и его статистические характеристики.

5. Методы представления многомерных плотностей вероятностей случайных сигналов с ограниченным спектром.

6. Критерии оптимальности при обнаружении сигналов: Neyman-Pearson и минимума вероятности «взвешенной» ошибки.

7. Понятия функции правдоподобия и отношения правдоподобия.

8. Синтез (определение структуры) оптимального приемника обнаружения при полностью известных параметрах сигнала.

9. Основные качественные показатели приемника при обнаружении сигналов (вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги). [2, с.31-36, 53-58, 76-79, 104-105, 145-151], [4, с. 49-57].

Разобрать примеры решения задач и ответить на вопросы.

2.1. Необходимые теоретические сведения.

Примеры решения задач

А. Случайный сигнал X имеет нормальное распределение с параметрами $N[0, \sigma]$. Он претерпевает одно из двух преобразований:

$$H_1 : Y = X^2, H_0 : Y = X.$$

Требуется составить отношение правдоподобия и правило распознавания гипотез при условии, что производится одно наблюдение случайного сигнала $Y = y_1$, а пороговое отношение равно Λ_0 .

Решение:

Для нахождения отношения правдоподобия необходимо знать функции правдоподобия и плотности распределения сигнала по обеим гипотезам. Найдем плотность распределения случайного напряжения Y по обеим гипотезам. Для этого воспользуемся формулой функционального преобразования случайных величин

$$W(y) = \sum_{k=1}^n W[x_k(y)] \cdot \left| \frac{dx_k(y)}{dy} \right|.$$

При гипотезе H_0 $x_{1,2} = \pm\sqrt{y}$, а - H_1 - $x = y$ поэтому

$$H_1: W(y) = \begin{cases} \frac{W(\sqrt{y}) + W(-\sqrt{y})}{2\sqrt{y}}, & y > 0 \\ 0, & y < 0 \end{cases}$$

$$H_1: W(y) = \frac{1}{6\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{y}{2\sigma^2}}, y > 0$$

или

$$H_0: W(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}}.$$

$$H_1: W(y) = \frac{1}{6\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{y}{2\sigma^2}}, y > 0$$

$$H_0: W(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}}.$$

Функции правдоподобия $L_0(y)$ и $L_1(y)$ получаются после подстановки в полученные выражения для плотностей вероятности результата наблюдения y_1 , поэтому отношение правдоподобия имеет следующий вид

$$\Lambda(y) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{y_1}} e^{-\frac{(y_1 - y_1^2)}{2\sigma^2}}; & y_1 \geq 0, \\ \infty; & y_1 < 0. \end{cases}$$

Правило распознавания гипотез определяется следующими соотношениями

$$\Lambda(y) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{y_1}} e^{-\frac{(y_1 - y_1^*)}{2\sigma^2} \frac{H_1^*}{H_0^*}} > \Lambda_0, y_1 \geq 0, \\ \infty > \Lambda_0, y_1 < 0. \end{cases}$$

Величина Λ_0 определяется выбранным критерием оптимальности.

Б. Производится обнаружение известного полезного сигнала на $u(t)$ на фоне нормальной стационарной помехи $n(t) - N[0, \sigma]$. Процесс на входе обнаружителя имеет вид $x(t) = u(t) + n(t)$.

Найти отношение правдоподобия и решающее правило, определяющее структуру оптимального обнаружителя сигнала $u(t)$, при условии, что производится m независимых наблюдений входного процесса, а пороговое отношение равно Λ_0 .

Решение.

Функции правдоподобия при наличии и отсутствии полезного сигнала на входе обнаружителя имеют следующий вид

$$L_{a_1}(x) = \frac{1}{[\sqrt{2\pi\sigma}]^m} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^m (x_k - u_k)^2\right],$$

$$L_{a_0}(x) = \frac{1}{[\sqrt{2\pi\sigma}]^m} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^m (x_k)^2\right],$$

а отношение правдоподобия

$$\Lambda(x) = \frac{L_{a_1}(x)}{L_{a_0}(x)} = \exp\left[\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^m (2x_k u_k - u_k^2)\right]$$

В соответствии с правилом отношения правдоподобия имеем

$$\Lambda(x) \underset{H_0^*}{>} \underset{H_1^*}{<} \Lambda_0$$

или

$$\exp \left[\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^m (2x_k u_k - u_k^2) \right] \underset{H_0^*}{>} \underset{H_1^*}{<} \Lambda_0,$$

откуда после логарифмирования и упрощения левой части неравенства получаем

$$\sum_{k=1}^m x_k u_k \underset{H_0^*}{>} \underset{H_1^*}{<} 0.5 \left[2\sigma^2 \ln \Lambda_0 + \sum_{k=1}^m u_k^2 \right] = \Lambda_0.$$

Величина Λ_0 определяется выбранным критерием оптимальности.

2.2. Вопросы для самоконтроля

1. В какой форме представляются на конечном интервале времени многомерные плотности вероятностей стационарных нормальных коррелированного и некоррелированного процессов?

2. Для чего введены критерии оптимальности радиотехнических систем и почему используются несколько критериев?

3. Что такое функция правдоподобия?

4. По какой методике определяется функция правдоподобия?

5. Чем отличаются функции правдоподобия соответствующие наличию и отсутствию полезного сигнала на входе приемника?

6. Что называется отношением правдоподобия?

7. Чем определяется величина порогового отношения?

8. На основе какого правила осуществляется синтез обнаружителей сигналов?

9. Какие показатели используются для оценки качества обнаружителя сигналов?

10. Какие приемники сигналов называют оптимальными?

2.3. Задачи

Задачи 1, 8, 13, 16, 20 рекомендуются для решения на практических занятиях, остальные (по вариантам) – в качестве индивидуального задания студентам.

1. Плотности вероятностей сигнала Y по двум гипотезам имеют следующий вид:

$$H_1 : \omega(y) = 0.5 \exp[-|y|], \quad H_0 : \omega(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp[-0.5y^2]$$

а) найти отношение правдоподобия, полагая, что произведено k независимых наблюдений сигнала Y .

б) изобразить (качественно) кривые плотностей вероятностей по обеим гипотезам при $k=1$. Полагая, что критерий соответствует условию $\Lambda(y) \gg \Lambda_0$, вычислить области решений для значения $\Lambda_0 = 1$. Как изменяется область решений, если Λ_0 выбрать равным 2.

Ответ:

$$а) \Lambda(y) = \frac{(\pi)^{k/2}}{(2)^{k/2}} \cdot \exp \left[\sum_{i=1}^k (0.5y_i^2 - |y_i|) \right].$$

б) при $[1 - \sqrt{1 + \ln(2/5)}] \leq |y| \leq [1 + \sqrt{1 + \ln(2/\pi)}]$ - выносится решение H_0^* . При других Y – решение H_1^* .

2. Плотности распределения сигнала Y по гипотезам H_0 и H_1 определяются следующими соотношениями

$$H_1 : Y = e^X, \quad H_0 : Y = X^2,$$

где $X = x(t)$ – стационарный нормальный случайный сигнал с нулевым средним и дисперсией σ^2 .

а) найти отношение правдоподобия и его логарифм, полагая, что произведено k независимых наблюдений сигнала Y .

б) изобразить (качественно) кривые плотности вероятностей по обеим гипотезам при $k=1$. Полагая, что критерий соответствует $\Lambda(y) > \Lambda_0$, вычислить области решений для значения $\Lambda_0 = 1$.

Ответ:

$$а) \Lambda(y) = \frac{1}{2\sigma^2} \cdot \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^k (y_i - \ln^2 y_i)}{\prod_{i=1}^k y_i^{1/2}} \right];$$

б) области решений определяются трансцендентным уравнением:

$$y = \ln^2 y - \sigma^2 \ln y.$$

3. Решить задачу 2 для случая когда, сигнал X претерпевает одно из следующих преобразований

$$H_1 : Y = X^2, \quad H_0 : Y = X^3,$$

Ответ:

$$а) \Lambda(y) = 3^k \prod_{i=1}^k y_i^{1/5} \cdot \exp \left[\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^k [y_i^{2/3} - y_i] \right];$$

б) области решений определяются трансцендентным уравнением:

$$y = y^{2/3} + \frac{\sigma^2}{3} \ln y + 2\sigma^2 \ln 3.$$

4. Плотности вероятностей случайного сигнала по обеим гипотезам имеют вид:

$$W_{H_i}(y) = \frac{1}{\pi[1+(y-a_i)^2]}, \quad -\infty < y < \infty;$$

$$i = \overline{0,1}, \quad a_0 = 0, a_1 = 1$$

а) найти отношение правдоподобия при условии, что произведено k наблюдений.

б) изобразить (качественно) кривые плотностей вероятностей по обеим гипотезам при $k=1$. Полагая, что критерий соответствует $\Lambda(y) \gg \Lambda_0$, вычислить области решений для значения $\Lambda_0 = 1$.

Ответ:

$$а) \Lambda(y) = \prod_{i=1}^k \frac{1+y_i^2}{1+(y_i-1)^2};$$

б) при $y > \frac{1}{2}$ выносится решение H_1^* , при $y < \frac{1}{2}$ – решение H_0^* .

5. Напряжения Y по двум гипотезам в произвольный момент времени определяются следующим образом

$$H_1: Y = \sin \Phi; \quad H_0: Y = \cos \Phi$$

где Φ – случайная величина равномерно распределенная на интервале $[-\pi, \pi]$.

Построить (качественно) кривые плотностей вероятностей по обеим гипотезам. Найти отношение правдоподобия при условии одного наблюдения напряжения Y . Различимы ли гипотезы H_1 и H_0 ?

Ответ: $\Lambda(y) = 1$.

6. Пусть напряжения Y по двум гипотезам определяются так:

$$H_1: Y = X; \quad H_0: Y = |X|,$$

где $X=X(t)$ – стационарный случайный сигнал с равномерным законом распределения в интервале $[-0.5, 0.5]$.

а) найти отношение правдоподобия;

б) нарисовать (качественно) кривые плотностей вероятностей напряжения по обеим гипотезам. Полагая, что критерий соответствует $\Lambda(y) \gg \Lambda_0$, определить области решений для $\Lambda_0 = 1$.

Ответ:

$$а) \text{ при } -0.5 \leq y \leq 0 \quad \Lambda(y) = \infty, \text{ при } 0 < y < \frac{1}{2} \quad \Lambda(y) = 0.5$$

;

б) при отрицательных значениях \mathcal{Y} выносится решение H_1^* , при положительных – H_0^* ;

7. Напряжения Y по гипотезам H_1 и H_0 , определяются из следующих соотношений

$$H_1: Y = \begin{cases} X^2, X > 0; \\ 0, X \leq 0; \end{cases} \quad H_0: Y = X,$$

где $X=X(t)$ – стационарный нормальный случайный сигнал – $N[0, \sigma]$.

Найти отношение правдоподобия при условии, что произведено одно наблюдение случайного напряжения Y .

Ответ:

$$\Lambda(y) = \begin{cases} \frac{\delta(y)\sigma(y)\sqrt{\pi}}{\sqrt{2}} e^{y^2/2\sigma^2} + \frac{1}{2\sqrt{x}} e^{-(y-x)^2/2\sigma^2}, y \geq 0, \\ 0, y < 0. \end{cases}$$

где $\delta(y)$ – дельта-функция.

8. Имеется k независимых наблюдений. По гипотезе H_1 случайный сигнал $Y(t)$ является стационарным гауссовским процессом $N[0, \sigma_1]$, и по гипотезе H_0 – также гауссовским – $N[0, \sigma_0]$, причем $\sigma_0 < \sigma_1$.

а) вычислить отношение правдоподобия $\Lambda(y)$;

б) полагая, что критерий соответствует $\Lambda(y) \gg \Lambda_0$, определить графически области решений для $k = 1$, $\Lambda_0 = 1$.

в) считая, что P_Λ есть вероятность выбора H_1 при условии, что истинна гипотеза H_0 , а P_Π – вероятность выбора H_0 при условии, что истинна гипотеза H_1 , т.е. $P_\Lambda = P(H_1^* / H_0)$, $P_\Pi = P(H_0^* / H_1)$, определить выражения для P_Λ и P_Π при $k=1$.

Ответ:

$$а) \Lambda(y) = \left[\frac{\sigma_0}{\sigma_1} \right]^k \exp \left[0.5 \sum_{i=1}^k y_i^2 \left[\frac{1}{\sigma_0^2} - \frac{1}{\sigma_1^2} \right] \right];$$

$$в) P_\Lambda = 0.5 \left[1 - \Phi \left(\Lambda_0 / \sigma_0 \right) \right];$$

$$P_\Pi = 0.5 \left[1 + \Phi \left(\Lambda_0 / \sigma_1 \right) \right],$$

где

$$\Phi(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt, \quad \Lambda_0 = \sqrt{2 \left[\ln \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0} \right) / \left(\frac{1}{\sigma_0^2} - \frac{1}{\sigma_1^2} \right) \right]}.$$

9. Решить задачу 8 (п.п. а) для случая, когда по гипотезе H_1 сигнал Y имеет ненулевое, равное m , математическое ожидание. Как изменятся области решений, если $m < 0$? Изменяются ли вероятности P_Λ и P_Π ?

Ответ:

$$а) \Lambda(y) = \left[\frac{\sigma_0}{\sigma_1} \right]^k \exp \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \frac{y_i^2}{\sigma_0^2} - \frac{(y_i - m)^2}{\sigma_1^2} \right].$$

10. Производится обнаружение случайного полезного сигнала $s \cdot u(t)$ на фоне случайной помехи $n(t)$. Процессы $u(t)$ и $n(t)$ – взаимно независимы, нормальны, стационарны, имеют нулевые средние и дисперсии σ_u^2 и σ_n^2 , соответственно, $s = \text{const}$.

Найти отношение правдоподобия и его логарифм при условии, что произведено k независимых наблюдений.

Ответ:

$$\Lambda(y) = \frac{\sigma_n}{\sqrt{c^2 \sigma_u^2 + \sigma_n^2}} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^k y_i^2 \frac{1}{c^2 \sigma_u^2 + \sigma_n^2} - \frac{1}{\sigma_n^2} \right]$$

11. Решить задачу 10 для случая, когда помеха представляется следующим образом

$$n(t) = \sum_{i=1}^l n_i(t),$$

где $n_i(t)$ – независимые, стационарные, нормальные случайные процессы с нулевыми средними и дисперсиями $\sigma_{n_i}^2 = \sigma_n^2, [i = \overline{1, l}]$ соответственно.

Указание: для решения задачи необходимо найти плотность распределения процесса $n(t)$.

Ответ:

$$\Lambda(y) = \frac{\sqrt{l} \cdot \sigma_n}{\sqrt{c^2 \sigma_u^2 + l \sigma_n^2}} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^k y_i^2 \frac{1}{c^2 \sigma_u^2 + l \sigma_n^2} - \frac{1}{l \sigma_n^2} \right].$$

12. Решить задачу 10 при условии, что процесс имеет не равное нулю математическое ожидание m .

Ответ:

$$\Lambda(y) = \frac{\sigma_n}{\sqrt{c^2 \sigma_u^2 + l \sigma_n^2}} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \frac{(y_i - m)^2}{c^2 \sigma_u^2 + \sigma_n^2} - \frac{y_i^2}{\sigma_n^2} \right].$$

13. Число событий N (например, число электронов, вылетающих из катода ЭЛТ) распределено по пуассоновскому закону. При каждом проведении эксперимента происходит некоторое число событий, которое и является результатом наблюдения. Оно изменяется в пределах от 0 до ∞ и подчиняется закону Пуассона по обоим гипотезам.

$$P_{N_i}(n) = \frac{m_i^n}{n!} e^{-m_i}, \quad N = 0, 1, 2, \dots; \quad i = 0, 1;$$

где m_i параметр, характеризующий среднее число событий $M[N] = m_i$. Найти отношение правдоподобия и,

полагая, что критерий соответствует $\Lambda(n) \gg \Lambda_0$, определить структуру устройства распознавания гипотез.

Указание: необходимо обратить внимание на то, что в этой задаче распределения величины N имеют дискретный характер.

$$\text{Ответ: } \Lambda(n) = (m_1 / m_0)^n \exp[-(m_1 - m_0)].$$

Устройство распознавания гипотез H_1 , и H_0 состоит из блока сравнения результата наблюдения с величиной Λ_0 , равной

$$\Lambda_0 = (\ln \Lambda_0 + m_1 - m_0) / (\ln m_1 - \ln m_0).$$

14. Определенная двоичная последовательность, состоящая из k элементов, передается по одному из двух каналов связи с вероятностями искажений элементов P_1 и P_0 (т.е. $H_1 : P_1, H_0 : P_0$). Искажения элементов происходят независимо друг от друга. Результатом наблюдения является число искажений N . Записать законы распределения числа искажений для обеих гипотез. Составить отношение правдоподобия.

Указания: для решения этой задачи необходимо знать биномиальный закон распределения.

Ответ:

$$P_k(N = n) = C_k^n \cdot P_i^n \cdot (1 - P_i)^{k-n}, \quad i = 0, 1;$$

$$\Lambda(n) = (P_1 / P_0)^n \left[(1 - P_1) / (1 - P_0) \right]^{k-n};$$

где C_k^n – число сочетаний.

15. Решить задачу 14 для случая, когда число последовательностей больше единицы и равно l .

$$\text{Ответ: } P_m(N = n) = C_m^n \cdot P_i^n \cdot (1 - P_i)^{k-n}, \quad i = 0, 1; \quad m = k \cdot l.$$

$$\Lambda(n) = (P_1 / P_0)^m \left[(1 - P_1) / (1 - P_0) \right]^{m-n}.$$

16. На вход обнаружителя поступает либо аддитивная смесь полезного сигнала и помехи, либо одна помеха. Полезный сигнал и помеха независимы, стационарны и распределение их мгновенных значений описывается одним и тем же показательным-степенным законом

$$W(x) = x \cdot e^{-x}, \quad (x > 0).$$

Найти отношение правдоподобия при условии, что произведено k независимых наблюдений.

Указание: плотности распределения сигнала и помехи по условию задачи отличны от нормальной. Поэтому для определения плотности распределения смеси сигнала и помехи необходимо использовать формулу «свертки» двух функций.

Ответ:

$$\Lambda(y) = \frac{1}{6} \prod_{i=1}^k y_i^2;$$

где y_i – выборки входного процесса.

17. Решить задачу 16 для случая, когда полезный сигнал представляет собой постоянное напряжение величины E .

Ответ:

$$\Lambda(y) = e^{-kE} \prod_{i=1}^k \left(1 - \frac{E}{y_i}\right).$$

18. Пусть по гипотезе H_1 , выходное напряжение источника постоянно и равно E , а по гипотезе H_0 равно 0. Наблюдение выходного напряжения производится на фоне аддитивного шума $n(t)$. Отсчеты шума берутся через каждую секунду и их число равно N . Отсчеты шума в различные моменты времени являются независимыми гауссовскими величинами с нулевыми средними и дисперсиями σ^2 и кроме того, они не зависят от выходного напряжения источника.

Найти структуру устройства распознавания двух сигналов источника в соответствии с критерием Неймана–Пирсона.

Ответ:

$$\sum_{i=1}^k \mathcal{Y}_i \underset{H_0^*}{\overset{H_1^*}{>}} \left\langle \frac{\sigma^2}{E} \ln \Lambda_0 + \frac{NE}{2} \right\rangle = \Lambda_0,$$

где \mathcal{Y}_i – отсчеты выходного сигнала источника.

19. Найти структуру оптимального по критерию Неймана-Пирсона приемника, предназначенного для обнаружения неслучайного сигнала

$$S(t) = A_m \cos[\omega_0 t + \varphi],$$

где A_m, ω_0, φ – полностью известны в стационарном нормальном шуме с нулевым средним и дисперсией σ^2 выборочные значения $x_i = x(t_i)$ входного процесса $x(t)$ представляющего собой либо шум, либо сумму сигнала и шума, отбираются через такой интервал Δ , что значение корреляционной функции шума $R(\Delta) = 0$, число выборок равно n .

Ответ:

$$\sum_{i=1}^n S_i \cdot x_i \underset{H_0^*}{\overset{H_1^*}{>}} h_0 = \Lambda_0 \sigma^2 + \sum_{i=1}^n \frac{S_i^2}{2}.$$

20. Найти структуру оптимального по критерию Неймана-Пирсона приемника, предназначенного для обнаружения случайного сигнала в собственном шуме приемника. При этом считать, что:

1. Полезный сигнал и собственный шум приемника взаимно независимы, стационарны и распределены по нормальному закону с нулевыми средними и дисперсиями σ_S^2 и σ_n^2 , соответственно.

2. Выборки x_i из входного процесса, представляющего собой либо один шум, либо сумму полезного сигнала и шума, осуществляются через такой интервал Δ , что $R_S(\Delta) = 0$ и $R_n(\Delta) = 0$, где R_S и R_n – соответственно корреляционные функции сигнала и шума. Число выборок равно n .

Ответ:

$$\sum_{i=1}^n x_i^2 \underset{H_0^*}{\overset{H_1^*}{>}} h_0 = \ln \Lambda_0 + \frac{n}{2} \ln(1+a^2) \underset{H_0^*}{\overset{H_1^*}{>}} 2 \frac{\sigma_n^2}{a^2} (1+a^2) \underset{H_0^*}{\overset{H_1^*}{>}}, \quad a = \frac{\sigma_S}{\sigma_n}.$$

21. Решить задачу 20 для случая, когда число выборок $n = 1$.

Ответ:

$$x \underset{H_0^*}{\overset{H_1^*}{>}} \left[\ln \Lambda_0 + 0.5 \ln(1+a^2) \right] \underset{H_0^*}{\overset{H_1^*}{>}} 2 \frac{\sigma_n^2}{a^2} (1+a^2) \underset{H_0^*}{\overset{H_1^*}{>}}^{1/2}, \quad \frac{1}{a} = \frac{\sigma_n}{\sigma_S}$$

22. Решить задачу 20 для случая, когда полезный сигнал имеет ненулевое, равное m , математическое ожидание.

Ответ:

$$\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{2m}{\sigma_S^2} \sum_{i=1}^n x_i \underset{H_0^*}{\overset{H_1^*}{>}} \left[\ln \Lambda_0 + \frac{n}{2} \ln(1+a^2) \right] \underset{H_0^*}{\overset{H_1^*}{>}} \frac{2\sigma_n^2}{a^2} (1+a^2) + \frac{n \cdot m^2}{\sigma_S^2}.$$

23. Найти структурную схему приемного устройства, осуществляющего оптимальную по критерию Неймана–Пирсона обработку колебания

$$x(t) = aS(t) + n(t),$$

где $S(t)$ – стационарный гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием $m_n = 0$ и корреляционной функцией

$$R_n(t_1, t_2) = \sigma_n^2 e^{-\alpha|t_1 - t_2|};$$

где $S(t)$ – детерминированный сигнал, определенный на интервале $(0, T)$ и равный нулю вне его.

Ответ:

оптимальный приемник должен сформировать величину

$$v = \frac{\alpha}{2\sigma_n^2} \int_0^T x(t)S(t) + \frac{1}{\alpha^2} \dot{x}(t)\dot{S}(t) dt + \frac{1}{2\sigma_n^2} [x(0)S(0) + x(T)S(T)]$$

и сравнить её с порогом h_0 , определяемым заданной вероятностью ложной тревоги

$$P_\lambda = 1 - \Phi(h_0 / \sigma_0),$$

где

$$\sigma_0^2 = \frac{\alpha}{2\sigma_n^2} \int_0^T S^2(t) dt + \frac{1}{\alpha} S^2(t) + \frac{1}{2\sigma_n^2} [S^2(0) + S^2(T)].$$

Если $\nu > h_0$ принимается решение $a = a_1 = 1$, в противном случае принимается $a = a_0 = 0$. Вероятность правильного обнаружения вычисляется по формуле

$$P_0 = 1 - \Phi(h_0 / \sigma_0 - \sigma_0).$$

24. Решить задачу 23 для случая, когда корреляционная функция шума имеет вид

$$R_n(t_1, t_2) = \sigma_n^2 e^{-\alpha|t_1 - t_2|} \cos \omega_1(t_1 - t_2) + \frac{\alpha}{\omega_1} \sin \omega_1|t_1 - t_2|.$$

Ответ:

оптимальный приемник должен сформировать величину

$$\nu = \frac{1}{2\alpha_0 \omega_0^2 \sigma_n^2} \int_0^T [\ddot{x}(t) + \alpha \dot{x}(t) + \omega_0^2 x(t)] \cdot [\ddot{S}(t) + \alpha \dot{S}(t) + \omega_0 S(t)] dt + \frac{x(0)S(0)}{\sigma_n^2} + \frac{\dot{x}(0)\dot{S}(0)}{\omega_0^2 \sigma_n^2}; \quad \omega_0^2 = \omega_1^2 + \alpha^2, \quad \alpha_0 = 2\alpha$$

и сравнить ее с порогом h_0 , определяемым заданной вероятностью ложной тревоги

$$P_\Lambda = 1 - \Phi(h_0 / \sigma_0),$$

где

$$\sigma_0^2 = \frac{1}{2\alpha_0 \omega_0^2 \sigma_n^2} \int_0^T [\ddot{S}(t) + \alpha \dot{S}(t)]^2 dt + \frac{S^2(0)}{\sigma_n^2} + \frac{\dot{S}^2(0)}{\sigma_n^2 \omega_0^2}.$$

При $\nu > h_0$, принимается решение $a = a_1 = 1$, в противном случае – $a = a_0 = 0$. Вероятность правильного обнаружения вычисляется по формуле

$$P_0 = 1 - \Phi(h_0 / \sigma_0 - \sigma_0).$$

3. Согласованные и квазисогласованные фильтры

Цель занятия – научиться определять основные характеристики согласованных и квазисогласованных фильтров: комплексный коэффициент передачи, амплитудные и фазочастотные характеристики, выходное напряжение и отношение сигнал/шум на выходе фильтра.

При подготовке к занятию изучить следующие разделы теории согласованной и квазисогласованной фильтрации:

1. Назначение согласованных фильтров (СФ).
2. Особенности импульсной характеристики и комплексного коэффициента передачи СФ.
3. Вид амплитудно- и фазочастотных характеристик СФ.
4. Методика определения отношения с/ш на выходе СФ.
5. Примеры синтеза согласованных фильтров для одиночных видео- и радиоимпульсов по заданной импульсной характеристике и спектральной плотности сигнала.
6. Структура СФ для пачек видео- и радиоимпульсов.
7. Назначение квазисогласованных фильтров. [2, с. 71-73, 76-77], [3, с.66-72], [4, с.219-225, 226-237], [5, с. 37-56].

Разобрать примеры решения задач и ответить на вопросы.

3.1. Необходимые теоретические сведения.

Примеры решения задач

А. На вход линейного фильтра воздействует аддитивная смесь

$$x(t) = S(t) + n(t),$$

где $n(t)$ – стационарный белый шум, $S(t)$ – статистически независимый от шума экспоненциальный импульс

$$S(t) = \begin{cases} A \exp[-A(t - T)], & t \leq T, \\ 0, & t > T. \end{cases}$$

Определить комплексный коэффициент передачи $K_0(\omega)$ фильтра, максимизирующего отношение с/ш на выходе.

Решение.

Фильтром, максимизирующим отношение с/ш на выходе, является согласованный фильтр. Комплексный коэффициент передачи согласованного фильтра имеет в общем случае следующий вид

$$\underline{K}_0(\omega) = C \dot{S}(\omega) \exp[-j\omega T].$$

В рассматриваемом случае спектральная плотность сигнала

$$\underline{S}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \exp(-j\omega t) dt = A \exp(-AT) \int_{-\infty}^T e^{(A-j\omega)t} dt = \frac{A}{A-j\omega} e^{-j\omega T}$$

поэтому $\underline{K}_0(\omega) = CA/(A+j\omega)$; $C = const$, т.е. фильтр, согласованный с сигналом, может быть реализован в виде RC цепочки, у которой $RC = 1/A$.

Б. На вход интегрирующей цепочки RC воздействует аддитивная смесь статистически независимых стационарного нормального белого шума $n(t)$ со спектральной плотностью

$$S_n(\omega) = \frac{N_0}{2}, \quad -\infty < \omega < \infty,$$

и прямоугольного видеоимпульса

$$S(t) = \begin{cases} U_m, & 0 \leq t \leq \tau_u, \\ 0, & \text{при других } t. \end{cases}$$

Требуется:

а) вывести формулу связывающую отношение сигнал/шум на выходе RC цепочки с длительностью импульса τ_u и энергетической шумовой полосой Δf_{Σ} цепи RC;

б) определить, в каком соотношении должны находиться длительность импульса и оптимальная энергетическая

шумовая полоса $(\Delta f_{\text{Э}})_{\text{ОПГ}}$, при которой на выходе цепи имеет место максимальное отношение сигнал/шум.

Решение.

Отношение с/ш на выходе фильтра равно

$$h_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{S_{\text{ВЫХ}}(t)}{\sigma_{\text{ВЫХ}}},$$

где $S_{\text{ВЫХ}}(t)$ – напряжение полезного сигнала на выходе фильтра, $\sigma_{\text{ВЫХ}}$ – эффективное напряжение шума.

Мощность шума на выходе фильтра можно определить в соответствии с теоремой Винера-Хинчина

$$\sigma_{\text{ВЫХ}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\text{ВЫХ}}(\omega) d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\Pi}(\omega) |\underline{K}(\omega)|^2 d\omega.$$

Подставляя в это выражение коэффициент передачи RC цепи, который равен

$$\underline{K}(\omega) = 1/(1 + j\omega RC),$$

имеем

$$\sigma_{\text{ВЫХ}}^2 = \frac{N_0}{4RC} = \frac{N_0}{2} \Delta f_{\text{Э}},$$

где $\Delta f_{\text{Э}} = 1/2RC$ – энергетическая шумовая полоса цепи RC.

Полезный сигнал на выходе рассматриваемого фильтра равен

$$S_{\text{ВЫХ}}(t) = \int h(t - \tau) S(\tau) d\tau,$$

где

$$h(t) = \begin{cases} (1/RC) \exp(-t/RC), & t \geq 0, \\ 0, & t < 0 \end{cases}$$

– импульсная характеристика фильтра.

В результате получаем

$$S_{\text{ВЫХ}}(t) = U_m (1 - e^{-t/RC}) 1_0(t) - U_m (1 - e^{-(t-\tau_u)/RC}) 1_0(t - \tau_u),$$

где $1_0(t)$ – единичная функция

$$I_0(t) = \begin{cases} 1, & t > 0, \\ 0, & t \leq 0. \end{cases}$$

Максимальное значение

$$S_{\text{ВЫХ}}(\tau_u) = U_m (1 - e^{-\tau_u / RC}) = [S_{\text{ВЫХ}}(t)]_{\text{max}}.$$

В соответствии с этим отношение сигнал/ шум на выходе равно

$$h_{\text{ВЫХ}} = \frac{S_{\text{ВЫХ}}(t)_{\text{max}}}{\sigma_{\text{ВЫХ}}} = \frac{\sqrt{2}U_m}{\sqrt{N_0 \Delta f_{\text{Э}}}} (1 - e^{-2\Delta f_{\text{Э}} \tau_u}).$$

Для определения зависимости между длительностью импульса и оптимальной энергетической шумовой полосой $(\Delta f_{\text{Э}})_{\text{опт}}$ необходимо вычислить производную от $h_{\text{ВЫХ}}$ по $\Delta f_{\text{Э}}$. Она равна

$$\frac{dh_{\text{ВЫХ}}}{d(\Delta f_{\text{Э}})} = \frac{\sqrt{2}U_m}{\sqrt{N_0}} \left[2\tau_u \Delta f_{\text{Э}}^{-1/2} e^{-2\Delta f_{\text{Э}} \tau_u} + \frac{1}{2} \Delta f_{\text{Э}}^{-3/2} (1 - e^{-2\Delta f_{\text{Э}} \tau_u}) \right].$$

Приравняв результат к 0, получим

$$\tau_u (\Delta f_{\text{Э}})_{\text{онм}} = 0.5 \ln [4\tau_u (\Delta f_{\text{Э}})_{\text{онм}} + 1].$$

Откуда

$$[\Delta f_{\text{Э}}]_{\text{онм}} = 0.628 / \tau_u.$$

При этом выходное отношение сигнал/шум равно

$$h_{\text{max}} = 0.9 \sqrt{\frac{2U_m^2 \tau_u}{N_0}} = 0.9 \sqrt{\frac{2E}{N_0}},$$

где $E = U_m^2 \tau_u$.

В. На вход фильтра с гауссовской характеристикой

$$K(\omega) = K_0 \exp[-b^2(\omega - \omega_0)^2] \exp(-j\omega T),$$

где b – Const, T – постоянное время задержки фильтра, воздействует смесь белого нормального шума со

спектральной плотностью $N_0/2$ ($-\infty \leq \omega \leq \infty$) и гауссового радиоимпульса

$$S(t) = A \exp(-t^2 / 4b^2) \exp j\omega_0 t.$$

Определить отношение сигнал/шум на выходе фильтра в момент времени T .

Решение.

а) амплитудно-частотная характеристика фильтра

$$|K(\omega)| = K_0 \exp[-b^2(\omega - \omega_0)^2],$$

а фазо-частотная характеристика $\varphi(\omega)$ линейная

$$\varphi(\omega) = -\omega T.$$

б) определим спектр сигнала. Для этого сначала найдем спектр его огибающей $G(\omega)$. В соответствии с преобразованием Фурье

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} A(t) e^{-j\omega t} dt,$$

где $A(t)$ – огибающая сигнала

$$A(t) = A \exp[-t^2 / 4b^2],$$

$$G(\omega) = 2A \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-t^2 / 4b^2] e^{-j\omega t} dt.$$

Учитывая, что $\exp jx = \cos x + j \sin x$ получим

$$\underline{G}(\omega) = 2A \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-t^2 / 4b^2] \cos \omega t dt.$$

Интеграл в этом выражении табличный

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-a^2 x^2} \cos cx dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2a} \exp[-c^2 / 4a^2],$$

поэтому

$$G(\omega) = 2ba\sqrt{\pi} \exp[-b^2(\omega)^2].$$

Спектр сигнала $\underline{S}(t)$ при этом имеет вид

$$g(\omega) = 2ba\sqrt{\pi} \exp[-b^2(\omega - \omega_0)^2].$$

Фазовая характеристика такого сигнала – «нулевая».

Из полученных выражений видно, что рассматриваемый фильтр для сигнала $S(t)$ является согласованным. Поэтому отношение сигнал/ шум на его выходе

$$h^2 = q^2 = 2E / N_0,$$

где E – энергия сигнала $S(t)$.

Г. На вход фильтра, согласованного с прямоугольным радиоимпульсом $S_0(t)$ длительностью τ_u : $S_0(t) = A_m \cos \omega_0 t$, $0 \leq t \leq \tau_u$, импульсная характеристика которого

$$h(t) = S_0(T - t),$$

где T – постоянное время задержки фильтра, воздействует аддитивная смесь

$$x(t) = S_1(t) + n(t),$$

где $n(t)$ – стационарный белый шум, а $S_1(t)$ - прямоугольный импульс длительностью τ_u : $S_1(t) = A_m \cos \omega_1 t$, частота которого отлична от частоты сигнала ($|\omega_0 - \omega_1| = \omega_p \ll \omega_0$).

Определить отношение сигнал/шум на выходе фильтра в момент времени T .

Решение.

Отношение сигнал/шум на выходе фильтра в момент времени T равно

$$h(T) = U_{\text{вых}}(T) / \sigma_{\text{ш}},$$

где $\sigma_{\text{ш}}$ – среднеквадратичное значение выходного шума. Напряжение полезного сигнала на выходе фильтра определяется интегралом Дюамеля

$$U_{\text{вых}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_1(\tau) h(t - \tau) d\tau.$$

При $0 \leq t \leq T$ напряжение равно

$$U_{\text{вых}}(t) = \int_0^t S_1(\tau) S_0(T - t + \tau) d\tau.,$$

а в момент времени T

$$\begin{aligned} U_{\text{вых}}(T) &= \int_0^{\tau_u} S_1(\tau) S_0(\tau) d\tau = A_m \cos \omega_0 \tau \cdot \cos \omega_1 \tau d\tau = \\ &= \frac{A_m^2}{2} \int_0^{\tau_u} [\cos(\omega_0 - \omega_1)\tau + \cos(\omega_0 + \omega_1)\tau] d\tau = \\ &= \frac{A_m^2}{2} \left[\frac{\sin(\omega_0 - \omega_1)\tau_u}{\omega_0 - \omega_1} + \frac{\sin(\omega_0 + \omega_1)\tau_u}{\omega_0 + \omega_1} \right]. \end{aligned}$$

По условию задачи $|\omega_0 - \omega_1| \ll \omega_0$, поэтому

$$U_{\text{вых}}(T) = \frac{A_m^2}{2} \frac{\sin(\omega_0 - \omega_1)\tau_u}{\Delta\omega_p}.$$

Мощность шума на выходе согласованного фильтра определяется известным соотношением $\sigma_u^2 = c^2 N_0 E / 2$, (в нашем случае $c = 1$), где E – энергия сигнала, равная $A_m \tau_u / 2$, $N_0 / 2$ спектральная плотность шума.

Поэтому получаем

$$h(T) = q \sin \Delta\omega_p \tau_u / \Delta\omega_p \tau_u,$$

где $q = \sqrt{2E / N_0}$.

3.2. Вопросы для самоконтроля

1. Какие линейные фильтры называются согласованными; в каком смысле они являются оптимальными?

2. Какой вид имеет импульсная характеристика согласованного фильтра?

3. Какой вид имеют амплитудно- и фазочастотная характеристики фильтра?

4. Чем определяется отношение сигнал/шум на выходе согласованного фильтра при воздействии на его вход полезного сигнала и помехи в виде белого шума?

5. Какой формулой определяется комплексный коэффициент передачи согласованного фильтра для случая небелого шума?

6. Нарисуйте структурные схемы фильтров для одиночных видео- и радиоимпульсов. Какое принципиальное различие есть между ними?

7. Какие линейные фильтры называются квазисогласованными, находят ли они применение на практике?

3.3. Задачи

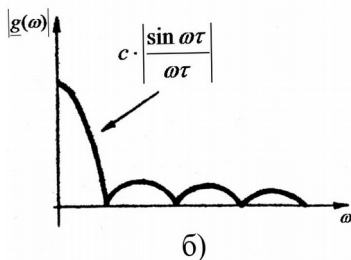
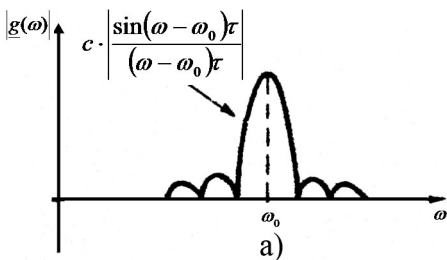
Задачи 1, 5, 10, 19, 22, 26 рекомендуются для решения на практических занятиях, остальные (по вариантам) – в качестве индивидуального задания студентам.

1. Какова амплитудно-частотная характеристика фильтров, согласованных с принимаемыми на фоне белого нормального шума сигналами, амплитудные спектры которых изображены на рис.3.1. а, б, в, г? Изобразить амплитудные спектры сигналов на выходе фильтров.

2. Определить в общем виде мощность шума на выходе фильтров, согласованных с принимаемыми на фоне белого нормального шума сигналами, амплитудные спектры которых изображены на рис. 3.1. Указание: следует обратить внимание на то, что на рис. 3.1 изображены спектры наиболее простых, широко известных сигналов.

3. Какой вид имеет импульсная характеристика фильтров, согласованных с принимаемыми на фоне белого шума сигналами, вид которых представлен на рис. 3.2? Построить временные диаграммы выходных сигналов и автокорреляционные функции шума на выходе фильтров.

4. Какой вид имеет фазочастотная характеристика фильтров согласованных с принимаемыми на фоне белого нормального шума сигналами, фазовые спектры которых изображены на рис. 3.3. а, б, в, г?



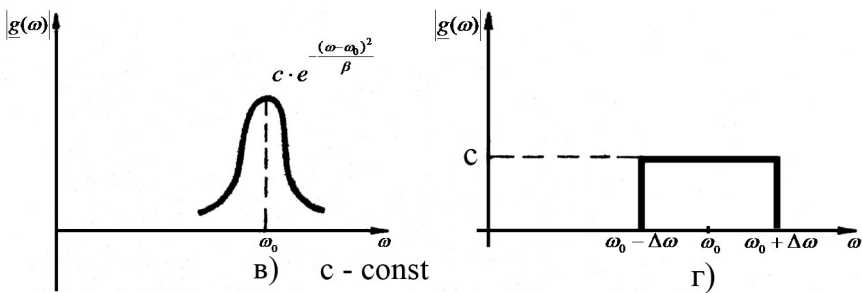


Рис. 3.1. Спектры сигналов

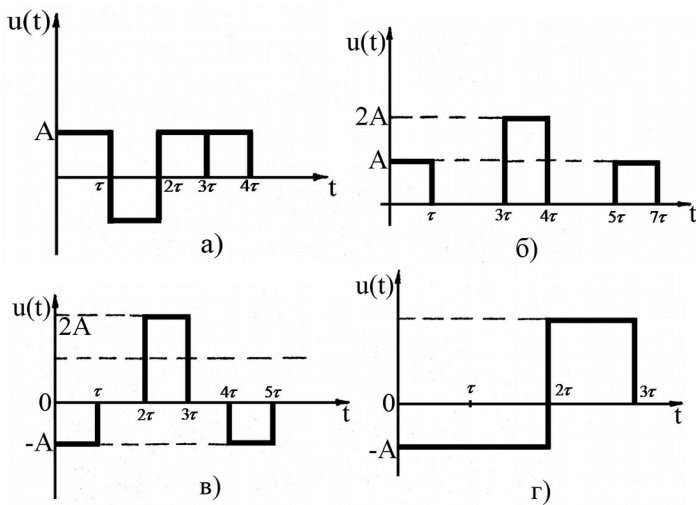
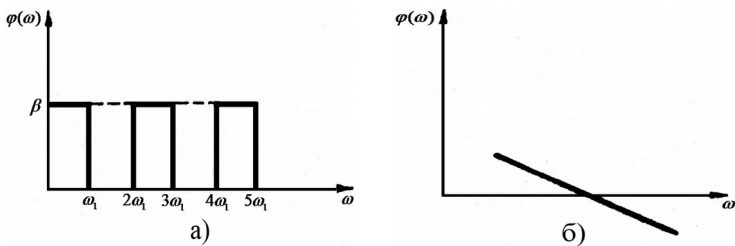


Рис. 3.2. Временные диаграммы сигналов



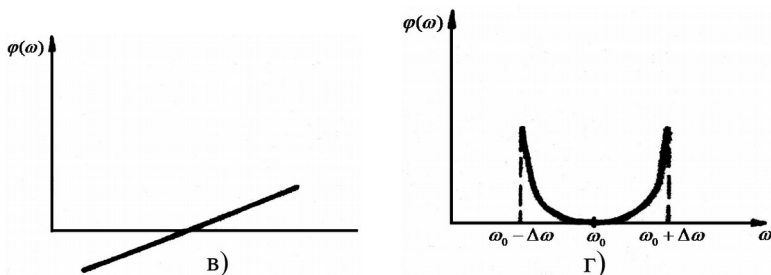


Рис. 3.3. Фазочастотные характеристики сигналов

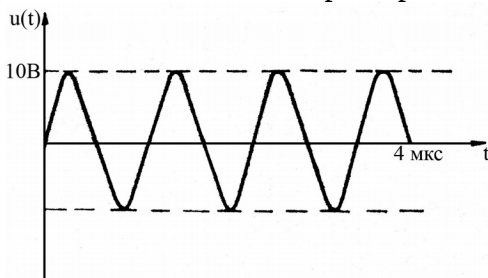


Рис. 3.4. Временная диаграмма сигнала

5. а) достроить функциональные схемы фильтров, согласованных с принимаемыми на фоне белого шума сигналами, временные диаграммы которых изображены на рис. 3.2;

б) изобразить временные диаграммы сигналов в различных точках структурных схем этих фильтров при действии на вход согласованных сигналов.

6. Построить структурную схему фильтра, согласованного с прямоугольным видеоимпульсом длительности τ , принимаемым на фоне белого нормального шума. Объяснить механизм его работы. Изобразить временные диаграммы в различных точках структурной схемы при действии на вход этого сигнала и прямоугольных видеоимпульсов той же амплитуды и длительности 0.5τ и 2τ . Определить максимальное отношение сигнал/шум на

выходе фильтра h для каждого из этих сигналов. Объяснить, почему фильтр не является согласованным для двух последних сигналов. Как надо изменить структурную схему фильтра, чтобы он стал согласованным для второго сигнала?

Ответ: в первом и третьем случае $h = q$, во втором – $h = 0.5q$, где $q^2 = 2E/N_0$ – отношение сигнал/шум на выходе фильтра при действии на его вход сигнала длительности τ с энергией E .

7. Построить структурную схему фильтра, согласованного с принимаемым на фоне белого нормального шума сигналом, временная диаграмма которого приведена на рис. 3.4.

8. Изобразить структурную схему фильтра, согласованного с последовательностью из пяти прямоугольных видеоимпульсов, длительность которых – 1 мкс, амплитуда 1 В, а квазипериод повторения – 5 мкс. Построить временные диаграммы напряжений сигналов в различных точках этой структуры схемы. Рассчитать мощность шума и отношения сигнал/шум в этих точках при действии на вход фильтра указанного сигнала и нормального, шума, выделяющего на сопротивлении в 1 Ом мощность 1 мВт в полосе 1 кГц (рециркулятор в фильтре не использовать).

9. Решить задачу для случая, когда в согласованном фильтре применяется близкий к идеальному рециркулятор (т.е. устройство с коэффициентом обратной связи, близким к единице).

10. Найти импульсную характеристику фильтра, согласованного с сигналом $S(t) = A \sin \omega_0 t \quad [0 \leq t \leq T]$, если на интервале $[0, T]$ укладывается нечетное число полупериодов.

Ответ:

$$h(t) = \begin{cases} A \sin \omega_0 t, & 0 \leq t \leq T, \\ 0, & 0 \leq t. \end{cases}$$

11. На вход согласованного фильтра воздействует полезный сигнал

$$S(t) = \begin{cases} t, & 0 \leq t \leq a, \\ 2a - t, & a \leq t \leq 2a, \\ 0, & t < 0, t > 2a \end{cases}$$

и белый шум.

Найти комплексный коэффициент передачи $K_0(\omega)$ и импульсную характеристику фильтра.

Ответ:

$$K_0(\omega) = \left[c / (j\omega)^2 \right] (1 - e^{j\omega a})^2 e^{-j\omega T},$$

$$h(t) = \begin{cases} t \cdot (t - 2a), & t - 2a \leq t \leq t - a, \\ T - t, & T - a \leq t \leq T, \\ 0, & t \geq T, t < T, t < T - 2a. \end{cases}$$

12. Найти сигнал на выходе фильтра, согласованного с входным сигналом

$$S(t) = \begin{cases} A, & 0 \leq t \leq \tau_v, \\ 0, & t < 0, t > \tau_v. \end{cases}$$

Ответ:

$$S_{\text{вых}}(t) = \begin{cases} cA^2(t - T + \tau_u), & T - \tau_u \leq t \leq T, \\ -cA^2(t - T + \tau_u), & T \leq t \leq T + \tau_u. \end{cases}$$

13. На вход линейного фильтра воздействует аддитивная смесь $x(t) = S(t) + n(t)$, где $S(t)$ – прямоугольный видеоимпульс длительности τ_n :

$$S(t) = \begin{cases} A, & 0 \leq t \leq \tau_u, \\ 0, & t < 0, t > \tau_u, \end{cases}$$

а $n(t)$ – стационарный нормальный шум со спектральной плотностью

$$S_n(\omega) = \frac{2\alpha a}{\alpha^2 + \omega^2}, \quad 0 < \omega < \infty.$$

Найти комплексный коэффициент передачи фильтра, максимизирующего выходное отношение сигнал/шум.

Ответ:

$$\underline{K}_0(\omega) = c \left[\frac{\alpha^2}{j\omega} - j\omega \right] (1 - e^{-j\omega\tau_u}).$$

14. Решить задачу 13. Для случая приема прямоугольного видеоимпульса на фоне стационарного шума со спектральной плотностью

$$S_n(\omega) = \frac{2\alpha\omega^2}{\alpha^2 + \omega^2}, \quad 0 < \omega < \infty.$$

Ответ: $K_0(\omega) = [c / j\omega] [1 - \alpha / (j\omega)^2] [1 - e^{-j\omega\tau_u}]$.

15. Найти коэффициент передачи $K_0(\omega)$ – линейного фильтра, обеспечивающего максимально возможное отношение сигнал/шум на выходе, если на вход фильтра поступает сигнал в виде последовательности из n

прямоугольных видеоимпульсов и белый нормальный шум. T_n – период последовательности, τ_u – длительность импульсов.

Ответ:

$$K_0(\omega) = \frac{c}{j\omega} \cdot \frac{1 - \exp(j\omega n T_n)}{1 - \exp(j\omega T_n)} (e^{j\omega T_n} - 1) e^{-j\omega T}.$$

16. Вычислить максимальное значение отношения сигнал/шум на выходе фильтра с гауссовой характеристикой

$$K_0(\omega) = K_0 \exp\left[-1.4 \frac{\omega - \omega_0}{\Delta\omega} - j\omega T\right]$$

при воздействии на его вход аддитивной смеси белого нормального шума со спектральной плотностью N_0 , $0 \leq \omega \leq \infty$ и гауссового радиоимпульса

$$S(t) = A \exp\left[-2.8(t/\tau_u)^2 + j\omega_0 t\right].$$

Определить оптимальное значение полосы пропускания фильтра $\Delta f_{opt} = \Delta\omega_{opt} / 2\pi$.

Указание: эта задача решается подобно задаче Б (см. примеры решения задач).

17. На вход фильтра, согласованного с прямоугольным радиоимпульсом $S(t)$ с длительностью τ_u

$$S(t) = A \cos \omega_0 t; \quad 0 \leq t \leq \tau_u,$$

воздействует аддитивная смесь сигнала $S(t)$ и стационарного шума $n(t)$. Определить отношение сигнал/шум $h(t) = \nu(t) / \sigma(t)$, где $\nu(t)$ – огибающая сигнала на выходе фильтра, а $\sigma(t)$ – среднее квадратическое значение выходного шума, в конце импульса $t = \tau_u$ для следующих случаев:

а) сигнал и шум начинают воздействовать на фильтр одновременно с момента $t = 0$.

б) шум $n(t)$ начинает действовать на фильтр с некоторым опережением Δt по отношению к сигналу $S(t)$.

в) шум воздействует на фильтр с момента $t \rightarrow -\infty$, а сигнал – с момента $t = 0$.

Ответ:

а) $h(\tau_u) = \sqrt{q}$, $q^2 = 2E / N_0$, $E = A^2 \tau_u / 2$,

б) $h(\tau_u) = \sqrt{q}$,

в) $h(\tau_u) = \sqrt{q}$.

18. Рассчитать отношение сигнал/шум на выходе идеального резисторного усилителя с прямоугольной АЧХ при действии на его вход смеси прямоугольного видеоимпульса длительности τ и белого нормального шума. Сравнить это отношение для следующих случаев а) оптимальной полосы пропускания; б) полосы $\Delta F = 0.5/\tau$ и в) полосы $\Delta f = 1/\tau$, с аналогичными отношением на выходе согласованного фильтра для такого сигнала.

19. На вход согласованного фильтра для одиночного сигнала и экспоненциального накопителя с задержанной обратной связью или рециркулятора с коэффициентом обратной связи $m = 0.9$, поступает аддитивная смесь сигнала в виде последовательности 10 прямоугольных видеоимпульсов с амплитудой 1 мВ, длительностью 1 мкс и квазипериодом повторения $T = 50$ мкс и белого шума, выделяющего на сопротивлении 1 Ом мощность 50 мкВт в полосе шириной 1 МГц. Построить временные диаграммы на входе и выходе рециркулятора. Определить выигрыш в отношении сигнал/шум, обеспечиваемый рециркулятором.

Ответ: $h^2 \approx 0.9q^2 = 0.36$.

20. Определить максимальное отношение сигнал/помеха на выходе устройства, изображенного на рис. 3.5, при воздействии на него аддитивной смеси белого шума со спектральной плотностью $S_n(\omega) = \frac{N_0}{2}$ ($-\infty \leq \omega \leq \infty$) и сигнала $S(t)$, имеющего вид изображенной на рис. 3.5 последовательности элементарных импульсов с равными амплитудами A_m и длительностями τ_u :

$$S(t) = A_m [1_0(t) - 2 \cdot 1_0(t - 3\tau_u) + 2 \cdot 1_0(t - 4\tau_u) - 1_0(t - 5\tau_u)]$$

Выходной фильтр согласован с элементарным импульсом и имеет импульсную переходную функцию

$$h(t) = \begin{cases} A_m S(\tau_u - t), & 0 \leq t \leq \tau_u, \\ 0, & t > \tau_u. \end{cases}$$

Указание: первым этапом решения этой задачи является построение временной диаграммы сигнала на выходе сумматора.

Ответ: $h = \sqrt{2E/N_0}$, где $E = 5A_m^2\tau_u$ – полная энергия сигнала.

21. Решить задачу 20 для случая, когда входной сигнал представляет собой последовательность пяти однополярных импульсов.

Указание: первым этапом решения этой задачи является построение временной диаграммы сигнала на выходе сумматора.

Ответ: $h = \sqrt{\frac{q}{25} \frac{2E}{N_0}}$.

22. На вход линейного фильтра (рис. 3.6) подается аддитивная смесь стационарного нормального шума со спектральной плотностью $S_n(\omega)$, $(-\infty \leq \omega \leq \infty)$ и сигнала $S(t)$, представляющего собой пять следующих друг за другом элементарных прямоугольных импульсов с равными амплитудами A_m и длительностями τ_u (рис. 3.6).

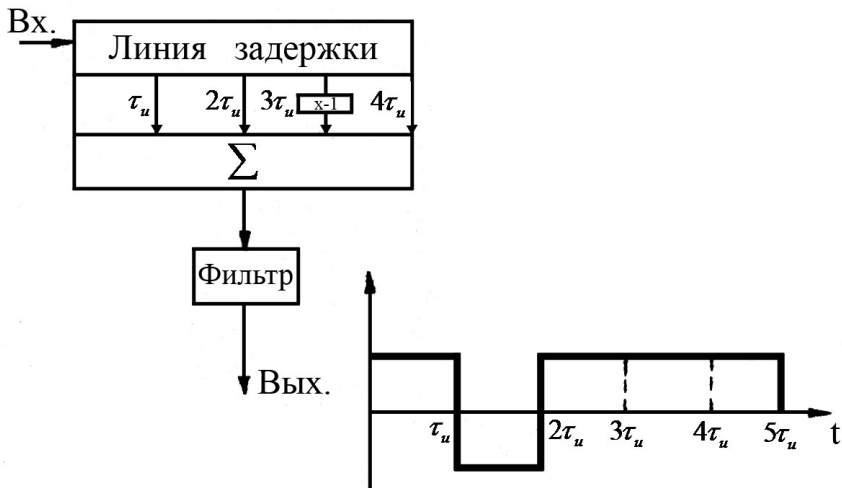


Рис. 3.5. Устройство обработки сигнала

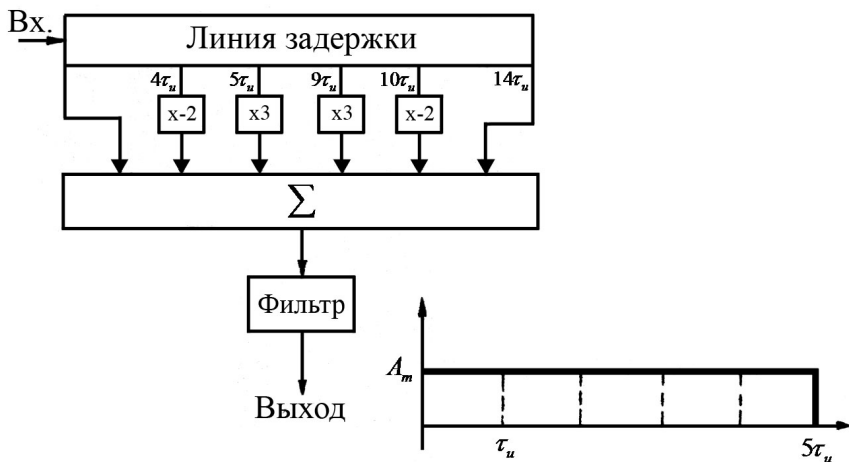


Рис. 3.6. Устройство обработки сигнала

Выходной фильтр согласован с элементарным импульсом (см. задачу 20). Определить максимальное значение отношения сигнал/помеха на выходе фильтра.

Указание: см. задачу 20.

$$\text{Ответ: } h = \sqrt{\frac{36}{28} \frac{2E}{N_0}}, \quad E = A_m^2 \tau_u.$$

23. Решить задачу 22 для случая, когда третий импульс рис. 3.5 имеет отрицательную полярность.

Указание: см. задачу 20.

$$\text{Ответ: } h = \sqrt{\frac{36}{28} \frac{2E}{N_0}}.$$

24. На вход фильтра, согласованного с прямоугольным радиоимпульсом $S_0(t)$ длительностью τ_u :

$$S_0(t) = A_m \cos \omega_0 t, \quad 0 \leq t \leq \tau_u$$

воздействует аддитивная смесь

$$x(t) = S_1(t) + n(t),$$

где $n(t)$ – стационарный белый шум, а $S_1(t)$ – радиоимпульс длительностью τ_u :

$$S_1(t) = A_m \cos \omega_1 t,$$

частота которого отлична от частоты сигнала ($|\omega_1 - \omega_0| = \Delta\omega_p \ll \omega_0$). Определить отношение сигнал/шум $h(\tau_u)$ на выходе в конце импульса $S_1(t)$.

Ответ:

$$h(\tau_u) \cong \sqrt{q} \frac{\sin \Delta\varphi_p}{\Delta\varphi_p}, \quad \Delta\varphi_p = \Delta\omega_p \tau_u.$$

25. На вход фильтра с идеальной прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой:

$$\underline{K}(\omega) = \begin{cases} 1, & -\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2} \leq \omega \leq -\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}, \\ 1, & \omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2} \leq \omega \leq \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}, \\ 0, & \text{при других } \omega \end{cases}$$

и нулевой фазовой характеристиками воздействует смесь $x(t) = S(t) + n(t)$, где $n(t)$ – стационарный нормальный белый шум, $S(t)$ – прямоугольный радиоимпульс длительностью τ_u , несущая частота которого совпадает со средней частотой фильтра ω_0 .

Определить оптимальное значение полосы пропускания фильтра, при котором выходное отношение сигнал/шум достигает максимума.

Указание: эта задача решается подобно задаче Б (см. примеры решения задач).

Ответ:

$$\Delta f_{opt} = 1.37 / \tau_u, \quad h_{max} = 0.91 \sqrt{q^2}, \quad q^2 = 2E / N_0.$$

4. Оценка параметров сигналов

Цель занятия научиться определять функцию правдоподобия и апостериорную плотность распределения при различных исходных данных и использовать их для оценки неизвестных параметров сигналов.

При подготовке к занятию изучить следующие разделы теории оценки параметров сигналов:

1. Постановка задачи оценки параметров сигналов.

1. Качественные показатели при измерении параметров сигналов: математическое ожидание ошибки, дисперсию и среднеквадратическое значение ошибки.

2. Критерий минимума среднего риска в теории оценки параметров. Функции стоимости ошибок: простую, квадратичную, линейную.

3. Методики решения задачи оценки параметров при большом отношении сигнал/шум.

4. Принципы нахождения оценок параметров сигналов: максимума апостериорной вероятности и функции правдоподобия, максимума корреляционного интеграла.

5. Примеры функциональных схем оптимальных измерителей дальности, скорости и угловых координат. [3, с.63-65], [4, с.109-115], [6, с. 166-181].

Разобрать примеры решения задач и ответить на вопросы.

4.1. Необходимые теоретические сведения.

Примеры решения задач

А. Случайное напряжение η на выходе приемника РЛС имеет нормальную плотность вероятностей

$$W_{\eta}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right]$$

с неизвестным средним значением m и неизвестной дисперсией σ^2 . В результате наблюдений получены n независимых значений $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ случайной величины η . Каковы правдоподобные значения m и σ^2 ?

Решение.

Для решения задачи необходимо воспользоваться принципом максимума правдоподобия. Совместная плотность вероятностей n независимых результатов наблюдений равна

$$W_{n\eta}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{1}{\sigma^n (2\pi)^{n/2}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2\right].$$

Функция правдоподобия $L(\eta/m, \sigma^2)$ имеет такой же вид, что и $W_{n\eta}$ при условии, что x_i – представляют собой результаты наблюдений. Её логарифм равен

$$\ln L(\eta/m, \sigma^2) = -\frac{n}{2} \ln(2\pi) - n \ln \sigma - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2.$$

Дифференцируя это выражение по m и приравнявая результат к нулю, получим оценку m^*

$$\sum_{i=1}^n (x_i - m^*) = 0, \quad m^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

Как видно оценкой m является среднеквадратическое значение результатов наблюдения. Подставляя найденное значение m^* в выражение для $\ln L$ и затем дифференцируя по σ , получим

$$\frac{\partial}{\partial \sigma} \ln L(\eta / m^*, \sigma^2) = -\frac{n}{\sigma} + \frac{1}{\sigma^3} \sum_{i=1}^n (x_i - m^*)^2.$$

Производная обращается в нуль при

$$n\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m^*)^2, \text{ поэтому}$$

$$(\sigma^2)^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m^*)^2.$$

В. Случайный сигнал Z на входе измерителя в любой момент времени имеет вид

$$Z = Y + X_1 + X_2,$$

где случайные величины Y , X_1 , X_2 взаимно независимы, нормальны, имеют нулевые средние и дисперсии σ_Y^2 , $\sigma_{X_1}^2$, $\sigma_{X_2}^2$ соответственно. Найти оценку случайной величины $Y - y^*$ в соответствии с принципом максимума апостериорной вероятности при одном наблюдении случайной величины $Z - z_1$.

Решение.

1. Случайные величины X_1 и X_2 нормальны, поэтому нормальна и их сумма $X = X_1 + X_2$. Математическое ожидание X равно нулю, а дисперсия – $\sigma_X^2 = \sigma_{X_1}^2 + \sigma_{X_2}^2$. Таким образом, $Z = Y + X$, где

$$W(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_X} \exp\left[-x^2 / 2\sigma_X^2\right].$$

2. Для определения апостериорной плотности вероятностей воспользуемся формулой Байеса

$$W(y/z) = \frac{W(z/y)W(y)}{W(z)},$$

где $W(z/y)$ – условное априорное распределение величины z , которое для любого (фиксированного) значения y . Определяется так

$$W(z/y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{(z-y)^2}{2\sigma_z^2}\right].$$

По принципу максимума апостериорной вероятности получим оценку величины Y $y^* = \sigma_y^2 z_1 / (\sigma_y^2 + \sigma_x^2)$.

4.2. Вопросы для самоконтроля

1. Какие критерии оптимальности и функции стоимости используются при оценке параметров сигналов?
2. Назовите наиболее употребительные функции стоимости.
3. Как формулируется постановка задачи оценки параметров и каким методом она решается?
4. Сформулируйте принципы нахождения оценок по максимумам функций апостериорной плотности вероятностей и правдоподобия, корреляционного интеграла.
5. В каких случаях совпадают оценки, полученные в соответствии с принципами максимумов апостериорной плотности вероятностей и правдоподобия?
6. Отличаются ли результаты, получаемые в отношении оценок при использовании простой и квадратичной функции стоимости?
7. Какие принципы нахождения оценок параметров сигналов находят практическое применение и почему?

4.3. Задачи

Задачи 1, 5, 13, 17 рекомендуются для решения на практических занятиях, остальные (по вариантам) – для самостоятельной проработки студентами.

1. По каналу связи с независимыми ошибками передается двоичная последовательность, состоящая из N элементов. Вероятность искажения элементов является постоянной, но неизвестной величиной P . Пусть n – наблюдаемое число искажений. Каково наиболее правдоподобное значение P ?

Указание: для решения задачи необходимо знать биномиальный закон распределения величины n .

Ответ: $P^* = n / N$.

2. Пусть входной процесс устройства оценки представляет собой сумму независимых нормальных стационарных случайных процессов с нулевыми средними и дисперсиями $\sigma_{x_i}^2 = \sigma^2$, т.е. $Y(t) = \sum_{i=1}^N x_i$.

Производится одно наблюдение входного процесса (считать N непрерывной случайной величиной). Найти оценку N по максимуму правдоподобия.

Ответ: $N^* = y^2 / \sigma^2$,

где y – результат наблюдения.

3. Решить задачу 2. для случая k независимых наблюдений входного процесса.

Ответ: $N^* = \left[\sum_{i=1}^k y_i^2 \right] / k\sigma^2$,

где y_i – результаты наблюдений.

4. Случайное напряжение Y распределено по закону Коши

$$W(y) = \left[\pi (1 + (y - a)^2) \right]^{-1}.$$

Оценить значение параметра a при условии, что произведено одно наблюдение случайной величины $Y - y$.

Ответ: $a^* = y$.

5. Нормально распределенное напряжение U измеряется двумя неравноточными вольтметрами, которые осуществляют измерения без систематических ошибок, но с разными

дисперсиями σ_1^2 , и σ_2^2 . Определить наиболее правдоподобное значение измеряемого напряжения U .

Ответ: $U^* = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} U_1 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} U_2$, где U_1 и U_2 – показания

вольтметров.

6. Случайное напряжение на входе измерителя Y распределено по нормальному закону

$$W(y) = \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{a}{2}(y - m)^2\right],$$

где m – известно, a – интересующий нас параметр (это величина обратная дисперсии). Предполагается, что имеется одно наблюдение случайной величины $Y = y_1$. Найти наиболее правдоподобное значение параметра a .

Ответ: $a^* = 1/(y_1 - m)^2$.

7. Решить задачу 6. для случая n независимых наблюдений.

Ответ: $a^* = n / \sum_{i=1}^n (y_i - m)^2$.

8. Случайный сигнал на входе измерителя стационарен и имеет нормальную плотность вероятностей

$$W(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(y - m)^2\right]$$

с неизвестным средним значением m и неизвестной дисперсией σ^2 . Найти наиболее правдоподобные значения m и σ^2 при условии двух наблюдений случайной величины Y .

Ответ:

$$m^* = \frac{y_1 + y_2}{2}, \quad (\sigma^2)^* = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\sigma^2} (y_1 - m)^2 + \frac{1}{\sigma^2} (y_2 - m)^2 \right].$$

9. Решить задачу 8 для случая большого числа n независимых наблюдений.

Ответ:

$$m^* = 0.5 \sum_{i=1}^n y_i, (\sigma^2)^* = D^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - m^*)^2.$$

10. Число событий N является случайной величиной и подчиняется закону Пуассона со средним значением a

$$P(N = n) = \frac{a^n}{n!} e^{-a}, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Производится одно наблюдение случайной величины N . Найти наиболее правдоподобное значение a .

Ответ: $a^* = n$.

11. Решить задачу 10 для случая k независимых наблюдений случайной величины N .

$$\text{Ответ: } a^* = \sum_{i=1}^k n_i / k,$$

n_i – результаты наблюдений.

12. Случайный сигнал на входе измерителя в любой момент времени имеет вид

$$Y = A + N,$$

где случайные величины A и N нормальны и имеют нулевые средние и дисперсии σ_A^2 и σ_N^2 соответственно. Найти оценку случайной величины A – a^* в соответствии с принципом максимума апостериорной вероятности при одном наблюдении случайной величины $Y = y_1$.

$$\text{Ответ: } a^* = \sigma_A^2 y_1 / (\sigma_A^2 + \sigma_N^2).$$

13. Решить задачу 12 для случая k независимых наблюдений случайной величины Y .

Ответ:

$$a^* = \frac{\sigma_A^2 \sum_{i=1}^k y_i}{\sigma_A^2 + \sigma_N^2}.$$

14. Решить задачу 12 для случая, когда

$$Y = A + \sum_{i=1}^l N_i,$$

где N_i – независимые нормальные случайные величины с нулевыми средними и дисперсиями $\sigma_{N_i}^2 = \sigma_N^2$.

Указание: для решения задачи необходимо сначала определить плотность распределения суммы случайных величин N_i .

Ответ:

$$a^* = \sigma_A^2 y / (\sigma_A^2 + l \sigma_N^2).$$

15. Решить задачу 14 для k независимых наблюдений случайной величины Y .

Ответ:

$$a^* = \frac{\sigma_A^2 \sum_{i=1}^k y_i}{\sigma_A^2 + l \sigma_N^2}.$$

16. Пусть сигнал на входе измерителя в любой момент времени $Y = A \cdot X$, где A и X независимые нормальные случайные величины с нулевыми средними и дисперсиями σ_A^2 и σ_N^2 . Производится одно наблюдение сигнала Y . Какова оценка случайной величины A – a^* в соответствии с принципом максимума апостериорной вероятности.

17. Плотность вероятностей сигнала Y имеет следующий вид

$$W_1(y/\Lambda) = \begin{cases} \Lambda e^{-\Lambda y}, & y \geq 0, \Lambda > 0, \\ 0, & y < 0. \end{cases}$$

Априорная плотность вероятностей параметра Λ зависит от двух параметров p и q .

$$W_{\Lambda}(\lambda/p, q) = \begin{cases} q^p / \Gamma(p) e^{-\lambda/p} \lambda^{p-1}, & \lambda \geq 0, \\ 0, & \lambda < 0. \end{cases}$$

Полагая, что сделано одно наблюдение случайной величины Y , найти оценку параметра $\Lambda - \lambda^*$.

Ответ:

$$\lambda^* = M[\lambda / y] = \frac{p+1}{q+p}.$$

ЧАСТЬ 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМУ

5. Исследование равносигнального метода пеленгации на примере авиационного радиокомпаса АРК-9

5.1. Общие указания к выполнению работы

Целью настоящей работы является [12]:

1. Ознакомление с амплитудными методами пеленгации, приобретение навыков построения пеленгационных характеристик.
2. Ознакомление с принципом работы радиокомпаса и его основными характеристиками.
3. Приобретение навыков работы с автоматическим радиокомпасом.
4. Ознакомление с конструкцией автоматического радиокомпаса, рамочной и штыревой антенн.
5. Освоение методики экспериментального измерения диаграмм направленности антенн, определения ошибок пеленгации.

При выполнении домашнего задания студенты знакомятся с назначением органов управления на передней панели лабораторной установки, амплитудными методами пеленгации, структурными схемами измерителей угловых координат, со структурной схемой автоматического радиокompаса, принципом формирования равносигнального направления, рассчитывают среднеквадратическую ошибку измерения угла.

При выполнении лабораторного задания студенты уточняют положение и назначение органов управления на передней панели лабораторной установки, знакомятся с конструкциями радиокompаса и его антенн, экспериментально определяют угловое положение пеленгуемой антенны, влияние на точность измерения угла уровня шумов на входе приёмника, экспериментально снимают диаграммы направленности антенн радиокompаса.

5.2. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка содержит авиационный средневолновый автоматический радиокompас АРК-9, включающий в себя блок питания и систему двух антенн – рамочной и штыревой, генератор шума Г2-1, генератор АМ сигналов Г3-4, соединенный фидером со штыревой антенной, расположенной на крыше соседнего здания, и вольтметр АВО-5М.

Радиокompас АРК-9 предназначен для установки на вертолетах и легких транспортных самолетах и используется для их вождения по приводным и радиовещательным станциям. Радиокompас обеспечивает получение непрерывного отсчета курсового угла (угла между продольной осью самолета и направлением на радиостанцию).

Пеленгация радиостанцией в АРК-9 осуществляется амплитудным методом радиосигнального направления (методом сравнения). Как известно, для реализации этого

метода необходимо использовать две антенны со смещёнными относительно друг друга диаграммами направленности или одну антенну с переключаемой диаграммой направленности. Для формирования равносигнального направления в АРК-9 используется антенная система с коммутируемой диаграммой направленности. Антенная система состоит из ненаправленной штыревой антенны и направленной – магнитной рамки.

Диаграмма направленности вертикальной рамки в горизонтальной плоскости имеет вид восьмёрки, как показано на рис. 5.1, кривая 1.

Сигнал на выходе рамочной антенны описывается выражением:

$$U_p = U_{p0} \cdot \cos\beta \cdot \sin(\omega_0 t), \quad (5.1)$$

где U_{p0} – максимальная амплитуда сигнала в рамочной антенне, β – угол между плоскостью рамки и направлением распространения радиоволн, ω_0 – круговая несущая частота.

Фазы сигнала в рамке для значений β , отличающихся на π , являются противоположными.

На рис. 5.1 они обозначены знаками «+» и «-».

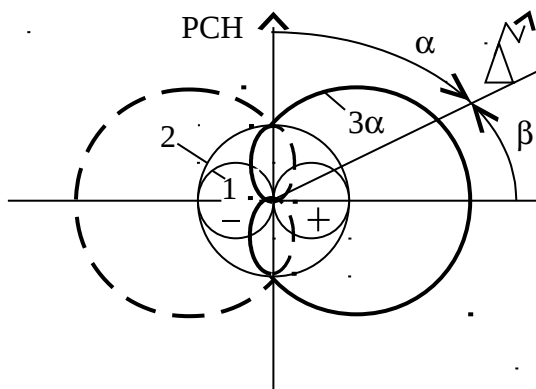


Рис. 5.1. Формирование диаграмм направленности пеленгационных антенн [12]

Сигнал в штыревой антенне

$$u_a = U_{a0} \cdot \cos(\omega_0 t), \quad (5.2)$$

и, как видно, не зависит от значения β (см. рис 5.1, кривая 2). Между сигналами в рамке и штыревой антенне имеется постоянный фазовый сдвиг, равный $\pi/2$.

Диаграмма направленности антенной системы рамка - штыревая антенна имеет вид кардиоиды, максимум которой соответствует углу $\beta=0$, либо $\beta=\pi$. Первая форма диаграммы направленности получается путём суммирования выходных сигналов антенн при условии компенсации усилителем высокой частоты (УВЧ) фазового сдвига $\pi/2$ сигнала рамочной антенне и равенстве значений $U_{p0}=U_{a0}=U_0$

$$\begin{aligned} U_{\Sigma} &= U_{p0} \cos\beta \cdot \sin(\omega_0 + \pi/2) + U_{a0} \cdot \cos(\omega_0 t) = \\ &= U_0(1 + \cos\beta) \cdot \cos(\omega_0 t). \end{aligned} \quad (5.3)$$

Сомножитель $U_0(1 + \cos\beta)$ в (5.3) определяет диаграмму направленности антенной системы, которая в полярных координатах имеет вид кардиоиды (см. рис. 5.1, кривая 3).

Вторая форма диаграммы направленности получается при вычитании сигнала рамочной антенны из сигнала штыревой антенны. Она также имеет вид кардиоиды, максимум которой соответствует углу $\beta=\pi$ (см. рис. 5.1, пунктирная кривая).

Прямая линия, проходящая через точки пересечения кривых кардиоид на рис. 5.1 определяет равносигнальное направление (РСН).

Структурная схема автоматического радиоконюаса АРК-9 представлена на рис. 5.2.

Рассмотрим принцип работы автоматического радиоконюаса. Сигнал рамочной антенны усиливается и поворачивается по фазе на $\pi/2$ в УВЧ. Напряжение на выходе УВЧ можно представить в виде

$$U_{увч} = K_{увч} \cdot U_{p0} \cdot \cos\beta \cdot \cos(\omega_0 t), \quad (5.4)$$

где $K_{увч}$ – коэффициент усиления УВЧ.

На первый вход коммутатора фазы, в качестве которого используется балансный модулятор (БМ), подаётся напряжение с выхода УВЧ, а на второй вход гармонический сигнал с частотой $\Omega=30$ Гц от генератора звуковой частоты.

$$U_{нч} = U_{нч} \sin(\Omega t), \quad (5.5)$$

Балансный модулятор перемножает сигналы УВЧ и звукового генератора. Напряжение на выходе БМ

$$\begin{aligned} U_{бм} &= U_{увч} \cdot U_{нч} = K_{увч} \cdot U_{р0} \cdot U_{нч} \cdot \cos\beta \cdot \sin(\Omega t) \cdot \cos(\omega_0 t) = \\ &= U_{бм} \cdot \cos\beta \cdot \sin(\Omega t) \cdot \cos(\omega_0 t), \end{aligned} \quad (5.6)$$

где $U_{бм} = K_{увч} U_{р0} U_{нч}$ – амплитуда напряжения на выходе БМ.

В последнем выражении присутствует множитель $\sin(\Omega t)$. Следовательно, балансный модулятор осуществляет периодическое с частотой $\Omega=30$ Гц инвертирование сигнала рамки, то есть действует как коммутатор фазы. Действие балансного модулятора эквивалентно механическому переключению выводов рамки с частотой Ω для изменения фазы её сигналов на π .

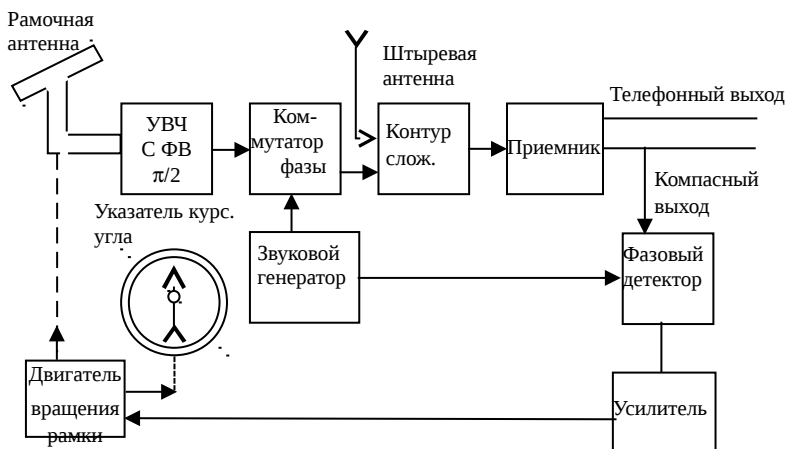


Рис. 5.2. Структурная схема радиокompаса АРК-9 [12]

Сигнал с выхода коммутатора фазы подаётся на контур сложения приемника, где складывается с сигналом ненаправленной антенны U_a . На выходе контура сложения будет формироваться напряжение

$$U_{kc} = U_{\text{бм}} + U_a = [U_{\text{бм}} \cdot \cos\beta \cdot \sin(\Omega t) + U_{a0}] \cos(\omega_0 t). \quad (5.7)$$

Величина коэффициента усиления $K_{увч}$ выбирается так, чтобы максимальное значение амплитуды на выходе БМ приблизительно равнялось амплитуде напряжения на выходе ненаправленной антенны, то есть $U_{\text{бм}} \approx U_{a0}$. Тогда напряжение на выходе контура сложения

$$U_{kc} = U_{\text{бм}} [1 + \cos\beta \cdot \sin(\Omega t)] \cos(\omega_0 t). \quad (5.8)$$

Выражение (5.8) описывает не что иное, как сигнал, который промодулирован по амплитуде гармоническим колебанием $\sin(\Omega t)$, причем глубина амплитудной модуляции определяется косинусом угла между плоскостью рамки и направлением прихода радиоволн.

Напряжение с выхода контура сложения подается на приемник, который осуществляет усиление и амплитудное детектирование (выделение огибающей) сигнала (5.8). Приемник имеет два выхода: телефонный – с вырезанием спектра около частоты 30 Гц и компасный, пропускающий эти частоты. Таким образом, на компасном выходе приемника является усиленной огибающей сигнала (5.8) и имеет вид

$$U_{np} = U_m \cdot \cos\beta \cdot \sin(\Omega t), \quad (5.9)$$

где U_m – максимально возможная амплитуда огибающей.

Амплитуда огибающей (5.9) $|U_m \cdot \cos\beta|$ содержит информацию о величине угла отклонения, а начальная фаза,

задаваемая $\cos\beta$, о знаке отклонения направления прихода радиоволн от направления $\beta=0$.

Сигнал (5.9) поступает на вход фазового детектора (ФД). На второй (опорный) вход ФД подаётся сигнал от звукового генератора $U_{нч}$, который используется также для коммутации фазы. Как известно, фазовый детектор производит перемножение поступающих сигналов и выделение низкочастотной составляющей. Выходной сигнал ФД

$$\begin{aligned} U_{фд} &= K_{фд} \cdot U_{пр} \cdot U_{нч} = \\ &= K_{фд} \cdot U_m \cdot U_{нч} \cos\beta \cdot \sin(\Omega t) \sin(\Omega t) = U_{вых} \cdot \cos\beta, \end{aligned}$$

(5.10)

где $K_{фд}$ – коэффициент передачи фазового детектора, $U_{вых}=0,5 \cdot K_{фд} \cdot U_m \cdot U_{нч}$ – максимальное значение напряжения на выходе ФД.

Напряжение с выхода ФД после усиления подаётся на двигатель вращения рамки. Под воздействием этого напряжения в автоматическом режиме радиокompаса рамка приходит в движение и вращается до тех пор, пока пеленгуемая радиостанция не окажется на равносигнальном направлении. В этот момент на входе УВЧ напряжение (5.1) создаваемое рамкой, равно нулю, в контуре сложения действует только сигнал ненаправленной антенны, отсутствуют амплитудная модуляция с частотой 30 Гц у входного сигнала приемника, управляющий сигнал на выходе ФД равен нулю и двигатель не вращается.

О положении рамочной антенны можно судить по угловому положению стрелки индикатора – указателя курса.

Основной характеристикой измерителей угловых координат является пеленгационная характеристика, представляющая собой зависимость выходного напряжения углового дискриминатора от угла рассогласования. В радиокompасе АРК-9 роль углового дискриминатора играет фазовый детектор, поэтому зависимость (5.10) является пеленгационной характеристикой радиокompаса.

Относительно равносигнального направления выражение для пеленгационной характеристики имеет вид

$$U_{\text{фд}} = U_{\text{вых}} \cdot \sin \alpha, \quad (5.11)$$

где $\alpha = \beta - 90^\circ$.

Кривая зависимости $U_{\text{фд}}$ от α (пеленгационная характеристика) представлена на рис. 5.3.

Наличие отрицательной обратной связи обеспечивает однозначность пеленгации в пределах углов от 0 до 360° . Это означает, что вне зависимости от начального значения угла между равносигнальным направлением и направлением прихода радиоволн, в момент окончания пеленгации источник радиоволн будет находиться на равносигнальном направлении.

Точки на пеленгационной характеристике $\alpha = 2\pi n$, где $n=0, \pm 1, \pm 2 \dots$ являются точками устойчивого равновесия, а $\alpha = \pi(2n+1)$ – точками неустойчивого равновесия системы. Для уяснения этого проведем два мысленных эксперимента.

Будем полагать, что под воздействием положительного напряжения с ФД электродвигатель вращает рамку по часовой стрелке, под воздействием отрицательной – против часовой стрелки.

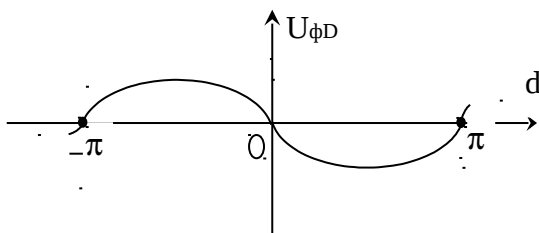


Рис. 5.3. Пеленгационная характеристика [12]

Эксперимент 1. Пусть угол $\alpha=0$. Тогда управляющее напряжение на выходе ФД равно нулю, рамка неподвижна. Предположим теперь, что под действием возмущений (например, изменения курса самолёта, на котором установлен радиокompас) угол α изменится в сторону отрицательных

значений ($\alpha < 0$), то есть источник радиоволн находится сейчас правее РСН. Согласно пеленгационной характеристике (см. рис. 5.3) в этом случае на выходе ФД появится положительное напряжение, которое будет поворачивать рамку по часовой стрелке до тех пор, пока угол α не станет опять равным нулю. В случае положительных рассогласований $\alpha > 0$ на выходе ФД появится отрицательное напряжение и рамка против часовой стрелки вновь вернется в устойчивое положение.

Эксперимент 2. Рассмотрим теперь случай, когда рамка находится в положении, соответствующем $\alpha = \pi$, то есть направление прихода радиоволн противоположно равносигнальному. Согласно пеленгационной характеристике управляющее напряжение также равно нулю и рамка неподвижна. Однако такое состояние системы не может продолжаться даже короткое время, поскольку под воздействием внешних или внутренних возмущений рамка неизбежно отклонится от первоначального положения. Пусть, например, угол α станет меньше π . На выходе ФД появится отрицательное напряжение и двигатель будет поворачивать рамку против часовой стрелки, пока направление прихода сигнала не совпадет с РСН, то есть пока угол α не станет равным нулю, а система не займет положения устойчивого равновесия.

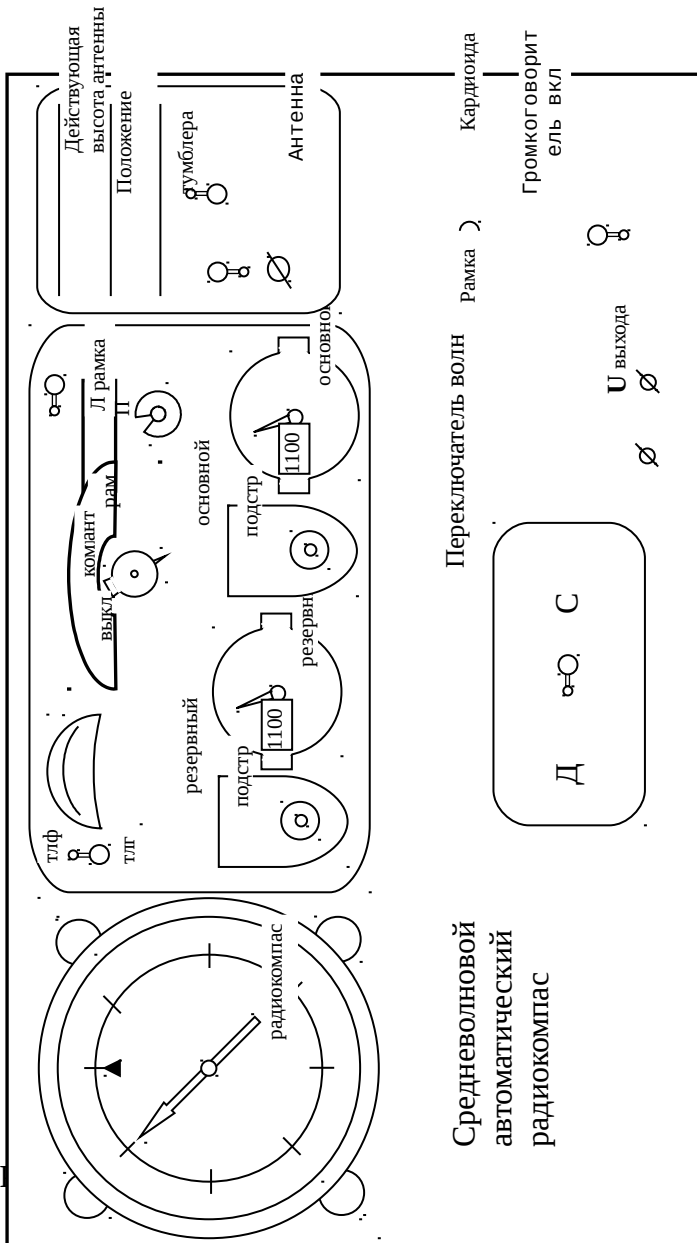
Таким образом, рассмотренная система обеспечивает однозначность отсчета пеленга, так как обладает лишь одним устойчивым положением равновесия, соответствующим истинному пеленгу.

Угол поворота рамки относительно продольной оси самолета (курсовой угол радиостанции) с помощью сельсинной передачи отображается на стрелочном индикаторе.

На рис. 5.4 приведена передняя панель лабораторной установки. В центре расположена лицевая панель приемника, на которой размещаются переключатели и ручки подстройки частоты двух идентичных трактов приемника: основного и резервного.

Диапазон рабочих частот радиокompаса от 150 до 1300 кГц разбит на 4 поддиапазона: 150-300 кГц, 300-600 кГц, 600-900 кГц, 900-1300 кГц, в каждом из которых можно провести точную подстройку частоты ручкой ПОДСТРОЙКА.

На передней панели приёмника также расположен тумблер вида сообщения (ТЛФ – ТЛГ), регулятор громкости телефонного выхода, индикатор настройки и переключатель режимов.



Средневолновой автоматический радиокompас

[12]

Переключателем ВЫКЛ – КОМПАС – АНТЕННА – РАМКА в радиокompасе устанавливаются следующие режимы:

1. Режим автоматической пеленгации – КОМПАС

Это основной режим радиокompаса. К контуру сложения подключаются обе антенны, формируя диаграмму направленности типа «кардиоида». Для пеленгации используется метод равносигнального напряжения (сравнения).

При настройке на частоту пеленгуемой радиостанции радиокompас автоматически определяет курсовой угол на эту радиостанцию.

2. Режим работы АНТЕННА

В этом режиме рамочный вход отключается от приёмника и радиокompас может использоваться как обычный средневолновый радиоприёмник с высокой чувствительностью. Этот режим используется для точной настройки радиокompаса на частоту источника радиоволн.

3. Режим пеленгации РАМКА

В этом режиме при установке переключателя РАМКА – КАРДИОИДА в положение РАМКА ненаправленная антенна отключается от контура сложения. При настройке на частоту пеленгации радиостанции путём поворота рамки с помощью переключателя Л – РАМКА – П (влево–рамка–вправо) определяется направление, соответствующее минимальному (или максимальному) приему. Уровень приёма может определяться величиной сигнала на индикаторе настройки радиокompаса, по показаниям вольтметра или прослушиванием сигнала станции через громкоговоритель. Стрелка указателя курса показывает курсовой угол на пеленгуемую радиостанцию. При установке переключателя РАМКА – КАРДИОИДА в положение КАРДИОИДА штыревая антенна подключается к контуру сложения.

В результате вторичного излучения при отражении радиоволн от частей самолёта, на котором установлен

радиокомпас, диаграмма направленности приёмной антенной системы искажается. Это явление называется радиодевиейцией.

Ошибка пеленга из-за радиодевиейции может достигать 15-20⁰. Компенсатором радиодевиейции вносят поправку в показания стрелочного указателя на основании графика радиодевиейции, снимаемого индивидуально для каждого летательного аппарата. После компенсации радиодевиейции, среднеквадратическая ошибка определения пеленга автоматического радиокомпаса составляет обычно 1,5-2⁰. Дальность действия АРК при работе с аэродромной радиостанцией составляет примерно 150-350 км.

В лабораторной установке сигнал с компасного выхода подается на клеммы U ВЫХОДА на передней панели. К ним подключается вольтметр АВО – 5М.

Рамочная антенна подключается к радиокомпасу с помощью коаксиальных разъёмов, а штыревая антенна – к клемме АНТЕННА, расположенной на передней панели. Здесь же расположены два тумблера, позволяющие изменять действующую высоту штыревой антенны.

Генератор ГЗ–4 используется в режиме амплитудной модуляции (1000 Гц) и позволяет устанавливать уровень сигнала, подаваемого на пеленгуемой антенне в пределах от 0 до 1 В.

Генератор шума Г2–1 подключен к проволочной антенне, размещенной в лаборатории. Пределы регулировки его выходного напряжения 0-1 В.

Вольтметр АВО–5М используется в режиме измерения переменного напряжения 0–30 В.

Для приведения лабораторной установки в состояние, необходимое для проведения исследований, надо сделать следующее: включить АРК–9 и генератор ГЗ–4; установить в генераторе ГЗ–4 частоту и уровень выходного сигнала, равные соответственно 1,1 МГц и 1 В; установить в АРК режим РАМКА, а переключатель РАМКА–КАРДИОИДА перевести в положение «кардиоида»; вращая рамку и изменяя

действующую высоту штыревой антенны, добиться, чтобы минимальное значение диаграммы направленности систем антенн было близким к нулю.

Точное угловое положение пеленгуемой антенны определяется в режиме КОМПАС по показаниям указателя курса. Для измерения среднеквадратической ошибки в режиме КОМПАС необходимо понизить уровень сигнала в пеленгуемой антенне до значений, при которых становятся заметными флюктуационные колебания рамки. Для формирования внешней флюктуационной помехи используется генератор шума Г2–1.

5.3. Домашнее задание и указания по его выполнению

1. Нарисовать структурные схемы амплитудных измерителей угловых координат по методам максимума, минимума, сравнения и изобразить (качественно) их пеленгационные характеристики.

2. Рассчитать и построить в полярной системе координат диаграммы направленности рамочной антенны и системы антенн: рамочной и штыревой.

3. Пунктирной линией на том же чертеже изобразить диаграмму направленности системы антенн при условии, что фаза выходного сигнала рамочной антенны изменилась на противоположную. Нанести линию, соответствующую равносигнальному направлению.

4. Нарисовать структурную схему радиокompаса АРК-9.

5. Изобразить временные диаграммы напряжений на выходе контура сложения, на входе и выходе фазового детектора радиокompаса, начиная с момента его включения и до момента пеленгации при условии, что пеленгуемый объект в начальный момент находился на направлении,

отличающемся от равносигнального на угол $\alpha = \alpha^*$ (значение угла α^* взять из таблицы).

Таблица 5.1

Значение α^* для различных вариантов

Вариант	1	2	3	4	5	6	7
α^* , град	10	160	-80	95	70	-110	120

6. Построить зависимость среднеквадратической ошибки измерения угла в радиокompасе при автоматическом режиме от отношения сигнал-шум на выходе приёмника. Значения отношения сигнал-шум взять из интервала 3-10.

7. Составить программу экспериментальных исследований пеленгации радиоизлучения для выполнения п. 3 лабораторного задания. В программе должны содержаться инструкции о последовательности переключения органов управления лабораторной установки и порядке измерений необходимых величин.

Для выполнения п. 1 домашнего задания следует изучить амплитудные методы пеленгации, принципы работы измерителей угловых координат [3, 145–149, 155], [7, с. 275, 279–285].

П. 2–5 можно выполнить, изучив описание лабораторной установки и принцип действия автоматического радиокompаса [7, с. 279–283].

При выполнении п. 6 необходимо иметь в виду следующее. Среднеквадратическая флюктуационная ошибка σ_α при измерении угла α зависит от эффективного значения шума $\sigma_{ш}$ на выходе углового дискриминатора (фазового детектора) и крутизны пеленгационной характеристики S в окрестности точки $\alpha=0$ и равна $\sigma_{\alpha=0} = \sigma_{ш}/S$. Так как пеленгационная характеристика $U_{фд} = U_{вых} \cdot \sin(\alpha)$, то

$$S = dU_{фд} / d\alpha \Big|_{\alpha=0} = U_{вых} \text{ и, тогда } \sigma_\alpha = 1/h,$$

где $h = U_{\text{вых}} / \sigma_{\text{ш}}$ – выходное отношение сигнал/шум (см. [3], с. 164 и п. 5.2 настоящих методических указаний).

Для составления программы экспериментальных исследований необходимо изучить принцип работы радиокompаса АРК–9, назначение органов управления на его передней панели, порядок включения радиокompаса АРК–9, генератора шума Г2–1 и генератора стандартных сигналов ГЗ–4.

Определение среднеквадратической ошибки измерений производится по известной из математической статистики формуле

$$\sigma_{\alpha} = \left[\sum_{i=1}^n \Delta\alpha_i^2 / (n - 1) \right]^{1/2}, \quad (5.12)$$

где n – число измерений ($n \gg 1$), $\Delta\alpha_i = \alpha_0 - \alpha_i$ – ошибка i – го измерения параметра, α_i – значение параметра при i –ом измерении, α_0 – истинное значение параметра (полученное при большом отношении сигнал/шум).

Уточнение программы (в случае необходимости) производится в лаборатории в часы консультаций по курсу РТС.

5.4. Лабораторное задание

1. Ознакомиться с авиационным радиокompасом, его антенной системой и приборами, входящими в состав лабораторной установки.

Обратить внимание на геометрическую длину штыревой антенны, конструкцию рамочной антенны.

2. Подготовить лабораторную установку к работе.

3. Провести экспериментальные исследования пеленгации радиоизлучения.

Исследования должны включать:

– определение точного углового положения пеленгуемой антенны; снятие диаграмм направленности рамочной антенны и системы антенн – рамочной и штыревой;

– определение ошибок пеленгации по измеренным диаграммам направленности (по методам минимума и максимума);

– измерение среднеквадратической ошибки измерения угла в режиме «КОМПАС» при нескольких значениях дисперсии помехи.

Подготовка лабораторной установки к работе осуществляется в соответствии с инструкциями, приведёнными в п. 5.2.

Экспериментальные исследования проводятся по программе, разработанной в домашнем задании.

Отчёт о проделанной работе должен содержать:

1. Выполненное домашнее задание.
2. Результаты экспериментальных исследований и их сопоставление с расчётными данными.
3. Рисунки, поясняющие выполнение домашнего задания и экспериментальных исследований.
4. Краткие выводы по всем этапам исследований.

5.5. Контрольные вопросы

1. Что такое пеленгация? На каких свойствах распространения радиоволн она основана?

2. Что такое пеленгационная характеристика?

3. Какие методы пеленгации используются в радиолокации и радионавигации? Чем они отличаются?

4. На чём основаны амплитудные методы пеленгации? Какой вид имеют пеленгационные характеристики при амплитудных методах?

5. Какой из амплитудных методов пеленгации позволяет получить наибольшую точность измерения угла? От чего зависит точность измерения угловых координат?

6. Какой вид имеет структурная схема измерителя угловых координат равносигнального типа?

7. Как получить диаграмму направленности типа кардиоида?

8. Какие методы пеленгации можно реализовать при использовании рамочной антенны и системы рамочной и штыревой антенн?

9. Каким образом формируется равносигнальное направление в автоматическом радиокompасе АРК–9? Для чего в нём используется коммутация диаграммы направленности?

10. За счёт чего в радиокompасе АРК–9 обеспечивается однозначность при измерении угла?

11. Какой вид имеет структурная схема радиокompаса АРК–9?

12. Для каких целей используется контур сложения?

13. Для чего в радиокompасе применяется балансный модулятор? Для чего в радиокompасе используется фазовый детектор?

15. Какой вид имеют временные диаграммы напряжений на входе фазового детектора и на его выходе, начиная с момента включения радиокompаса до момента «пеленгации», при условии, что пеленгуемый объект в начальный момент находится справа от равносигнального направления? Изменяются ли эти диаграммы, если объект будет находиться слева от равносигнального направления?

16. Какой вид будут иметь временные диаграммы напряжений на входах и выходе контура сложения, начиная с момента включения радиокompаса и до момента «пеленгации», если пеленгуемый объект в начальный момент находился на направлении противоположном равносигнальному направлению?

17. Какой вид будут иметь временные диаграммы напряжений на входе и выходе приемника, начиная с момента включения радиокompаса и до момента «пеленгации», если пеленгуемый объект в начальный момент находился справа от

равносигнального направления? Изменяются ли эти диаграммы, если объект будет находиться слева от равносигнального направления?

18. Чем можно объяснить отличие от идеальных диаграмм направленности диаграммы направленности рамочной антенны и системы антенн рамочной и штыревой, измеренные экспериментально?

19. Что такое радиодевиация? Как ее можно компенсировать?

20. Как экспериментально определяются ошибки измерения угла азимута объекта?

21. Как влияют на точность пеленгации уровни полезного сигнала и помех на входе приемника? Как можно определить дисперсию оценки угловых координат экспериментальным путем?

6. Исследование радиолокационной станции и индикатора кругового обзора РБП-3

6.1. Общие указания по выполнению работы

Целью настоящей работы является [12]:

1. Изучение принципов измерения координат целей радиолокационной станции (РЛС) с индикатором кругового обзора (ИКО).

2. Ознакомление с основными параметрами и характеристиками РЛС кругового обзора.

3. Изучение принципов управления РЛС и имитации целей с заданными дальностью и углом азимута.

4. Освоение методики экспериментального определения параметров и характеристик РЛС.

При выполнении домашнего задания студенты знакомятся с методами определения координат целей, структурными схемами РЛС и индикатором кругового обзора,

рассчитывают параметры зондирующих сигналов, ошибки при измерении дальности, длину волны волновода, изучают конструкции самолётных радиолокационных антенн.

При выполнении лабораторного задания студенты изучают конструкцию блоков РЛС и способы их экранирования, экспериментально определяют азимут и расстояние до цели, разрешающую способность РЛС, осуществляют проверку работоспособности трёхтонового усилителя.

При выполнении экспериментальных исследований в работе используется лабораторная установка, которая состоит из самолётной РЛС РБП-3 (включающей в себя индикатор кругового обзора) и блока моделирования искусственных целей.

При выполнении исследований на лабораторной установке необходимо иметь в виду следующие замечания по технике безопасности.

Радиолокационная станция типа РБП-3 питается электроэнергией от однофазного мотор-альтернатора переменного тока 115 В 400 Гц и выпрямителя постоянного тока 27 В, подключаемого к осветительной сети переменного тока 220 В.

При работе РЛС вращается антенная система, а в блоках передатчика и индикатора вырабатывается высокое напряжение опасное для жизни, поэтому студентам, выполняющим данную лабораторную работу, запрещается:

1. Включать станцию без разрешения преподавателя.
2. Вскрывать блоки станции.
3. Отсоединять соединительные кабели.
4. Находиться вблизи вращающихся частей антенной системы.
5. Переводить станцию в режим секторного обзора.

6.2. Описание индикатора кругового обзора РЛС РБП-3 и блока имитатора целей

Индикаторы кругового обзора, используемые в радиолокационных станциях с круговым обзором по азимуту, предназначены для отображения на экране в полярной системе координат отметок всех целей в пределах дальности действия станции. Они являются выходными устройствами РЛС обнаружения и целеуказания, а также панорамных РЛС, предназначенных для снятия радиолокационных карт местности.

С помощью ИКО можно измерить дальности до целей, углы азимута и разрешающую способность по дальности. Для осуществления измерения дальности производится развертка по дальности от центра трубки к периферии по радиусу, а для измерения угла азимута радиус (развертка по дальности) вращается по окружности синхронно с вращением приемно-передающей антенны РЛС. Отсчет дальности R производится от центра экрана трубки до отметки цели (см. рис. 6.1), представляющей собой отрезок дуги, путем измерения этого расстояния по механической шкале (с помощью линейки). Причем $R(\text{км}) = R(\text{мм}) \cdot M(\text{км/мм})$, где M – масштаб дальности.

Для линейной развёртки $M = R_{\text{max}} / (D/2)$, где R_{max} – максимальная дальность обнаружения в километрах, $D/2$ – длина радиуса (луча) развертки в миллиметрах. Разным значениям R_{max} соответствует свой масштаб.

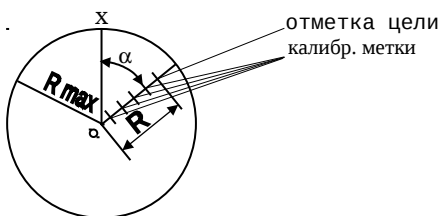


Рис. 6.1. Определение местоположения цели по индикатору кругового обзора [12]

Для измерения масштаба в ИКО используется специальная регулировка. Для того, чтобы результат отсчета дальности был правильным, необходимо обеспечить совпадение моментов излучения сигнала передающей антенной РЛС с началом развертки по дальности.

В этом состоит синхронизация по дальности. Для этой цели в РЛС используется последовательность синхроимпульсов, которая запускает модулятор передатчика и работу канала развертки по дальности ИКО. Отсчет угла азимута α производится от условного направления ОК в горизонтальном направлении до отметки цели. Обычно за условное принимают направление на Север для наземных РЛС и линию направления курса – для самолетных РЛС.

Для удобства отсчета дальности R и угла азимута α развертки по дальности и углу азимута калибруются. В исследуемом ИКО развертка по дальности калибруется с помощью электронных меток или электронного визира. Калибрационные метки на экране ИКО (см. рис. 6.1) высвечиваются нажатием кнопки «Ярк.метки». Интервал между метками составляет 10 км. При измерении расстояния до близко расположенных целей ($R < 20$ км) в РЛС предусмотрена возможность включения двухкилометровых меток (включается с разрешения преподавателя). Более точный отсчет дальности в РЛС можно осуществить с помощью электронного визира. Процесс измерения дальности при этом методе заключается в совмещении метки визира с отметкой цели. Изменение положения метки и отсчет дальности производится с помощью лимба и шкалы дальности визира, соответственно. Развертки по азимуту калибруются с помощью механической шкалы с нанесенными на нее метками через 1° . Для измерения угла азимута используется метод максимума, то есть отсчет угла производится при совпадении линии визирования РЛС – цель с максимумом диаграммы направленности антенны РЛС. При этом центр принятого импульсного сигнала соответствует середине дужки на экране

индикатора. Этот метод дает возможность наиболее полно использовать мощность передатчика и КНД антенн, хотя точность измерения угла методом максимума примерно на порядок меньше, чем методом сравнения. Для РЛС дальнего обнаружения и целеуказания точность измерения угла азимута играет второстепенную роль по сравнению с использованием мощности передатчика и КНД передающей антенны, поэтому в таких системах используется метод максимума.

Таким образом, структурная схема любого ИКО должна содержать каналы разверток по дальности и углу азимута, синхронизируемые импульсами с передатчика и сигналами с вращающейся антенны, видеоусилитель принимаемых сигналов и ряд вспомогательных каскадов. Функциональная схема индикаторного устройства РЛС РБП-3 дана на рис. 6.2.

Положительный синхроимпульс из блока дальности поступает на вход развязывающего каскада, который позволяет исключить взаимное влияние канала формирования импульса запуска развертки, расположенного в блоке дальности, и канала формирования развертки. С выхода развязывающего каскада импульсы поступают на вход ждущего мультивибратора.

Вырабатываемые им прямоугольные импульсы усиливаются и используются для запуска генератора развертки, а после усиления подаются на вход катодного повторителя, нагрузкой которого является ротор импульсного вращающегося трансформатора (ИВТ).

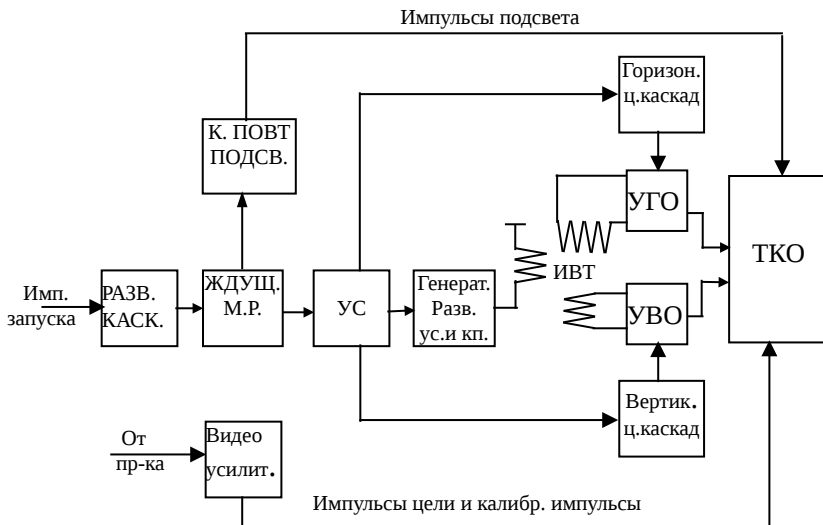


Рис. 6.2. Функциональная схема индикатора кругового обзора РЛС РБП-3 [12]

ИВТ представляет собой электромеханическую систему, состоящую из ротора с обмоткой и статора с двумя взаимно перпендикулярными обмотками, как показано на рис. 6.3. Обмотка ротора служит первичной обмоткой трансформатора, а обмотка статора вторичной. Ротор механически связан с антенной и вращается синхронно с ней. На ротор ИВТ подается напряжение развертки. Это напряжение индуцируется в статорные обмотки с амплитудой, зависящей от коэффициента связи между ротором и статором, то есть от угла поворота ротора по отношению к статору. При вращении ротора коэффициент связи меняется от нуля до максимума по синус-косинусному закону.

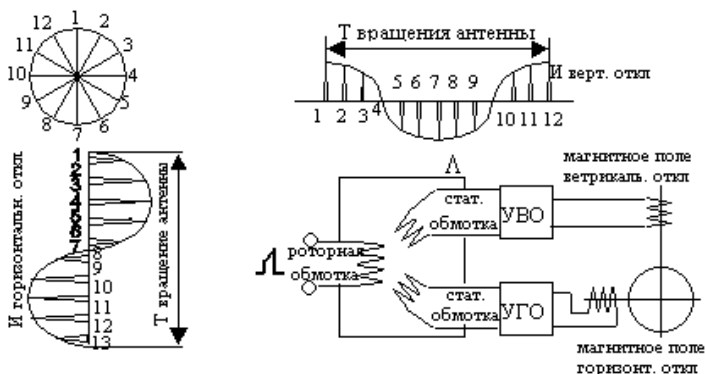


Рис. 6.3. Принцип синхронизации угла развертки луча индикатора кругового обзора с углом поворота антенны [12]

В связи с этим амплитуда выходного напряжения будет меняться по закону синуса на одной обмотке статора и по закону косинуса – на другой. Импульсы со статорных обмоток ИВТ поступают на усилитель вертикального отклонения луча (УВО) и усилитель горизонтального отклонения луча (УГО). Анодной нагрузкой оконечных усилителей служит отклоняющая система трубки.

Схемы стабилизации начала развертки (центрирующие каскады) служат для обеспечения движения светового пятна из одной и той же точки экрана.

Для подсвета прямого хода развёртки служат импульсы, снимаемые с выхода катодного повторителя подсвета. При подаче импульса подсвета на управляющую сетку трубки кругового обзора (ТКО) через разделительный конденсатор импульс теряет постоянную составляющую. Для её восстановления используется восстановитель постоянных составляющих.

Лабораторная установка, как уже отмечалось, представляет собой действующую РЛС типа РБП–3, которая работает совместно с блоком моделирования искусственных целей, дальности до которых можно менять вручную. РЛС

предназначена для прицельного бомбометания с самолетов по наземным и надводным целям, а также для навигации по наземным или импульсным радиомаякам при полете в условиях отсутствия визуальной видимости земли. Станция дает возможность получать на экране ИКО изображение местности и имеет следующие технические данные:

1. Максимальная дальность обнаружения целей – 100 км;
2. Рабочая длина волны – 3 см (9370 МГц);
3. Мощность передатчика в импульсе – 64 кВт;
4. Длительность импульса 0,3; 0,45; 1,0; 1,7 мкс; частота повторения: 1875; 1250; 625; 340 Гц;
5. Ширина диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости составляет $3,5^\circ$. В вертикальной плоскости антенна имеет широкий луч (типа cosec шириной 60°) для обеспечения равномерного облучения местности под самолетом;
6. Скорость вращения антенны – 12 об/мин («медленно») или 24 об/мин («быстро»);
7. Потребляемая мощность от бортовой сети 27 Вт-2,8 кВт;
8. Полный вес станции без кабелей – 150 кг.

В состав РЛС типа РБП-3 входят следующие основные блоки (см. рис 2.2.4):

- блок дальности (блок 4 ДМ);
- блок передатчика (блок 11 ДМ);
- антенное устройство;
- приёмное устройство (блок 2 ДМ);
- блок разверток (блок 1 ДМ);
- блок индикатора (блок 7 Д).

Блоки 1 ДМ и 7Д входят в состав ИКО.

В блоке дальности задающим блокинг-генератором, стабилизированным кварцем, вырабатываются импульсы с частотой 75 кГц.

Эти импульсы, пройдя последовательно через ряд делителей частоты и достигнув частоты 3750 Гц, попадают на генератор управляющих импульсов. В нём в зависимости от

режима работы («11 км ОПБ», «Боковая наводка», «Поиск 11-50 км», «Поиск 120 и 170 км», «Маяк»), происходит деление частоты в одном из следующих отношений 1:2, 1:3, 1:6, 1:11 (получаются частоты: 1875 Гц, 1250 Гц, 625 Гц, 340 Гц).

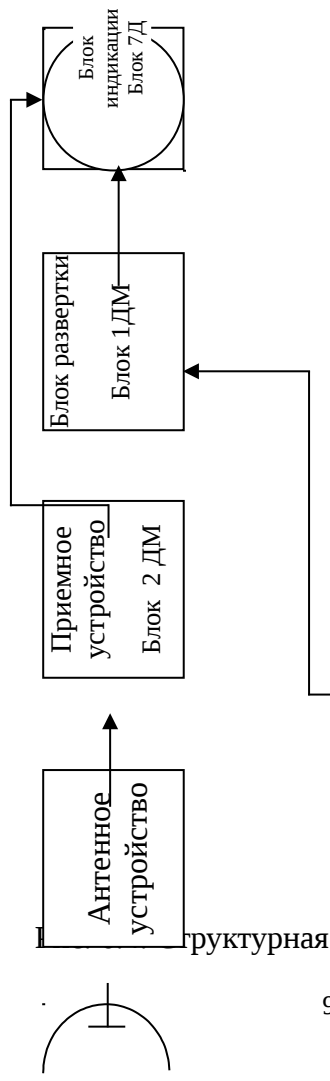
С генератора управляющих импульсов через развязывающие каскады импульсы поступают на цепи задержки импульса запуска передатчика, где задерживаются по отношению к управляющим на 20 км.

Такая задержка необходима для возможности осуществления операции «открытия» и «закрытия» центра.

Задержанный на 20 км импульс через согласующий каскад подводится из блока дальности к передатчику.

Входным устройством передатчика является подмодулятор. Он запускается импульсами из блока дальности и служит для формирования импульсов требуемой длительности и амплитуды, необходимых для нормальной работы модулятора при различных масштабах. Длительности импульсов определяются формирующими цепочками.

Генерируемые магнетроном импульсы высокочастотных колебаний поступают через волноводный переключатель магнетронов в антенный переключатель «Передача – Приём», состоящий из газовых разрядников блокировки магнетрона (РБМ) и защиты приёмника (РЗП), и далее в антенну.



структурная

Во время прохождения высокочастотной энергии передатчика через антенный коммутатор в разрядниках происходит пробой пространства между электродами, чем обеспечивается беспрепятственное прохождение энергии магнетронов в систему волноводов и далее в антенну.

Одновременно пробой разрядников РЗП обеспечивает защиту смесительного детектора приёмника от выхода из строя.

Антенна излучает высокочастотную энергию в виде пучка с раствором в вертикальной плоскости 60° (формы cosec) и в горизонтальной – $3,5^{\circ}$.

Сигналы, отраженные от цели, принимаются антенной и через волноводный тракт поступают в антенный переключатель.

Приём отраженных сигналов происходит в отсутствие импульсов передатчика, то есть в то время, когда нет пробоя в разрядниках.

Разрядник РБМ исключает ответвление энергии в сторону магнетрона, а один из разрядников РЗП, настроенный на частоту работающего магнетрона, обеспечивает прямое прохождение сигнала в камеру кристаллического смесителя ВЧ приёмной головки. В эту же камеру поступают колебания гетеродина-клистрона.

Полученная на выходе смесителя промежуточная частота (60 МГц) поступает на предварительный усилитель промежуточной частоты (ПУПЧ) сигнала. С ПУПЧ через коаксиальный кабель усиленные сигналы промежуточной частоты подводятся к основному усилителю промежуточной частоты (ОУПЧ) приёмника. ОУПЧ состоит из шести каскадов усиления и имеет нелинейную характеристику (приближающуюся к логарифмической), что обеспечивает возможность пропускания широкого диапазона интенсивности входных сигналов без применения ручной регулировки усиления тракта.

С выхода ОУПЧ усиленный сигнал промежуточной частоты (60 МГц) поступает на видеодетектор, на нагрузку

которого выделяются видеоимпульсы целей, которые затем подаются на вход трёхтонового видеоусилителя. Преимущества трёхтонового усилителя видны из следующего: при поступлении на вход обычного видеоусилителя, имеющего линейную амплитудную характеристику, сигналов различной интенсивности (например, слабых сигналов, отраженных от поверхности земли, и сигналов, отраженных от целей) и при подборе усиления каскадов видеоусилителя таким, что наиболее интенсивные сигналы от целей имеют максимально допустимую яркость на экране ИКО, то слабые сигналы видны не будут. При установке большого коэффициента усиления слабые сигналы будут значительно усилены, однако, контрастность изображения на экране ИКО будет мала, так как амплитуда сигналов, отраженных от земли, становится соизмеримой с амплитудой сигналов, отраженных от целей.

Трёхтоновый видеоусилитель по различному усиливает сигналы различной интенсивности, поэтому возможно получение на экране ТКО изображения с чётким разделением по яркости:

1. Весьма слабые сигналы – тёмные тона (водная поверхность);
2. Слабые сигналы – серые тона (поверхность земли);
3. Сильные сигналы – светлые тона (цели).

В этом случае на экране будут хорошо различимы как сигналы от целей, так и сигналы от земной и водной поверхности.

Работа трёхтонового усилителя поясняется на рис. 6.5.

Радиально-круговая развёртка на экране трубки индикатора создается системой индикации, включающей в себя блок развёрток и трубку кругового обзора. Как было сказано выше, управляющие импульсы в блоке дальности поступают на цепи задержки импульса передатчика, где задерживаются по отношению к управляющим на 20 км. Таким образом, импульс запуска передатчика РЛС имеет

фиксированную задержку относительно управляющего импульса на 20 км. Одновременно управляющие импульсы в блоке дальности поступают на цепи задержки импульса запуска развёртки.

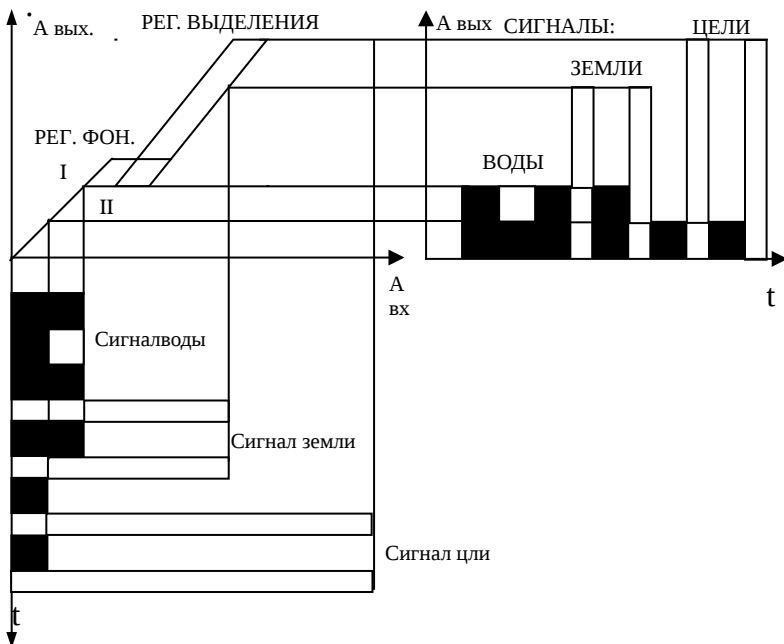


Рис. 6.5. Принцип работы трехтонового усилителя [12]

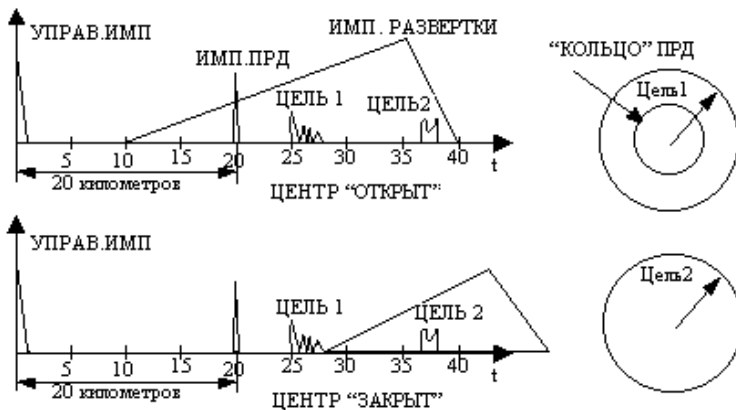


Рис. 6.6. Принцип реализации режимов «Центр закрыт» и «Центр открыт» [12]

Задержка во времени импульсов запуска развёртки (по отношению к управляющим) изменяется либо плавно от 5 км до 60 км в режиме «ПОИСК», либо по ступеням от 20 км до 280 км в режиме «МАЯК».

Плавная задержка импульса запуска развёртки позволяет осуществлять операции «открытия» и «закрытия» центра. При минимальной задержке (5 км) начало развёртки опережает импульс передатчика на 15 км (см. рис. 6.6) и кольцо на трубке кругового обзора, соответствующее импульсу передатчика («кольцо передатчика»), оказывается вынесенным на 15 км от центра к краям экрана, то есть центр «открыт».

«Открытие» центра позволяет подробно рассматривать сигналы целей, близко находящихся к импульсу передатчика, как, например, близкорасположенные воздушные или наземные цели при полёте на малых высотах.

При задержке начала развёртки на 20 км импульс передатчика и начало развёртки совпадают по времени, и на экране ТКО «кольцо передатчика» превращается в точку в центре экрана, то есть центр «закрит». При максимальной задержке (60 км) начало развёртки отстаёт от импульса передатчика на 40 км, поэтому на экране индикатора будут видны цели, находящиеся на дальностях 40 км (у центра экрана) и более удалённые (к периферии от центра экрана). «Закрытие» центра позволяет подробно рассматривать удалённые цели (у периферии экрана) на крупном масштабе, что повышает точность отсчёта дальности и опознавания целей. Ступенчатая задержка импульса запуска развёртки действует при работе станции в режиме «МАЯК» и даёт возможность наблюдать сигнал радиомаяка, находящегося на расстоянии, значительно превышающем масштаб развёртки.

В режимах «Поиск 120 км» и «Поиск 170 км» импульсы запуска развёртки совпадают по времени с импульсами запуска передатчика.

Радиолокационная станция РБП-3 управляется с помощью щитка дистанционного управления (ЩДУ) и оперативного щитка индикаторной трубки кругового обзора.

На щитке дистанционного управления РЛС, который показан на рис. 6.7, расположены следующие органы регулировки и управления:

1. Включение питания станции – «Рег. напряж. 115 В»
«Вкл. сети – 27 В, 115 В»;
2. Переключатель масштаба – «Масштаб, км»;
3. Лимб регулировки плавной задержки развертки – «Плавн. Задержка»;
4. Переключатель режимов «Поиск», «Маяк» и ступенчатой задержки развертки – «Поиск–Маяк, Ступ. задержка и 10 км»;
5. Тумблер включения дифференцирующей цепи приемника – «Норм. –Дифференц.»;
6. Потенциометр ручной подстройки частоты приемника и включение АПЧ – «АПЧ–Наотр. приёмн.»;
7. Тумблер включения передатчика – «Выс. пер-ка»;
8. Тумблер переключения магнетронов – «Лит. I – Лит. I I»
9. Переключатель рода – «Круг – Передн. сектор -

работы механизма вращения «антенны»	Задний сектор – Левый сектор – Правый сектор – Ручн. упр.»;
10. Переключатель скорости вращения антенны	– «Быстро – Выкл. – Медленно»
11. Переключатель направления вращения антенны	– «Лево-Право»;
12. Лимб измерительной метки дальности (электронного визира)	– «Дальность»;
13. Переключатель калибровки блока связи	– «Нулев. дальн. – Калиб. – Работа»;
14. Потенциометр калибровки «10 км 60»	– «10 км 60»;
15. Потенциометр калибровки нулевой дальности	– «Нулев. Дальность»;
16. Переключатель контрольного прибора	– «Наклон антенны –Ток магнет. – Ток детектора сигнала – Ток детектора АПЧ»;
17. Потенциометр и выключатель яркости продольной и калибрационных меток	– «Ярк. Меток»;
18. Тумблер выключения	– «УС АВТ – РУЧН.».

автоматического ввода угла
сноса

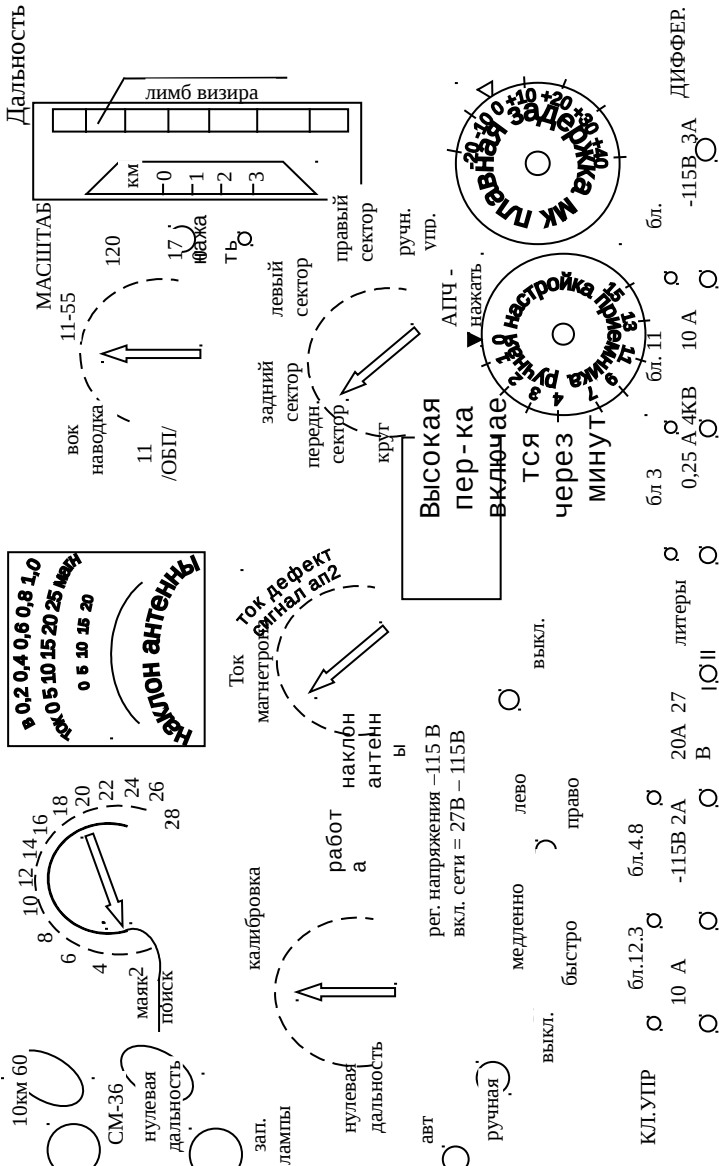


Рис. 6.7. Расположение органов управления на панели ЩДУ РЛС РБП-3 [12]

На оперативном щитке трубки кругового обзора (ТКО) расположены следующие органы регулировки:

1. Потенциометр регулировки яркости – «Яркость»;
2. Потенциометр фокусировки – «Фокус»;
3. Потенциометр ограничения высокого уровня трехтонового усилителя – «Выделение»;
4. Потенциометр ограничения низкого уровня трехтонового усилителя – «Фон»;
5. Потенциометр плавного изменения масштаба 11-15 км – «Растяжка 11-55»;
6. Тумблер управления механизмом наклона антенны – «Вверх – Вниз»;
7. Потенциометр освещения шкалы – «Подсвет»;
8. Ручка поворота указателя азимута – «Указатель азимута».

В лабораторной установке передатчик, а также СВЧ тракт приемника отключены. Формирование отметок целей, а также фона местности производится с помощью блока моделирования искусственных целей, который состоит из цепей азимутальных размеров искусственных целей схемы ступенчатой задержки запускающих импульсов и генератора высокой частоты 60 МГц (равной промежуточной частоте приемника РЛС).

Работа блока моделирования искусственных целей состоит в следующем.

С блока дальности РЛС импульс запуска передатчика подается в блок моделирования искусственных целей на схему ступенчатой задержки, где в зависимости от числа нажатий кнопки «Движение» в режиме «Удаление» или

«Приближение» он задерживается на определенное время, соответствующее удалению моделируемой цели от РЛС. С вывода схемы задержки импульсы поступают на схему запуска генератора высокой частоты. Выработанные генератором высокой частоты радиоимпульсы искусственных целей поступают в тракт УПЧ приемного устройства РЛС, вследствие чего на экране ИКО создаются отметки целей. Формирование искусственных целей и их азимутальных размеров осуществляется с помощью постоянных магнитов, укрепленных на цоколе вращающейся части антенны, и геркона, коммутирующего цепь модуляции ГВЧ. В режиме работы «Геркон» осуществляется формирование отметок целей для нескольких азимутальных положений. В режиме работы «Пост.» отметки целей наблюдаются при любом азимутальном положении антенны.

В блоке моделирования предусмотрен режим «Фон», при этом в нем за период развертки луча в ИКО генерируется сигнал частоты 60 МГц с линейно изменяющейся амплитудой, запускаемый началом развертки. Такой сигнал соответствует некоторому условному рельефу местности с плавно увеличивающейся, с ростом дальности, отражающей способностью радиоволн. В режиме при неподвижной антенне распределение яркости луча ТКО должно соответствовать амплитудной характеристике трехтонового усилителя. При вращении антенны на экране ТКО высвечивается фон местности в виде концентрических полос разной яркости.

6.3. Домашнее задание и указания по его выполнению

1. Изучить принцип измерения координат целей в РЛС кругового обзора.
2. Изобразить структурную схему РЛС кругового обзора типа РПБ-3.

3. Провести расчет параметров зондирующих импульсов (периода повторения T_n и длительности τ_i) для обеспечения следующих характеристик РЛС: дальности обнаружения $R_{\max} = R_{\max}^*$, потенциальной разрешающей способности $\delta R_n = \delta R_n^*$ (значения параметров взять из таблицы).

Таблица 6.1

Значения R_{\max}^* , δR_n^* и α^* для вариантов

Вариант	1	2	3	4	5	6	7
R_{\max}^* , км	11	12	11	12	12,5	14	15
δR_n^* , м	50	100	150	200	170	180	160
α_1^* , град	20	10	40	30	20	10	10
α_2^* , град	80	30	170	40	120	80	80

4. Изобразить качественно на одной временной диаграмме последовательность сигналов, излучаемых РЛС, за время, соответствующее одному обороту антенны, и сигнала, отраженного от цели $0 < R < R_{\max}$, угол азимута произвольный, а время облучения цели равно нескольким периодам зондирующего сигнала T_n . Увеличивая мысленно R до значений $R > R_{\max}$, убедиться, что однозначный отсчет дальности возможен только при $R < R_{\max}$.

5. Изобразить качественно на одной временной диаграмме сигналы на входе приемника, отраженные от двух целей. Расстояния до целей полагать одинаковыми, а их углы азимута – равными α_1^* и α_2^* . На оси времени точками отобразить положения зондирующих сигналов. Рассчитать число импульсов в пачках принимаемых сигналов при значении T_n , рассчитанном в п. 3, при угловой скорости вращения антенны и ширине ее диаграммы направленности соответственно равными 20 об/мин и $3,6^\circ$.

6. Изучить структурную схему индикатора кругового обзора и основные режимы его работы.

7. Нарисовать функциональную схему ИКО.

8. Нарисовать диаграммы, поясняющие назначение и работу трехтонового усилителя.

9. Рассчитать ошибки измерения дальности по механической и двум электронным шкалам (метки, визир), а также разрешающую способность ИКО по дальности при следующих исходных данных: диаметр экрана ИКО $D = 100$ мм; диаметр пятна на экране $d = 0,5$ мм; длительность зондирующего импульса $\tau_{\text{и}} = 0,5$ мкс; расстояние между соседними метками $\Delta l_{\text{м}} = 2$ км; расстояние между соседними делениями шкалы (линейки) $\Delta l_{\text{ш}} = 5$ мм; цена деления шкалы отсчета отсчетного устройства $\Delta R_{\text{ш0}} = 0,1$ км. Значение R_{max} * взять из таблицы.

10. Рассчитать максимальную длину волны используемого в РЛС волновода прямоугольного сечения (размеры его внутреннего сечения равны $a = 24$, $b = 10$ мм).

11. Нарисовать (качественно) эскиз антенны самолетной РЛС, имеющей диаграмму направленности вида cos², и объяснить ее назначение.

12. Составить программу экспериментальных исследований в соответствии с лабораторным заданием. В программе должны быть указаны способы измерения параметров или характеристик ИКО и РЛС и необходимые для их осуществления положения ручек управления на щитке дистанционного управления индикаторной трубки, блока моделирования искусственных целей.

Для успешного выполнения домашнего задания следует изучить импульсный метод измерения дальности, метод максимума при измерении угловых координат цели, принцип работы РЛС кругового обзора (см. п. 6.2. настоящих методических указаний, а также [3], с. 46-47; 126-130; 145-149; 151-154, [7] с. 178-183; 205-207).

При выполнении п.9 необходимо иметь в виду следующее.

Ошибки отсчета дальности в РЛС определяются следующими выражениями:

1. Для механической шкалы $\Delta R_{\text{м}} = 0,15 \cdot \Delta l_{\text{ш}} \cdot M(\text{км})$;

2. При отсчете по электронным меткам $\Delta R_{эл} = 0,05 \cdot \Delta l_m$ (км);

3. При отсчете с помощью электронного визира: $\Delta R_{эм} = \sqrt{\Delta R_n^2 + \Delta R_c^2 + \Delta R_i^2}$, где M – масштаб дальности $M = 2R_{max}/D$ (км/мм); ΔR_n – ошибка за счет нестабильности электронного визира, определяемая как $\Delta R_n = 0,001 R_{max}$; ΔR_c – ошибка совмещения визира с отметкой цели $\Delta R_c = 0,3d \cdot R_{max}/D$; ΔR_i – ошибка интерполяции при отсчете по шкале установки визира $\Delta R_i = 0,3 \Delta R_{ш0}$.

Под разрешением сигналов понимают возможность отдельно обнаружить и измерить параметры сигналов от близкорасположенных целей. Разрешающая способность по дальности δR_n определяется как минимальная разность дальностей двух разрешаемых точечных объектов, расположенных в одном угловом направлении идвигающихся с одинаковыми радиальными скоростями. В РЛС кругового обзора с визуальной индикацией она складывается из потенциальной разрешающей способности δR_n и разрешающей способности индикатора δR_i : $\delta R = \delta R_n + \delta R_i$.

Потенциальная разрешающая способность определяется длительностью импульса τ_i $\delta R_n = 0,5 \cdot \tau_i \cdot c$, где c – скорость света.

Разрешающая способность индикатора определяется диаметром электронного луча d $\delta R_i = d \cdot M$, где M – масштаб дальности.

Таким образом: $\delta R = 0,5 \cdot \tau_i \cdot c + d \cdot M$.

Для составления программы экспериментальных исследований необходимо изучить методику измерения дальности, разрешающей способности и угла азимута в РЛС РБП–3, знать принцип работы трехтонового усилителя, назначение режимов ИКО и блока моделирования искусственных целей, а также изучить назначение и точное место расположения органов управления РЛС и имитатора цели в соответствии с описанием лабораторной установки.

Следует иметь в виду, что при выполнении работы используются следующие органы РЛС: 1, 2, 3, 5, 11, 12, 15, 17-щитка ТКО.

При определении разрешающей способности ИКО и РЛС по дальности в качестве второй цели следует использовать метку электронного визира.

Требуемый масштаб дальности при исследованиях устанавливается с помощью электронного визира и потенциометра плавного изменения масштаба 11 – 55 км, оперативного считка ТКО.

Уточнение программы (в случае необходимости) производится в лаборатории в часы консультаций по курсу РТС.

6.4. Лабораторное задание

1. Ознакомиться с конструкцией щитка дистанционного управления (ЩДУ) и оперативного щитка индикаторной трубки. Уточнить назначение ручек управления.

Определить внешние размеры соединительного волновода и его максимальную длины волны.

2. Ознакомиться с антенной РЛС и сделать заключение о форме ее диаграммы направленности. Нарисовать эскиз антенны РЛС.

3. Ознакомиться с конструкцией блока СВЧ передатчика. Обратить внимание на его компоновку и способ экранирования.

4. Провести экспериментальные исследования.

Исследования должны включать:

4.1. Измерение масштаба дальности M при значении $R_{\max} = R_{\max}^*$, величин d , D , расстояния до цели R , $\Delta l_{\text{ш}}$, $\Delta l_{\text{м}}$, $\Delta R_{\text{ш}0}$, их сопоставления с данными домашних заданий;

4.2. Измерение углов азимутов целей;

4.3. Определение разрешающей способности РЛС по дальности и ее сопоставление с расчетными данными;

4.4. Исследование работоспособности трехтонового усилителя;

4.5. Исследование режимов ЦЕНТР ОТКРЫТ, ЦЕНТР ЗАКРЫТ.

Проведение экспериментальных исследований осуществляется в соответствии с программой, составленной в домашнем задании.

Отчет о проделанной работе должен содержать:

1. Результаты выполнения домашних заданий.
2. Результаты экспериментальных исследований и их сопоставление с расчетными данными.
3. Описание возможных режимов ИКО при измерении дальности и работе трехтонового усилителя; необходимые рисунки.
4. Краткие выводы по всем этапам исследований.

6.5. Контрольные вопросы

1. Что такое радиолокация? На каких свойствах распространения радиоволн она основана?

2. Укажите основные характеристики радиолокационной станции кругового обзора РБП–3.

3. Какие методы измерения дальности Вы знаете? На чем основан принцип измерения дальности, используемый в данной радиолокационной станции?

4. Как измеряется угол азимута в исследуемой РЛС?

5. Какие основные блоки включает в себя РЛС РБП–3?

6. Какие устройства входят в состав блока индикатора кругового обзора?

7. Чем определяется точность измерения дальности в исследуемой радиолокационной станции?

8. Какими параметрами зондирующего сигнала определяется максимальная дальность обнаружения РЛС РБП–3?

9. Каким параметром зондирующего сигнала в исследуемой радиолокационной станции определяется потенциальная разрешающая способность по дальности?

10. От чего зависит разрешающая способность по дальности при измерении ее с помощью ИКО?

11. Чем определяется точность измерения угла азимута при использовании амплитудного метода максимума? Почему этот метод менее точный чем метод сравнения?

12. Какие способы отсчета дальности можно использовать в данной РЛС?

13. Каково назначение и особенности трехтонового усилителя? Как осуществить проверку его работоспособности?

14. В чем состоят назначение и принцип работы импульсного вращающегося трансформатора?

15. Для чего используется в данной лабораторной установке блок моделирования искусственных целей?

16. В чем состоит назначение режимов индикатора кругового обзора «Центр открыт», «Центр закрыт»?

17. Какова максимальная рабочая длина волны волноводов?

18. Как выглядит антенна радиолокационной станции РБП-3, какова форма ее диаграммы направленности?

19. Для каких целей используются антенны с диаграммой направленности типа cosec (cosec^2)?

20. Как в исследуемой РЛС осуществляется развязка между приемным и передающим трактами?

7. Исследование приемника с согласованным фильтром РЛС обнаружения ЛЧМ сигналов

7.1. Общие указания по выполнению лабораторной работы

Целью настоящей работы является [13]:

1. Ознакомление со свойствами сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ).

2. Ознакомление с принципом работы устройств формирования и оптимального обнаружения ЛЧМ сигнала.

3. Освоение методики экспериментального измерения параметров и характеристик ЛЧМ сигнала и оптимального приемника обнаружения.

При выполнении домашнего задания студенты знакомятся с функциональной схемой лабораторной установки, назначением органов управления на ее передней панели, принципами формирования и оптимальной обработки ЛЧМ сигнала и его свойствами, рассчитывают основные параметры ЛЧМ сигнала и рабочие характеристики приемника обнаружения.

При выполнении лабораторного задания студенты уточняют положение и название органов управления на передней панели лабораторной установки, знакомятся с конструкцией согласованного фильтра для ЛЧМ сигнала, экспериментально определяют базу сигнала различными способами, влияние на форму отфильтрованного сигнала отклонения частоты несущей от номинала, экспериментально снимают рабочие характеристики приемника и дисперсионной линии задержки.

При выполнении экспериментальных исследований в работе используются лабораторная установка, содержащая устройство формирования и приемник обнаружения ЛЧМ сигнала, генератор шума Г2–1, генератор стандартных сигналов Г3–4, два счетчика импульсов ЧЗ–20 и осциллограф С1–67.

7.2. Краткие сведения о сигналах с ЛЧМ

Для обеспечения наибольшей дальности действия радиолокации необходимо применять согласованную фильтрацию. Выходной сигнал при этом воспроизводит автокорреляционную функцию входного сигнала. Чтобы

получить высокую разрешающую способность по дальности, необходимо иметь эту функцию в виде кратковременного импульса. Для этого спектр излучения импульсов должен быть достаточно широким.

Расширение спектра сигнала достигается как укорочением длительности излучаемых импульсов (что нецелесообразно), так и их угловой (частотной или фазовой) модуляцией по некоторому закону.

Для получения большей дальности действия излучаемые импульсы должны иметь большую длительность. Следовательно, для одновременного обеспечения высоких разрешающей способности и дальности действия, сигналы должны иметь достаточно большое произведение ширины спектра на длительность. Такие сигналы принято называть сложными.

К сложным относятся сигналы с линейной частотной модуляцией. Сигналы с ЛЧМ широко используются в радиолокации. Рассмотрим их свойства.

Если длительность сигнала T , а его девиация $\frac{\Delta\omega}{2} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta f}{2}$, то мгновенная частота при ЛЧМ равна (рис. 7.1 а):

$$\omega(t) = \omega_0 - \frac{\Delta\omega}{T} \cdot t, \quad |t| \leq \frac{T}{2}, \quad (7.1)$$

фаза $\varphi(t)$ меняется по квадратичному закону

$$\varphi(t) = \int \omega(t) dt = \omega_0 \cdot t - \frac{\Delta\omega}{2 \cdot T} \cdot t^2 + \varphi_0, \quad (7.2)$$

где φ_0 – постоянная интегрирования. Если $\varphi(t) = 0$ при $t = 0$, то и $\varphi_0 = 0$. При этом ЛЧМ сигнал имеет следующий вид (рис. 2.3.1 б):

$$u(t) = A \cdot \cos\left(\omega_0 t - \frac{\Delta\omega}{2 \cdot T} \cdot t^2\right), \quad |t| \leq \frac{T}{2}, \quad (7.3)$$

или

$$u(t) = \text{Re } A \exp\left[j \cdot (\omega_0 t - \frac{\Delta \omega \cdot t^2}{2 \cdot T})\right], \quad (7.4)$$

где $\dot{A}(t) = A \cdot \exp\left[-\frac{j \omega \cdot t^2}{2 \cdot T}\right]$ – комплексная амплитуда.

Модуль спектра огибающей ЛЧМ сигнала равен

$$|\dot{G}(\omega)| = \frac{A \cdot T}{\sqrt{2 \cdot D}} \cdot \sqrt{[c(y_1) + c(y_2)]^2 + [s(y_1) + s(y_2)]^2}. \quad (7.5)$$

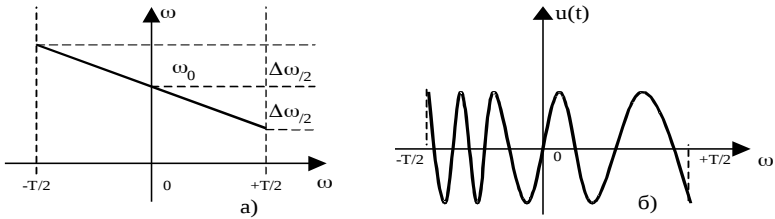


Рис. 7.1. Закон изменения частоты и временная функция ЛЧМ сигнала [13]

Фазовая характеристика имеет вид

$$\varphi(\omega) = \pi \cdot D \cdot \left(\frac{\omega}{\Delta \omega}\right)^2 - \arctg \frac{s(y_1) + s(y_2)}{c(y_1) + c(y_2)} = \pi \cdot D \left(\frac{\omega}{\Delta \omega}\right)^2 - \theta_0, \quad (7.6)$$

где $s(x)$ и $c(x)$ – синус и косинус – интегралы Френеля, D – коэффициент сжатия ЛЧМ сигнала, равный половине его базы $B = 2 \cdot \Delta f \cdot T$.

Амплитудный и фазовый спектры ЛЧМ сигнала смещены относительно спектра огибающей и ее фазовой характеристики на величину несущей ω_0 .

Амплитудно-частотные спектры ЛЧМ сигнала при различных значениях D представлены на (рис. 7.2 а). Как видно, при больших D ширина спектра близка к $\Delta \omega$.

Фазо-частотная характеристика (7.6) содержит квадратичный член и слагаемое, которое практически не зависит от частоты, особенно при больших D (рис. 7.2 б).

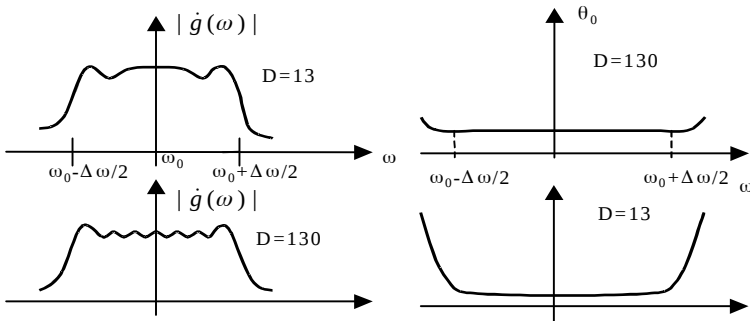


Рис. 7.2. Энергетический и фазовый спектры ЛЧМ сигналов с различной базой [13]

Для практических целей используются ЛЧМ сигналы с большой базой. Амплитудно-частотная характеристика фильтра $k(\omega)$, согласованного с ЛЧМ сигналом, при больших базах сигнала прямоугольная:

$$k(\omega) = \begin{cases} c = \text{const}, & |\omega - \omega_0| < \frac{\Delta\omega}{2}, \\ 0, & |\omega - \omega_0| > \frac{\Delta\omega}{2}. \end{cases} \quad (7.7)$$

Фазо-частотная характеристика этого фильтра $\beta(\omega)$ согласно (7.6) имеет вид

$$\beta(\omega) = -\omega \cdot t_0 - \frac{(\omega - \omega_0)^2}{(\Delta\omega)^2} \cdot \pi \cdot D. \quad (7.8)$$

Она нелинейна и описывается линейным слагаемым и параболой второй степени (рис. 7.3а). Из (7.8) следует, что согласованный фильтр осуществляет задержку спектральных компонент на время

$$t_3(\omega) = -\frac{d\beta}{d\omega} = t_0 + \frac{2 \cdot (\omega - \omega_0)}{(\Delta\omega)^2} \cdot \pi \cdot D, \quad (7.9)$$

являющееся линейно – нарастающей функцией частоты в частотном интервале $\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2} \div \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}$ (рис. 7.3 б).

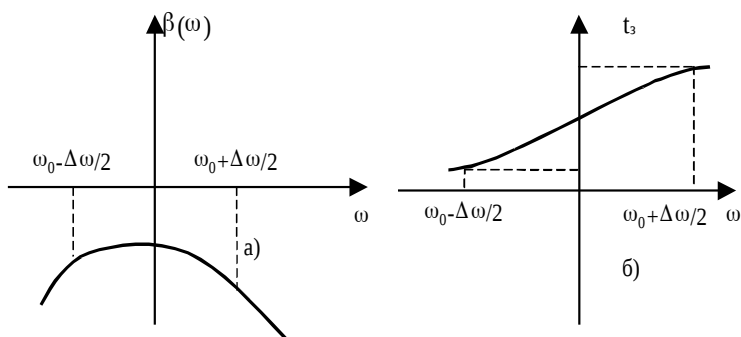


Рис. 7.3. Фазо-частотные и временные характеристики фильтра, согласованного с ЛЧМ сигналом [13]

Согласованные фильтры для ЛЧМ сигнала могут быть построены различным путем. Наибольшее распространение получили фильтры на основе дисперсионных ультразвуковых линий задержки (ДУЛЗ), представляющих собой алюминиевый волновод (ленту) с закрепленными на его концах передающим и приемным пьезоэлектрическими датчиками.

Выходной сигнал согласованного фильтра при больших D имеет вид:

$$u_{\text{вых}}(t) \cong c_1 \cdot A \cdot \sqrt{D} \cdot \frac{\sin \pi F(t - t_0)}{\pi F(t - t_0)} \cdot \cos \omega_0(t - t_0), \quad (7.10)$$

где $c_1 = \text{const}$.

Как видно, в отличие от входного сигнала он уже не имеет частотной модуляции. Его огибающая имеет вид функции $\frac{\sin x}{x}$. Максимальное значение огибающей в $c_1 \sqrt{D}$ раз отличается от амплитуды входного сигнала и в \sqrt{D} раз

больше амплитуды выходного сигнала при условии, что модуляция на входе фильтра отсутствует. Зная амплитуду выходного сигнала согласованного фильтра при немодулированном входном сигнале (в этом случае $D = 1$) и максимальное значение амплитуды этого сигнала при наличии девиации, можно экспериментально определить коэффициент сжатия и базу ЛЧМ сигнала.

Нормированная комплексная огибающая выходного сигнала U_B / U_{em} дана на рис. 7.4 (а). Выходной импульс на уровне 0.637 от максимального имеет длительность $T_1 = 1 / \Delta f$. Поэтому отношение длительностей импульсов на входе и выходе равны коэффициенту $D = T / T_{1,0.6}$. Чем больше D и база сигнала, тем выше уровень сжатия. Чаще о величине сжатия судят по ширине огибающей выходного сигнала фильтра на уровне 0,5 от максимального; иногда используют другие критерии.

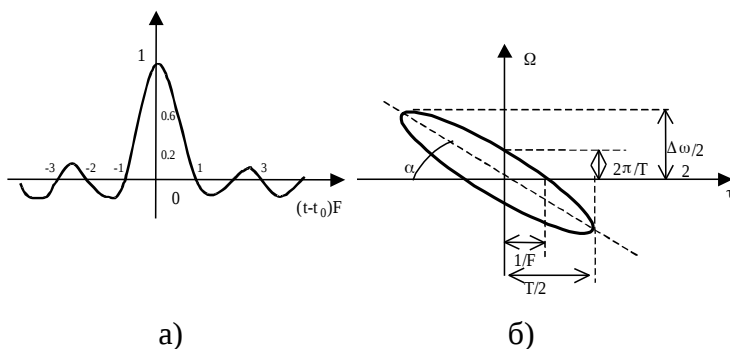


Рис. 7.4. Комплексная огибающая (а) и сечение тела неопределенности (б) ЛЧМ сигнала [13]

При обработке ЛЧМ сигналов начальная фаза φ_0 (7.2) обычно является случайной величиной. Если фильтр согласован с сигналом (7.3) при $\varphi_0 = 0$, то при наличии ненулевого сдвига он оказывается рассогласованным.

Можно показать, что выходной сигнал фильтра при $\varphi_0 \neq 0$ имеет вид

$$u_{\text{вых}}(t) \cong u_{\text{вых}} \cdot \cos[\omega_0(t - t_0) + \varphi_0],$$

т.е. огибающая сигнала $u_{\text{вых}}$ такая же, как и при $\varphi_0 = 0$; зависимой от величины φ_0 оказывается фаза высокочастотного заполнения.

Положение пика сжатого сигнала на оси времени может изменяться при этом в пределах $\pm \frac{\pi}{\omega_0}$, т.е. половины периода высокочастотного заполнения. При достаточно большом числе периодов, приходящемся на длительность сжатого сигнала, влияние φ_0 на величину пика незначительно.

Заметим в заключение, что использование ЛЧМ сигналов (как и других сложных сигналов) позволяет повысить скрытность передачи. Пусть отношение мощностей сигнала и шума на входе согласованного фильтра в полосе Δf равно

$$\frac{P_c}{P_u}; \text{ на выходе фильтра оно равно } q^2 = \frac{2 \cdot E}{N_0} = \frac{u_{\text{вых}}^2(t_0)}{\sigma_u^2}.$$

Поэтому

$$q^2 = \frac{2 \cdot E}{N_0} = \frac{P_c}{P_u} \cdot 2 \cdot \Delta f \cdot T = B \cdot \frac{P_c}{P_u},$$

Где $N_0 = \frac{P_u}{\Delta f}$ – спектральная интенсивность шума, σ_u^2 – мощность шума на выходе фильтра. В данной работе рассматривается только Гауссовский шум.

Отсюда видно, что увеличивая базу сигнала можно осуществить передачу при значительном превышении шума над сигналом на входе приемника.

Значение базы ЛЧМ сигнала экспериментальным путем можно определить по величине коэффициента сжатия, уровням выходного сигнала фильтра, а также по выигрышу в

отношении $\frac{\text{сигнал}}{\text{шум}}$, который дает согласованный фильтр.

Мощность шума σ_w^2 можно определить по полному размаху его напряжения ℓ (на экране осциллографа при отсутствии горизонтальной развертки). Известно [3], что с точностью большей 0.1% мгновенные значения нормального процесса заключены в интервале $6\sigma_w$, где σ_w – среднеквадратическое значение. Поэтому $\sigma_w = \frac{\ell}{6}$ для оценки совместной разрешающей способности по дальности и скорости (времени и частоте) используется понятие двумерной автокорреляционной функции (ДАФ) сигнала $\dot{R}(\tau, \Omega)$.

Модульное значение $\dot{R}(\tau, \Omega)$ при $\Omega = 0$ представляет собой модуль огибающей выходного сигнала согласованного фильтра (10) [7].

$$|\dot{R}(\tau, 0)| = \left| \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right) \cdot \frac{\sin\left[\pi D \frac{\tau}{T} \cdot \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right)\right]}{\pi D \frac{\tau}{T} \cdot \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right)} \right|, \quad (7.11)$$

при $\tau = 0$

$$|\dot{R}(0, \Omega)| = \left| \frac{\sin \cdot \pi D \frac{\Omega}{\Delta \omega}}{\pi D \frac{\Omega}{\Delta \omega}} \right|, \quad (7.12)$$

и определяет функцию частотной корреляции.

Квадрат модуля ДАФ $|\dot{R}(\tau, \Omega)|^2$ называется функцией неопределенности сигнала. Сечение главного лепестка функции неопределенности в плоскости τ, ω – эллипс, повернутый относительно оси τ на угол $\alpha \cong \arctg \Delta \omega T$ (рис. 7.4 (б)).

Для оценки помехоустойчивости при обнаружении сигналов используются рабочие характеристики и характеристики обнаружения приемника [3, 9], связывающие

между собой вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги, соответственно P_0 и $P_л$, и отношение $\frac{c}{ш}$ на выходе согласованного фильтра Q .

Вероятности P_0 и $P_л$ могут быть найдены экспериментально в процессе статистических испытаний. При фиксированных пороге и мощности шума, испытания заключаются в многократном сравнении выходного сигнала приемника с порогом.

Если N – число испытаний, то

$$P_0^* = \frac{N_0}{N}, \quad P_л^* = \frac{N_л}{N},$$

где N_0 и $N_л$ – число превышений порога при наличии полезного сигнала и при его отсутствии, соответственно; P_0^* и $P_л^*$ – статистические вероятности, сходящиеся при $N \rightarrow \infty$ к математическим вероятностям P_0 и $P_л$ [10]. Число N в эксперименте конечное, но должно быть достаточно большим. Подсчет значений N_0 , $N_л$ и N производится с помощью счетчиков.

7.3. Описание лабораторной установки

Установка позволяет производить исследование свойств и изучение особенностей согласованной фильтрации ЛЧМ сигнала, а также определение экспериментальным путем вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги.

Установка состоит из передающей и приемной частей и вспомогательных блоков. Передающая часть включает в себя блок синхронизации и модуляции, вырабатывающий синхронизирующие импульсы, и используемые для модуляции пилообразный сигнал и прямоугольные импульсы, генератор ЛЧМ сигнала (ГЛЧМ) и суммирующий усилитель. Здесь предусмотрены регулировки девиации частоты ЛЧМ сигнала

Δf (0 – 1000 кГц), задержки синхронизации τ_s (90 – 220 мкс) и частоты несущей f_0 (5.8 – 6.6 МГц). Передатчик генерирует ЛЧМ радиоимпульсы со случайной начальной фазой. Длительность импульсов $T = 47$ мкс, период следования $T_0 = 180$ мкс. Амплитуда сигнала на входе ДУЛЗ равна 1,7 в.

На передающей стороне также предусмотрена возможность получения второго сигнала с ЛЧМ, перекрывающегося во времени с основным и получаемого путем задержки последнего. Подключение второго сигнала ко входу суммирующего усилителя осуществляется клавишей, расположенной на задней панели установки. Там же расположена клавиша, позволяющая отключать полезный сигнал от входа усилителя.

Приемная часть установки состоит из согласованного фильтра для ЛЧМ сигнала (ДУЛЗ), УВЧ, двух амплитудных детекторов (АД), ультразвуковой линии задержки 64 мкс (УЛЗ), сумматора – усилителя УВЧ2, формирователя строб – импульса и порогового устройства с регулируемым порогом (ПУ). Используемая в приемнике ДУЛЗ имеет линейный участок зависимости задержки от частоты длительностью 57 мкс в диапазоне 600 кГц (6,0 – 6,6 МГц) и полосу пропускания от 6,05 до 6,55 МГц, т.е. 500 кГц (см. рис. 2.3.2). Таким образом, фильтр на основе ДУЛЗ является согласованным для ЛЧМ сигнала с параметрами $\Delta f = 500$ кГц, $T = 47$ мкс. ($D = 23,5$).

Зависимость задержки от частоты может быть определена экспериментально. Для этого, изменяя несущую частоту немодулированных импульсов, надо измерять задержку выходного импульса ДУЛЗ относительно входного сигнала.

После оптимальной фильтрации и усиления сигнал в приемнике поступает на два канала – прямой, включающий в себя АД1 и формирователь строб-импульса, и канал с задержкой.

Строб-импульс имеет длительность 0,5 мкс. Он задержан относительно огибающей сигнала УВЧ1 на 64 мкс и используется для стробирования того же самого сигнала в ПУ.

В качестве стробирующего, в принципе, можно было бы использовать синхроимпульс передатчика. Это позволило бы исключить задержку сигнала в приемнике и упростить его схему в целом. Однако такой вариант оказывается не приемлемым из-за невозможности точной фиксации временного положения максимума отклика на выходе ДУЛЗ, соответствующего моменту действия строб-импульса. Временное смещение отклика от номинального значения обусловлено неточностью установки несущей частоты ЛЧМ сигнала по шкале и нестабильностью частоты ГЛЧМ.

Следует заметить также, что использование двух каналов в приемнике исключает случайность начальной фазы в принятом сигнале.

В устройстве формирования строб-импульса вырабатываются также импульсы, задержанные на время меньше, чем 64 мкс. Они используются в качестве синхронизирующих при наблюдении выходных сигналов УВЧ2 и АД2.

В установке предусмотрена возможность измерения мгновенной частоты (и девиации) ЛЧМ сигнала. Для этой цели служит измеритель частоты.

Переключатель ПЗ необходим для одновременного включения счетчиков N и N_0 (N_n) при определении значения P_0^* (P_n^*), p_2 – для выключения сигнала.

7.4. Домашнее задание и указания по его выполнению

1. Нарисовать структурную схему устройства формирования оптимального обнаружения ЛЧМ сигнала.

2. Рассчитать коэффициент сжатия D ЛЧМ сигнала при его длительности $T = 47$ мкс и девиации частоты $\frac{\Delta f}{2} = 250$ кГц и $\frac{\Delta f}{2} = 400$ кГц.

3. Рассчитать длительность сжатого импульса T_1 для тех же, что и в п. 2, значений девиации частоты. Оценить разрешающую способность по дальности ΔR .

4. Нарисовать (качественно) сечение ДАФ ЛЧМ сигнала при отсутствии расстройки по частоте для $T = 47$ мкс и двух значений Δf : $\Delta f = 500$ кГц и $\Delta f = F^*$ (см. табл. 7.1).

Таблица 7.1

Значения F^* , F_o^* и q^* для вариантов

Варианты	Параметры		
	F^* (кГц)	F_o^* (кГц)	q^*
1	550	15	2
2	600	10	3
3	650	20	2,5
4	700	30	4
5	750	17	3,5
6	800	25	2,7

5. Рассчитать смещение сжатого импульса во времени за счет доплеровского сдвига $F^* = F_o^*$ (см. табл. 7.1).

6. Рассчитать выигрыш в отношении с/ш при согласованной фильтрации для двух значений длительности ЛЧМ сигнала $T = 47$ мкс и $T = 20$ мкс при скорости изменения частоты $K = 10^{10} \frac{\Gamma\text{ц}}{\text{с}}$.

7. Рассчитать рабочие характеристики приемника обнаружения сигнала со случайной начальной фазой для двух значений отношения $\frac{C}{ш}$: $q = 0$ (сигнал отсутствует) и $q = q^*$

(см. табл. 7.1). Значения вероятностей ложной тревоги изменять от $P_{л} = 0$ до $P_{л} = 0,1$.

8. Составить программу экспериментальных исследований свойств ЛЧМ сигнала и приемника обнаружения в соответствии с п. 3 лабораторного задания. В программе должны содержаться инструкции о порядке переключения органов управления лабораторной установки, методика осуществления экспериментальных исследований.

П.п. 2 – 6 можно выполнить, изучив свойства ЛЧМ сигнала [3, с. 101 – 102], [7, с. 155, 158 – 161]. При расчете смещения сжатого импульса во времени необходимо знать свойства сечения модуля ДАФ плоскостью τ , Ω .

Для выполнения п. 7 следует изучить характеристики обнаружения и рабочие характеристики приемника оптимального обнаружения сигнала со случайной начальной фазой. [3, с. 54, 57 – 60], [8, с. 93 – 96], [9, с. 62 – 69].

Для составления программы экспериментальных исследований свойств ЛЧМ сигнала и приемника оптимального обнаружения необходимо изучить по приложению к данной работе принцип работы лабораторной установки и назначение ее органов управления, ознакомиться с рекомендациями по измерению параметров сигнала и характеристик приемника.

7.5. Лабораторное задание

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, уточнить назначение органов управления установкой.
2. Подготовить лабораторную установку к работе.
3. Провести экспериментальные исследования свойств ЛЧМ сигнала и характеристик приемника оптимального обнаружения.

Исследования должны включать:

1. Визуальное наблюдение сигналов на входе и выходе ДУЛЗ при наличии и отсутствии девиации;

2. Визуальное наблюдение двух налагающихся во времени сигналов с ЛЧМ и без нее на входе ДУЛЗ и сигналов на его выходе.

3. Измерение коэффициента сжатия ЛЧМ сигнала и его базы (различными методами). Расчет разрешающей способности.

4. Измерение изменения частоты в ЛЧМ импульсе с помощью измерителя частоты.

5. Определение дисперсионной характеристики ДУЛЗ (зависимости времени задержки от частоты сигнала).

6. Изучение влияния частоты несущей на форму ДАФ и сдвиг ее по времени при номинальной девиации частоты ЛЧМ сигнала (см. домашнее задание).

7. Построение рабочих характеристик приемника для значений $q = 0$ и $q = q^*$ (см. домашнее задание).

Подготовка лабораторной установки к работе осуществляется в соответствии с инструкцией, приведенной в приложении к данной работе. Экспериментальные исследования проводятся по программе, разработанной в домашнем задании.

Отчет о проделанной работе должен содержать:

1. Результаты выполнения домашних заданий.
2. Результаты экспериментальных исследований и их сопоставление с расчетными данными.
3. Необходимые рисунки.
4. Краткие выводы по всем этапам исследований.

7.6. Контрольные вопросы

1. Какие сигналы называются сложными? Для каких целей они используются?

2. Особенности амплитудного и фазового спектров ЛЧМ сигнала.

3. Из каких соображений выбираются параметры ЛЧМ сигнала: длительность и девиация частоты?

4. Из каких соображений выбираются параметры дисперсионной линии задержки?

5. Какой вид имеет выходной сигнал согласованного фильтра и его огибающая что такое ДАФ сигнала ? Как влияет скорость движения цели на форму и временное положение сжатого импульса?

6. Какие искажения в сжатом импульсе появляются при наличии рассогласования между параметрами сигнала и параметрами линии?

7. Как влияет на форму отклика ДУЛЗ изменение начальной фазы входного сигнала?

8. Как меняется отношение $\frac{\text{сигнал}}{\text{шум}}$ на выходе ДУЛЗ?

9. Составьте требования к частотным и фазовым характеристикам трактов, усиливающим импульсный сигнал с ЛЧМ.

10. Чем определяется разрешающая способность по дальности?

11. Структура оптимального приемника сигнала со случайной начальной фазой. От чего зависят качественные показатели P_o и P_d такого приемника?

12. Что такое рабочая характеристика приемника? Можно ли по семейству рабочих характеристик построить характеристики обнаружения?

13. Начертите схему лабораторной установки. Объясните назначение канала задержки в приемнике.

14. Объясните назначение элементов принципиальной схемы передающей части. Начертите временные диаграммы, иллюстрирующие ее работу.

15. Как имитируется эффект Доплера в лабораторной установке? Прокомментируйте полученные экспериментально результаты по влиянию эффекта Доплера.

16. Принцип работы измерителя частоты в импульсе. Какова точность измерений?

17. Как экспериментально определить базу сигнала? Дисперсионную характеристику ДУЛЗ?

8. Исследование эффективной поверхности рассеяния радиолокационных целей

8.1. Общие указания по выполнению лабораторной работы

Лабораторная установка предназначена для исследования эффективной поверхности (площади) рассеяния различных целей и измерения статических характеристик их рассеяния.

Метод исследования базируется на аналогии между звуковыми и электромагнитными волнами и принцип масштабного моделирования.

Технические особенности лабораторной установки:

1. Неслышимый ультразвуковой диапазон зондирующих акустических импульсов.

2. Возможность плавной регулировки несущей частоты зондирующих импульсов, их периода и скважности.

3. Возможность плавной регулировки мощности зондирующих импульсов.

4. Устойчивость к мешающим акустическим шумам (с уровнем до 60 дБ) звукового диапазона в помещении лаборатории.

5. Метод обработки сигнала – квазиоптимальная фильтрация.

6. Минимальная разрешающая способность по дальности – не менее 50 мм.

7. Максимальная дальность обнаружения – не менее 2 м.

8. Возможность варьирования азимута измерительной секции – плавная (-15° .. $+110^{\circ}$).

9. Возможность варьирования угла места измерительной секции – дискретная (-45..+45°).

10. Возможность варьирования угла крена и тангажа цели (0-45°).

11. Виды цели:

11.1. Плоская прямоугольная пластина.

11.2. Четырехгранная призма.

11.3. Угловый отражатель.

11.4. Шар.

11.5. Двухточечная цель (для оценки разрешающей способности лоатора).

11.6. Сложная цель (макет самолета).

12. Масштабное моделирование работы наземного моноимпульсного радиолокатора обнаружения воздушных целей.

Лабораторная установка основана на методе масштабного моделирования радиолокационной станции с помощью ультразвукового лоатора. В силу известных свойств взаимности волновых процессов [11], электромагнитные и акустические волны имеют качественно-подобные эффекты рассеяния и отражения волновых фронтов, что позволяет произвести качественную оценку характеристик рассеяния и обратного рассеяния электромагнитных волн на примере акустических волн ультразвукового диапазона. Безусловно, в силу различной природы электромагнитных и акустических колебаний, далеко не все эффекты можно смоделировать таким образом (например, эффекты, связанные с поляризацией электромагнитной волны). Однако несомненным преимуществом такого подхода является высокая наглядность и компактность экспериментального оборудования.

Действительно, скорость распространения акустической волны (звука) при нормальных условиях ($t=20^{\circ}\text{C}$) составляет порядка 330 м/с, тогда как скорость распространения плоской электромагнитной волны (в бесконечной среде без дисперсии) равна скорости света и составляет $3 \cdot 10^8$ м/с. Следовательно,

скорость звука почти в 10^6 раз меньше скорости света. Длина акустической волны с частотой 40 кГц составит

$$\lambda_{ав} = 330 / 40 \cdot 10^3 = 0,83 \cdot 10^{-2} \text{ (м)},$$

то есть $\lambda_{ав} = 0,83$ см. Столь малая длина волны позволяет использовать вместо реальных радиолокационных целей их уменьшенные модели. Так, например при облучении модели само лета длиной 25 см (эквивалентная длина $30 \lambda_{ав}$), диаграмма рассеяния должна быть эквивалентна рассеянию электромагнитной волны $\lambda_{эМВ} = 0,8$ м (частота около 360 МГц) на самолете с длиной фюзеляжа 25 м. Таким образом, лабораторная установка, занимая не более 2 м² площади лаборатории, позволяет моделировать работу наземного полноразмерного радиолокатора обнаружения цели.

В свою очередь, малые расстояния до цели позволяют использовать малую акустическую мощность (не более 0,1 Вт). Применение акустических конических «рупоров» передающих и приемных узлов формирует необходимую диаграмму направленности, а также согласует волновые сопротивления пьезоэлектрических мембран с сопротивлением среды (воздуха).

В лабораторной установке предусмотрена оперативная плавная регулировка мощности «Р» излучаемых импульсов, периода следования «Т» и длительности «т», а также юстировка несущей частоты импульсов «F₀» и частотной характеристики квазисогласованного фильтра.

8.2. Описание конструкции лабораторной установки

Внешний вид конструкции лабораторной установки представлен на рис. 8.1. Структурно установка состоит из Приемо-передающего электронного блока (цифра 1, рис. 8.1) и Механической части.

Механическая часть лабораторной установки состоит из неподвижного штатива (цифра 2, рис. 8.1) и подвижной рамки (цифра 4, рис. 8.1) измерительной секции. На площадке

штатива (цифра 3, рис. 8.1) установлены ультразвуковые акустические излучатель и приемник-микрофон, оснащенные устройствами рупорной конструкции оптимизирующего их работу. Фиксированные на площадке штатива излучатель и приемник (цифра 3, рис. 8.1) предназначены для измерения диаграммы обратного рассеяния исследуемой локационной цели.

Кольцевая рама (цифра 4, рис. 8.1) подвижно закреплена в верхней и нижней части штатива и имеет возможность поворота в горизонтальной плоскости. Подвижная измерительная секция, оборудована приемником-микрофоном и рупором (цифра 6, рис. 8.1) и предназначена для измерения диаграммы рассеяния исследуемой локационной цели.

Подвижная измерительная секция с помощью фиксатора закреплена на кольцевой раме и имеет возможность перемещаться в двух плоскостях – по вертикали по кольцевой раме (*Угол места* – β°) и горизонтали вместе с кольцевой рамой (*Азимут* – α°). Текущее значение угла места β° подвижной измерительной секции определяется по рискам шкалы, нанесенной на кольцевую раму, а значение азимута α° – по шкале угла поворота кольцевой рамы (цифра 5, рис. 8.1).

Исследуемая локационная цель (цифра 7, рис. 8.1) устанавливается в точке геометрического центра кольцевой рамы, соответствующего максимуму диаграммы направленности излучателя и максимальной угловой чувствительности приемников-микрофонов. Цель фиксируется в пространстве механической системой из двух спиц.

Поперечные линейные размеры спиц выбраны значительно меньше длины волны зондирующего акустического излучения, что обеспечивает эффективное дифракционное «огибание» фронта волны препятствия в виде тонкой спицы с минимальным уровнем обратного рассеяния.

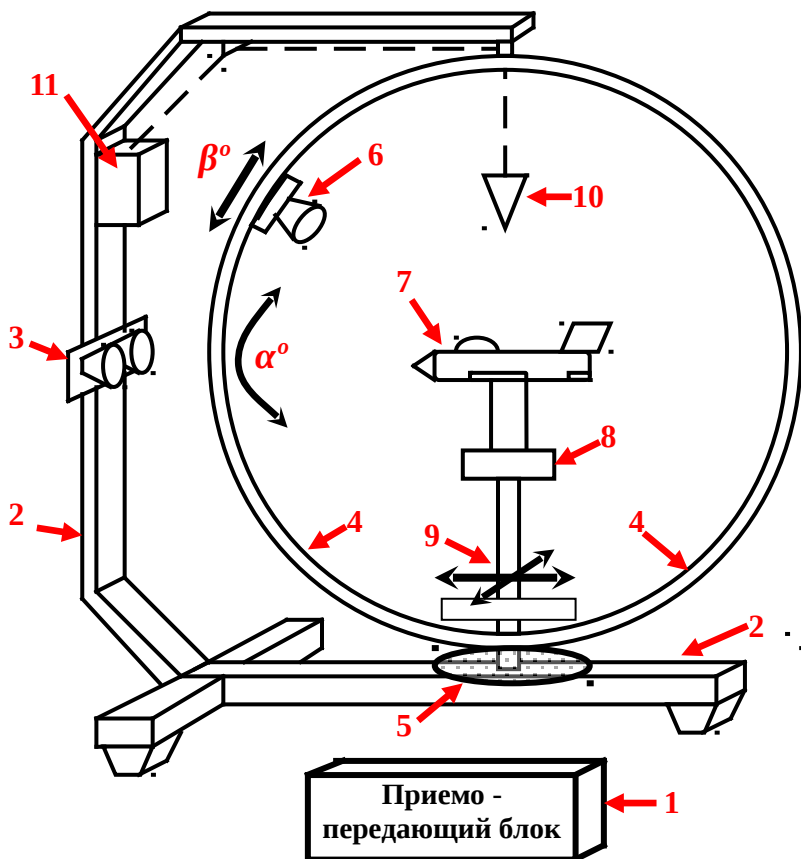


Рис. 8.1. Конструкция лабораторной установки

Исследуемая цель закрепляется на подвижном шарнире (цифра 8, рис. 8.1) с тремя степенями свободы, обеспечивающем варьирование углового положения цели по углу *курса* θ° , *тангажа* γ° и *крена* δ° (рис. 8.2)

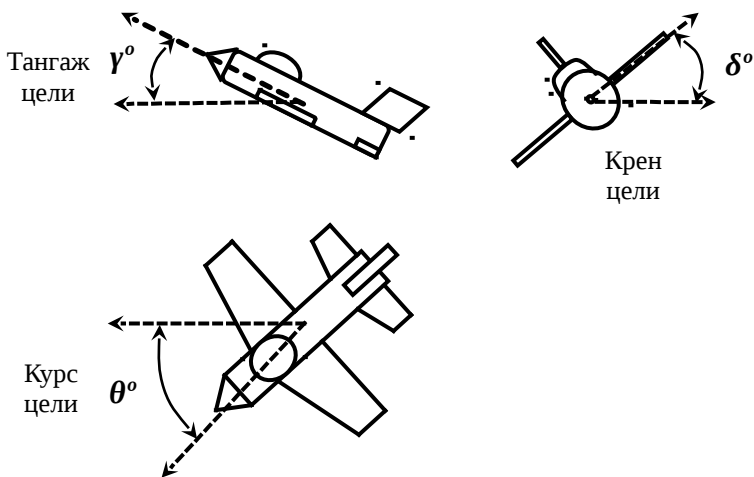


Рис. 8.2. Возможность установки подвижным шарниром углового положения локационной цели

Изменение угла **тангажа** γ° и **крена** δ° приводит к смещению цели из центра кольцевой рамки, что может вызвать погрешность измерения рассеяния цели. Для центровки положения цели лабораторная установка оборудована центральным отвесом (цифра 10, рис. 8.1) с устройством регулировки высоты отвеса (цифра 11, рис. 8.1), а также устройством центровки (цифра 9, рис. 8.1) обеспечивающим двухмерное позиционирование подвижного шарнира (цифра 8, рис. 8.1) локационной цели.

Структурная функциональная схема представлена на рис. 8.3. Функционально установка состоит из двух частей: приемной и передающей.

Передающая часть состоит из:

1. Генератора несущей частоты F_0 , представляющего высокостабильный релаксационный генератор прямоугольных колебаний с частотой около 40 кГц. Предусмотрена ручная регулировка-юстировка несущей частоты « F_0 ».

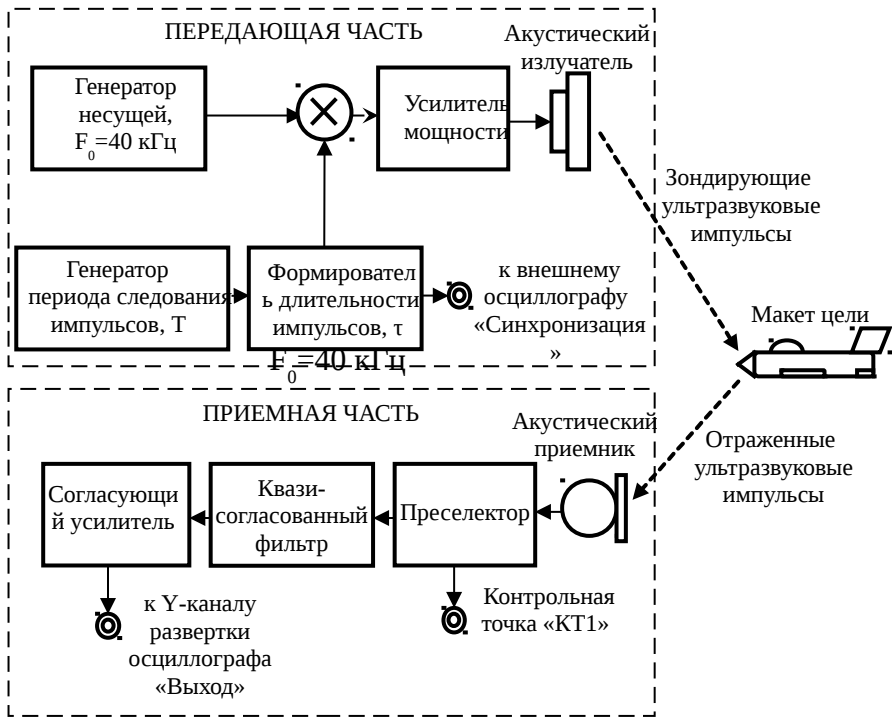


Рис. 8.3. Структурная функциональная схема лабораторной установки

2. Генератор периода следования импульсов, представляющий собой низкочастотный генератор прямоугольных колебаний, западающих частоту следования зондирующих импульсов. Предусмотрена плавная регулировка периода следования импульсов « T ».

3. Формирователь длительности импульсов представляет собой ждущий генератор – одновибратор, работающий под управлением генератора периода следования импульсов и формирующий короткие импульсы (длительность $\tau \leq 0,5$ мс) положительной полярности. Дополнительно формируются

импульсы внешней синхронизации осциллографа. Предусмотрена плавная регулировка длительности зондирующих импульсов «т».

4. Перемножитель, выполняющий функции модуляции импульсов несущей частоты и формирующий на выходе последовательность радиоимпульсов с несущей частотой « F_0 », периодом следования «Т» и длительностью импульса «т».

5. Усилитель мощности представляет собой мощный двухтактный ключевой каскад и предназначен для возбуждения акустического ультразвукового излучателя.

6. Акустический излучатель пьезоэлектрического типа генерирует ультразвуковые акустические колебания. Акустическая антенная система в виде конического рупора формирует необходимую диаграмму направленности и обеспечивает условие оптимальной работы излучателя.

7. Макет цели установлен на площадке подвижного шарнира с возможностью изменения угла курса, крена и тангажа локационной цели.

8. Акустический приемник. Лабораторная установка оборудована двумя приемниками ультразвуковых сигналов. Один из них установлен в блоке измерительной секции и предназначен для исследования **характеристик рассеяния** целей, второй приемник смонтирован рядом с излучателем на неподвижном штативе и предназначен для исследования **характеристик обратного рассеяния**. Акустические приемники оборудованы согласующими устройствами рупорной конструкции оптимизирующего работу ультразвукового акустического приемника.

9. Преселектор выполняет функции согласования сопротивления, частичной селекции и усиления входного сигнала для последующей обработки квазисогласованным фильтром. Преселектор имеет дополнительный выход на контрольную точку «КТ1», который предназначен для начальной юстировки (точной настройки) несущей частоты

«F₀» пачки радиоимпульсов по максимальному коэффициенту передачи сквозного акустического канала.

10. Квасисогласованный фильтр представляет собой активный полосовой фильтр Бесселя высокого порядка. Известно, что при прохождении прямоугольного радиоимпульса через полосовой фильтр с АЧХ, близкой к прямоугольной форме с полосой пропускания равной $\Pi = 1,37/T$ (где T – длительность радиоимпульса), теоретически достигается отношение сигнал/шум $H^2 = 0.82(2E/N_0)$, тогда как отношение сигнал/шум на выходе идеального согласованного с прямоугольным радиоимпульсом фильтра составляет $h^2 = 2E/N_0$ (здесь E – энергия сигнала, N_0 – спектральная плотность мощности белого шума). Таким образом, эффективность квазиоптимальной фильтрации всего лишь на 18% ниже оптимальной. При этом квазисогласованные фильтры не критичны по полосе пропускания. Так при изменении полосы в 1,5 раза, H^2 изменяется в 1.25 раза.

Квасисогласованный фильтр оснащен юстировочными элементами для точной настройки частотной характеристики.

11. Согласующий усилитель выполняет функции оконечного усилителя и согласования сопротивления устройства квазиоптимальной обработки со входом вертикальной развертки внешнего осциллографа.

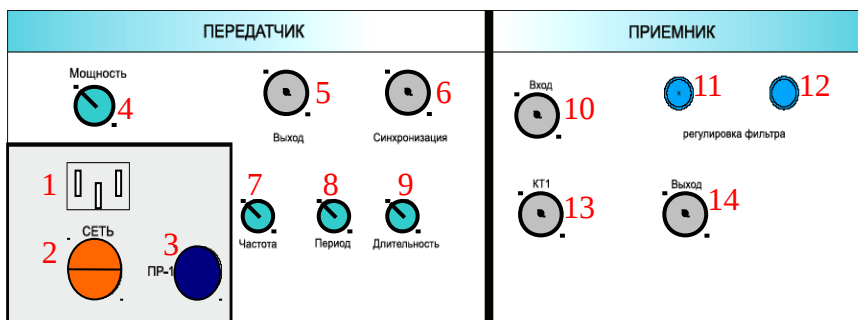


Рис. 8.4. Вид передней панели электронного
приемо-передающего блока

На рис. 8.4. цифрами обозначены:

1. Сетевой разъем EURO питания лабораторной установки;
2. Выключатель питания лабораторной установки;
3. Сетевой предохранитель (1 А);
4. Регулятор установки мощности излучения;
5. Коаксиальный контакт выхода передающего блока. Подключается к ультразвуковому пьезо-излучателю;
6. Коаксиальный контакт выхода сигнала синхронизации. Подключается к каналу внешней синхронизации осциллографа;
7. Регулятор настройки несущей частоты ультразвуковых импульсов;
8. Регулятор настройки периода следования ультразвуковых импульсов;
9. Регулятор настройки длительности ультразвуковых импульсов;
10. Коаксиальный контакт входа приемного блока. Подключается к ультразвуковому пьезо-микрофону;
11. Первый регулятор настройки частотной характеристики квазисогласованного фильтра;
12. Второй регулятор настройки частотной характеристики квазисогласованного фильтра;
13. Коаксиальный контакт контрольной точки ультразвукового преселектора.
14. Коаксиальный контакт выхода квазисогласованного приемника.

8.3. Домашнее задание и указания по его выполнению

1. Изучить принцип действия моноимпульсных РЛС.

2. Изучить принцип масштабного моделирования рассеяния радиолокационных целей.

3. Нарисовать структурную схему импульсного радиолокатора и пояснить функциональное взаимодействие отдельных блоков.

4. Изучить диаграммы рассеяния пластины, уголкового отражателя и сферы. Занести графики диаграмм рассеяния в отчет.

8.4. Лабораторное задание

Перед началом выполнения каждой лабораторной работы необходимо выполнить операции:

1. Заблаговременно включить осциллограф и лабораторную установку и дать им «прогреться» не менее 5 мин.

2. Ориентируясь на жидкостные индикаторы уровня установить горизонтальность площадки образцов подвижного кронштейна. В дальнейшем, во время проведения измерений наблюдать за индикаторами уровня и поддерживать горизонтальную ориентацию локационной цели.

3. Совместить указатель угла азимута площадки образцов с нулевым отсчетом шкалы азимута.

4. Установить исследуемый образец в крепления площадки образцов.

5. С помощью устройства управления высотой отвеса (цифра 11, рис. 8.1), опустить отвес и проверить совпадение центральной точки локационной цели с вертикальной осью подвижной рамы. При необходимости с помощью устройства (цифра 9, рис. 8.1) произвести центровку подвижного шарнира.

6. Установить регулятор «Мощность» (цифра 4, рис. 8.4) в среднее положение.

7. Во время проведения измерений, с целью снижения погрешности рекомендуется убирать руки (и другие

отражающие предметы) от площадки образцов на расстояние не менее 0,7 м.

Задание 1. Исследование диаграмм обратного рассеяния плоской прямоугольной пластины.

Установить локационную цель «Плоская прямоугольная пластина» в подвижный шарнир.

Подключить выход фиксированного на раме приемника акустических колебаний (кабель «Приемник 1») с коаксиальным контактом «Вход» (цифра 10, рис. 2.4.4) панели «Приемник».

Подключить кабель «Передатчик» к коаксиальному контакту «Выход» (цифра 5, рис. 2.4.4) панели «Передатчик».

Установить усиление канала «У» осциллографа равными 0,5 в/дел.

Плавно поворачивая регулятор мощности излучаемого сигнала «Р» по часовой оси и наблюдая за экраном осциллографа, установить максимальную амплитуду отраженного сигнала около 2В.

Плавно поворачивая по азимуту исследуемый образец (пластину) установить ее перпендикулярно пьезо-излучателю.

Измерить левую часть диаграммы рассеяния. Для этого, поворачивая по часовой оси площадку образцов в пределах $0 \div +90^\circ$, через каждые 5° по экрану осциллографа измерять амплитуду отраженного сигнала. Результаты измерений занести в табл. 8.1.

Во время проведения измерений, с целью снижения погрешности, рекомендуется убирать руки (и другие отражающие предметы) от площадки образцов на расстояние не менее 0,7 м. По окончании измерений правой части диаграммы обратного рассеяния, установить площадку образцов в начальное положение.

Измерить правую часть диаграммы рассеяния. Для этого, поворачивая против часовой оси площадку образцов, в пределах $0 \div -90^\circ$, через каждые 5° по экрану осциллографа

измерять амплитуду отраженного сигнала. Результаты измерений занести в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Диаграмма обратного рассеяния пластины

Азимут, α°	-90	-85	-80	...	-5	0	+5	...	+90
Амплитуда отраженного сигнала, В									

Представить табличные данные в виде диаграммы в полярной системе координат. Обратить внимание на ширину угла блеска отражения пластины.

Задание 2. Исследование трехмерной диаграммы рассеяния плоской прямоугольной пластины.

Подключить выход приемника акустических колебаний подвижной измерительной секции (кабель «Приемник 2») с коаксиальным контактом «Вход» панели «Приемник».

Повернуть площадку образцов по часовой стрелке и установить ее в положение соответствующее азимуту 45° относительно пьезо-излучателя.

Установить измерительную секцию в положение кольцевой рамы, соответствующее нулевому значению отчета угла места.

Плавно повернуть кольцевую раму измерительной секции по часовой оси в положение начала отсчета азимута измерительной секции.

Установить усиление канала «У» осциллографа равными 0,5 в/дел.

Плавно поворачивая регулятор мощности излучаемого сигнала «Мощность» (4 рис. 8.4) по часовой оси и наблюдая за экраном осциллографа, установить максимальную амплитуду отраженного сигнала около 2В.

Измерить левую часть диаграммы рассеяния. Для этого, поворачивая по часовой оси кольцевую раму измерительной секции в пределах $0 \div +115^\circ$, через каждые 5° по экрану осциллографа измерять амплитуду отраженного сигнала. Результаты измерений занести в табл. 8.2.

По окончании измерений правой части диаграммы обратного рассеяния, установить кольцевую раму измерительной секции в начальное положение, для чего совместить указатель угла азимута подвижной секции с нулевым отсчетом шкалы азимута.

Измерить правую часть диаграммы рассеяния. Для этого, поворачивая **против часовой оси** площадку образцов, в пределах $0 \div -15^\circ$, через каждые 5° по экрану осциллографа измерять амплитуду отраженного сигнала. Результаты измерений занести в табл. 8.2.

Затем, последовательно устанавливая измерительную секцию в позиции, соответствующие положительным значениям угла места $+15, +30, +45$ а затем отрицательным $-15, -30, -45$, для каждого положения измерить соответствующую диаграмму рассеяния. Результаты занести в табл. 8.2.

На основании данных таблицы для каждого значения угла места измерительной секции построить диаграмму рассеяния в полярной системе координат.

Рекомендуется использовать компьютерные программы визуализации и обработки экспериментальных данных.

Сделать вывод о трехмерной форме диаграммы рассеяния плоской пластины.

Таблица 8.2

Трехмерная диаграмма рассеяния пластины

Азимут, α°	-90	...	-5	0	+5	...	+80	+85	+90
Амплитуда отраженного сигнала, В									

(угол места измерительной секции $\beta = 0^\circ$)										
... $\beta = 15^\circ$)										
...										

Задание 3. Исследование диаграмм рассеяния четырехгранной призмы.

Установить четырехгранную призму на подвижный шарнир.

Подключить выход установленного на раме подвижной измерительной секции приемника акустических колебаний (кабель «Приемник 2») с коаксиальным контактом «Вход» панели «Приемник» (цифра 10, рис. 8.4).

Подключить выход фиксированного на раме передатчика акустических колебаний (кабель «Передатчик») с коаксиальным контактом «Выход» панели «Передатчик» (цифра 5, рис. 8.4).

Установить усиление канала «У» осциллографа равными 0,5 в/дел.

С помощью ручки подвижного шарнира повернуть четырехгранную призму боковой плоскостью перпендикулярно к излучателю. Наблюдая за жидкостными индикаторами уровня, проконтролировать горизонтальность плоскости подвижного шарнира.

Плавное поворачивая регулятор мощности излучаемого сигнала «Мощность» (цифра 4, рис. 8.4) по часовой оси и наблюдая за экраном осциллографа, установить максимальную амплитуду отраженного сигнала около 2В.

С помощью подвижного шарнира (цифра 8, рис. 8.1) вернуть локационную цель – призму в начальное положение, соответствующее нулевым значениям угла азимута подвижного шарнира.

Измерить левую часть диаграммы обратного рассеяния. Для этого, поворачивая по часовой оси площадку подвижного

шарнира в пределах $0 \div +180^\circ$ по азимуту, через каждые 5° по экрану осциллографа измерять амплитуду отраженного сигнала. Результаты измерений занести в табл. 8.3.

По окончании измерений правой части диаграммы обратного рассеяния, установить площадку образцов в начальное положение, для чего совместить указатель угла азимута площадки образцов с нулевым отсчетом шкалы азимута подвижного шарнира.

Измерить правую часть диаграммы рассеяния. Для этого, поворачивая против часовой оси площадку образцов в пределах $0 \div -180^\circ$, через каждые 5° по экрану осциллографа измерять амплитуду отраженного сигнала. Результаты измерений занести в табл. 8.3.

Представить табличные данные в виде диаграммы в полярной системе координат. Сравнить диаграммы рассеяния прямоугольной пластины, полученные в первой лабораторной работе.

Таблица 8.3

Диаграмма обратного рассеяния призмы

Азимут, α°	-90	-85	-80	...	-5	0	+5	...	80	85	90
Амплитуда отраженного сигнала, В											

Задание 4. Исследование трехмерной диаграммы рассеяния четырехгранной призмы.

Подключить выход приемника акустических колебаний установленный на подвижной секции (кабель «Приемник 1») с коаксиальным контактом «Вход» панели «Приемник» (цифра 10, рис. 8.4).

Подключить выход установленного на подвижной измерительной секции приемника акустических колебаний (кабель «Приемник 2») с коаксиальным контактом «Вход» панели «Приемник» (цифра 10, рис. 8.4).

Подключить выход фиксированного на раме штатива передатчика акустических колебаний (кабель «Передатчик») с коаксиальным контактом «Выход» панели «Передатчик» (цифра 5, рис. 8.4).

Повернуть площадку образцов в начальное положение, соответствующее нулевым значениям угла азимута (ребром к излучателю).

Установить измерительную секцию в положение кольцевой рамы, соответствующее нулевому значению отчета угла места.

Установить кольцевую раму с измерительной секции в положение, соответствующее величине угла азимута равное 90° .

Установить усиление канала «У» осциллографа равными 0,5 в/дел.

Плавно поворачивая регулятор мощности излучаемого сигнала «Мощность» (4 рис. 8.4) по часовой оси и наблюдая за экраном осциллографа, установить максимальную амплитуду отраженного сигнала около 2 В.

Плавно повернуть кольцевую раму измерительной секции по часовой оси в положение начала отсчета азимута измерительной секции.

Измерить левую часть диаграммы рассеяния. Для этого, поворачивая по часовой оси кольцевую раму измерительной секции в пределах $0 \div +115^\circ$, через каждые 5° по экрану осциллографа измерять амплитуду отраженного сигнала (в лабораторной установлен ограничитель максимального угла поворота рамы измерительной секции угол азимута 115° , поскольку при больших углах измерения в значительной степени будут искажены влиянием прямого (не рассеянного на цели) сигнала, поскольку приемник измерительной секции попадет в область главного лепестка диаграммы направленности излучателя) Результаты измерений занести в табл. 8.4

По окончании измерений правой части диаграммы обратного рассеяния, установить кольцевую раму

измерительной секции в начальное положение, для чего совместить указатель угла азимута рамы измерительной секции с нулевым отсчетом шкалы азимута.

Измерить правую часть диаграммы рассеяния. Для этого, поворачивая против часовой оси площадку образцов, в пределах $0 \div -15^\circ$, через каждые 5° по экрану осциллографа измерять амплитуду отраженного сигнала. Результаты измерений занести в табл. 8.4.

Затем, последовательно устанавливая измерительную секцию в позиции, соответствующие положительным значениям угла места $+15, +30, +45$, а затем отрицательным $-15, -30, \dots, -45$, для каждого положения измерить соответствующую диаграмму рассеяния. Результаты занести в табл. 8.4.

Таблица 8.4

Трехмерная диаграмма рассеяния призмы

Азимут, α°	-15	-10	...	-5	0	+5	...	+110	+115
Амплитуда отраженного сигнала, В (угол места измерительной секции $\beta = 0^\circ$)									
... $\beta = 15^\circ$)									
...									

На основании данных таблицы для каждого значения угла места измерительной секции построить диаграмму рассеяния в полярной системе координат. Сделать вывод о трехмерной форме диаграммы рассеяния трехгранной призмы.

Задание 5. Изучение диаграммы обратного рассеяния уголкового отражателя.

Установить уголкового отражателя на подвижный шарнир, развернув по углу азимута и тангажа перпендикулярно излучению (раструбом к излучателю) согласно рис. 8.5.

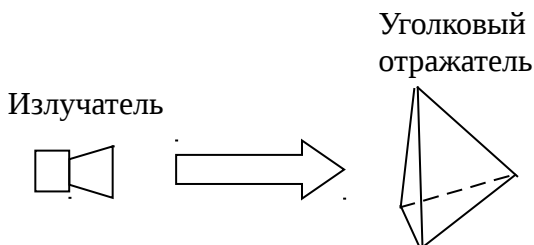


Рис. 8.5. Пространственная ориентация уголкового отражателя на площадке образцов

Подключить выход фиксированного на раме приемника акустических колебаний (кабель «Приемник 1») с коаксиальным контактом «Вход» панели «Приемник» (цифра 10, рис. 8.4).

Подключить выход **фиксированного на раме** передатчика акустических колебаний (кабель «Передатчик») с коаксиальным контактом «Выход» панели «Передатчик» (цифра 5, рис. 8.4).

Установить усиление канала «У» осциллографа равными 0,5 в/дел.

Плавное поворачивая регулятор мощности излучаемого сигнала «Мощность» (цифра 4, рис. 8.4) по часовой оси и наблюдая за экраном осциллографа, установить максимальную амплитуду отраженного сигнала около 2В. Во время настройки желательно незначительно «покачать» площадку образцов по азимуту и углу места и убедиться, что максимум отражения совпадает с нулевыми отсчетами шкал азимута и угла места площадки образцов подвижного шарнира.

Измерить левую часть диаграммы рассеяния. Для этого, поворачивая по часовой оси площадку образцов подвижного шарнира в пределах $0 \div +90^\circ$, через каждые 5° по экрану осциллографа измерять амплитуду отраженного сигнала. Результаты измерений занести в табл. 8.5.

По окончании измерений правой части диаграммы обратного рассеяния, установить площадку образцов в начальное положение, для чего совместить указатель угла азимута с нулевым отсчетом шкалы азимута.

Измерить правую часть диаграммы рассеяния. Для этого, поворачивая **против часовой оси** площадку образцов, в пределах $0 \div -90^\circ$, через каждые 5° по экрану осциллографа измерять амплитуду отраженного сигнала. Результаты измерений занести в табл. 8.5.

Представить табличные данные в виде диаграммы в полярной системе координат. Обратить внимание на ширину угла блеска отражения уголкового отражателя. Сравнить полученные диаграммы с диаграммами рассеяния плоской пластины.

Таблица 8.5

Диаграмма обратного рассеяния уголкового отражателя

Азимут, α°	-90	-85	-80	...	-5	0	+5	...	80	85	90
Амплитуда отраженного сигнала, В											

Задание 6. Исследование трехмерной диаграммы рассеяния уголкового отражателя.

Подключить выход установленного на раме подвижной измерительной секции приемника акустических колебаний (кабель «Приемник 2») с коаксиальным контактом «Вход» панели «Приемник» (цифра 10, рис. 8.4).

Подключить выход фиксированного на раме передатчика акустических колебаний (кабель «Передатчик») с

коаксиальным контактом «Выход» панели «Передатчик» (цифра 5, рис. 8.4).

Установить измерительную секцию в положение кольцевой рамы, соответствующее нулевому значению отчета угла места.

Плавно повернуть кольцевую раму измерительной секции по часовой оси в положение начала отсчета азимута измерительной секции.

Установить усиление канала «У» осциллографа равными 0,5 в/дел.

Плавно поворачивая регулятор мощности излучаемого сигнала «Мощность» (4 рис. 8.4) по часовой оси и наблюдая за экраном осциллографа, установить максимальную амплитуду отраженного сигнала около 2В. При начальной настройке угла места и азимута площадки образцов необходимо соблюдать высокую точность и аккуратность, поскольку диаграмма рассеяния уголкового отражателя имеет ярко выраженный направленный характер.

Измерить левую часть диаграммы рассеяния. Для этого, поворачивая по часовой оси кольцевую раму измерительной секции в пределах $0 \div +115^\circ$, через каждые 5° по экрану осциллографа измерять амплитуду отраженного сигнала. Результаты измерений занести в табл. 8.6.

По окончании измерений правой части диаграммы обратного рассеяния, установить кольцевую раму измерительной секции в начальное положение, для чего совместить указатель угла азимута с нулевым отсчетом шкалы азимута.

Измерить правую часть диаграммы рассеяния. Для этого, поворачивая против часовой оси площадку образцов, в пределах $0 \div -15^\circ$, через каждые 5° по экрану осциллографа измерять амплитуду отраженного сигнала. Результаты измерений занести в табл. 8.6.

Затем, последовательно устанавливая измерительную секцию в позиции, соответствующие положительным

значениям угла места +15, +30, +45, а затем отрицательным -15, -30, -45, для каждого положения измерить соответствующую диаграмму рассеяния по методике описанной выше. Результаты занести в табл. 8.6

На основании данных таблицы для каждого значения угла места измерительной секции построить диаграмму рассеяния в полярной системе координат. Сделать вывод о трехмерной форме диаграммы рассеяния уголкового отражателя. Для наглядного представления табличных данных рекомендуется применять компьютер для обработки и визуализации трехмерной диаграммы направленности в среде графических математических пакеты.

Таблица 8.6

Трехмерная диаграмма рассеяния уголкового отражателя

Азимут, α°	-90	-85	-80	...	-5	0	+5	...	80	85	90
Амплитуда отраженного сигнала, В (угол места измерительной секции $\beta = 0^\circ$)											
... $\beta = 15^\circ$)											
...											

Исследование диаграмм рассеяния шара.

Особенностью диаграмм рассеяния шара является его малая эффективная поверхность рассеяния, и, как следствие, низкая отражающая способность.

Задание 7. Изучение диаграммы обратного рассеяния шара.

Установить шар на площадку образцов.

Подключить выход фиксированного на раме приемника акустических колебаний (кабель «Приемник 1») с коаксиальным контактом «Вход» панели «Приемник» (цифра 10, рис. 8.4).

Подключить выход фиксированного на раме передатчика акустических колебаний (кабель «Передатчик») с коаксиальным контактом «Выход» панели «Передатчик» (цифра 5, рис. 8.4).

Установить усиление канала «У» осциллографа равными 0,5 в/дел.

Плавно поворачивая регулятор мощности излучаемого сигнала «Мощность» (4 рис. 8.4) по часовой оси и наблюдая за экраном осциллографа, установить максимальную амплитуду отраженного сигнала около 2В.

Повернуть площадку образцов в начальное положение, соответствующее нулевым значениям угла азимута.

Измерить левую часть диаграммы рассеяния. Для этого, поворачивая **по часовой оси** площадку образцов в пределах $0 \div +180^\circ$ по азимуту, через каждые 5° по экрану осциллографа измерять амплитуду отраженного сигнала. Результаты измерений занести в табл. 8.7

По окончании измерений правой части диаграммы обратного рассеяния, установить площадку образцов в начальное положение, для чего совместить указатель угла азимута с нулевым отсчетом шкалы азимута.

Измерить правую часть диаграммы рассеяния. Для этого, поворачивая **против часовой оси** площадку образцов, в пределах $0 \div -180^\circ$, через каждые 5° по экрану осциллографа измерять амплитуду отраженного сигнала. Результаты измерений занести в табл. 8.7

Представить табличные данные в виде диаграммы в полярной системе координат. Сделать вывод о изотропности диаграммы рассеяния шара.

Таблица 8.7

Диаграмма обратного рассеяния шара

Азимут, α°	-	-	-	...	-	0	+5	...	80	85	90
------------------------	---	---	---	-----	---	---	----	-----	----	----	----

	90	85	80		5						
Амплитуда отраженного сигнала, В											

Задание 8. Исследование трехмерной диаграммы рассеяния шара.

Подключить выход установленного на раме подвижной измерительной секции приемника акустических колебаний (кабель «Приемник 2») с коаксиальным контактом «Вход» панели «Приемник» (цифра 10, рис. 8.4).

Подключить выход фиксированного на раме передатчика акустических колебаний (кабель «Передатчик») с коаксиальным контактом «Выход» панели «Передатчик» (цифра 5, рис. 8.4).

Повернуть площадку образцов в начальное положение, соответствующее нулевым значениям угла азимута.

Установить измерительную секцию в положение измерительной секции в положение кольцевой рамы, соответствующее значению отчета угла места 15° .

Установить усиление канала «Y» осциллографа равными 0,5 в/дел.

Плавное поворачивая регулятор мощности излучаемого сигнала «Мощность» (4 рис. 8.4) по часовой оси и наблюдая за экраном осциллографа, установить максимальную амплитуду отраженного сигнала около 2В.

Плавное повернуть кольцевую раму измерительной секции по часовой оси в положение начала отсчета азимута измерительной секции.

Измерить левую часть диаграммы рассеяния. Для этого, поворачивая по часовой оси кольцевую раму измерительной секции в пределах $0 \div +115^\circ$, через каждые 5° по экрану осциллографа измерять амплитуду отраженного сигнала. Результаты измерений занести в табл. 8.8.

Во время проведения измерений, с целью снижения погрешности рекомендуется убирать руки (и другие

отражающие предметы) от площадки образцов на расстояние не менее 0,7 м.

По окончании измерений правой части диаграммы обратного рассеяния, установить кольцевую раму измерительной секции в начальное положение, для чего совместить указатель угла азимута с нулевым отсчетом шкалы азимута.

Измерить правую часть диаграммы рассеяния. Для этого, поворачивая против часовой оси площадку образцов, в пределах $0 \div -15^\circ$, через каждые 5° по экрану осциллографа измерять амплитуду отраженного сигнала. Результаты измерений занести в табл. 8.8.

Затем, последовательно устанавливая измерительную секцию в позиции, соответствующие положительным значениям угла места $+15, +30, +45$ а затем отрицательным $-15, -30, -45$, для каждого положения измерить соответствующую диаграмму рассеяния. Результаты занести в табл. 8.8.

Таблица 8.8

Трехмерная диаграмма рассеяния шара

Азимут, α°	-90	-85	-80	...	-5	0	+5	...	80	85	90
Амплитуда отраженного сигнала, В (угол места измерительной секции $\beta = 0^\circ$)											
... $\beta = 15^\circ$)											
...											

На основании данных таблицы для каждого значения угла места измерительной секции построить диаграмму рассеяния в полярной системе координат. Сделать вывод о трехмерной форме диаграммы рассеяния шара.

Исследование диаграмм рассеяния сложной цели (модели самолета).

С локационной точки зрения, модель самолета представляет собой сложное, распределенное в пространстве тело, состоящее из множества отражающих поверхностей. Рассеяние зондирующего излучения такой целью будет представлять собой суперпозицию полей отраженных множеством элементов обладающих различной интенсивностью (амплитудой) и фазой (задержкой), вследствие чего диаграмма рассеяния будет иметь многолепестковый, изрезанный характер.

Задание 9. Изучение диаграммы обратного рассеяния сложной цели.

Установить макет самолета на площадку образцов подвижного шарнира курсом на излучатель.

Повернуть по азимуту на 90° подвижный шарнир и установить макет самолета перпендикулярно направлению на излучатель.

Подключить выход фиксированного на раме приемника акустических колебаний (кабель «Приемник 1») с коаксиальным контактом «Вход» панели «Приемник» (цифра 10, рис. 8.4).

Подключить выход фиксированного на раме передатчика акустических колебаний (кабель «Передатчик») с коаксиальным контактом «Выход» панели «Передатчик» (цифра 5, рис. 8.4).

Установить усиление канала «У» осциллографа равными 0,5 в/дел.

Плавно поворачивая регулятор мощности излучаемого сигнала «Мощность» (цифра 4, рис. 8.4) по часовой оси и наблюдая за экраном осциллографа, установить максимальную амплитуду отраженного сигнала около 2В.

Повернуть площадку образцов в начальное положение, (по направлению на излучатель) соответствующее нулевым значениям угла азимута.

Измерить левую часть диаграммы рассеяния. Для этого, поворачивая по часовой оси площадку образцов в пределах $0 \div +180^\circ$ по азимуту, через каждые 5° по экрану осциллографа измерять амплитуду отраженного сигнала. Результаты измерений занести в табл. 8.9.

По окончании измерений правой части диаграммы обратного рассеяния, установить площадку образцов в начальное положение, для чего совместить указатель угла азимута с нулевым отсчетом шкалы азимута.

Измерить правую часть диаграммы рассеяния. Для этого, поворачивая против часовой оси площадку образцов, в пределах $0 \div -180^\circ$, через каждые 5° по экрану осциллографа измерять амплитуду отраженного сигнала. Результаты измерений занести в табл. 8.9.

Таблица 8.9

Диаграмма обратного рассеяния макета самолета

Азимут, α°	-90	-85	-80	...	-5	0	+5	...	80	85	90
Амплитуда отраженного сигнала, В											

Представить табличные данные в виде диаграммы в полярной системе координат. Сделать вывод об особенностях рассеяния сложной цели

Задание 10. Исследование трехмерной диаграммы рассеяния сложной цели (макета самолета).

Установить макет самолета на площадку образцов подвижного шарнира курсом на излучатель.

Повернуть по азимуту на 90° подвижный шарнир и установить макет самолета перпендикулярно направлению на излучатель.

Подключить выход установленного на раме подвижной измерительной секции приемника акустических колебаний

(кабель «Приемник 2») с коаксиальным контактом «Вход» панели «Приемник» (цифра 10, рис. 2.4.4).

Подключить выход фиксированного на раме передатчика акустических колебаний (кабель «Передатчик») с коаксиальным контактом «Выход» панели «Передатчик» (цифра 5, рис. 2.4.4).

Установить усиление канала «У» осциллографа равными 0,5 в/дел.

Плавное поворачивая регулятор мощности излучаемого сигнала «Мощность» (4 рис. 2.4.4) по часовой оси и наблюдая за экраном осциллографа, установить максимальную амплитуду отраженного сигнала около 2В.

Повернуть площадку образцов в начальное положение, (по направлению на излучатель) соответствующее нулевым значениям угла азимута.

Измерить левую часть диаграммы рассеяния. Для этого, поворачивая **по часовой оси** кольцевую раму измерительной секции в пределах $0 \div +115^\circ$, через каждые 5° по экрану осциллографа измерять амплитуду отраженного сигнала. Результаты измерений занести в табл. 8.10.

По окончании измерений правой части диаграммы обратного рассеяния, установить кольцевую раму измерительной секции в начальное положение, для чего совместить указатель угла азимута с нулевым отсчетом шкалы азимута.

Измерить правую часть диаграммы рассеяния. Для этого, поворачивая против часовой оси площадку образцов, в пределах $0 \div -15^\circ$, через каждые 5° по экрану осциллографа измерять амплитуду отраженного сигнала. Результаты измерений занести в табл. 8.10.

Таблица 8.10

Трехмерная диаграмма рассеяния макета самолета

Азимут, α°	-90	-85	-80	...	-5	0	+5	...	80	85	90
Амплитуда											

отраженного сигнала, В (угол места измерительной секции $\beta = 0^\circ$)														
... $\beta = 15^\circ$														
...														

Затем, последовательно устанавливая измерительную секцию в позиции, соответствующие положительным значениям угла места $+15, +30, +45$, а затем отрицательным $-15, -30, \dots, -45$, для каждого положения измерить соответствующую диаграмму рассеяния. Результаты занести в табл. 8.10. На основании данных таблицы для каждого значения угла места измерительной секции построить диаграмму рассеяния в полярной системе координат. Сделать вывод о трехмерной форме диаграммы рассеяния сложной цели.

Задание 11. Исследование разрешающей способности локатора.

Установить двухточечную цель на площадку образцов подвижного шарнира перпендикулярно излучателю (рис. 8.6). Максимально разнести по дальности пластины двухточечной цели (R).

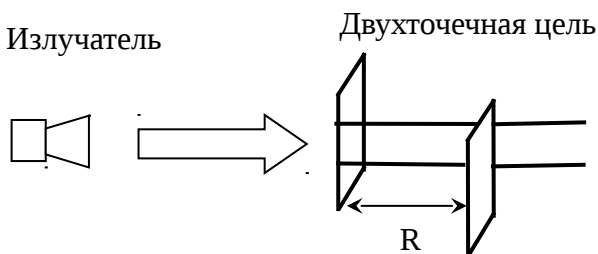


Рис. 8.6. Пространственная ориентация двухточечной цели

Подключить выход фиксированного на раме приемника акустических колебаний (кабель «Приемник 1») с коаксиальным контактом «Вход» панели «Приемник» (цифра 10, рис. 8.4).

Подключить выход фиксированного на раме передатчика акустических колебаний (кабель «Передатчик») с коаксиальным контактом «Выход» панели «Передатчик» (цифра 5, рис. 8.4).

Установить усиление канала «У» осциллографа равными 0,5 в/дел.

Плавно поворачивая регулятор мощности излучаемого сигнала «Мощность» (4 рис. 8.4) по часовой оси и наблюдая за экраном осциллографа, установить максимальную амплитуду отраженного сигнала около 2В.

На экране осциллографа наблюдать две отметки от пластин двухточечной цели. По экрану осциллографа измерить разность времен прихода сигнала Δt от второй и второй пластины цели. С помощью линейки измерить расстояние R между пластинами. Уменьшая расстояние между пластинами, линейкой измерять расстояние R и задержку Δt . Определить предел разрешения локатора как минимальное расстояние R_{\min} , при котором отметки двух целей сливаются. Результаты занести в табл. 8.11.

Построить графическую зависимость времени задержки Δt от расстояния R . Сделать вывод о минимальном расстоянии, отражающему разрешающую способность локатора.

Таблица 8.11

Зависимость задержки зондирующих импульсов
от расстояния между целями

Задержка импульсов, Δt , с				
Расстояние, R , м				

Задание 12. Масштабное моделирование наземного моноимпульсного локатора обнаружения цели.

Установить макет самолета на площадку образцов подвижного шарнира курсом на излучатель.

Подключить выход фиксированного на раме приемника акустических колебаний (кабель «Приемник 1») с коаксиальным контактом «Вход» панели «Приемник» (цифра 10, рис. 2.4.4).

Подключить выход фиксированного на раме передатчика акустических колебаний (кабель «Передатчик») с коаксиальным контактом «Выход» панели «Передатчик» (цифра 5, рис. 2.4.4).

Установить усиление канала «У» осциллографа равными 0,5 в/дел.

Плавно поворачивая регулятор мощности излучаемого сигнала «Мощность» (цифра 4, рис. 8.2) по часовой оси и наблюдая за экраном осциллографа, установить максимальную амплитуду отраженного сигнала около 2В.

С помощью устройства (цифра 9, рис. 8.1) максимально отодвинуть подвижный шарнир с макетом самолета от закрепленного на раме излучателя.

По экрану осциллографа определить время задержки t_{\max} отраженного от цели импульса от момента начала развертки (внешняя синхронизация осциллографа от выхода «Синхронизация» панели «Передатчик»). С помощью измерительной линейки измерить расстояние от излучателя до макета самолета. Результаты занести в табл. 8.12.

С помощью устройства (цифра 9, рис. 8.1) максимально приблизить подвижный шарнир с макетом самолета к закрепленному на раме излучателю.

По экрану осциллографа определить время задержки t_{\min} отраженного от цели импульса от момента начала развертки (внешняя синхронизация осциллографа от выхода «Синхронизация» панели «Передатчик»). С помощью измерительной линейки измерить расстояние от излучателя до макета самолета. Результаты занести в табл. 8.12.

Таблица 8.12

Зависимость времени задержки отраженных импульсов от
расстояния до цели

Задержка импульсов, Δt , с				
Расстояние , R, м				
Расчетное время задержки, $\tau = \frac{2R}{\vartheta}$, с				
где $\vartheta = 330$ м/с – скорость звука.				

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем учебном пособии в сжатом виде рассмотрены принципы и методы радиолокации. Приведены примеры решения типовых радиолокационных задач, представлен список задач и вопросов для практических занятий и самоконтроля обучающихся. Изложены необходимые теоретические сведения и методики изучения принципов работы и оценки технических параметров радиолокационного лабораторного оборудования.

Лица, желающие углубить свои знания в области теории и техники радиолокации, могут воспользоваться специальной литературой, указанной в библиографическом списке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васин В.В. Справочник-задачник по радиолокации. [Текст] / В.В. Васин, Б.М. Степанов. – М.: Советское радио, 1977. – 425 с.
2. Дулевич В.Е. Теоретические основы радиолокации [Текст] / В.Е. Дулевич. – М.: Советское радио, 1978. – 510 с.
3. Альбац М.Е. Радиотехнические системы [Текст] / М.Е. Альбац, А.М. Бонч-Бруевич, А.И. Дымова. – М.: Советское радио, 1975. – 550 с.
4. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации [Текст] / М.И. Финкельштейн. – М.: Радио и связь, 1983. – 370 с.
5. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов [Текст] / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1983. – 560 с.
6. Казаринов В.М. Радиотехнические системы [Текст] / Ф.П. Гришин, В.П. Ипатов, В.М. Казаринов. – М.: Высш. шк., 1990. – 470 с.
7. Пестряков В.Б. Радиотехнические ситемы. [Текст] / В.Б. Пестряков, В.Д. Кузенков. – М.: Радио и связь, 1985. – 450 с.
8. Дулевич В.Е. Теоретические основы радиолокации. [Текст] / В.Е. Дулевич. – М.: Советское радио, 1978. – 620 с.
9. Лёзин Ю.С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем [Текст] / Ю.С. Лёзин. – М.: Радио и связь, 1986. – 380 с.
10. Вентцель Е.С. Теория вероятностей [Текст] / Е.С. Вентцель. – М.: Физматгиз, 1962. – 420 с.
11. Майзельс Е.Н. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей [Текст] / Е.Н. Майзельс, В.А. Торгованов, М.А. Колосов. – М.: Советское радио, 1972.– 475 с.
12. Ледовских В.И. Исследование радионавигационной и радиолокационной системы. Методические указания к лабораторным работам №3,4 по дисциплине «Основы теории радиотехнических систем» для студентов специальности

200700 «Радиотехника» очной и очно-заочной (вечерней) форм обучения / В.И. Ледовских, В.А. Казьмин. – Воронеж: ВГТУ, 2004. – 42 с.

13. Ледовских В.И. Исследование приемника с согласованным фильтром РЛС обнаружения ЛЧМ сигналов. Методическое руководство к лабораторной работе №5 по дисциплине «Статистическая теория радиотехнических систем» для студентов специальности 210302 «Радиотехника» очной и очно–заочной форм обучения / В.И. Ледовских. – Воронеж: ГОУВПО ВГТУ, 2008. – 28 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Часть 1. Сборник задач для самостоятельной подготовки и проведения практических занятий	4
1. Физические основы радиолокации	4
1.1. Необходимые теоретические сведения. Примеры решения задач	4
1.2. Вопросы для самоконтроля	24
1.3. Задачи	25
2. Отношения правдоподобия. Синтез обнаружителей сигналов	28
2.1. Необходимые теоретические сведения. Примеры решения задач	29
2.2. Вопросы для самоконтроля	32
2.3. Задачи	32
3. Согласованные и квазисогласованные фильтры ...	43
3.1. Необходимые теоретические сведения. Примеры решения задач.....	44
3.2. Вопросы для самоконтроля	50
3.3. Задачи	50
4. Оценка параметров сигналов	61
4.1. Необходимые теоретические сведения Примеры решения задач.....	62
4.2. Вопросы для самоконтроля	64
4.3. Задачи	64
Часть 2. Методические указания к лабораторному практикуму...	69
5. Исследование равносигнального метода пеленгации на примере авиационного радиоконюаса АРК-9	69
5.1. Общие указания к выполнению работы	69
5.2. Описание лабораторной установки	70
5.3. Домашнее задание и указания по его выполнению	81
5.4. Лабораторное задание	83
5.5. Контрольные вопросы	84

6. Исследование радиолокационной станции и индикатора кругового обзора РБП-3	86
6.1. Общие указания по выполнению работы	86
6.2. Описание индикатора кругового обзора РЛС РБП-3 и блока имитатора целей	87
6.3. Домашнее задание и указания по его выполнению	103
6.4. Лабораторное задание	107
6.5. Контрольные вопросы	108
7. Исследование приемника с согласованным фильтром РЛС обнаружения ЛЧМ сигналов	109
7.1. Общие указания по выполнению лабораторной работы	109
7.2. Краткие сведения о сигналах с ЛЧМ	110
7.3. Описание лабораторной установки	118
7.4. Домашнее задание и указания по его выполнению	120
7.5. Лабораторное задание	122
7.6. Контрольные вопросы	123
8. Исследование эффективной поверхности рассеяния радиолокационных целей	125
8.1. Общие указания по выполнению лабораторной работы	125
8.2. Описание конструкции лабораторной установки	127
8.3. Домашнее задание и указания по его выполнению	134
8.4. Лабораторное задание	135
Заключение	156
Библиографический список	157

Учебное издание

Володько Александр Владиславович

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ
И КОМПЛЕКСОВ**

ПРАКТИКУМ И СБОРНИК ЗАДАЧ

Подписано в печать 16.03.2018.

Формат 60x84 1/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 10,1. Тираж 350 экз. Заказ №

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»

394026 Воронеж, Московский проспект, 14

Участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ

394026 Воронеж, Московский проспект, 14