

**В.П.Денисов**

**РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

**Методическое пособие по проведению практических  
занятий**

**ТОМСК – 2013**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

Кафедра радиотехнических систем (РТС)

**В.П.Денисов**

**РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

Методическое пособие  
по проведению практических занятий

(издание стереотипное)

**2013 г.**

Пособие рассчитано на студентов, изучающих дисциплины «Радиотехнические системы», «Радиолокационные системы», а также начинающих преподавателей, ведущих практические занятия по данным дисциплинам.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
Занятие 1 «Физические основы радиотехнических методов определения координат и скорости объектов» .....	6
Занятие 2 «Радиолокационные цели и их характеристики» .....	8
Занятие 3 «Дальность действия радиотехнических систем в свободном пространстве» .....	11
Занятие 4 «Обнаружение радиолокационных сигналов» .....	13
Занятие 5 «Влияние земли и атмосферы на дальность действия радиотехнических систем» .....	16
Занятие 6 «Импульсный метод измерения дальности» .....	18
Занятие 7 «Методы обзора пространства в радиолокации» .....	21
Занятие 8 «Селекция движущихся целей» .....	25
Занятие 9 «Спутниковые радионавигационные системы» .....	29
Литература .....	32

## ВВЕДЕНИЕ

В рамках дисциплины «Радиотехнические системы» изучаются общие вопросы построения радиотехнических систем – систем, в которых переносчиком информации служат радиоволны, и более подробно – основы радиолокации и радионавигации. В рамках дисциплины «Радиолокационные системы» основное внимание уделяется вопросам построения систем радиолокации.

Указанные виды радиосистем объединяются общностью основной решаемой задачи – определение местоположения объектов в пространстве радиотехническими средствами.

Методы радиолокации и радионавигации основаны на одних и тех же принципах. Поэтому в курсе вначале рассматриваются радиотехнические методы и средства определения местоположения объектов и параметров их движения, а затем эти сведения применяются к описанию принципов построения радиолокационных и радионавигационных систем, а также для получения расчетных соотношений, определяющих их тактико-технические характеристики.

Другая важная часть радиосистем – системы передачи информации, изучается студентами в иных курсах. В данном пособии приводятся предложения по проведению практических занятий. Автор считает, что пособие будет полезно студентам, готовящимся к практическим занятиям, а также начинающим преподавателям, у которых еще не сложилась собственная методика их проведения.

Независимо от объема лекционного курса учебные планы различных специальностей предусматривают проведение 8-9 практических занятий (один раз в две недели). Ниже приводится примерный перечень рекомендуемых тем практических занятий.

Примерный перечень тем практических занятий.

1. Физические основы радиотехнических методов определения координат и скорости объектов.
2. Радиолокационные цели и их характеристики.
3. Дальность действия радиотехнических систем в свободном пространстве.
4. Обнаружение радиолокационных сигналов.
5. Влияние земли и атмосферы на дальность действия радиотехнических систем.
6. Импульсный метод измерения дальности.
7. Методы обзора пространства в радиолокации.
8. Селекция движущихся целей.
9. Спутниковые радионавигационные системы.

Тема очередного практического занятия определяется преподавателем, его проводящим, по согласованию с лектором. Тема занятия объявляется студентам заранее, чтобы они смогли к нему подготовиться.

Занятие начинается с опроса студентов по теме и разъяснения преподавателем ключевых вопросов темы. Для этого используются помещенные в пособия контрольные вопросы.

После того как, по мнению преподавателя, студенты овладели необходимым минимумом знаний по теме занятия, группа переходит к решению задач. Задачи решаются студентами самостоятельно. За одно занятие подготовленный студент должен, как правило, решить 5-6 задач. Если студент не успевает решить все заданные задачи в течение академической пары часов, оставшиеся задачи он должен решить дома к следующему занятию. Преподаватель должен проконтролировать каждого студента и убедиться, что он понимает существо задачи и методику ее решения. Это можно сделать только в ходе личной беседы.

Справочный и теоретический материал, необходимый для решения задач, содержится в «Справочнике-задачнике по радиолокации» (авторы В.В.Васин, Б.М.Степанов) [1], а также в учебном пособии [2].

Большинство из предлагаемых для решения задач заимствовано из справочника-задачника [1], хотя в условия

ряда из них внесены значительные изменения. В пособии вслед за порядковым номером заимствованных задач в скобках указаны их номера в справочнике-задачнике.

## **Занятие 1 «Физические основы радиотехнических методов определения координат и скорости объектов»**

Обычно первое практическое занятие проводится еще до того, как студенты на лекциях получили достаточный теоретический материал для самостоятельного решения задач. Поэтому первое занятие проводится по особой схеме: первый час из академической пары преподаватель коротко излагает теоретический материал. Его содержание заключается в следующем.

### **1. Измерение дальности.**

Студентам известно, что все радиотехнические методы измерения дальности основаны на измерении временной задержки между излученным сигналом и сигналом отраженным от объекта наблюдения (или переизлученным им). Преподаватель поясняет, что существующие методы измерения дальности различаются тем, как измеряется задержка, что в свою очередь зависит от вида излучаемого (зондирующего) сигнала. Далее преподаватель излагает принципы работы и приводит обобщенные структурные схемы импульсного, частотного и фазового дальномеров. Поясняются причины возникновения неоднозначности измерений при использовании периодического зондирующего сигнала.

### **2. Измерение угловых координат (пеленгование).**

Напомнить студентам, что угловые координаты источников радиоизлучения (переизлучения) определяются как положение нормали к фазовому фронту принимаемой радиоволны в предположении, что среда распространения радиоволн однородна, и что все методы пеленгования делятся на амплитудные (где используются направленные свойства антенн) и фазовые, где используется разность фаз сигналов, принятых на разнесенные антенны, которые могут быть и не направленными. С амплитудным методом студенты в общих

чертах познакомились в курсе «Устройства СВЧ и антенны». Поэтому на практическом занятии надо уделить время фазовому методу: начертить простейшую структурную схему двухканального пеленгатора, пояснить связь между погрешностями измерения разности фаз и пеленга, пояснить, как определяются секторы однозначного пеленгования.

### 3. Измерение радиальной скорости.

Студентам известно, что радиальная скорость в радиолокации и радионавигации измеряется по эффекту Доплера. Обратить внимание студентов, что формулы, связывающие доплеровский сдвиг частоты и радиальную скорость объекта различны для ситуаций, когда принимается сигнал, излученный движущимся передатчиком (случай, типичный для радионавигации), и когда сигнал, отраженный от объекта наблюдения, принимается приемником, расположенным в том же месте, где и источник излучения (случай, типичный для активной локации).

Решение предлагаемых далее простых задач имеет целью продемонстрировать принципы координатных измерений и показать порядок измеряемых радиотехнических величин.

## Задачи

1 (1.4) 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.

2 (1.5) 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?

3 (1.11) Цель удалена от РЛС на 75 км. Какую дальность до цели покажет индикатор станции, если период следования импульсов равен 300 мкс?

4(1.13) В РЛС с симметричным пилообразным законом изменения частоты колебаний  $F_1 = 100$  Гц,  $\Delta f_1 = 10^5$  Гц, а

дальность обнаруженной цели 300 км. Чему равна разностная частота сигнала в приемнике?

5 (1.25) Определить разность фаз колебаний при измерении угловой координаты фазовым методом, если расстояние между приемными антеннами равно 75 см, длина волны 25 см и угол между направлением на источник сигнала и осью симметрии антенной системы  $\alpha = 5^\circ$ .

6 (1.28) Определить доплеровское смещение частоты сигналов, отраженных от движущегося в направлении РЛС человека, если скорость движения лежит в пределах от 2 до 5 км/ч, а длина волны РЛС равна 3 см. Какие требования должны быть предъявлены к стабильности высокочастотного генератора РЛС, если допустимы уходы частоты не более 20% от измеряемого доплеровского смещения?

7 (1.31) Когерентно-импульсная РЛС наблюдения за искусственными спутниками Земли работает на волнах длиной 10 см при длительности импульсов 20 мкс. Обнаружит ли РЛС спутник, движущийся прямо на нее с радиальной скоростью 8 км/с, если полоса пропускания приемника согласована с длительностью излучаемых импульсов ( $\Delta f_{\text{п.д}} = 1/\tau_{\text{п.д}}$ )?

## **Занятие 2 «Радиолокационные цели и их характеристики»**

Объекты радиолокационного наблюдения принято называть целями. В теории радиолокационные цели делят на элементарные и сложные, точечные и распределенные. По характеру вторичного излучения различают следующие отражающие объекты: 1) одиночные, 2) групповые, 3) распределенные. Вторичное излучение разделяется на зеркальное отражение, диффузное рассеяние (отражение от шероховатых поверхностей) и резонансное переизлучение. Во всех случаях объекты радиолокационного наблюдения характеризуются эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР).

При изучении материала раздела необходимо уяснить

определение эффективной поверхности рассеяния целей и ее физический смысл, знать методику определения ЭПР простых и распределенных целей. Следует обратить внимание на то, что ЭПР реальных целей является случайной величиной, следует знать законы распределения вероятностей амплитуд и мощности отраженных сигналов, а также спектры флуктуаций ЭПР и уметь пользоваться полученными распределениями при решении задач, иметь представление о флуктуациях фазового центра цели.

### Контрольные вопросы

1. От чего зависит ЭПР цели?
2. Какие цели называются простыми (элементарными)?  
Как определяется ЭПР простых целей?
3. Что такое сложная цель? Какому закону подчинено распределение вероятностей ЭПР сложной цели?
4. Объясните причины возникновения флуктуаций ЭПР сложной цели. Зачем нужно знать спектр флуктуаций ЭПР?
5. Как зависит ЭПР цели от длины волны РЛС?
6. Назовите виды отражений РЛ сигналов и укажите, в каких случаях возникают те или иные виды отражений.
7. От чего зависит ЭПР распределенных целей?
8. Как можно измерить ЭПР образца военной техники?

### Задачи

1 (2.2) РЛС обнаруживает четырехвинтовой пассажирский самолет на расстоянии  $D_1 = 300$  км с заданными вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги. На каком расстоянии  $D_2$  эта же РЛС обнаружит реактивный истребитель?

2 (2.4) Найти радиус шара  $R$ , сторону квадратной пластины  $a$ , длину ребра углового отражателя  $b$ , имеющих эффективную отражающую площадь при  $\lambda = 3$  см, равную эффективной отражающей площади крейсера.

3 (2.7) Цель представляет собой два одинаковых

изотропных точечных переизлучателя, расположенных на неотражающей штанге длиной  $l_0 = 10$  м. Найти значение углов  $\alpha$  положения цели относительно локатора, при которых эта цель имеет наибольшую и наименьшую отражающую площадь при  $\lambda = 3$  см.

4 (2.8) Определить ширину лепестков диаграммы переизлучения двухточечной цели в задаче 2.7.

5 (2.9) Самолет совершает прямолинейный полет со скоростью  $v = 2500$  км/ч, пролетая мимо РЛС, имеющей длину волны  $\lambda = 10$  см, на минимальном расстоянии  $D = 50$  км. Оценить частоту флуктуаций амплитуды сигнала, отраженного от самолета, принимая последний за двухточечную цель с  $l_0 = 20$  м.

6 (2.11) Сложная реальная цель имеет среднее значение эффективной отражающей площади  $\bar{\sigma} = 20$  м<sup>2</sup>. Вероятность того, что случайное значение  $\sigma$  превысит расчетную величину  $\sigma_0$  равна 0,9. Найти  $\sigma_0$ .

7 (2.14) Определить эффективную отражающую площадь  $\bar{\sigma}$  для случая наблюдения земной поверхности с помощью самолетной панорамной РЛС импульсного типа при следующих условиях: длина волны сигнала РЛС  $\lambda = 3$  см, длительность импульса  $\tau_0 = 0,5 \cdot 10^{-6}$  с, длина раскрыва антенны в азимутальной плоскости  $d_a = 1,5$  м, дальность наблюдаемого участка  $D = 100$  км, высота полета  $H = 10$  км; характер наблюдаемой поверхности: а) местность, поросшая молодым лесом; б) бетонное покрытие.

8 (2.18) Радиолокационная станция имеет данные: длина волны  $\lambda = 3$  см, ширина луча антенны  $\theta_{ac} = \theta_{ai} = 4^\circ$ , длительность импульса  $\tau_0 = 0,5 \cdot 10^{-6}$  с, дальность обнаружения  $D = 30$  км. Определить эффективную отражающую площадь дождя интенсивностью  $p = 5$  мм/ч.

Задачи 3-5 – фактически одна задача. В процессе ее решения студенты должны уяснить механизм возникновения флуктуаций ЭПР сложных целей.

### **Занятие 3 «Дальность действия радиотехнических систем в свободном пространстве»**

Дальность действия – важнейший тактический параметр большинства РТС. Поэтому ее расчету посвящено два занятия. Первое посвящено расчету дальности действия в свободном пространстве, второе – учету факторов, влияющих на дальность действия в тропосфере вблизи поверхности земли.

На первом занятии рассматриваются вопросы выбора основных параметров РТС для обеспечения необходимой дальности ее действия, то есть максимальной дальности, при которой удовлетворяются предъявляемые к РТС технические требования. В литературе наряду с термином "дальность действия" употребляется термин "максимальная дальность действия". Методически дальность действия рассчитывается следующим образом. Вычисляется мощность сигнала на входе приемника РТС как функция дальности и приравнивается минимальной принимаемой мощности, при которой удовлетворяются основные тактико-технические требования (ТТТ), предъявляемые к РТС. Из этого уравнения находится дальность действия. Минимальная принимаемая мощность определяется уровнем собственных шумов приемника, приведенных ко входу, а также требуемыми качественными показателями обнаружения или точностью измерения. Последние зависят от назначения РТС.

Основой для проведения занятия является уравнение, определяющее дальность действия линии связи в свободном пространстве, а также основное уравнение радиолокации, определяющее дальность действия активного лоатора.

При изучении данной темы следует уяснить зависимость дальности действия от основных параметров РТС; мощности (энергии) излучения, чувствительности приемника, длины волны, эффективной приемной площади антенны и др.

Обратить внимание студентов, что коэффициент различимости – минимально необходимое отношение сигнал/шум по мощности на входе приемника, может быть существенно меньше единицы, если в линии связи (активной РЛС) излучается сигнал сложной формы, а в приемном тракте

производится его оптимальная обработка.

### Контрольные вопросы

1. Напишите формулу для дальности действия линии связи в свободном пространстве и поясните входящие в нее величины.

2. Напишите формулу дальности радиолокационного обнаружения в свободном пространстве и поясните входящие в нее величины.

3. Как сказывается длина волны на дальность радиолокационного обнаружения в свободном пространстве?

4. Как определяется дальность действия РЛС при активном ответе?

5. Что такое коэффициент различимости?

6. Что такое коэффициент усиления антенны? Как он связан с эффективной приемной площадью?

### Задачи

1 (5.3) Рассчитать дальность действия  $D_{1 \text{ эф}}$  в свободном пространстве наземной радиолокационной станции, характеризующейся следующими данными:

$$P_{\text{эф}} = 1 \text{ кВт}, \quad \tau_{\text{с}} = 1 \text{ мкс}, \quad S_{\text{ра}} = S_{\text{пр}} = 15 \text{ м}^2, \\ \bar{\sigma} = 10 \text{ м}^2, \quad k_{\text{о}} = 20, \quad k_{\text{д}} = 25, \quad \lambda = 10 \text{ м}.$$

Температуру приемника принять равной  $300^\circ\text{К}$ .

2 (5.5) До какого предела  $D_{1 \text{ эф}}$  целесообразно увеличивать дальность действия наземной станции обнаружения самолетов, если максимальная высота полета целей составляет 30 км? Поглощение в атмосфере не учитывать.

3 (5.9) Показать, что независимо от работы РЛС в непрерывном или импульсном режимах, параметром передатчика, влияющим на дальность действия станции, является средняя мощность генерируемых колебаний.

4 (5.12) Каково значение коэффициента различимости  $k_{\text{д}}$

в самолетной РЛС с непрерывным излучением при следующих значениях параметров: дальность обнаружения целей в свободном пространстве 40 км,

$$\lambda = 2 \text{ м}, \quad k_{\phi} = 20, \quad \bar{\sigma} = 5 \text{ м}^2, \quad S_{i\delta} = S_{i\delta\delta} = 0,5 \text{ м}^2,$$

$$P_{\text{дс}} = 50 \text{ Вт}, \quad T_0 = 300^\circ \text{К}, \quad \tau_{\text{п}} = T_{i\delta\delta} = 2 \text{ мс}.$$

5 (5.15) Используется полуактивная система наведения ракет на цель (цель облучается радиолокационной станцией, а аппаратура ракеты принимает отраженные сигналы). Построить график зависимости максимального расстояния захвата сигналов цели ракетой от расстояния между РЛС и целью при следующих значениях параметров РЛС:  $P_{\text{дс}} = 200 \text{ кВт}$ ,  $\tau_{\text{э}} = 1 \text{ мкс}$ ,  $G_{i\delta\delta} = 500$ ,  $\bar{\sigma} = 10 \text{ м}^2$ ,  $\lambda = 3 \text{ см}$ ; аппаратуры ракеты:  $G_{i\delta} = 100$ ,  $k_{\phi} = 25$ ,  $k_{\delta} = 10$ . Поглощение энергии радиоволн в тропосфере не принимать во внимание.

6 (5.28) В направлении РЛС один за другим на дистанции 100 м летят несколько однотипных самолетов. Насколько дальность обнаружения группы больше дальности обнаружения одиночного самолета, если  $\tau_{\text{э}} = 2 \text{ мкс}$ ?

7 (5.29) Самолетная панорамная РЛС имеет дальность действия 300 км по кораблю с  $\bar{\sigma} = 5000 \text{ м}^2$ . Какова дальность действия  $D_1$  этой РЛС по берегу моря, представляющему собой ровную необработанную почву, если ширина луча по азимуту равна  $1^\circ$ , длительность импульсов – 1 мкс, высота полета – 10 км?

#### **Занятие 4 «Обнаружение радиолокационных сигналов»**

Теоретической основой данного раздела курса является теория статистических решений, знакомая студентам по предшествующим дисциплинам. Залогом к успешному освоению темы является уяснение существа критериев оптимальности, а также того, что все они приводят к одному и тому же правилу принятия решения о наличии либо отсутствии сигнала - вычислению отношения правдоподобия и

сравнению его с порогом. Вид отношения правдоподобия зависит от принятой модели сигналов и помех (т.е. от формы их математического представления), а порог – от выбранного критерия оптимальности. Надо помнить формулу отношения правдоподобия для простейших моделей сигнала, принимаемого на фоне нормального белого шума, уметь находить величину порога при использовании критерия Неймана-Пирсона как наиболее употребительного в радиолокации, а также уметь на основании отношения правдоподобия строить схемы оптимальных обнаружителей. Надо знать, что такое согласованные фильтры, каковы их свойства и как они используются при построении оптимальных обнаружителей одиночных радиоимпульсов и пачек радиоимпульсов.

В зависимости от степени готовности группы для изучения данной темы может понадобиться не одно, а два практических занятия.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие критерии оптимальности обнаружения Вам известны? В чем они заключаются?
2. В чем заключается правило принятия решения о наличии сигнала, оптимальное по критерию Неймана-Пирсона?
3. Укажите, от каких величин зависит вероятность ложной тревоги и правильного обнаружения в схеме корреляционного обнаружителя.
4. Поясните, что такое отношение правдоподобия, от чего оно зависит и как используется при построении оптимальных обнаружителей.
5. Поясните связь частотной характеристики согласованного фильтра со спектром принимаемого сигнала.
6. Укажите, какими величинами определяется отношение сигнал-шум на выходе согласованного фильтра.
7. Что такое нормальный белый шум? Подходит ли под это определение собственный шум приемных устройств?
8. Охарактеризуйте методику использования кривых

обнаружения для расчета коэффициента различимости.

9. Поясните структуру согласованного фильтра для обработки пачки когерентных радиоимпульсов.

10. Что такое корреляционный интеграл?

### Задачи

1 (4.2) Приняв, что априорные сведения о наличии цели отсутствуют ( $P(\tilde{N}) = P(\hat{I}) = 0,5$ ), вероятность правильного обнаружения  $P_{\text{ii}}$  цели может лежать в пределах от 0,9 до 0,99 и вероятность ложной тревоги  $P_{\text{eo}}$  – от 0,01 до 0,1, указать значения  $P_{\text{ii}}$  и  $P_{\text{eo}}$ , соответствующие:

а) максимальной вероятности принятия правильного решения при обнаружении цели;

б) максимальной вероятности ошибки.

2 (4.7) Оценить требуемое увеличение отношения сигнал/шум при переходе от обнаружения полностью известного сигнала к обнаружению сигнала с неизвестной фазой и флуктуирующей амплитудой. Принять  $P_{\text{ii}} = 0,9$  и  $0,99$ ;  $P_{\text{eo}} = 10^{-4}$  и  $10^{-8}$ .

3 (4.11) Осуществляется обнаружение сигнала с флуктуирующей амплитудой и неизвестной начальной фазой; индикатор дальность–азимут с яркостной отметкой. Определить требуемое отношение сигнал/шум, если  $P_{\text{ii}} = 0,9$ ,  $P_{\text{eo}} = 10^{-3}$  и на экране индикатора располагаются 10 000 элементов разрешения ( $100 \times 100$ ).

4 (4.14) Определить требуемое значение отношения сигнал/шум  $q$  и коэффициент различимости  $k_{\delta}$ , если нужно обеспечить обнаружение цели когерентно-импульсной РЛС при  $P_{\text{ii}} = 0,95$  и  $P_{\text{eo}} = 10^{-4}$  по пачке из 2500 импульсов. Произведение всех коэффициентов потерь принять равным 10.

5 (4.20) Имеется радиолокационная станция, работающая в режиме кругового обзора. Путем изменения мощности излучения РЛС вероятность правильного обнаружения цели за одно облучение может быть сделана равной 0,5 или 0,7 при

$P_{\text{эб}}=10^{-4}$ . В каком из режимов работы потребуется меньшая суммарная энергия сигнала, если нужно обнаруживать цель с вероятностью правильного обнаружения не менее 0,94? Потерями в тракте РЛС пренебречь и для расчета необходимого отношения сигнал/шум воспользоваться формулой:

$$\bar{q} = 2[\ln(1/P_{\text{эб}})/\ln(1/P_{\text{и}}) - 1]$$

6 (4.23) Имеется трехканальная трехчастотная радиолокационная станция с двумя вариантами вторичной обработки сигналов: суммирование выходных напряжений приемников всех трех каналов ( $U_1 + U_2 + U_3$ ) и перемножение выходных напряжений ( $U_1 U_2 U_3$ ). Каковы вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги системы, если значения этих вероятностей в каждом канале равны  $P_{\text{и}}$  и  $P_{\text{эб}}$ ?

7 (4.24) Сравнить по требуемым энергетическим затратам одноканальную некогерентную РЛС и трехканальную трехчастотную станцию с суммированием выходных напряжений каналов при условии, что результирующие значения вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги в обоих случаях одинаковы и равны  $P_{\text{и}}=0,95$  и  $P_{\text{эб}}=10^{-3}$ . Обнаруживаются сигналы со случайной начальной фазой и флуктуирующей амплитудой. Использовать формулы, полученные в предыдущей задаче.

### **Занятие 5 «Влияние земли и атмосферы на дальность действия радиотехнических систем»**

Данное практическое занятие должно расширить знания студентов в области расчета дальности действия РТС. В дополнение к уже изученной методике расчета дальности действия в свободном пространстве они должны уяснить влияние на дальность действия отражений радиоволн от поверхности земли, рефракции, поглощения и рассеяния радиоволн в атмосфере, потерь энергии в приемном и передающем трактах, отличия способа обработки сигналов от оптимального.

### Контрольные вопросы

1. Какие факторы, не учтенные в основном уравнении радиолокации, влияют на дальность действия РЛС?
2. Как рассчитать дальность прямой радиовидимости?
3. Что такое «нормальная рефракция»?
4. На каких волнах сильнее сказывается отражение радиоволн от земли и почему?
5. Какие факторы вызывают поглощение радиоволн в тропосфере?
6. Как условия распространения сказываются на выборе длины волны? Какой диапазон волн предпочтителен для использования в РТС, работающих за пределами атмосферы, и почему?
7. Объясните причину трудности радиолокационного обнаружения низколетящих целей.

### Задачи

1 (5.8) Самолетная РЛС с учетом поглощения энергии радиоволн в тропосфере должна иметь дальность действия 40 км. Какова должна быть ее дальность действия в свободном пространстве, если  $\lambda=2$  см и учитывается поглощение в дожде интенсивностью 4 мм/ч и в кислороде воздуха на всей дальности действия станции?

2 (5.9) Показать, что независимо от работы РЛС в непрерывном или импульсном режимах, параметром передатчика, влияющим на дальность действия станции, является средняя мощность генерируемых колебаний.

3 (5.14) Определить дальность обнаружения источника активного излучения радиолокационной станцией, если этот источник излучает среднюю мощность 1 Вт в полосе 1 МГц и имеет коэффициент усиления антенны  $G_a=5$ , а РЛС характеризуется следующими данными:  $S_{i\delta}=0,5$  м<sup>2</sup>,  $k_\delta=30$ ,  $T_0=300^\circ\text{E}$ ,  $k_\delta=67$ , среднее время облучения цели основным

лепестком диаграммы направленности антенны  $T_{i\delta} = 0,5$  мс, полоса пропускания приемника  $\Delta f_{i\delta} = 1$  МГц. Коэффициент поглощения энергии радиоволн принять равным  $\delta_i = 0,2$  дБ/км.

4 (5.16) Найти значения угла места  $\beta_{i\delta n}$  и  $\beta_{i\delta f}$ , соответствующие максимумам и минимумам диаграммы направленности антенны наземной РЛС в вертикальной плоскости, если  $H_a = 6$  м,  $\lambda = 2$  м.

5 (5.17) Оценить дальность действия РЛС метрового диапазона для  $\beta_{\alpha} = 0,5^\circ$ , если высота подъема антенны равна 5 м, длина волны – 4 м, а дальность действия в свободном пространстве – 200 км.

6 (5.22) Для обнаружения самолетов используется РЛС дециметрового диапазона ( $\lambda = 0,3$  м). Максимум диаграммы направленности антенны РЛС в свободном пространстве был бы расположен горизонтально. Определить ширину  $\theta_0$  нижнего лепестка диаграммы видимости РЛС с учетом влияния Земли при условии, что высота центра антенны над поверхностью Земли составляет 5 м; ширина основного лепестка диаграммы направленности антенны в свободном пространстве равна  $14^\circ$ .

7 (5.23) Применительно к условиям предыдущей задачи определить дальность обнаружения самолета, летящего на высоте 100 м над земной поверхностью, если дальность действия РЛС по аналогичному самолету в свободном пространстве составляет 125 км. Принять, что  $F(\beta_{\alpha}) \approx F(0) = 1$ .

### **Занятие 6 «Импульсный метод измерения дальности»**

Все методы измерения дальности можно разделить на две группы – использующие непрерывное излучение и импульсное. К методам, использующим непрерывное излучение, относятся фазовый и частотный. К анализу каждого из методов надо подходить с общих позиций оценки пределов измерения (минимальный и максимальный),

точности и разрешающей способности. При оценке точности и разрешающей способности следует выявить потенциальные возможности метода и их ухудшение в реальной аппаратуре за счет ее несовершенства. Потенциальная точность измерений характеризуется дисперсией эффективной оценки измеряемой величины и для всех методов измерения временной задержки сигнала, принимаемого на фоне нормального белого шума, зависит от среднеквадратической ширины спектра зондирующего сигнала и отношения энергии принятого сигнала за время измерения к спектральной плотности собственного шума приемника, приведенного ко входу. Потенциальная разрешающая способность для всех методов зависит от эффективной ширины спектра сигнала. Понятия «среднеквадратическая ширина спектра» и «эффективная ширина спектра» не совпадают. Для оценки потенциальной разрешающей способности по дальности и радиальной скорости используют функцию неопределенности. Надо знать сущность и математическую формулировку принципа неопределенности в радиолокации, устанавливающего предельные возможности разрешения по дальности и радиальной скорости, иметь представление о диаграммах неопределенности типовых сигналов.

При изучении импульсного метода следует особое внимание обратить на структурные схемы дальномеров с визуальной индикацией на ЭЛТ, где в наиболее наглядной форме проявляется существо метода, а также на применение сигналов сложной формы: с внутриимпульсной линейной частотной модуляцией и фазо-кодовой манипуляцией. Надо представлять способы формирования таких сигналов в передающем тракте и их оптимальной обработки в приемном тракте, позволяющие использовать потенциальные возможности в плане обнаружения, разрешения и точности измерения (метод сжатия импульсов).

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое потенциальная точность измерения дальности? Как ее можно оценить?

2. Что такое потенциальная разрешающая способность по дальности? Как она связана с функцией неопределенности по дальности и скорости?

3. Как можно осуществить сжатие импульса по длительности? Что такое база сигнала и коэффициент сжатия?

4. Как влияет индикаторное устройство в импульсном дальномере на разрешающую способность по дальности?

5. Что такое сигналы сложной формы? Зачем они применяются в радиолокации и радионавигации?

6. Какие схемы обеспечивают получение потенциальной разрешающей способности по дальности?

7. Какие технические требования предъявляются к антенным коммутаторам в импульсных дальномерах?

8. Начертите структурную схему импульсного дальномера, имеющего индикатор на электронно-лучевой трубке (ЭЛТ) с линейной разверткой и амплитудной отметкой.

9. Зачем в импульсных дальномерах применяются двушкальные индикаторы? Как они устроены? От чего зависит их точность?

### Задачи

1 (7.12) Оценить среднеквадратическую ошибку отсчета дальности по индикатору с механической шкалой, имеющей предельное значение 400 км и интервал между делениями 12 мм. Используется трубка с диаметром экрана 300 мм, коэффициент использования экрана  $k_y = 0,8$ . Начертить структурную схему дальномера, эпюры напряжений в характерных точках схемы, указать периоды и длительности импульсов, следующие из условия задачи.

2 (7.13) Оценить результирующую ошибку измерения дальности в задаче (1), если в РЛС используются импульсы гауссовой формы длительностью 3 мкс и сигнал обнаруживается при  $q_0 = \frac{2E}{N_0}$ . Определить коэффициент

ухудшения потенциальной точности. Начертить структурную схему дальномера, эпюры напряжений в характерных точках

схемы, указать периоды и длительности импульсов, следующие из условия задачи.

3 (7.14) Используя условия и данные задач (1) и (2), изменим с целью повышения точности измерений метод отсчета – применим двухшкальный отсчет со ступенчатой задержкой развертки с  $D_{\phi \epsilon} = 100$  км. Отсчет по этой шкале ведется по электронным меткам с интервалом 12 мм. Определить результирующую ошибку измерения дальности и коэффициент ухудшения точности. Начертить структурную схему дальномера, указать периоды и длительности импульсов, следующие из условия задачи.

4 (7.15) Как изменится ошибка измерения дальности, определенная в предыдущей задаче, если отсчет по шкале  $D_{\phi \epsilon} = 100$  км производить не по электронной шкале, а совмещением измерительного импульса (электронного визира) с отметкой цели с последующим отсчетом по шкале потенциометра, имеющей цену деления 100 м? Принять качество фокусировки  $Q_0 = 300$  и коэффициент использования экрана  $k_y = 0,8$ . Начертить структурную схему дальномера, эпюры напряжений в характерных точках схемы, указать периоды и длительности импульсов, следующие из условия задачи.

### **Занятие 7 «Методы обзора пространства в радиолокации»**

В радиолокационных системах обзор по дальности происходит естественным путем – за счет распространения радиоволн от РЛС до цели и обратно. Из-за высокой скорости их распространения обзор всего интервала дальности производится очень быстро. Поэтому, говоря о радиолокационных методах обзора пространства, имеют в виду обзор по угловым координатам. Метод обзора пространства радиолокационной станцией теснейшим образом связан с методом измерения угловых координат и во многом определяет все ее построение. Поэтому, изучая данный раздел,

студенты одновременно должны знакомиться с построением радиолокационных станций разных типов.

Однолучевые и многолучевые РЛС могут иметь мгновенный (одновременный), последовательный и параллельно-последовательный (смешанный) методы обзора. Его выбор зависит от назначения РЛС и предъявляемых к ней тактических требований.

В процессе занятия студенты должны уяснить принципы построения РЛС, имеющих различные способы обзора (уметь строить их функциональные схемы), а также освоить методику расчета времени обзора.

### Контрольные вопросы

1. Как определяется минимальный период обзора при последовательном обзоре по угловым координатам?
2. Какова оптимальная форма диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости в панорамных самолетных станциях обзора земной поверхности?
3. Что такое коэффициент обзора?
4. Начертите функциональную схему РЛС кругового обзора, в которой используется импульсный метод измерения дальности.
5. Что такое обзор пространства по гибкой программе?
6. Что такое винтовой обзор пространства?
7. Что такое РЛС бокового обзора с синтезированной антенной (РСА)?
8. Как используется эффект Доплера при построении РСА?
9. От чего зависит разрешающая способность РСА по дальности?
10. Начертите структурную схему РСА с антенной фокусированного типа.

### Задачи

1 (3.3) Наземная станция обнаружения самолетов имеет плоский луч шириной  $1^\circ$  по азимуту. Луч вращается со скоростью 6 об/мин. Определить время облучения цели  $T_{\text{и.д.с}}$  и число  $N_n$  принимаемых отраженных импульсов, если частота следования излучаемых импульсов 500 имп/с.

2 (3.2) Показать, что если заданы средняя мощность излучения передатчика  $P_{\text{п0}}$  и требуемая полная энергия

сигнала на входе приемника  $E_n$ , то при использовании как импульсной РЛС, так и станции с непрерывным излучением, требуется одинаковое время облучения цели. Предположить, что все прочие условия (направленность антенны, поглощение энергии в тропосфере, отражающие свойства цели и т.д.) в обоих случаях одинаковы.

3 (3.5) Допустив, что для надежного обнаружения цели на фоне шумов летчик должен трижды увидеть ее отметку, определить допустимые пределы изменения периода обзора  $T_{i\acute{a}c}$  самолетной РЛС обнаружения. Дальность действия станции составляет 50 км; сокращение дальности обнаружения целей, вызванное троекратным наблюдением их отметок, не должно превышать  $0,05D_{i\acute{a}e\grave{n}}$ ; скорость сближения самолета с целью может достигать 2500 км/ч.

4 (3.7) При поиске цели по дальности (в системе автоматического дальномера) за время прохождения временных стробов дальномера мимо сигнала цели принимаются 50 отраженных импульсов. Чему равно время поиска на интервале 10 км, если ширина стробов соответствует  $\Delta D = 100$  м, а частота следования импульсов РЛС 2000 имп/с? Начертить структурную схему дальномера и эпюры напряжений в характерных точках схемы.

5 (3.23) В самолетной панорамной РЛС используется электрическое сканирование по азимуту. Каков сектор обзора РЛС, если допустимое расширение луча равно 5%?

6 (3.19) Определить время облучения точечной цели при использовании когерентно-импульсной фокусированной РЛС бокового обзора, если  $\theta_{0,5} = 1^\circ$ ,  $D = 300$  км и  $v = 1000$  км/ч. Сравнить результат расчета с временем облучения точечной цели при использовании нефокусированной РЛС для  $\lambda = 3$  см.

7 (3.18) Чему равен угол поворота антенны РЛС за время, равное времени запаздывания отраженного сигнала от цели, находящейся на дальности 250 км? Скорость вращения антенны равна 6 об/мин.

## Занятие 8 «Селекция движущихся целей»

Рассматривается селекция движущихся целей на фоне пассивных помех. Пассивными помехами называют мешающие отражения от неподвижных или медленно перемещающихся объектов. Обнаружение сигналов в пассивных помехах основано на различии их свойств. Основной причиной, обуславливающей эти различия, являются разные скорости движения цели и пассивной помехи. Неодинаковость скоростей и характера движения приводит к разнице в спектрах доплеровских частот полезных сигналов и помех.

Для борьбы с пассивными помехами используют также различия в поляризованных свойствах сигналов и помех.

В ходе практического занятия студенты должны уяснить способы статистического описания помех, различия в статистических свойствах сигналов и помех (в частности, в энергетических спектрах), влияние пассивных помех на наблюдаемость радиолокационных сигналов.

Методы селекции сигналов, принимаемых на фоне пассивных помех, делятся на когерентные (основанные на эффекте Доплера) и некогерентные, к которым относятся все остальные.

Основное внимание следует уделить когерентным методам селекции движущихся целей, как наиболее эффективным и распространенным в современной радиолокации. Студенты должны иметь четкое представление о физических принципах, используемых в системах когерентной селекции, принципах построения функциональных схем когерентных РЛС, использующих непрерывное и импульсное излучение, уметь с помощью математических выкладок показать, что они действительно производят селекцию движущихся целей.

Когерентно-импульсные локаторы делят на системы с внутренней и внешней когерентностью. Это деление основано на способе (месте) получения напряжения, когерентного с излучаемым импульсным сигналом.

Следует обсудить принципы классификации и основные

схемы когерентно-импульсных локаторов с внутренней когерентностью, соотношение между доплеровским смещением частоты и частотой повторения излучаемых импульсов для однозначного измерения скорости, что такое слепые скорости и каким образом их можно устранить. Для улучшения условий наблюдаемости полезных сигналов в когерентно-импульсных локаторах применяются устройства компенсации пассивных помех. Обсудить схему и работу компенсирующего устройства (с одиночной и двойной компенсацией), частотную характеристику компенсирующего устройства и требования, предъявляемые к его отдельным узлам.

В литературе качество работы компенсирующих устройств характеризуется различными параметрами, причем их определения не всегда совпадают.

В данном курсе используется коэффициент подавления помехи, представляющий собой отношение мощности помехи на входе компенсирующего устройства к мощности помехи на выходе, а также коэффициент улучшения отношения сигнал/помеха на выходе устройства по отношению ко входу.

### **Контрольные вопросы**

1. Как зависит уровень пассивных помех от параметров РЛС? В чем сущность пространственной селекции?
2. В чем сущность когерентного метода селекции движущихся целей?
3. Начертите структурную схему когерентной РЛС с непрерывным излучением сигналов.
4. Начертите структурные схемы когерентно-импульсных РЛС с синхронизацией от когерентного гетеродина и от передатчика.
5. В чем заключается метод череспериодной компенсации сигналов, отраженных от неподвижных объектов?
6. Что такое слепые скорости? Какие методы можно использовать для устранения слепых скоростей?
7. В чем сущность поляризационной селекции целей?

8. В чем отличие полезных сигналов от пассивных помех на выходе фазового (амплитудного) детектора?
9. Начертите амплитудно-частотную характеристику системы однократной (двукратной) ЧПК.

10. Что такое коэффициент подавления помехи? Как он зависит от энергетического спектра помехи?
11. Что такое РЛС с истинной когерентностью?
12. Что такое РЛС с псевдокогерентностью?
13. Начертите структурную схему цифровой системы ЧПК.

### Задачи

1 (10.10) Оценить эффект прохождения пассивных помех в когерентно-импульсной РЛС с ЧПК, если период следования импульсов РЛС равен времени корреляции помехи, коэффициент корреляции помехи выражается формулой  $\rho(\tau) = \exp[-\pi^2 \tau^2 \Delta F_{0,1}^2]$ .

2 (10.11) Применительно к условиям предыдущей задачи указать диапазон значений периода  $T_{\xi}$  следования импульсов РЛС, в пределах которого помеха ослабляется по мощности схемой ЧПК не менее чем в 50 раз.

3 (10.13) В РЛС обнаружение сигнала с полностью известными параметрами на фоне собственных шумов приемника характеризуется вероятностями  $P_{\text{дл}} = 0,8$ ,  $P_{\text{об}} = 10^{-11}$ . Как изменяются значения указанных вероятностей при воздействии на РЛС непрерывных шумовых помех, спектральная плотность которых в 6 раз превышает спектральную плотность шумов? Принять равными значения априорных вероятностей наличия и отсутствия сигнала на входе приемника; усиление приемника считать фиксированным.

4 (10.17) Оценить коэффициент подавления  $K_{\xi}$  собственных шумов приемника в схеме ЧПК, если полоса пропускания приемника  $\Delta f_{\text{пд}} = 1$  МГц, а период следования импульсов  $T_{\xi} = 1$  мс.

5 (10.18) РЛС с непрерывным излучением сопровождает цель по скорости. Чему равно отношение пассивной помехи к сигналу по мощности на выходе линейной части приемника,

если  $\Delta f_{i0} = 330$  Гц,  $f_0 = 9$  ГГц, цель летит перпендикулярно направлению РЛС – цель, скорость ветра в направлении РЛС составляет 10 км/ч? Отношение указанных мощностей на входе приемника равно 1. Считать, что система АСС следит точно за частотой сигнала, а частотная характеристика приемника имеет прямоугольную форму.

### **Занятие 9 «Спутниковые радионавигационные системы»**

Спутниковые РНС отличаются от иных тем, что источниками излучения, относительно которых измеряются координаты потребителя, являются искусственные спутники Земли (ИСЗ). Методы определения координат потребителя относительно ИСЗ сводятся к классическим. Для пересчета координат потребителя в геоцентрическую систему положения спутников в моменты навигационных определений должны быть точно известны. Это достигается применением наземной радиотехнической системы траекторных измерений, расчета эфемерид спутников и передачи на борт соответствующей информации.

В СРНС первого поколения используется интегральный доплеровский метод нахождения координат, который можно рассматривать как разностно-дальномерный.

В СРНС второго поколения используется квазидальномерный метод измерения координат, который также можно привести к разностно-дальномерному.

### **Контрольные вопросы**

1. Поясните интегральный доплеровский метод определения координат в СРНС первого поколения.
2. Перечислите недостатки СРНС первого поколения.
3. Изложите существо метода измерения координат потребителя навигационной информации по сигналам ИСЗ в СРНС второго поколения.
4. Что такое «псевдодальности»? Как они измеряются в

аппаратуре потребителя СНРС второго поколения?

5. Сигнал какого вида используется для измерения псевдодальностей в СНРС «Navstar»?

6. Что общего и в чем разница между американской системой «Navstar» и отечественной «Глонасс»?

7. Что такое «эфемериды» ИСЗ?

8. Как определяются координаты навигационных ИСЗ и траектории их движения для расчета эфемерид?

### Задачи

1. Известно, что мощность сигналов, излучаемых ИСЗ системы «Navstar» открытым кодом  $P_{\text{Е\tilde{N}C}}=10$  Вт, а коэффициент усиления передающей антенны  $G_{\text{Е\tilde{N}C}}=50$ . Какова мощность сигнала на выходе антенны аппаратуры потребителя навигационной информации, имеющей коэффициент усиления  $G_{\text{П\tilde{O}D}}=2$ ? Принять множитель ослабления сигнала ИСЗ в ионосфере и тропосфере 2 дБ.

2. Аппаратура потребителя СНРС второго поколения содержит в своем составе систему слежения за частотой принимаемого от ИСЗ сигнала и оценки доплеровского сдвига частоты, систему слежения за задержкой сигналов ИСЗ на трассе распространения, систему расхождения спутникового и бортового времени. Начертить возможные структурные схемы этих систем.

3. Начертите укрупненную структурную схему аппаратуры потребителя СНРС второго поколения и поясните принципы ее работы.

4. Предположим, что уровень принимаемого сигнала по открытому коду СНРС «Navstar» составляет – 165 дБ/Вт, коэффициент шума приемника 1,5 дБ. Полоса пропускания системы слежения за задержкой дальномерных сигналов определяется необходимостью передачи наложенных на них навигационных сообщений (50 бит/сек) и составляет 100 Гц. Оценить шумовую составляющую погрешности дальномерных измерений.

## **Литература**

1. Васин В.В., Степанов Б.М. Справочник-задачник по радиолокации. – М.: Сов. радио, 1977.
2. Денисов В.П., Дудко Б.П. Радиотехнические системы. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2006.