

Министерство образования и науки Российской Федерации
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

А.А. САВИН, А.А. МЕЩЕРЯКОВ, Б.П. ДУДКО

РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
ПРАКТИКУМ

Томск, 2012

УДК 621.396.98 (075.8)
Д 81

Савин А.А., Мещеряков А.А., Дудко Б.П. Радионавигационные системы. Практикум / А.А. Савин. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012, – 109 с.

Учебно-методическое пособие предназначено для проведения практических занятий по дисциплине «Радионавигационные системы» со студентами специальностей «Радиоэлектронные системы» (210304) и «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования» (160905).

Пособие содержит две части.

Первая часть является учебным пособием и предназначена, в основном, студентам для подготовки и выполнения практических занятий. Полезен материал первой части и для преподавателей, ведущих практические занятия. Пособие, в частности, содержит материал по описанию принципа действия и технические характеристики радионавигационных устройств и систем, выпускаемых промышленностью в последние годы; подобного материала нет в учебной литературе, да и в специальной литературе и Интернете найти его трудно.

Вторая часть является методическими указаниями для преподавателей, ведущих занятия. Здесь приведены планы практических занятий для каждой специальности, материалы по рейтинговой раскладке контрольных работ и вопросы, входящие в тестовые контрольные работы.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Часть 1. Учебное пособие для проведения практических занятий по дисциплине «Радионавигационные системы».....	7
1. Основы радионавигации.....	8
1.1. Задачи навигации.....	8
1.2. Методы навигации.....	9
1.3. Системы координат.....	10
1.4. Навигационные величины и поверхности (линии) положения.....	11
1.5. Погрешность определения поверхности (линии) положения.....	13
1.6. Местоположение корабля.....	14
1.7. Рабочая область навигационной системы и средний квадрат погрешности места.....	16
1.8. Общие сведения об измерителях навигационных величин радиоэлектронными средствами.....	18
1.8.1. Классификация измерителей.....	18
1.8.2. Особенности сигналов измерительных радиолиний.....	19
1.9. Измерение углов.....	20
1.10. Измерение расстояний.....	22
1.11. Измерение сумм расстояний.....	24
1.12. Измерение разностей расстояний.....	25
1.13. Измерение скоростей.....	27
1.14. Расчетные задания.....	28
1.15. Задачи.....	29
1.16. Рекомендуемая литература.....	32
2. Радионавигационные устройства и системы.....	33
2.1. Бортовой радиопеленгатор (автоматический радиокompас).....	33
2.2. Аэродромный автоматический радиопеленгатор.....	35
2.3. Системы посадки самолётов.....	41
2.4. Радиосистемы ближней навигации.....	46
2.5. Радиосистемы дальней навигации.....	53
2.6. Автономные навигационные системы.....	56
2.7. Комплексование навигационных средств.....	64
2.8. Рекомендуемая литература.....	69
3. Расчет энергетических характеристик навигационных радиолиний.....	70
3.1. Сведения из теории.....	70

3.2. Методика расчета радиолиний УКВ диапазона.....	78
3.2.1. Исходные данные.....	78
3.2.2. Методика расчета энергетических характеристик.....	79
3.2.3. Расчет множителя ослабления.....	81
3.3. Расчетные задания.....	84
3.4. Рекомендуемая литература.....	85
4. Анализ и синтез функциональных схем радионавигационных устройств и систем	86
Часть 2. Методические указания для проведения практических занятий по дисциплине «Радионавигационные темы».....	си-88
1. Методические указания для проведения практических занятий по дисциплине «Радионавигационные темы» для специальности 210304.....	си-89
2. Методические указания для проведения практических занятий по дисциплине «Радионавигационные темы» для специальности 160905.....	си-92
3. Рейтинговая раскладка практических занятий.....	96
4. Вопросы тестового контроля.....	97

Введение

Настоящее учебно-методическое пособие предназначено для подготовки и проведения практических занятий по курсу «Радионавигационные системы» и частично «Радиотехнические системы» студентами радиотехнических специальностей. В первую очередь пособие ориентировано на студентов специальностей «Радиоэлектронные системы» (210304) и «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования» (160905).

Основной задачей проведения практических занятий является повторение методов местоопределения и принципов построения навигационной аппаратуры, анализ существующих систем и устройств и составление функциональных схем таких систем с иными техническими характеристиками. Повторение теоретического материала сопровождается решением задач, выполнением расчетных заданий и написанием тестовых контрольных.

Пособие содержит две части: часть первая является учебным пособием при подготовке к практическим занятиям и ориентирована, в основном, на студентов. Первая часть имеет четыре раздела, соответствующих темам занятий согласно программе курса в части проведения практических занятий.

Первый раздел содержит в сокращенном виде теоретический материал лекционного курса по методам местоопределения и принципам построения навигационной аппаратуры. Повторение сопровождается набором типовых задач для решения, набором расчетных заданий и контрольными вопросами в тестовой форме.

Второй раздел посвящен кратким описаниям принципа работы и техническим характеристикам современных типов радионавигационных систем и устройств. Материал подготовлен, в основном, по данным сайтов Интернета и содержит сведения о последних моделях устройств и систем, найти которые в других учебных изданиях невозможно. Представлены следующие устройства и системы: системы посадки самолетов, системы ближней навигации самолетов, системы дальней навигации, самолетные автономные доплеровские системы, радиокомпасы, аэродромные пеленгаторы, самолетные радиовысотомеры.

Третий раздел предполагает изучение методики расчета и расчет энергетических характеристик навигационных измерительных радиолиний. В конце раздела приведены задания для расчета конкретных радиолиний.

Четвертый раздел содержит задания на анализ и построение функциональных схем конкретных навигационных устройств или систем. Основой для построения является материал второго раздела.

Вторая часть является методическими указаниями по проведению практических занятий и предназначена, в основном, для преподавателей, ведущих практические занятия по программам двух специальностей: 210304 и 160905. В этой части также приведена рейтинговая раскладка практических занятий и вопросы текущего тестового контроля знаний студентов.

Практические занятия проводятся, как правило, в учебной лаборатории радионавигационных систем, в которой представлены образцы эксплуатируемых аэрофлотом в разные годы навигационных устройств и систем.

ЧАСТЬ 1

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ
ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СИ-
СТЕМЫ»**

1. Основы радионавигации

1.1. Задачи навигации

Навигация – это наука о способах и средствах вождения кораблей. Начиналась навигация для целей вождения морских кораблей и судов, затем включила в себя вождение воздушных кораблей, а в последнее время распространилась и на космические корабли.

Задачи навигации разнообразны и решаются при помощи различных технических средств, которые можно разделить на три группы:

- общие средства,
- астрономические средства,
- радиоэлектронные средства.

Общие средства – это навигационные приборы общего назначения: магнитные, индукционные и гироманнитные компасы, указатели воздушной скорости, барометрические высотомеры, часы и т. д.

Астрономические средства – приборы, использующие закономерности взаимного расположения Земли и небесных светил. Основным прибором является секстан, определяющий высоту светила над горизонтом.

Радиоэлектронные средства весьма разнообразны и состоят из бортовых и (или) наземных устройств. В настоящем пособии им уделено основное внимание.

Основной задачей навигации является вывод корабля в заданную точку пространства наивыгоднейшим для данных условий путём с установленной точностью в определённый момент времени. Выполнение этой задачи возможно в том случае, если корабль будет двигаться по заранее намеченному маршруту или по рассчитанному при движении маршруту. При этом необходимо обеспечить заданное положение корабля относительно центра масс – пилотирование и заданное движение центра масс в пространстве – режим движения.

В системе управления движением предусмотрена группа навигационных измерителей, выходные данные с которых поступают на вычислительное устройство, где оценивается ряд величин, определяющих положение и режим движения центра масс. Кроме этого в системе присутствует группа измерителей относительно центра масс.

Кроме основной задачи в навигации возникает ряд других задач, среди которых следующие: обеспечение привода самолёта на аэродром посадки, обеспечение безопасного движения самолётов в приаэродромной зоне и последовательного захода на посадку, обеспечение снижения самолёта и посадки, обеспечение сбора самолётов и судов и движение в строю, управление воздушным движением и управление движением судов и т.п.

Литература: [1, с. 7][3, с. 3–9], [конспект лекций, тема 1].

1.2. Методы навигации

Вернёмся к основной задаче навигации. Вывод корабля в заданную точку возможен при движении по известному маршруту. Маршрут или траектория движения – это непрерывная пространственно-временная кривая перемещения центра масс корабля в заданной системе координат, т.е. зависимость координат во времени. Это означает, что основная задача навигации сводится к определению местоположения корабля. Поэтому методы местопределения называются методами навигации.

Методы навигации представляют собой совокупность взаимосвязанных измерений навигационных величин (параметров) и вычислительных операций, позволяющих получить информацию о фактическом режиме движения. Целью любого метода является получение информации о текущем местоположении корабля и скорости его относительно выбранной системы координат.

Принято рассматривать три метода навигации.

Позиционный метод или метод позиционных линий, основанный на непосредственной реализации линий (поверхностей) положения.

Метод счисления пути, основанный на измерении вектора скорости или ускорения с последующим интегрированием для получения вектора пройденного пути.

Обзорно-сравнительный метод, который предполагает определение текущего местоположения в результате сравнения наблюдаемой картины местности с картой или запомненной картиной местности.

Позиционный метод предполагает измерение навигационных величин (расстояний, углов и др.) относительно наземных или небесных ориентиров (точек с известными координатами), а также на основании знания и измерения параметров физических полей Земли и её атмосферы. В качестве наземных ориентиров обычно используются радиомаяки, в качестве небесных – естественные или искусственные источники излучения. Одной измеренной навигационной величине соответствует одна линия (поверхность) положения. Последняя является линией, при перемещении по которой измеренная навигационная величина остаётся постоянной. Линия (поверхность) положения строится относительно места расположения ориентира. При использовании физических полей Земли должно быть априорно известно пространственное распределение измеряемого параметра поля. Поверхностью положения будет поверхность постоянного уровня поля, равного измеренной величине. Метод получил наибольшее распространение. Он реализован в системах ближней, дальней и спутниковой навигации.

Метод счисления пути предполагает измерение перемещения корабля относительно известного начального положения. Чтобы произвести счисление пути нужно располагать данными о курсе и ускорении или скорости относительно Земли, т.е. о векторе путевой скорости или ускорения. Вектор перемещения (вектор пройденного пути) определяется путём однократного интегрирования скорости или двукратного интегрирования ускорения. Ме-

тод является основным для построения автономных систем навигации. В качестве измерителя модуля ускорения используется инерциальное устройство, называемое акселерометром. Для измерения скорости берутся датчики воздушной скорости, лаги, доплеровские измерители скорости и угла сноса. Курс измеряется магнитными, гиромангнитными, индукционными, астрономическими и другими приборами. Интегрирование производится электро-механическими или электронными устройствами обычно в декартовой системе координат.

Обзорно-сравнительный метод в простейшем случае заключается в визуальной ориентировке путём непрерывного или дискретного сличения местности с картой или с ранее запомненной картиной местности. В современных системах навигации сравниваются так называемые карты заданного курса и карты реального курса. Карты земной поверхности или звёздного неба могут быть радиолокационными, тепловыми, оптическими и т.д.

Сравнение карт требует обработки большого объёма информации и производится корреляционным методом. Поэтому рассматриваемые системы называются ещё корреляционно-экстремальными. Карты заданного курса получаются с помощью соответствующей аппаратуры при перемещении по известному маршруту или путём моделирования по топографическим картам, фотоснимкам с самолётов или искусственных спутников Земли и т.д.

Литература: [1, с. 8–10], [3, с. 11–14], [5, с. 15–18], [конспект лекций, тема 1].

1.3. Системы координат

Решение навигационных задач производится в различных системах координат, причём каждая задача может быть решена в нескольких системах. Выбирается такая система, в которой аналитические выражения для описания траектории движения и процесса управления, да и само управление, будут наиболее простыми. Основными являются следующие системы координат.

1.Связанная система координат, служащая для обеспечения управляемого движения относительно центра масс корабля, т. е. пилотирования. В данной ортогональной системе $Oxuz$ начало располагается в центре масс, ось x направлена по продольной оси корабля, ось y – по поперечной оси и ось z ортогональна первым двум. Положение этой системы и самого корабля относительно горизонтальной плоскости и горизонтальной системы координат (см. ниже) определяется следующими углами:

курс (истинный курс) – это угол между направлением на север и проекцией продольной оси корабля на горизонтальную плоскость, отсчитанный по часовой стрелке;

тангаж – угол в вертикальной плоскости между продольной осью корабля и горизонтом, положительный тангаж соответствует набору высоты;

крен – угол в вертикальной плоскости между поперечной осью корабля и горизонтом, положительный крен соответствует правому повороту.

2. Горизонтальная топоцентрическая система координат, в которой работают радиолокационные станции аэропортов, пунктов УВД и УДС и т.д. Начало системы располагается в месте нахождения РЛС, отсчётная плоскость – горизонтальная, начальное направление – на север. Координаты корабля (цели): дальность, азимут (угол в горизонтальной плоскости от севера до проекции направления на корабль, отсчитываемый по часовой стрелке) и угол места (иногда – угол высоты) – угол в вертикальной плоскости от горизонта до направления на цель.

3. Географическая система координат, в которой обычно решается основная навигационная задача. Систему можно считать геоцентрической, поскольку координаты корабля определяются двумя углами: широтой и долготой для двумерного случая навигации на земной поверхности. В трёхмерном случае к углам добавляется высота над земным геоидом. Широта отсчитывается от экватора: северная (положительная) и южная (отрицательная) в пределах 0–90 градусов. Долгота измеряется в плоскости экватора от Гринвичского меридиана в восточном направлении в пределах 0–180 градусов.

4. Геоцентрическая экваториальная инерциальная система координат, которая используется для описания траекторий ИСЗ. Это ортогональная система с началом в центре Земли и отсчётной плоскостью, проходящей через экватор. Ось x направлена в точку весеннего равноденствия и неподвижна относительно звёзд. Ось y также лежит в плоскости экватора, ось z идёт в направлении северного полюса.

Литература: [3, с.10–11], [конспект лекций, тема 1].

1.4. Навигационные величины и поверхности (линии) положения

Материал относится к определению места корабля методом позиционных линий. В этом методе измеряются некоторые геометрические величины, называемые навигационными величинами или навигационными параметрами, относительно навигационных точек. Это обычно радиомаяки, расположенные в точках с известными координатами. Далее вводятся промежуточные понятия в виде позиционных линий, а точнее в виде линий или поверхностей положения. Последние представляют собой линии (поверхности) при перемещении по которым измеренная навигационная величина остаётся неизменной. Для определения места нужно иметь две линии или три поверхности, пересечение которых даёт точку, т.е. место.

$$p = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2},$$

$$p = R.$$

Наиболее очевидной навигационной величиной является расстояние от корабля до навигационной точки. Уравнения навигационного параметра в декартовой и полярной системах координат следующие:

Линией положения является окружность, поверхностью – сфера с центрами в навигационной точке. Навигационное устройство называется радиодальномером.

$$p = R_1 + R_2 = 2a.$$

Если расположить приёмник и передатчик в двух навигационных точках, расстояние между которыми называется базой устройства, то можно определить сумму расстояний от этих двух точек до корабля. На корабле должен располагаться приёмо-передатчик для ретрансляции сигнала из одной навигационной точки в другую; возможно и пассивное переотражение сигнала. Получается суммарно – дальномерное устройство, дающее уравнение параметра в виде:

Линией положения является эллипс, поверхностью – эллипсоид, полученный вращением эллипса относительно базы, расположенной вдоль оси x . Уравнение эллипсоида:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1.$$

Здесь a и b – полуоси эллипса, причем

$$b = \sqrt{a^2 - \frac{d^2}{4}},$$

d – база устройства.

При больших удалениях или малых базах устройство приближается к дальномерному.

$$p = R_1 - R_2 = 2a.$$

Можно взять в качестве навигационного параметра разность расстояний от корабля до двух навигационных точек. Получится разностно-дальномерное устройство, в котором расстояние между точками также называется базой. Расположение устройства будет таким же, как рассмотрено выше, однако состав аппаратуры будет существенно другим. В навигационных точках располагаются радиомаяки, излучающие синхронные или синфазные сигналы. На корабле измеряется разность времени прихода этих сигналов, соответствующая разности расстояний. Уравнение параметра имеет вид:

Линией положения является гипербола, поверхностью положения – гиперболоид, описываемый уравнением:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{b^2} = 1,$$

где a и b – полуоси,

$$b = \sqrt{\frac{d^2}{4} - a^2},$$

d – база устройства.

Гиперболоид образуется путём вращения гиперболы относительно оси x , совпадающей с линией базы. Устройство иногда называется гиперболическим. При больших удалениях или малых базах гиперболоид вписывается в асимптотический конус с вершиной в начале координат, а устройство вырождается в угломерное.

$$p = \alpha, p = \operatorname{arctg} \frac{y}{x}.$$

В качестве навигационного параметра можно взять угол (α). Устройство будет называться угломерным с уравнениями параметра:

В общем виде уравнение параметра представляется некоторой функцией координат:

$$p = p(x, y, z).$$

Литература: [1, с. 13–15], [2, с. 21–24], [конспект лекций, тема 2].

1.5. Погрешность определения поверхности (линии) положения

Любое радиоэлектронное устройство обладает определённой погрешностью измерения. Эта погрешность приводит к появлению погрешности (ошибки) определения поверхности положения, а затем и к погрешности определения места. В дальнейшем для краткости будем говорить о погрешности поверхности положения и погрешности места. Погрешность поверхности положения измеряется по нормали к поверхности и определяется разностью между истинным и найденным значениями навигационного параметра. Для установления связи между погрешностью поверхности положения и погрешностью параметра воспользуемся понятием скалярного поля для возможных значений какого-либо навигационного параметра. Поверхность (линия) положения в данном поле характеризуется поверхностью (линией) постоянного уровня поля. Изменение скалярного поля характеризуется векторной величиной, называемой градиентом поля. Градиент поля направлен по нормали к поверхности постоянного уровня в конкретной точке. Модуль градиента равен пределу отношения приращения параметра в направлении нормали к величине нормали (по координатам, т.е. на местности). Как видно, величина градиента определяет введённое выше понятие погрешности определения поверхности положения.

Математические выражения для введённых выше величин следующие:

$$\operatorname{grad} p = \frac{dp}{dn} \times \vec{n},$$

$$\frac{dp}{dn} = |\operatorname{grad} p| = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)^2},$$

$$\frac{dp}{dn} \rightarrow \frac{\Delta p}{\Delta n},$$

$$U = \Delta n = \frac{\Delta p}{\sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)^2}} = \frac{\Delta p}{|\operatorname{grad} p|},$$

где $U = \Delta n$ – погрешность поверхности положения,
 Δp – погрешность измерения параметра.

Рассмотрим погрешности различных радионавигационных устройств.

Дальномерное устройство. Уравнение параметра $p = R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$.

Модуль градиента $|\text{grad } p| = 1$. Поэтому $U = \Delta p$, т.е. погрешность поверхности положения равна погрешности измерения дальности на любых расстояниях от навигационной точки и вне зависимости от направления.

Суммарно-дальномерное устройство (двумерный случай). Погрешность линии положения равна:

$$U = \frac{\Delta p}{\sqrt{2(1 + \cos \Psi)}} = \frac{\Delta p}{2 \cos \frac{\Psi}{2}}.$$

Ψ – угол, под которым видна база.

Полученная формула показывает, что погрешность поверхности положения максимальна на нормали к базе и минимальна вдоль линии базы. С увеличением расстояния и уменьшением базы погрешность уменьшается. Лучшим вариантом устройства является отсутствие базы, когда оно вырождается в дальномерное.

Разностно-дальномерное устройство (двумерный случай). Погрешность линии положения равна:

$$U = \frac{\Delta p}{2 \sin \frac{\Psi}{2}}.$$

Ψ – угол, под которым видна база.

Анализ формулы показывает, что увеличение базы уменьшает погрешность поверхности положения, причём она минимальна на нормали к базе. С ростом расстояния погрешность растёт.

Угломерное устройство (двумерный случай). Погрешность линии положения равна:

$$U = R\Delta p = R\Delta\theta,$$

где R – расстояние,

$\Delta\theta$ – погрешность измерения угла в радианах.

Формула показывает, что погрешность растёт пропорционально расстоянию и не зависит от направления. Погрешность поверхности положения будет зависеть ещё от угла в вертикальной плоскости:

$$U = R\Delta\theta \cos h.$$

Обобщая рассмотренные четыре вида устройств, можно записать:

$$U = k\Delta p,$$

где k – коэффициент погрешности или геометрический фактор, разный для различных устройств.

Литература: [1, с. 15–18], [2, с. 25–28], [3, с.44–46], [конспект лекций, тема 2].

1.6. Местоположение корабля

Положение (координаты, место) корабля в трёхмерном пространстве определяется как точка пересечения трёх поверхностей положения. В двумерном случае, при навигации на плоскости или другой поверхности, место корабля определяется пересечением двух линий положения.

Поверхности (линии) положения находятся с определённой погрешностью, что приводит к наличию погрешности определения места корабля. Эту погрешность называют погрешностью места или ошибкой места.

Выражение для погрешности места при навигации на плоскости имеет вид:

$$r = \frac{1}{\sin \gamma} \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos \gamma} .$$

где γ – угол пересечения линий положения в месте расположения корабля.

Формула показывает, что погрешность определяется не только ошибками линий положения, но и углом их пересечения, т.е. размером базы системы (расстоянием между устройствами), расстоянием от центра базы до корабля и направлением на корабль от линии базы.

Погрешность места конкретной системы местоопределения может быть получена при подстановке в формулу конкретных выражений для коэффициентов ошибок устройств.

Введем статистическое описание погрешностей и найдем вероятность погрешности места.

Будем считать, что погрешности определения трёх поверхностей положения независимы и распределены по нормальному закону с дисперсиями $\sigma_{U_1}^2, \sigma_{U_2}^2, \sigma_{U_3}^2$. Тогда трёхмерная плотность вероятности совместного появления этих погрешностей будет иметь вид:

$$w(U_1, U_2, U_3) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^3 \sigma_{U_1} \sigma_{U_2} \sigma_{U_3}}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{U_1^2}{\sigma_{U_1}^2} + \frac{U_2^2}{\sigma_{U_2}^2} + \frac{U_3^2}{\sigma_{U_3}^2} \right) \right].$$

Если приравнять показатель степени этого выражения некоторой постоянной, то получим уравнение поверхности, на которой совместная плотность вероятности погрешностей, характеризующая погрешность места, одинакова. Такой поверхностью является эллипсоид в косоугольной системе координат $Ou_1u_2u_3$, оси которой совпадают с нормальными к поверхностям положения, а центр находится в истинном месте корабля. Полученный таким образом эллипсоид называется эллипсоидом погрешностей (ошибок) места. Это целое семейство эллипсоидов, параметры которых определяются погрешностями измерений и тремя углами между нормальными к поверхностям положения.

Плотность вероятности погрешности места при нормальном распределении погрешностей линий положения будет распределена по обобщённому закону Релея.

Итак, точность определения местоположения корабля полностью характеризуется эллипсоидом или эллипсом погрешностей. Поэтому наиболее полное представление о зависимости точности местоопределения от взаимного положения корабля и навигационных точек даёт так называемое поле погрешностей, представляющее собой поле эллипсоидов (эллипсов) погрешностей заданной вероятности. По ним просто и наглядно можно определить рабочую область (рабочую зону) системы местоопределения.

Литература: [1, с. 18–20], [2, с. 28–31], [5, с. 15–22], [конспект лекций, тема 2].

1.7. Рабочая область навигационной системы и средний квадрат погрешности места

Рабочая область навигационной системы ограничена объёмом пространства, внутри которого ошибка места с заданной вероятностью не превосходит выбранное значение. Эту область можно построить, определив в аналитическом виде полуоси эллипсоида погрешностей места для различных точек пространства или построив геометрически объёмное поле эллипсоидов ошибок места для разных точек пространства. По такому геометрическому рисунку можно обвести границу рабочей зоны, где размер полуоси меньше заданной. Однако аналитические зависимости для величин полуосей через элементарные функции не выражаются, а объёмную геометрию использовать трудно. Поэтому чаще используют аналитическое выражение для среднего квадрата погрешности места: корень квадратный из этой величины и служит критерием, по которому строится рабочая область системы местоопределения.

Выражение (в двумерном случае) для среднего квадрата погрешности места имеет вид:

$$\overline{r^2} = \frac{1}{\sin^2 \gamma} \left(\overline{U_1^2} + \overline{U_2^2} + 2\overline{U_1 U_2} \cos \gamma \right).$$

Здесь γ – угол пересечения линий положения,

U_1, U_2 – погрешности линий положения.

Учитывая, что:

$$\overline{U_1^2} = \sigma_{U_1}^2, \quad \overline{U_2^2} = \sigma_{U_2}^2, \quad \overline{U_1 U_2} = \rho \sigma_{U_1} \sigma_{U_2},$$

где $\sigma_{U_1}^2, \sigma_{U_2}^2$ – дисперсии погрешностей поверхностей положения,

ρ – коэффициент корреляции погрешностей,

получаем следующее:

$$\sigma_r^2 = \overline{r^2} = \frac{1}{\sin^2 \gamma} \left(\sigma_{U_1}^2 + \sigma_{U_2}^2 + 2\rho \sigma_{U_1} \sigma_{U_2} \cos \gamma \right).$$

Можно вместо погрешностей линий положения в последнюю формулу ввести погрешности измерения навигационных параметров и коэффициенты

ошибок k . Запишем такое выражение относительно среднеквадратического значения погрешности

$$\sigma_r = \frac{1}{\sin \gamma} \sqrt{(k_1 \sigma_{p_1})^2 + (k_2 \sigma_{p_2})^2 + 2\rho k_1 k_2 \sigma_{p_1} \sigma_{p_2} \cos \gamma} .$$

Рабочая область системы определяется линией, выраженной аналитически полученным выражением при $\sigma_r = const$.

Аналогичным образом можно получить выражение для среднего квадрата погрешности места и среднеквадратической погрешности места в случае трёхмерной навигации. Естественно, выражение тогда будет более громоздким.

Вернёмся к двумерному случаю и приведём выражения для среднеквадратической погрешности некоторых конкретных систем местоопределения.

Дальномерная система. Система состоит из двух навигационных точек, относительно которых или из которых измеряются расстояния. Считая дальномёры равноточными и помня, что коэффициент ошибки для дальномёров равен единице, получаем следующее:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_0}{\sqrt{2} \sin \gamma} \sqrt{1 + \rho \cos \gamma} ,$$

где σ_0 – среднеквадратическая погрешность измерения дальности.

Отсюда следует, что кривой равного значения погрешности места будет соответствовать постоянный угол пересечения линий положения. Такой кривой будет окружность, хордой которой является база системы. Окружность максимальной точности получается в случае, когда хорда превращается в диаметр. Рабочая область будет располагаться по обе стороны от линии максимальной точности, но никогда не распространится на область вблизи линии базы. На больших удалениях погрешность места пропорциональна первой степени расстояния.

Угломерная (пеленгационная) система. Система также состоит из двух навигационных точек, из которых измеряются углы на корабль относительно северного направления или на которые определяются углы на борту корабля. Для равноточных пеленгаторов с учётом выражения для коэффициента ошибок получаем следующее:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_\theta}{\sin \gamma} \sqrt{R_1^2 + R_2^2 + 2\rho R_1 R_2 \cos \gamma} ,$$

где σ_θ – среднеквадратическая ошибка измерения угла в радианах.

Минимальная погрешность будет присутствовать в двух точках, расположенных по обе стороны от базы на перпендикуляре из его середины. Линии равной точности имеют вид сплюснутой в направлении базы и ограниченной базой окружности, проходящей через навигационные точки. Таких линий также будет две. На больших удалениях погрешность места растёт пропорционально квадрату расстояния.

Дальномерно-угломерная система. Система состоит из дальномера и угломера, расположенных в одной точке. При некоррелированных ошибках измерителей среднеквадратическая погрешность места имеет вид:

$$\sigma_r = \sqrt{(R\sigma_\theta)^2 + \frac{\sigma_R^2}{4}},$$

где σ_θ и σ_R – среднеквадратические ошибки измерения угла и дальности.

Линией равной точности является окружность с центром в навигационной точке, поэтому рабочая область ограничена этой окружностью. Радиус этой окружности из последнего выражения определится как:

$$R_0 = \frac{1}{\sigma_\theta} \sqrt{\sigma_r^2 - \frac{\sigma_R^2}{4}}.$$

На больших удалениях погрешность пропорциональна первой степени расстояния.

Разностно-дальномерная система. Система состоит из двух устройств, каждое из которых располагается в двух навигационных точках. Минимальное количество точек в системе – три. При равноточных устройствах выражение для погрешности имеет вид:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_R}{\sin \gamma} \sqrt{\operatorname{cosec}^2 \frac{\Psi_1}{2} + \operatorname{cosec}^2 \frac{\Psi_2}{2} + 2\rho \cos \gamma \operatorname{cosec} \frac{\Psi_1}{2} \operatorname{cosec} \frac{\Psi_2}{2}},$$

где σ_R – среднеквадратическая погрешность измерения разности расстояний,

Ψ_1, Ψ_2 – углы, под которыми видны базы первого и второго устройств из точки расположения корабля.

Литература: [1, с. 20–23], [2, с. 32–37], [3, с. 44–46], [конспект лекций, тема 2].

1.8. Общие сведения об измерителях навигационных величин радиоэлектронными средствами

1.8.1. Классификация измерителей

По степени решения основной навигационной задачи все измерительные средства делятся на устройства, системы и комплексы. Система полностью решает навигационную задачу, реализуя один из трёх методов навигации: позиционных линий, счисления пути или обзорно-сравнительный. Устройство решает эту задачу частично, производя одномоментно измерение одной навигационной величины. В методе позиционных линий это может быть угол, расстояние, сумма расстояний или их разность. Одна навигационная величина определяет одну линию (поверхность) положения; система должна решать задачу пересечения двух линий или трёх поверхностей положения, т.е. состоять из двух или трёх устройств и вычислителя. Система может иметь и одно измерительное устройство, но оно должно работать в раз-

личные моменты времени и по различным навигационным точкам. Комплекс местоопределения также решает навигационную задачу, но на основе избыточной информации, получаемой от устройств различного принципа действия. Обычно комплексируются устройства, реализующие различные методы навигации. За счёт избыточной информации оценка места корабля получается с лучшими характеристиками: точностью, надёжностью и др.

В настоящем разделе рассматриваются измерители первичных навигационных величин, т.е. навигационные устройства.

Навигационные измерители классифицируются по виду навигационной величины. Устройства могут быть угломерными, дальномерными, суммарно-дальномерными и разностно-дальномерными, системы – дальномерно-угломерными, разностно-дальномерными и т.д.

В радионавигации для измерения навигационных величин применяется гармонический сигнал, который при распространении приобретает модуляцию своих параметров взаимным положением точек излучения и приёма. Поэтому распространена также классификация устройств по параметру радиосигнала, из которого извлекается информация о навигационной величине. В соответствии с этим различают амплитудные, временные, частотные и фазовые устройства. Здесь предполагаются параметры несущего сигнала, однако можно использовать несущий сигнал, предварительно промодулированный низкочастотным гармоническим или случайным сигналами.

1.8.2. Особенности сигналов измерительных радиолиний

В качестве сигнала, несущего или извлекающего информацию, в радионавигации используются гармонические сигналы, имеющие четыре параметра: амплитуду, частоту, время и фазу. Каждый из этих параметров может нести известную информацию, заложенную в них путём принудительной модуляции. Эти же параметры могут приобретать (извлекать) новую информацию, заключающуюся во взаимном пространственном положении точек излучения и приёма. Этот процесс известен как модуляция сигнала пространственным положением объектов. Приведённое выше относится к несущему сигналу. Однако в качестве первичного (несущего) сигнала может использоваться промодулированный сигнал, например, низкочастотным гармоническим или шумоподобным сигналом. Вид модуляции (параметр модуляции) может быть любым. В этом случае информативным параметром для передачи или извлечения информации становится любой параметр модулирующего сигнала. Поэтому измерительные устройства разделяются на измерители, работающие на несущем сигнале, и измерители, работающие на модулирующем сигнале.

Измерительные радиолинии являются линиями с известными основными параметрами. Режимы поиска и обнаружения сигнала по основным параметрам не предусматриваются. Поиск ведётся только по тому параметру, который несёт информацию и является случайным. Линии также в подавля-

ющем большинстве случаев работают при высоких отношениях сигнала к шуму.

Навигация, как правило, имеет дело с подвижными кораблями, поэтому принимаемые сигналы имеют доплеровское смещение частоты. Это обстоятельство приводит к некоторым сложностям при приёме и обработке сигналов, однако с этим приходится мириться, тем более, что сам сдвиг является информативной величиной.

Радионавигация использует весь освоенный диапазон волн. Использование участков диапазона частот следующее.

Крайне низкие частоты (КНЧ, менее 3 кГц). Крайне низкие частоты порядка сотен Герц могут служить для навигации подводных лодок.

Очень низкие частоты (ОНЧ, 3–30 кГц). Частоты применимы для дальней и глобальной навигации, в частности, здесь работают системы «Омега» и РСДН.

Низкие частоты (НЧ, 30–300 кГц). Частоты обеспечивают дальнюю и среднюю навигацию. Здесь работает система «Лоран» и бортовые радиоконпасы.

Средние частоты (СЧ, 300 кГц–3 МГц) – диапазон работы радиоконпасов.

Высокие частоты (ВЧ, 3–30 МГц) из-за больших погрешностей используется только для передачи информации.

Очень высокие частоты (ОВЧ, 30–300 МГц). Системы посадки, система управления воздушным движением.

Ультравысокие частоты (УВЧ, 300 МГц–3 ГГц). Дальномеры, системы управления воздушным движением и управления движением судов, системы ближней навигации и др.

Сверхвысокие частоты (СВЧ, 3–30 ГГц). Бортовые автономные системы.

Крайне высокие частоты (КВЧ, 30–300 ГГц). Диапазон практически не используется.

Широко применяется разделение радиодиапазона по длине волны следующим образом: сверхдлинные волны (СДВ, более 10000 м), длинные волны (ДВ, 10000–1000 м), средние волны (СВ, 1000–100 м), короткие волны (КВ, 100–10 м) и ультракороткие волны (УКВ, 10–0,01 м).

Литература: [1, с. 11; 39–40], [2, с. 12–17], [конспект лекций, тема 1].

1.9. Измерение углов

Применяются два варианта построения угломерных устройств: измерители направления прихода электромагнитной волны, и тогда говорят о пеленгаторах источников излучения, и устройства, задающие направление в пространстве, такое устройство называется радиомаяком. В любом случае направлению соответствует конкретное значение одного из параметров сигнала.

Предполагается прямолинейное распространение волны, в этом случае измеренный или заданный углы совпадают с интересующими углами на плоскости или в пространстве. В любом случае угол определяется как нормаль к фазовому фронту, а определить её можно лишь путём анализа фронта в двух или более точках. Такой анализ производит антенное устройство, имеющее некоторые пространственные размеры. Принцип взаимности, свойственный антеннам, определяет одинаковость характеристик устройств типа пеленгаторов и типа маяков.

Амплитудный метод построения угломерных устройств в качестве информативного параметра принимает амплитуду сигнала. Метод реализуется с помощью направленных антенн, у которых амплитуда выходного сигнала или напряжённости поля является функцией угла. Именно эта зависимость называется диаграммой направленности антенны. В качестве рабочих точек выбираются характерные точки диаграммы направленности. В соответствии с этим названы и используются следующие варианты определения или задания угла: максимального сигнала, минимального сигнала и сравнения сигналов.

Временной метод предполагает приём (передачу) сигналов в двух разнесённых точках с последующим измерением разности времени прихода сигналов в них или в некоторой третьей точке. Приём сигналов предполагает построение радиопеленгатора, излучение – радиомаяка. В обоих случаях расстояние разноса антенн, называемое базой устройства, много меньше расстояний до источника излучения или третьей точки, так что расстояния можно считать параллельными. Разность расстояний, определяющая разность времени распространения сигналов, определяется углом между направлением на источник (третью точку) и нормалью к линии базы. Связь разности времени прихода с углом α определяется соотношением:

$$\Delta t = \frac{d \sin \alpha}{c} .$$

Здесь c – скорость света.

Метод измерения разности времени прихода зависит от вида радиосигнала. При импульсном сигнале задержка находится по передним фронтам импульсов цифровым или аналоговым измерителем. Непрерывный сигнал может быть использован лишь при наличии модуляции одного из параметров несущей случайным непериодическим или периодическим детерминированным сигналом. В первом случае измерение производится корреляционным методом, во втором – по характерным точкам сигнала. Естественно, если речь идёт о радиомаяке, то модулирующий сигнал в разнесённых точках должен быть синхронным.

Частотный метод углометрии предполагает использование эффекта Доплера. Существуют варианты доплеровского маяка системы посадки самолетов (система ILS), маяки системы ближней навигации (система VOR). Известна одна разработка пеленгового радиомаяка, в которой используется направленная антенна, сканирующая в заданном секторе углов с синхронным изменением несущей частоты излучаемого сигнала. Приёмное устройство,

измеряя частоту периодически появляющегося сигнала, по априорно известному соответствию частот и углов определяет угол на приёмник из точки расположения маяка. Вариант не является чисто частотным, поскольку здесь задействована направленная антенна, которой определяется погрешность задания угла.

Фазовый метод предполагает использование двух антенн, разнесённых на некоторое расстояние, называемое базой. Как и во временном варианте, фазовые угломерные устройства работают при малых базах по сравнению с расстояниями до источника излучения или приёма, которые можно считать параллельными. Разность фаз, выраженная в радианах, связана с углом прихода (излучения) α соотношением:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \alpha.$$

В этом выражении разность фаз может превышать 360 градусов, поэтому его обычно записывают в следующем виде:

$$\Delta\varphi_{\text{изм}} + 2\pi n = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \alpha.$$

Здесь n – целое число полных периодов фазы.

Литература: [1, с. 39–50], [2, с. 98–135], [3, с. 121–139], [5, с. 148–164], [конспект лекций, темы 4, 5, 6].

1.10. Измерение расстояний

Измерение расстояния возможно путём снятия информации, связанной с ним, с любого из четырёх параметров радиосигнала и последующего пересчёта значения параметра в расстояние. Существует четыре метода измерения расстояния: амплитудный, временной, частотный и фазовый. Амплитудный метод позволяет производить однократное измерение расстояния (на пути передатчик – приёмник), остальные – однократное и двукратное (на пути туда и обратно).

Амплитудный метод основан на свойстве электромагнитного поля распространяться сферической волной в свободном пространстве, когда плотность потока мощности поля обратно пропорциональна квадрату расстояния. Этот закон в аналитической форме может быть записан в виде:

$$\Pi = K_1 \frac{P}{R^2}, \quad E = \frac{K_2 \sqrt{P}}{R},$$

где Π – плотность потока мощности,

E – напряжённость поля,

K_1 и K_2 – известные коэффициенты,

P – излучаемая мощность с учётом направленности антенны.

При распространении в реальной среде в формулы в качестве дополнительного коэффициента в правой части вводится соответствующий множитель ослабления. Именно зависимость указанных характеристик поля от

множителя ослабления, который определяется с большой погрешностью, приводит к низкой точности метода и отсутствию разработок на его основе.

Временной метод основан на свойстве электромагнитного поля распространяться с постоянной известной скоростью, принимаемой в расчетах равной скорости света. Измеренное время однократного или двукратного распространения волны, умноженное на скорость света, даёт величину расстояния или удвоенного расстояния.

В большинстве случаев во временные дальнометры заложены импульсные сигналы, однако используются и непрерывные сигналы с модуляцией одного из параметров несущей случайным непериодическим или квазислучайным периодическим сигналами.

Частотный метод предполагает следующее. Поскольку частота сигнала не связана с расстоянием распространения волны, то нужно ввести в первичный сигнал модуляцию несущей частоты по определённому закону. При обработке принятого сигнала, используя параметры закона модуляции, нужно пересчитать измеренную разность частот сначала во время распространения (однократного или двукратного), а потом в расстояние. Закон изменения частоты должен быть периодическим. При линейном законе параметрами сигнала являются: девиация $f_{\text{дев}}$ и период T . Временное смещение излучаемого и принятого сигналов обуславливает различие их мгновенных частот. Разность частот измеряется, а затем пересчитывается в расстояние. Алгоритм пересчета следующий:

$$R = \frac{1}{2} c \Delta t = \frac{c T \Delta f}{4 f_{\text{дев}}},$$

где Δf – измеряемая разность частот (частота биений).

Фазовый метод основан на возможности выражения расстояния в фазовых градусах или радианах в предположении, что расстояние величиной в одну длину волны составляет 360 градусов. Перевод осуществляется через волновое число и записывается в следующем виде:

$$\Delta \varphi_{\text{изм}} + 2\pi n = \frac{2\pi}{\lambda} R = \frac{\omega R}{c}.$$

Здесь n – целое число полных периодов фазы.

Элементом, способным оценить сдвиг фаз между излучаемым и принятым сигналами, является фазометр. Информация с него поступает на счётно-решающий прибор, алгоритм которого реализует вышеприведённую формулу. Для работы фазометра необходимо постоянное присутствие двух сигналов, что требует непрерывного или квазинепрерывного режима излучения и приёма. В свою очередь это требует частотного разделения каналов запроса и ответа при запросном варианте построения дальнометра или наличие отдельных антенн для приёма и передачи в радиолокационном варианте.

Достоинство фазового метода состоит в высокой точности измерения расстояния, составляющей сотые доли длины волны. Указанное свойство особенно проявляется в диапазоне УКВ, в котором работает большинство высокоточных навигационных систем.

Недостатком метода является неоднозначность измерения, происходящая из-за свойства фазометров оценивать разность фаз лишь в пределах 0 – 360 градусов. Измеряемое же расстояние практически всегда намного больше одного периода, т.е. целое число периодов сдвига фазометр пропускает. Устранение неоднозначности производится различными способами и будет рассмотрено ниже.

Литература: [1, с. 51–56], [2, с.136–280], [3, с. 9–10], [5, с. 79–103], [конспект лекций, темы 4, 5, 6, 7].

1.11. Измерение суммы расстояний

Суммарно-дальномерное устройство предполагает рассмотрение трёх точек в пространстве или на плоскости: корабля и двух навигационных точек. Навигационные точки имеют известные координаты и разнесены на расстояние, называемое базой устройства. Корабль информацию о линии положения не извлекает, а производит лишь активную или пассивную ретрансляцию сигнала. В одной из навигационных точек располагается передатчик, в другой – приёмник. По структуре точек и составу аппаратуры устройство повторяет вариант разнесённой радиолокации. Измерение суммы расстояний возможно как в точке излучения, так и в точке приёма. В любом случае в измерительный пункт необходимо передавать информацию о моменте излучения или приёма сигнала. Делается это по отдельному каналу синхронизации или путём ретрансляции принятого сигнала в передающую точку, в последнем случае время ретрансляции нужно учитывать. Возможен также вариант с использованием системы единого времени.

Измеренному значению суммы расстояний соответствует линия положения в виде эллипса и поверхность в виде эллипсоида. Ещё раз отметим, что измеряется сразу сумма расстояний, каждое из расстояний отдельно не определяется.

Информативным относительно суммы расстояний может быть любой из параметров сигнала, кроме амплитуды. Будем иметь в виду, что достоинства и недостатки методов повторяют таковые для измерителей расстояния. В соответствии с этим рассмотрим три варианта построения устройств.

Временной метод, как и при измерении расстояния, может использовать импульсный или непрерывный сигнал. Вариант построения измерителя с непрерывным сигналом предполагает первичную периодическую модуляцию (случайную или квазислучайную) одного из его параметров. В любом варианте определяется временной интервал либо между двумя импульсами, либо между двумя случайными сигналами, который затем пересчитывается в сумму расстояний. При импульсном сигнале ретранслятор может не изменять несущую частоту, непрерывный режим требует частотного разделения принятого и ретранслированного сигналов.

Частотный метод реализуется следующим образом. Передатчик излучает частотно-модулированный сигнал. Закон модуляции может быть различным, предпочтительным является линейный двусторонний симметрич-

ный. Ретранслятор вводит фиксированную известную временную задержку для обеспечения разнесения принимаемой частоты и излучаемой. В приёмной точке изменение несущей частоты будет повторять модуляцию излучаемого сигнала, но иметь временную задержку, определяемую суммой расстояний и задержкой в ретрансляторе. Обработка сигналов возможна в точке излучения или приёма при передаче, соответственно, принятого или излучаемого сигналов в избранную точку. Время передачи при обработке также необходимо учесть. Выделение разностной частоты возможно путём образования биений с последующим детектированием и фильтрацией. Измерение частоты производится устройством типа анализатора спектра. Вычислительное устройство реализует следующий алгоритм относительно суммы расстояний:

$$R_1 + R_2 = \frac{cT\Delta f}{2f_{\text{дев}}} - c\Delta t_p,$$

где Δt_p – задержка в ретрансляторе.

В фазовый методе отличия от фазового метода измерения расстояния минимальны. Можно производить измерение разности фаз на несущей частоте и не частоте модуляции. Требуется применять непрерывный или квазинепрерывный режим излучения и производить смену частот в точке ретрансляции сигнала: дробно-кратное с сохранением когерентности при измерении разности фаз на несущей частоте и произвольное смещение, если информативной является фаза модулирующего сигнала.

Литература: [1, с.57–59], [2, с.136–280], [конспект лекций, темы 4, 5, 6, 7].

1.12. Измерение разности расстояний

Разностно-дальномерное устройство состоит из двух радиопередатчиков (реже радиоприёмников), расположенных в точках с известными координатами и образующих базу устройства. Передатчики (радиомаяки) работают совместно и излучают синхронные или синфазные сигналы. В приёмной точке информация о моменте излучения отсутствует, поэтому временной интервал или разность фаз между принятыми сигналами определяется не абсолютными значениями расстояний, а их разностью. Оценка разности расстояний и использование полученной информации производятся в приёмной точке, т. е. на корабле. Если базу образуют приёмные установки, то в третьей точке располагается передатчик. Разность расстояний от передатчика измеряется в одной из приёмных точек, для этого необходимо обеспечить передачу в измерительную точку второго сигнала. Время трансляции должно быть учтено.

Временной метод задания линий положения с применением импульсных сигналов внедрён в первых системах дальней навигации. Синхронизация радиомаяков производится по специальному каналу, с помощью системы единого времени или по принципу ведущая плюс ведомая станции. Все маяки системы, иногда только пары или тройки, работают на одной частоте. Пе-

риод повторения импульсов определяется временем распространения сигнала вдоль линии базы. Длительность импульса задаёт разрешающую способность, которая здесь определяет минимальную измеряемую разность расстояний, т.е. фактически предельную точность измерения. Однако последнее утверждение справедливо при невозможности разделения передних фронтов частично перекрывающихся импульсов. Если это возможно, то длительность импульса влияет лишь на энергетику системы. Передний фронт импульса определяет точность измерения временного интервала и разности расстояний.

Измерители временных интервалов имеют большое число вариантов построения. Они могут быть аналоговыми и цифровыми. Аналоговые строятся по схеме с непосредственным измерением, с косвенным измерением и с компенсационным измерением.

В случае использования непрерывных сигналов, как и при измерении расстояний и суммы расстояний, они должны быть промодулированы по одному из параметров случайным непериодическим или квазислучайным периодическим сигналом. Синхронизация излучаемых сигналов производится относительно модулирующего сигнала. На борту оценка временной задержки выполняется с помощью коррелятора, который фактически реализует компенсационный вариант построения измерителя. Квазислучайные сигналы при обработке могут в отдельности подвергаться операции сжатия, а временной интервал определяется между сжатыми импульсами.

Частотный метод предполагает излучение частотно-модулированных сигналов. Закон изменения частоты – линейный, однако может быть гармоническим. Параметры модуляции (девиация и период) должны быть строго одинаковыми во всех точках излучения, причём начала изменения частоты – синхронными. Осуществляется это путём передачи модулирующего сигнала по специальным линиям или же путём введения принципа ведущая плюс ведомая станция.

На борту принимаются два ЧМ-сигнала, временной сдвиг частот которых определяется разностью расстояний. О временном сдвиге судят по текущей разности частот. Пересчёт разности частот в разность расстояний двухэтапный – через параметры модуляции и скорость света:

$$R_1 - R_2 = \frac{cT\Delta f}{2f_{\text{дев}}},$$

где Δf – измеренная разность частот,

$f_{\text{дев}}$ – девиация частоты,

T – период модуляции,

c – скорость света.

Как и при измерении дальности подвижность приёмной точки приводит к смещению одного из графиков по оси частот и к различию мгновенных разностей частот на этапах нарастания и убывания частоты. Однако в рассматриваемых устройствах отмеченный эффект определяется не абсолютны-

ми значениями радиальных скоростей корабля относительно радиомаяков, а их разностью.

В фазовом методе разность расстояний можно выразить в длинах волн (в фазовых градусах или радианах) с помощью волнового числа. Оценив разность фаз сигналов от двух радиомаяков, можно пересчитать её в разность расстояний по формуле:

$$R_1 - R_2 = \frac{\lambda}{2\pi} (\Delta\varphi_{изм} + 2\pi n),$$

где λ – длина волны,

n – целое число периодов фазы,

$\Delta\varphi_{изм}$ – измеренная фазометром разность фаз.

Как и всегда, фазовый метод предполагает применение непрерывного или квазинепрерывного сигнала. Для разделения сигналов используют частотное или временное разнесение, поскольку другие виды разнесения малоэффективны или неприемлемы.

Фазовые разностно-дальномерные устройства могут работать на частоте модулирующего гармонического сигнала.

Литература: [1, с. 59–63], [2, с. 141–164], [3, с. 76–100], [конспект лекций, темы 4, 5, 6, 7].

1.13. Измерение скоростей

Скорость корабля является второй по значению навигационной характеристикой после координат. Так двумерный вектор скорости широко используется в дальней навигации для реализации метода счисления пути при определении координат подводных, надводных и воздушных кораблей. Трёхмерный вектор скорости в конкретной точке траектории космического корабля полностью определяет его дальнейшую траекторию при баллистическом полёте. Радиоэлектронные измерители скорости используют эффект Доплера. Зависимость доплеровского сдвига (доплеровского смещения) частоты от радиальной скорости выражается формулой:

$$f_D = \frac{V_R f_0}{c} = \frac{V_R}{\lambda},$$

где V_R – радиальная скорость,

f_0 – излучаемая частота.

Измерители радиальной скорости делятся на автономные и неавтономные. Автономные измерители, известные как доплеровские измерители скорости и сноса (ДИСС), располагаются на борту корабля и позволяют определять модуль путевой скорости и угол между направлениями воздушной и путевой скоростей. Неавтономные измерители могут располагаться на борту или на земле и реализуют беззапросный или запросный вариант построения.

Автономные измерители строятся как измерители модуля путевой скорости и угла сноса. Направление воздушной скорости совпадает с продольной осью корабля, находящегося в активном движении. Такие измерители,

называемые ДИСС, совместно с компасами, определяющими истинный курс, позволяют оценить полный вектор путевой скорости.

ДИСС состоит из приёмо-передатчика, излучающего сигнал под острым углом к земной поверхности и принимающего отраженный сигнал. Совместная обработка этих сигналов позволяет выделить доплеровское смещение частоты, определяемое величиной скорости сближения корабля с землёй в направлении радиолуча.

Измеряется также угловая скорость (скорость изменения угла). Метод предполагает оценку угловой скорости или тангенциальной составляющей вектора скорости по разности радиальных скоростей, полученных в двух пространственно разнесённых точках. Такое разнесение обуславливает различие углов на движущийся объект из точек измерения и различие радиальных скоростей. Последние определяются по доплеровским сдвигам частот. Выражения для угловой скорости и тангенциальной составляющей вектора скорости имеют вид:

$$\dot{\theta} = \frac{\Delta f_{\text{д}} c}{d \cos \theta \cdot f}, \quad V_{\tau} = \frac{\Delta f_{\text{д}} c R}{d \cos \theta \cdot f}.$$

Здесь d – база устройства,

θ – угол на объект из середины базы,

f – частота сигнала,

c – скорость света,

R – расстояние до объекта,

Δf – разность доплеровских частот.

Литература: [1, с. 64–73], [2, с. 230–280], [3, с. 161–179], [5, с. 212–217], [конспект лекций, темы , 5, 7].

1.14. Расчетные задания

Рассчитать и построить линии равной точности для оценки рабочей зоны систем местоопределения следующих типов.

А. Дальномерно-угломерная система, расположенная в одной точке.

Погрешности измерения (СКО) навигационных величин следующие: $\sigma_R = 0,1-3,0$ км; $\sigma_{\theta} = 0,1-3,0$ град. Коэффициент корреляции погрешностей от 0 до 0,5.

Б. Дальномерная система, расположенная в двух точках.

Погрешности измерения (СКО) навигационных величин следующие: $\sigma_R = 0,1-3,0$ км; $\sigma_{\theta} = 0,1-3,0$ градуса. Коэффициент корреляции погрешностей от 0 до 0,5. Расстояние между точками (база) 5–50 км.

В. Дальномерно-угломерная система, расположенная в двух точках.

Погрешности измерения (СКО) расстояний: $\sigma_R = 0,1-3,0$ км. Измерители равноточные. Коэффициент корреляции погрешностей от 0 до 0,5. Расстояние между точками (база) 5–50 км.

Г. Угломерная система, расположенная в двух точках.

Погрешности измерения (СКО) углов: $\sigma_\theta = 0,1-3,0$ градуса. Измерители равноточные. Коэффициент корреляции погрешностей от 0 до 0,5. Расстояние между точками (база) 5–50 км.

Д. Суммарно-дальномерная система, расположенная в трех точках на одной линии.

Погрешности измерения (СКО) расстояний: $\sigma_R = 0,1-3,0$ км. Измерители равноточные. Коэффициент корреляции погрешностей от 0 до 0,5. Расстояние между точками (база) 5–50 км.

Е. Разностно-дальномерная система, расположенная в трех точках на одной линии.

Погрешности измерения (СКО) расстояний: $\sigma_R = 0,1-3,0$ км. Измерители равноточные. Коэффициент корреляции погрешностей от 0 до 0,5. Расстояние между точками (база) 5–50 км.

Ж. Дальномерно-разностно-дальномерная система, расположенная в двух точках.

Погрешности измерения (СКО) расстояний: $\sigma_R = 0,1-3,0$ км. Коэффициент корреляции погрешностей от 0 до 0,5. Расстояние между точками (база) 5–50 км.

З. Суммарно-разностно-дальномерная система, расположенная в двух точках.

Погрешности измерения (СКО) расстояний: $\sigma_R = 0,1-3,0$ км. Коэффициент корреляции погрешностей от 0 до 0,5. Расстояние между точками (база) 5–50 км.

Примечание. Конкретные цифры в задании определяет преподаватель.

1.15. Задачи [4]

1. Выбрать масштабные частоты фазового дальномера, предназначенного для измерения дальности до 500 км со среднеквадратической ошибкой 50 м. Считать, что источником погрешности являются случайные ошибки фазовых измерений, распределенные нормально с нулевым средним значением и среднеквадратическим отклонением 5° .
2. Самолетный радиовысотомер предназначен для измерения высоты, не превосходящей 2 км, и должен иметь дискретность измерений не больше 2 м. Выбрать девиацию частоты и частоту модуляции.

3. Пеленгование производится в горизонтальной плоскости в секторе $\pm 60^\circ$ фазовым методом. Среднеквадратическая ошибка определения угла на краях сектора составляет $0,5^\circ$. Определить необходимый разнос антенн для обеспечения заданной точности пеленгования, если среднеквадратическая ошибка измерения разности фаз равняется 10° . Определить сектор однозначного пеленгования при полученном разносе.
4. Дальномер наземной радиолокационной станции предназначен для измерения дальности в диапазоне от 500 до 1500 км с разрешающей способностью 50 м. Выбрать частоту следования импульсов, длительность импульса, тип выходного устройства. Учесть влияние выходного устройства на разрешающую способность.
5. Найти ширину спектра сигнала, излученного однолучевым самолетным измерителем скорости и отраженного от земной поверхности, если ширина диаграммы направленности составляет 10° , а облучение ведется под углом 45° к линии горизонта. Несущая частота 10000 МГц.
6. При поиске цели по дальности (в системе автоматического дальномера) во время прохождения временных стробов дальномера мимо сигнала цели принимаются 50 отраженных импульсов. Чему равно время поиска на интервале 12 км, если ширина строба соответствует интервалу дальности 100 м, а частота следования импульсов РЛС 2000 имп/с?
7. Определить сектор углов, в пределах которого ошибка пеленгования не превосходит ошибки измерения разности фаз. Пеленгование производится фазовым методом. База пеленгатора выбирается из условия однозначного отсчета в секторе $\pm 90^\circ$.
8. Оцените потенциальную разрешающую способность и точность измерения угловых координат РЛС, если диаметр зеркала антенны 6 м, длина волны 10 см и отношение сигнал/шум: $q^2=100$.
9. В дальномере с симметричным пилообразным законом изменения частоты колебаний частота модуляции равна 100 Гц, девиация частоты 10^6 Гц, а дальность действия 300 км. Чему равна разностная частота сигнала в приемнике?
10. Точный геодезический фазовый дальномер предназначен для измерения расстояний до 100 км со среднеквадратической погрешностью, не превосходящей 10 см. Дальномер работает в режиме «запрос-ответ», измерения разности фаз происходят на частотах модуляции со среднеквадратической погрешностью, не превосходящей 5° . Выбрать модулирующие частоты, считая, что вероятность аномальных ошибок измерения дистанции не должна превосходить 1%.
11. Определить наивысшую частоту синусоидальной модуляции незатухающих колебаний дальномера, если максимальная измеряемая дальность целей равна 100 км.
12. Определить потенциальную разрешающую способность пеленгатора, имеющего антенну диаметром 10 м при длине волны 10 см.
13. Построить пеленгационную характеристику фазового угломерного устройства (по выходу фазового детектора) при изменении направления

- на цель в пределах от 0 до 25°. Длина волны равна 10,2 см, расстояние между антеннами 58 см. Указать сектор однозначности.
14. Определить доплеровское смещение частоты сигналов, отраженных от движущегося в направлении измерителя скорости человека, если скорость движения лежит в пределах от 2 до 5 км/ч, а длина волны равна 3 см. Какие требования должны быть предъявлены к стабильности высокочастотного генератора, если допустимы уходы частоты не более 20% от измеряемого доплеровского смещения?
 15. Самолет летит со скоростью 900 км/ч под углом 60° к направлению на наземную радиостанцию, излучающую сигналы на частоте 30 МГц (длина волны 10 м) Определить, сигнал какой частоты будет принимать самолетный приемник.
 16. Импульсный дальномер имеет индикатор на электронно-лучевой трубке с амплитудной отметкой и кольцевой разверткой. Диаметр трубки равен 8 см. Отсчет дальности ведется по механической шкале с предельным значением 40 км, интервал между делениями шкалы равен 10 мм. Оценить среднеквадратическую ошибку отсчета дальности. Начертить структурную схему дальномера.
 17. Трехсантиметровый импульсный дальномер имеет в свободном пространстве дальность действия 50 км. Какой будет его дальность действия при сильном дожде на всей трассе?
 18. У радиовысотомера (самолетного) девиация частоты передатчика 60 МГц, частота модуляции 150 Гц. Как должна измениться частота модуляции, чтобы на высоте 1000 м разностная частота оставалась такой же, как и на высоте 100 м?
 19. Определить частоту следования эталонных импульсов в преобразователе дальности, при которой общая среднеквадратическая ошибка измерения дальности не превосходит 15 м.
 20. Как отразится наличие доплеровского частотного сдвига отраженных сигналов на значении разностной частоты в частотном дальномере при симметричном пилообразном законе изменения частоты излучения?
 21. Как при наличии неизвестного доплеровского сдвига частоты отраженных сигналов в частотном дальномере с симметричным законом модуляции обеспечить точное измерение и дальности и скорости цели?
 22. Частота излучаемых колебаний частотного дальномера изменяется по синусоидальному закону: $f = f_0 + 0.5 \cdot \Delta f_M \cdot \cos \Omega_M t$. Как изменяется разностная частота в приемнике дальномера, если дальность до цели постоянна? При каких условиях можно использовать подобное дальномерное устройство? Предполагается, что время запаздывания отраженных сигналов много меньше периода частотной модуляции ($t_D \ll T_M$).
 23. При использовании двухчастотного фазового дальномера разность фаз колебаний, подводимых к фазовому детектору, составляет 36°; дальность до цели равна 30 км. Определить разность частот дальномера.
 24. При пеленгации целей по методу сравнения амплитуд сигналов используются

две антенны с круговыми диаграммами направленности. Выходное напряжение приемного устройства пропорционально отношению амплитуд принятых сигналов. Найти пеленгационную характеристику угломерного устройства в пределах угла $0-90^\circ$.

25. В частотном дальномере для выделения разностной частоты имеется только один фильтр, настроенный на частоту f_ϕ . Полоса пропускания фильтра Δf_ϕ много меньше возможного диапазона изменения частот: $\Delta f_\phi \ll (f_{P_МАКС} - f_{P_МИН})$. Как можно обеспечить в такой станции измерение дальности целей во всем рабочем диапазоне от $D_{МИН}$ до $D_{МАКС}$?
26. Показать, что поправка на высоту цели, определяемая кривизной Земли, равна $\Delta H = D^2/2R_\ominus$, где R_\ominus - эквивалентный радиус Земли с учетом рефракции радиоволн.
27. Показать, что двухантенное пеленгационное устройство позволяет определять угловую скорость цели при условии измерения доплеровских частот сигналов в каждой точке приема: $\Omega_\psi = \lambda |F_{D1} - F_{D2}| / 2d$. Предполагается, что база антенн d ничтожно мала по сравнению с дальностью до цели D .
28. Максимальная скорость сближения самолетов может достигать 2000 км/ч. Как нужно выбрать частоту следования импульсов самолетного когерентно-импульсного дальномера для обеспечения однозначной селекции целей по доплеровской частоте? Как это скажется на измерении дальности цели? Длина волны РЛС равна 3 см.
29. Радиовысотомер с частотной модуляцией имеет два рабочих диапазона: 0–120 м и 0–1200 м. Предполагая, что значение разностной частоты одинаково для максимальных высот обоих диапазонов, девиация частоты для первого диапазона равна 40 МГц, а частота модуляции не меняется при переключении диапазонов, определить девиацию частоты для второго диапазона.
30. Рабочая длина волны измерителя скорости равна 10 см. Доплеровский сдвиг частоты принятых сигналов равен 5 кГц. Что можно сказать о скорости сближения передатчика и приемника?

1.16. Рекомендуемая литература

1. Дудко Б.П. Радионавигация: учебное пособие. – Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2003.
2. Белавин О.В. Основы радионавигации. – М.: Сов. радио, 1977.
3. Бакулев П.А. Радионавигационные системы: учебник для вузов/ П.А.Бакулев, А.А. Сосновский. – М.: Радиотехника, 2005.
4. Васин В.В., Степанов В.М. Справочник-задачник по радиолокации. – М.: Сов радио, 1977.
5. Денисов В.П. Дудко Б.П. Радиотехнические системы: учебн. пособие. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2006.

2. Радионавигационные устройства и системы

2.1 Бортовой радиопеленгатор (автоматический радиокompас)

Устройство предназначено для определения направлений на наземные радиовещательные станции и приводные радиомаяки относительно продольной оси корабля в горизонтальной плоскости, т.е. курсового угла радиостанции. Обычно направление продольной оси относительно северного направления (истинный курс) известно, поэтому радиокompас позволяет оценить истинный пеленг радиомаяка, т.е. угол на маяк относительно северного направления. Учитывая, что линией положения для угломера является прямая и координаты маяков известны, место корабля может быть определено путём последовательного пеленгования двух маяков. При этом истинные пеленги радиомаяков должны быть пересчитаны к истинным пеленгам корабля из мест расположения маяков, т.е. найдены обратные пеленги. Большинство самолётных радиокompасов работают в диапазонах длинных и средних радиоволн. В состав радиокompаса входят: антенное устройство, радиоприёмное устройство со схемой обработки сигналов, пульт управления и индикаторы. В отечественной аэронавигации эксплуатируется серия радиокompасов, имеющих марку АРК.

Все радиокompасы используют амплитудный метод пеленгования с использованием направленной рамочной антенны.

Радиокompасы АРК-5–АРК-11 имеют поворотную магнитную рамочную антенну с электромеханическим (ручным и автоматическим) управлением ее положения и электромеханическим устройством передачи углового положения на стрелочный индикатор. Принцип действия таких компасов понятно изложен в предлагаемой литературе.

Компасы АРК-15 и последующих разработок используют неповоротную направленную антенну, состоящую из двух ортогонально расположенных в горизонтальной плоскости магнитных рамочных антенн. Для пеленгования радиостанций применяется гониометрическое устройство, состоящее из двух неподвижных ортогонально расположенных катушек индуктивности, внутри которых располагается вращающаяся катушка. Неподвижные антенны разлагают принятый сигнал на две квадратурные по углу составляющие, которые затем внутри неподвижных катушек гониометра создают магнитное поле, ориентированное так же, как и электромагнитное поле, действующее на антенны. Поворотная катушка (вручную или автоматически) устанавливается по направлению магнитного поля внутри неподвижных катушек; положение ее передается электромеханическим устройством на обычный стрелочный индикатор пеленга.

Радиокompасы АРК-85 (АРК-25) относятся к бортовому оборудованию качественно нового поколения. Отличительной их особенностью является использование цифровых методов обработки информации, цветных электронно-лучевых систем отображения данных и систем автоматического и ав-

томатизированного (дистанционного ручного) управления настройкой и режимами работы. Предназначены они для использования на самолетах (Ил-96, Ту-204 и др.) и вертолетах в качестве угломерного радионавигационного устройства. Радиокompасы обеспечивает решение навигационных задач при маршрутных полетах и при заходе на посадку, работает в международном диапазоне частот и удовлетворяет требованиям ИКАО и рекомендациям ARINC.

Установка радиокompасов обеспечивается как в виде автономного устройства, так и в составе цифровых навигационных комплексов. Автоматическое управление радиокompасом осуществляется сигналами, формируемыми вычислительной системой самолетовождения (ВСС) по вводимым перед вылетом данным о заданном маршруте, координатах и рабочих частотах приводных радиостанций. ВСС реализует временную программу перестройки АРК.

Ручное управление радиокompасом АРК-85 производится пилотом или штурманом, оперирующими органами управления, представленными на комплексном пульте (КП) РТС. КП РТС — это специализированный пульт, предназначенный для управления бортовым связным и радионавигационным оборудованием.

Радиокompас АРК-25 по схемным и конструктивным решениям очень близок к АРК-85. Основной отличительной особенностью его является то, что ручное дистанционное управление им осуществляется с помощью пульта управления и индикации ПУИ-85, предназначенного в первую очередь для управления вычислительной системой самолетовождения. ПУИ-85 имеют буквенное и цифровое наборные поля, что существенно расширяет номенклатуру оперативных процедур, реализуемых с его помощью в процессе управления ВСС и РТС.

Информация, получаемая с помощью АРК-25 и АРК-85, отображается на экране комплексного индикатора навигационной обстановки (КИНО).

Технические характеристики различных радиокompасов представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Технические характеристики радиокompасов

Характеристика	АРК-11	АРК-15	АРК-У2	АРК-22	АРК-25	АРК-85
Диапазон частот, кГц	120–1340	150–1800	100–150	150–1750	150–1750	150–1750
Предельная чувствительность, мкВ/М, не хуже	40–60	25	50	25	25	-
Погрешность определения курса, град, не хуже	2,5	2	3	1,5	±2,0	2
Точность установки частоты, Гц	250	100	-	-	-	-

Время перестройки частоты, с	8	2–4	-	-	2	2
Полоса пропускания, Гц:						
- широкая	2000	2,7	-	-	-	-
- узкая	600	1,2				
Избирательность, дБ	-	-	-	-	80	
Выходная мощность звукового сигнала, мВт	-	-	-	-	100	-
Скорость индикации, град/с	-	-	-	-	30	
Напряжение питания переменного тока частотой 400 Гц, В	-	-	-	-	115	-
Диапазон рабочих температур, °С	-	-			-60 +60	-
Масса приемного устройства, кг	35	15,7	10	7,7	3,9	-
Количество предварительно записываемых частот настройки	-	-	-	-	38	-
Дальность действия по приводу, км	-	200–400	-	-	250–500	250–500
Высотность, км	-	25	25			
Среднее время наработки на отказ, час	-	300	-	1000	-	-

Как видно из таблицы, основные технические характеристики радиоконпасов изменяются мало. Уменьшаются масса, габариты и энергопотребление, повышается надежность, т.е. улучшаются те параметры, которые определяются элементной базой схемного построения АРК.

Литература: [1, с. 83–86], [2, с. 128–136], [3, с. 130–139], [4, с. 31–58], [конспект лекций, тема 4], данные Интернет.

2.2. Аэродромный автоматический радиопеленгатор

Автоматические радиопеленгаторы (АРП) представляют собой наземные устройства, предназначенные для определения азимута корабля из места расположения АРП по сигналам бортовых УКВ связных радиостанций. АРП применяются также для опознавания кораблей; в этом случае они работают совместно с обзорными РЛС. Широкое применение в аэропортах получили автоматические радиопеленгаторы серии АРП (АРП-6, АРП-7с, АРП-80к, АРП-95 и др.).

АРП ранних разработок (АРП-6, АРП-7с и др.) относится к классу амплитудных устройств, реализующих вариант сравнения амплитуд сигналов с двух одновременно работающих разнесённых антенн, расположенных взаимно перпендикулярно. Каждая антенна представляет собой два противофазно включённых вибратора, разнесённые в горизонтальной плоскости на расстояние, меньшее половины длины волны. Нормированная диаграмма направленности такой антенны имеет форму косинусоиды, как и рамочная антенна. Одна пара вибраторов ориентирована в направлении север-юг, другая – запад-восток. Кроме этого имеется ненаправленная центральная антенна. Общий принцип работы пеленгатора соответствует принципу работы радиокомпаса. Сигналы с разнесённых антенн подвергаются балансной модуляции напряжениями различных низких частот от внутренних генераторов. Аналитически эти сигналы можно представить как

$$u_{Б1} = U_B \cos \theta \cos \Omega_1 t \cos \omega t,$$

$$u_{Б2} = U_B \sin \theta \cos \Omega_2 t \cos \omega t,$$

где Ω_1, Ω_2 – частоты модуляции,

θ – азимут источника излучения.

После сложения сигналов, описанных этими выражениями, с сигналом от ненаправленной центральной антенны результат может быть записан в следующем виде:

$$u_{\Sigma 1} = U_{Ц} (1 + m_1 \cos \Omega_1 t) \cos \omega t,$$

$$u_{\Sigma 2} = U_{Ц} (1 + m_2 \cos \Omega_2 t) \cos \omega t,$$

где $U_{Ц}$ – амплитуда сигнала с центральной антенны.

Коэффициенты глубины модуляции равны

$$m_1 = \frac{U_B}{U_{Ц}} \cos \theta, m_2 = \frac{U_B}{U_{Ц}} \sin \theta$$

и определяются азимутом источника, а фазы огибающих с частотами Ω_1 и Ω_2 (6 и 5 кГц) зависят от того, каким из лепестков диаграмм принимаются сигналы. На выходе приёмника низкочастотные сигналы разделяются фильтрами, идут на фазовые детекторы, а затем генераторы развёртки преобразуют эти сигналы в пилообразные импульсы, следующие с частотой около 200 Гц. Полярность импульсов соответствует полярности напряжений на выходе фазового детектора, а амплитуда зависит от величины этого напряжения. Эти напряжения обеспечивают отклонение луча электронно-лучевой трубки, угол отклонения луча равен азимуту пеленгуемой станции.

В состав АРП входят: антенная система с антенной головкой, приёмно-измерительное устройство, контрольно-измерительный генератор и радиостанция для связи с самолётами с дискоконусной антенной. Основные антенны установлены на мачте высотой около 10 м, расположенной над аппаратной и могут поворачиваться. Антенна контрольно-измерительного генератора устанавливается на треноге на расстоянии 75 м в северном или другом известном направлении.

$$e_a(t) = E_a \sin \left[2\pi ft + \frac{2\pi}{\lambda} R \cos(2\pi Ft - \theta) \right].$$

Пеленгатор комплектуется двумя приёмниками радиостанции РСИУ-4 или ей подобной. Диапазон рабочих частот составляет 118–150 МГц, среднеквадратическая погрешность пеленгования не хуже 3 градусов.

Автоматический радиопеленгатор АРП-7с выполняет те же функции, что и АРП-6, имеет такой же состав и принцип работы. Отличием является то, что вместо ЭЛТ в качестве индикатора используется магнитный индикатор направления. Последний представляет собой магнитоэлектрический логометр, состоящий из двух взаимно перпендикулярных рамок (статорная часть) и вращающегося магнита (роторная часть). На статорную часть поступают сигналы с фазовых детекторов, пропорциональные синусу и косинусу угла азимута, и образуют внутри поле, соответствующее полю пеленгуемой станции. Ротор с индикаторной стрелкой поворачивается по направлению статорного поля, тем самым указывает азимут. Диапазон рабочих частот пеленгатора 118–136 кГц, среднеквадратическая погрешность пеленгования составляет 3 градуса.

Пеленгаторы АРП-75, АРП-80к, АРП-95 и др. реализуют другой принцип определения направления. Принцип работы такого радиопеленгатора заключается в приёме сигнала пеленгуемого передатчика на вращающуюся (коммутируемую) по окружности в горизонтальной плоскости антенну (симметричный полуволновый вибратор).

В результате вращения антенны возникает эффект Доплера из-за изменения расстояния между передатчиком и работающим вибратором. В результате этого на принимаемый сигнал налагается фазовая (частотная) модуляция. В устройстве преобразования информации АРП происходит последовательное выделение налагаемого закона фазовой модуляции и определение начальной фазы первой гармоники этого закона. Начальная фаза определяется пеленгом на радиопередатчик.

Фаза ЭДС, наводимой в неподвижной антенне, расположенной в центре окружности, равна:

$$\varphi_0 = 2\pi ft,$$

где f – частота принимаемого сигнала.

Мгновенное значение ЭДС в излучателе, вращающемся по окружности радиуса R с частотой F , равно:

$$e_a(t) = E_a \sin[2\pi ft + R \cos(2\pi Ft - \theta)].$$

Следовательно, ЭДС в антенне модулирована по фазе частотой F , причем начальная фаза θ модулирующего колебания соответствует пеленгу передатчика.

Фаза ЭДС в коммутируемой антенне отличается от φ_0 на величину:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} R \cos(2\pi Ft - \theta),$$

где θ – пеленг передатчика,
 $2\pi Ft$ – текущее значение азимута вращающейся антенны,
 λ – длина волны принимаемого сигнала.

Величина

$$\Delta\varphi_M = \frac{2\pi}{\lambda} R$$

называется индексом фазовой модуляции и характеризует максимальное значение отклонения фазы относительно φ_0 , происходящее при вращении антенны.

Если принятые колебания усилить, подать на фазовый демодулятор и отфильтровать, то на выходе НЧ-фильтра сигнал содержит информацию о пеленге:

$$U = U_m \cos(2\pi Ft - \theta).$$

Для определения пеленга необходимо сравнить напряжение с опорным напряжением той же частоты (этот сигнал обеспечивает «вращение» вибратора):

$$U_{on} = U_{m\ on} \cos 2\pi Ft.$$

Фаза сигнала U_{on} подстроена так, она равна нулю в моменты прохождения вращающейся антенной северного направления. Показания индикатора пеленга соответствует разности фаз сигналов U и U_{on} , т.е. пеленгу. На практике вместо вращающейся антенны применяются системы расположенных по окружности неподвижных вибраторов, которые с помощью коммутатора последовательно подключаются к входу приемника. Такой радиопеленгатор называется квазидоплеровским. Вращение одного вибратора по окружности имитируется последовательным переключением 16 вибраторов с частотой переключения $F_n = 525$ Гц. При этом частота вращения антенны получается равной:

$$F = \frac{F_n}{16} = 32,6 \text{ Гц.}$$

Переключение вибраторов осуществляется с помощью электронного коммутатора и выключателей, управляемых прямоугольными импульсами, которые формируются в аппаратуре управления и контроля.

Радиопеленгатор АРП-75 имеет следующие характеристики.

1. Обеспечивает пеленгование самолётов с точностью, характеризуемой следующими ошибками:

- максимальной инструментальной ошибкой не более $\pm 1^\circ$,
- вероятной ошибкой не более 1° .

Коэффициент подавления ошибок от переотражателей (по сравнению с малобазовыми радиопеленгаторами) 4–6.

2. Зона пеленгования по азимуту 360° .

3. Зона пеленгования по углу места 38° .

4. Дальность пеленгования при мощности бортовой УКВ-радиостанции 5 Вт и высоте полёта:

1000м ----- не менее 100км,

3000м ----- не менее 180км,
10000м ----- не менее 300км.

5. Диапазон рабочих частот 118–135,975МГц с сеткой через 25МГц.

6. Число одновременно пеленгуемых самолётов, работающих на разных частотных каналах связи от 1 до 8.

7. Время излучения бортового передатчика для получения с заданной точностью не менее 1с.

8. Время готовности к работе после включения питания не более 2 минут.

9. Средняя наработка на отказ каждого канала (с учётом резерва) включая групповую аппаратуру, составляет 1000 часов при среднем времени восстановления одной неисправности 30 мин.

10. Время непрерывной работы 24 часа.

11. Условия эксплуатации:

- температура окружающего воздуха от -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$ (для аппаратуры командно-диспетчерского пункта (КДП) от $+5^{\circ}\text{C}$ до $+40^{\circ}\text{C}$),

- относительная влажность окружающего воздуха до 95% при $+30^{\circ}\text{C}$.

12. АРП может сопрягаться с выносным индикатором кругового обзора РЛС «Скала», «ОПРЛ-4» с индикаторами аппаратуры «Знак», «Стройка-Б».

13. Мощность потребляемая: от сети 380 В 50 Гц 2 кВт (с обогревом 8 кВт), от сети 220 В 50 Гц 700 Вт.

Радиопеленгатор АРП-90 используется в составе оборудования аэродрома местных воздушных линий и может применяться на аэродромах, расположенных в горной местности. Он обеспечивает работу на двух независимых пеленгаторных каналах с отображением информации на цифрострелочных индикаторах и не требует регулировок и настроек аппаратуры при эксплуатации, имеет встроенный автоконтроль.

Технические характеристики пеленгатора представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Характеристики радиопеленгатора АРП-90

Диапазон частот с сеткой через 25 кГц, МГц	118–135, 975
Максимальная инструментальная ошибка, град	от -1 до $+1$
Среднеквадратическая ошибка, град, не более	1,5
Коэффициент подавления ошибок от переотражения	4-6
Зона обзора в вертикальной плоскости, град, не менее	60
Дальность пеленгования при мощности бортовой радиостанции 5 Вт, км, не менее:	
при высоте полета,	
100 м	50
300 м	60
1000 м	120
3000 м	200

Пеленгование при длительности сигнала, с, не менее	1
Потребляемая мощность, Вт, не более	5000
Условия эксплуатации: температура окружающей среды, °С	от -50 до +50
влажность, при +35°С, %	98

Радиопеленгатор АРП-95 обеспечивает следующие технические решения.

- Обслуживание аэродромных зон.
- Микропроцессорная технология и высокочастотная микроэлектроника.
- Непрерывный допусковый контроль излучаемых сигналов и встроенный тестовый контроль.
- Дистанционное автоматизированное управление блоком АРП.
- Отображение информации на экране IBM-совместимого компьютера, индикаторах, дисплеях систем УВД.
- Облегченная антенна усовершенствованной конструкции.

Технические характеристики пеленгатора содержатся в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Технические данные радиопеленгатора АРП-95

Характеристика	Величина
Максимальная инструментальная погрешность	не более $\pm 0,5^\circ$
Вероятностная среднеквадратичная ошибка пеленгования	не более $\pm 0,75^\circ$
Зона действия:	
- в горизонтальной плоскости	0–360°
- в вертикальной плоскости	0–45°
- по дальности	не менее 120 км на высоте 1 км, не менее 220 км на высоте 3 км, не менее 380 км на высоте 10 км
Диапазон частот	118–135,975 МГц с сеткой 25 кГц
Отклонение частоты	не более $\pm 0,001\%$
Число частотных каналов	до 16
Габаритные размеры:	
- блок АРП	350 x 580 x 588 мм
- антенна	6 м (высота) x 3,2 м (диаметр)
Условия эксплуатации	

- вне помещения	температура от -50 до $+50^{\circ}\text{C}$
	ветровые нагрузки до 50 м/с
- внутри помещения	температура от -10 до $+50^{\circ}\text{C}$, относительная влажность до 98% при $+25^{\circ}\text{C}$
Электропитание	
- сеть	однофазная ($187-264$) В, ($47-63$) Гц
- потребляемая мощность	не более 65 ВА для блока АРП, не более $3,0$ кВА при включенной системе терморегулирования
Надежность	
- наработка на отказ	не менее 10000 часов
Срок службы	15 лет

Литература: [1, с.87–90], [2, с. 122–128], [3, с. 123–130], [конспект лекций, тема 4], данные Интернет.

2.3. Системы посадки самолётов

Функции посадочного оборудования при автоматической посадке сводятся к следующему:

- определение с требуемой точностью величин отклонения корабля от заданной траектории посадки в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а также высоты и вертикальной скорости:

- минимизация в момент приземления отклонения от оси взлётно-посадочной полосы (ВПП), боковой составляющей скорости и угла между продольной осью корабля и ВПП в вертикальной плоскости.

Состав посадочной аппаратуры определяется категорией посадки, зависящей от метеоминимума, при котором допускается посадка. Международная организация гражданской авиации (ИКАО) определяет три категории. Системы первой категории выдают информацию для управления посадкой до высоты 60 метров (это высота нижней границы облачности). Системы второй категории обеспечивают то же до высоты 15 метров. Системы третьей категории пригодны для посадки с приземлением при ограниченной или отсутствии видимости и при движении по ВПП. Аппаратура для такой посадки имеет тройное резервирование основных элементов.

В настоящее время эксплуатируются радиосистемы посадки метрового диапазона, обеспечивающие посадку по неизменной заданной на земле траектории. Система состоит из наземной и бортовой частей. Наземная часть задаёт траекторию движения в двух плоскостях с помощью курсового и глиссадного маяков. В отдельных точках траектории производится дублирующий

контроль действительного движения посредством двух или трёх маркерных маяков. Бортовая часть определяет отклонения от заданной радиозоны в двух плоскостях с выдачей информации на индикаторы лётчика и штурмана. В двух или трёх точках снижения появляется сигнал маркерного маяка, требующий проверки в этот момент требуемой высоты. Кроме этого для целей посадки используется информация от автономного бортового радиовысотомера малых высот и от некоторых инерциальных приборов (вариометра, гироскопа и т.п.).

Недостатком систем посадки метрового диапазона является формирование единственной траектории под углом 2–4 градуса к горизонту, что неприемлемо для самолётов с укороченным взлётом и вертолётов. Кроме этого система подвержена значительному влиянию погодных условий на задаваемый угол посадки, поскольку диаграмма направленности антенны глиссадного маяка формируется с участием земной поверхности.

Свободными от указанных недостатков являются системы посадки сантиметрового диапазона. Система также состоит из наземной и бортовой частей, но принцип работы её более сложный. Для обеспечения произвольного угла наклона глиссады соответствующий маяк с узкой диаграммой направленности антенны производит угловое сканирование в вертикальной плоскости. Требуемая данному типу летательных аппаратов глиссада формируется на борту.

Системы посадки метрового диапазона используют методы сравнения или минимума глубины модуляции несущего сигнала. К ним относится ряд отечественных систем СП-48, СП-50, СП-50М, СП-68, СП-70 и т.д., а также варианты международной системы ILS (Instrument Landing System) Бортовое оборудование обычно является многофункциональным. Так отечественная аппаратура КУРС-МП2 работает по сигналам всех перечисленных выше систем, а также канал курса способен принимать сигналы азимутального пеленгового маяка VOR международной системы ближней навигации VOR/DME. Аналогично строится и зарубежная бортовая аппаратура.

Международными нормами определены следующие частотные диапазоны работы маяков любых систем посадки: курсовые – от 108 до 111,975 МГц, глиссадные – от 328,6 до 335,4 МГц, маркерные – 75,0 МГц.

Системы посадки сантиметрового диапазона MLS (Microwave Landing System) разработаны с целью замены систем посадки типа ILS, обладающих следующими недостатками: 1) малые размеры секторов посадки, 2) непригодность для самолётов с вертикальным и укороченным взлётом и посадкой, 3) зависимость параметров каналов курса и глиссады от характера местности вблизи маяков и от метеоусловий, 4) малое число частотных каналов, 5) высокая стоимость строительного-монтажных работ и эксплуатации.

В состав системы входит наземное и бортовое оборудование. Полный комплект наземного оборудования состоит из угломерной и дальномерной подсистем. Угломерная подсистема состоит из четырёх каналов: двух азимутальных и двух угломестных. Состав маяков следующий: 1) азимутальный радиомаяк для задания курса посадки, 2) азимутальный радиомаяк для зада-

ния курса ухода от полосы для захода на второй круг посадки; 3) угломестный радиомаяк для задания глиссады; 4) угломестный радиомаяк для выравнивания самолёта перед приземлением. Радиомаяки передают на борт также некоторую служебную информацию (функции маяка, метеоусловия, координаты антенн маяков, тест для проверки бортовой аппаратуры и т.д.) В состав дальномерной подсистемы входит бортовой запросчик дальности, работающий с наземным ответчиком системы ближней навигации VOR/DME. В упрощенных системах вместо дальномера может использоваться маркерный канал ILS.

В зависимости от вида информативного параметра сигнала ILS делятся на временные (TRSB – time reference scanning beam) и частотные (DMLS – doppler microwave landing system).

В качестве международной принята в эксплуатацию система TRSB. Временные радиомаяки излучают импульсный сигнал антенной с узкой сканирующей диаграммой направленности (ширина диаграммы 1–3 градуса, в зависимости от типа маяка и типа антенны). Сектор сканирования составляет ± 40 град. для азимутального маяка. Диаграмма совершает равномерное сканирование в указанном секторе с полным периодом 0,2 с. За начало периода принимается крайнее правое положение; в этот момент радиомаяк через ненаправленную антенну излучает стартовый импульс. Угловое положение самолета определяется временем между принятыми сигналами от диаграмм во время их прямого и обратного хода (на линии курса это время равно половине периода).

Угломерные радиомаяки содержат передатчик, управляемый сигналами с КДП, антенную систему, устройства контроля и управления. Наиболее ответственным элементом радиомаяка, определяющим точность системы, является антенная система.

В антенных системах TRSB находят применение фазированные антенные решетки, отражательные и линзовые антенны.

Фазированные антенные решетки (ФАР) состоят более чем из 80 модулей, каждый из которых имеет собственный излучатель и фазовращатель. Антенны защищены от воздействия осадков обтекателями.

Управление положением луча в пространстве осуществляется электронным методом. Управляющие сигналы в цифровой форме подаются на фазовращатели ФАР. Одновременное изменение фазовых сдвигов на некоторую постоянную величину обеспечивает поворот фронта волны, а следовательно, и ДНА на угол порядка $0,5^\circ$. При точном контроле амплитуды и фазы колебаний, питающих отдельные модули ФАР, обеспечивается узкая ДНА в рабочей плоскости при малом уровне боковых лепестков и достаточно широкая ДНА в плоскости, перпендикулярной рабочей. Так, например, при размерах ФАР, равных 3,66 м в горизонтальной и 1,22 м в вертикальной плоскостях, ширина ДНА в азимутальной плоскости равна примерно 1° и в угломестной плоскости — порядка нескольких десятков градусов.

Отражательные антенны представляют собой ряд облучателей и отражатель, выполненный в виде части тороидальной поверхности высотой око-

ло 2 и с апертурой около 8 м. Для изменения углового положения ДНА применяется электронное переключение облучателей. Ширина ДНА отражательных антенн в рабочей (обычно азимутальной) плоскости составляет 1–3°.

Линзовые антенны могут применяться в аппаратуре угломестного радиомаяка выравнивания. Антенны обеспечивают ДНА шириной 0,5°.

Частотные DMLS маяки вводят доплеровское изменение частоты сигнала, пропорциональное измеряемому углу. Доплеровский сдвиг возникает в результате поочередного излучения колебаний одним элементом линейной антенной решетки. Коммутация этих элементов создает имитацию движения излучателя вдоль антенны. Поскольку решетка расположена перпендикулярно и симметрично средней линии взлетно-посадочной полосы (для азимутального маяка), то движение вдоль решетки создает движение в направлении самолет – антенна с образованием доплеровского сдвига частоты сигнала, величина которого зависит от угла на самолет относительно средней линии. Для устранения доплеровского сдвига из-за движения самого самолета радиомаяк излучает сигнал еще и через некомутируемую антенну, расположенную в центре антенной решетки. Через эту же антенну излучается на поднесущей частоте еще один сигнал, относительно которого производится измерение доплеровского сдвига, пропорционального углу смещения самолета.

Передачик предназначен для получения колебаний, питающих коммутируемую и опорную антенны во время передачи угломерной информации; модулированного сигнала на поднесущей частоте для передачи дополнительных данных, а также колебаний для питания специальных антенн клиренса, прием излучения которых позволяет определить на борту сторону уклонения от заданной траектории, т. е. получить сигнал вида «Лети вправо (влево)» вне зоны действия основных измерителей угловых координат.

Принципиальное значение в системе DMLS имеет стабильность частоты наземных источников колебаний, используемых для выделения угломерной информации. Данная проблема решается применением общих для всех выходных колебаний источников высокой частоты, охваченных системой автоподстройки частоты по кварцевому генератору. Частота 83,2 кГц, а также и поднесущая 41,6 кГц, получают от стабилизированных генераторов, работающих на частотах: 15,00; 15,0832 и 15,0416 МГц.

Антенная система состоит из трех антенн, конструктивно объединенных на общей раме. Основная, коммутируемая антенна представляет собой обычно волноводно-щелевую решетку, число и взаимное расположение излучателей которой зависит от требуемых ширины луча и размеров сектора, обслуживаемого радиомаяком. Так, например, в азимутальном радиомаяке ширина луча около 1° в секторе $\pm 40^\circ$ обеспечивается при 24 излучателях, расположенных на расстоянии $0,57\lambda$ друг от друга. Апертура антенны равна $54,17\lambda$. Время переключения излучателей в одном направлении 2,5 мс. Излучатели имеют разнос по вертикали, что позволяет сформировать диаграмму направленности с резким провалом под малыми углами места. По концам

решетки размещаются антенна опорного канала и антенна передачи данных. Антенна клиренса размещается вне основной конструкции.

Антенны угломестных радиомаяков аналогичны по конструкции с рассмотренной и отличаются только числом и расположением излучателей. Число излучающих элементов обычно составляет 32, а расстояние между ними 1,7 м в основном маяке (ширина луча около 1° , апертура антенны $54,17\lambda$) или 3,4 м для маяка выравнивания (ширина луча около $0,5^\circ$, апертура антенны $108,34\lambda$).

В антенных системах TRSB находят применение фазированные антенные решетки, отражательные и линзовые антенны.

Фазированные антенные решетки (ФАР) состоят более чем из 80 модулей, каждый из которых имеет собственный излучатель и фазовращатель. Антенны защищены от воздействия осадков обтекателями.

Управление положением луча в пространстве осуществляется электронным методом. Управляющие сигналы в цифровой форме подаются на фазовращатели ФАР. Одновременное изменение фазовых сдвигов на некоторую постоянную величину обеспечивает поворот фронта волны, а, следовательно, и ДНА на угол порядка $0,5^\circ$. При точном контроле амплитуды и фазы колебаний, питающих отдельные модули ФАР, обеспечивается узкая ДНА в рабочей плоскости при малом уровне боковых лепестков и достаточно широкая ДНА в плоскости, перпендикулярной рабочей. Так, например, при размерах ФАР, равных 3,66 м в горизонтальной и 1,22 м в вертикальной плоскостях, ширина ДНА в азимутальной плоскости около 1° и в угломестной плоскости – порядка нескольких десятков градусов.

Отражательные антенны представляют собой ряд облучателей и отражатель, выполненный в виде части тороидальной поверхности высотой около 2 и с апертурой около 8 м. Для изменения углового положения ДНА применяется электронное переключение облучателей. Ширина ДНА отражательных антенн в рабочей (обычно азимутальной) плоскости составляет $1-3^\circ$.

Линзовые антенны могут применяться в аппаратуре угломестного радиомаяка выравнивания. Антенны обеспечивают ДНА шириной $0,5^\circ$.

Литература: [1, с.74–82], [2, с. 139–199], [3, с. 141–160], [4, с. 6–22], [5, с. 192–198], [конспект лекций, тема 4].

2.4. Радиосистемы ближней навигации

Радиосистемой ближней навигации (РБН) называют систему, состоящую из наземных радиомаяков и бортового оборудования и обеспечивающую в пределах зоны действия информацию об азимуте и (или) дальности корабля на его борту. Азимут и дальность определяются относительно радионавигационной точки, в которой расположен радиомаяк и координаты которой известны. Дальность действия аэронавигационных РБН зависит от высоты полета самолета и составляет не менее 400 км при высоте полета более 10000 м. Погрешности определения азимута (СКО) лежат в пределах от 0.125

до единиц градусов в зависимости от типа маяков, определения дальности – около 100 м.

Наземное оборудование РБН состоит из азимутального и дальномерного радиомаяков. Азимутальный маяк является пеленговым маяком, т.е. позволяет определять на борту азимут на корабль из места расположения маяка. Дальномерный маяк является ответчиком, с которым работает бортовой запросчик дальности. В некоторых системах имеется аппаратура для измерения азимута и дальности корабля в месте расположения маяков.

Бортовое оборудование РБН предназначено для измерения азимута и дальности для последующего определения в навигационно-посадочном комплексе координат корабля или отклонения от заданного маршрута движения.

Система в целом состоит из двух радионавигационных устройств: угломерного (азимутального) устройства и дальномерного устройства. Каждое из этих устройств имеет наземную и бортовую часть. Бортовая часть находится на каждом корабле, а наземная часть представляет собой разветвлённую сеть радиомаяков, либо объединённых азимутально-дальномерных, либо только азимутальных или только дальномерных.

Местоположение корабля может определяться по результатам определения двух линий положения: прямой и окружности при работе по одному объединённому маяку. Возможно определение одинаковых линий положения при работе по разнесённым маякам.

Наибольшее распространение в аэронавигации получили отечественные системы, называемые РСБН, и международные системы VOR /DME и TACAN.

Канала азимута систем типа РСБН работает в диапазоне 873.6–935.2 МГц и реализует временной метод задания угла. Азимутальный радиомаяк имеет направленную антенну, вращающуюся со скоростью 100 оборотов в минуту. Кроме этого маяк через ненаправленную антенну излучает опорный импульсный сигнал, позволяющий определить момент времени, когда диаграмма направленной антенны проходит северное направление. Временной интервал между опорным импульсом и сигналом от направленной антенны определяет азимут самолета из места расположения маяка.

В системе VOR /DME для определения азимута используются частоты 108–118 МГц. В настоящее время эксплуатируются так называемые стандартные радиомаяки VOR (very high omnidirectional radio range), реализующий фазовый метод. Излучаемый сигнал формируется антенной системой, имеющей в горизонтальной плоскости слабо выраженную направленность. Вращение диаграммы направленности с частотой 30 Гц приводит к амплитудной модуляции принимаемого сигнала с этой же частотой. В точке с произвольным азимутом θ фаза огибающей амплитудно-модулированного сигнала запаздывает относительно фазы такого же сигнала, принимаемого в северном направлении (опорного сигнала), на величину θ . Опорный сигнал, излучаемый маяком, имеющий частоту 30 Гц и фазу, независимую от азимута точки приёма и равную фазе азимутального сигнала при $\theta=0$, излучается маяком путём частотной модуляции поднесущего колебания. Этот дважды мо-

дулированный сигнал является единственным излучаемым азимутальным маяком сигналом.

Оборудование азимутальных радиомаяков VOR состоит из антенной системы, передающего устройства и контрольно-юстировочной аппаратуры. Электронные устройства собраны на полупроводниковых приборах и конструктивно оформлены в виде съемных функциональных модулей (блоков), размещенных в аппаратной кабине. Кабина располагается под антенной системой РМ. Возможно использование одного или двух комплектов аппаратуры (второй комплект резервный). Предусмотрены дистанционное управление и контроль за работой маяка.

Антенная система маяка состоит из ненаправленной антенны (НА) и антенны вращающегося поля (АВП). Антенны выполнены методом печатного монтажа и представляют собой единую конструкцию из двух скрещенных диполей длиной около $0,17\lambda$ (АВП) и четырех сегментов, расположенных между диполями (НА). Сегментная НА имеет ДНА, отклоняющуюся от идеальной окружности не более чем на 0,25 дБ. Каждый из диполей АВП питается от электронного гониометра балансно-модулированными колебаниями со сдвигом по фазе модулирующих колебаний частоты 30 Гц на 90° . Благодаря этому создается вращающаяся с частотой 30 Гц диаграмма направленности, имеющая форму восьмерки. В радиомаяках VOR ранних конструкций применяются вращающиеся антенны. Антенны НА и АВП размещаются на высоте около 2 м над металлическим противовесом диаметром 5 м. Противовес служит для уменьшения влияния местных объектов в непосредственной близости от АРМ. Возможна установка двух комплектов антенн друг над другом, что обеспечивает выигрыш в 5 дБ по излучаемой мощности.

Антенны НА и АВП окружены решеткой из вертикальных металлических стержней, имеющих длину 1,8 м и расположенных по окружности радиусом 1 м. Решетка служит для подавления паразитной вертикальной составляющей поля примерно на 20 дБ.

В состав антенной системы входит контрольная антенна (КА), которая представляет собой диполь, устанавливаемый у края противовеса, и служит для приема сигналов маяка с целью последующего контроля параметров радиомаяка.

Передающее устройство состоит из задающего генератора и усилителя мощности, который обеспечивает мощность 25 Вт и может работать параллельно с таким же усилителем для увеличения мощности до 50 Вт. В состав передатчика входят источники модулирующих частот 30 и 9960 Гц и датчик сигналов опознавания. Амплитудный модулятор обеспечивает также передачу речевых сигналов. На частотный модулятор подаются колебания частоты 30 Гц (сигнал опорной фазы), получаемые в электронном гониометре.

Контрольно-юстировочная аппаратура состоит из контрольного устройства, осуществляющего прием и демодуляцию сигналов, схемы управления, служащей для контроля азимута, измеренного в точке установки КА, определения соответствия параметров сигналов допускам и выработки сиг-

нала «Авария» при нарушениях работы, а также сигнала на выключение питания радиомаяка или на переход на резервный комплект.

Разработан также доплеровский азимутальный радиомаяк DVOR, отличающийся от стандартного тем, что информация об азимуте заключена в фазе частотно-модулированного сигнала с центральной частотой 9960 Гц, а сигнал опорной фазы передаётся с помощью амплитудной модуляции несущей. Однополосный ЧМ сигнал, соответствующий первой боковой частоте, излучается антенной системой азимутального маяка, которая состоит из 50 вибраторов, размещённых по окружности. При коммутации вибраторов создаётся имитация движения излучающего вибратора по окружности, что приводит к появлению в излучаемом сигнале доплеровского сдвига с частотой вращения излучающего вибратора, т.е. с частотой коммутации. Доплеровский сдвиг относительно первой боковой частоты имеет девиацию 480 Гц и изменяется с частотой коммутации (30 Гц) с фазой, определяемой азимутом точки приёма. Кроме этого, центральный вибратор ЦВ антенной системы постоянно излучает опорный сигнал с частотой 30 Гц путём амплитудной модуляции несущего колебания. Фаза опорного сигнала совпадает с фазой азимутального при нулевом азимуте точки приёма.

В состав оборудования DVOR входят: антенная система, передающее устройство и контрольно-юстировочная аппаратура, а также устройство дистанционного управления и автоматического переключения на резервный комплект.

Электронные устройства собраны на полупроводниковых приборах в виде функциональных блоков и размещены в аппаратной кабине.

Антенная система маяка состоит из ненаправленной антенны, антенного устройства и антенны дальнего контроля. Ненаправленная антенна НА – четырехсегментная, аналогичная соответствующей антенне VOR.

Антенное устройство формирует поле, которое имитирует поле пары вращающихся вибраторов. Антенное устройство состоит из 50 вибраторов, идентичных по конструкции с НА VOR. Вибраторы расположены на равных расстояниях друг от друга по окружности диаметром 13,5 м ($\sim 5\lambda_{cp}$), в центре которой помещена НА. Вибраторы располагаются на высоте 1,3 м над противовесом из металлической сетки, имеющим диаметр 30–40 м.

Антенна дальнего контроля типа волновой канал устанавливается на расстоянии приблизительно 200 м от НА под определенным азимутом.

Передающее устройство содержит задающий генератор, который формирует колебания несущей частоты f_n и боковых частот $f_n \pm 9960$ Гц. Требуемая стабильность средней фазы колебаний основных частот по отношению к фазе несущей (не хуже 7°) обеспечивается системой фазовой автоподстройки, управляющие сигналы на которую подаются от усилителя мощности либо непосредственно (для f_n), либо через сумматоры (для $f_n \pm 9960$ Гц). Усилители мощности обеспечивают выходную среднюю мощность не более 5 Вт, иногда 100 Вт. Последний состоит из пяти идентичных усилителей по 25 Вт каждый, из которых один используется как предварительный усилитель.

Имитация вращения пары вибраторов требует переключения излучающих элементов с определенной частотой и формирования специальной формы огибающей сигналов, подаваемых на пары излучателей для лучшего приближения результата имитации к тому, что возможно при механическом вращении антенны. С указанными целями вибраторы разделяются на две группы (четные и нечетные). Для обеспечения частотной модуляции с частотой 30 Гц верхняя и нижняя боковые полосы излучаются одновременно диаметрально расположенными вибраторами (например, 1 и 26) с последующим переключением на следующую пару вибраторов (2 и 27) со скоростью $25 \cdot 30 \text{ Гц} = 750 \text{ Гц}$. Изменение формы огибающей подаваемых на излучатели сигналов достигается с помощью амплитудной модуляции колебаний поднесущих частот сигналом от генератора модулирующих функций. Модулирующие сигналы подаются со сдвигом по фазе на 90° .

Контрольно-юстировочная аппаратура включает в себя устройства внешнего и встроенного контроля. Функции, выполняемые этими устройствами, аналогичны функциям аппаратуры контроля радиомаяка VOR.

Существует прецизионный доплеровский азимутальный маяк, позволяющий практически полностью исключить влияние рельефа местности на точность определения азимута. Отличием маяка является то, что опорный сигнал передается путём частотной модуляции другой поднесущей частоты, равной 6500 Гц.

Оборудование дальномерных радиомаяков DME состоит из антенной системы, приемного и передающего устройств и контрольно-юстировочной аппаратуры. Все оборудование выполнено в виде съемных функциональных модулей (блоков) и размещено в аппаратной кабине, расположенной под антенной системой. Возможно также размещение кабины на некотором удалении от антенной системы. Находят применение как одинарные, так и вдвоенные комплекты аппаратуры (второй комплект резервный). В состав радиомаяка входят устройства дистанционного управления и контроля работы аппаратуры.

Антенная система ДРМ представляет собой конструктивно объединенные приемо-передающую и контрольную антенны. Приемо-передающая антенна ДРМ состоит из четырех вертикальных рядов полуволновых вибраторов, расположенных по образующим цилиндра, диаметром около 15 см. Максимум излучения антенны поднят на 4° над горизонтом. Ширина луча в вертикальной плоскости не менее 10° по уровню половинной мощности. В горизонтальной плоскости ДНА совпадает с окружностью с точностью не хуже 6–9 дБ.

Контрольная антенна имеет две независимые приемо-передающие антенны (по одной на каждый комплект ДРМ), состоящие из вертикального ряда полуволновых вибраторов, расположенных по образующим цилиндра непосредственно под приемо-передающей антенной.

Все антенны закреплены на металлической конструкции, выполняющей функции рефлектора, и закрыты общим обтекателем диаметром 20 см и

высотой 173 см. При территориальном совмещении радиомаяков VOR и DME антенна последнего монтируется над антенной системой VOR.

Передающее устройство состоит из стабилизированного кварцем задающего генератора, в который входит также варакторный умножитель частоты, усилителя мощности на планарных триодах и модулятора.

Приемное устройство состоит из приемника сигналов запроса дальности, схемы управления нагрузкой ответчика, схемы задержки, а также устройств, предназначенных для декодирования и кодирования сигналов. Для запираания приемного канала после приема очередного запросного сигнала служит генератор строб-импульсов.

Схема установки порога и генератор случайных импульсов формируют из шумового напряжения импульсы, количество которых в единицу времени зависит от числа запросных сигналов на выходе приемника. Схема отрегулирована таким образом, что общее количество импульсов, проходящих через суммирующий каскад, соответствует излучению ответчиком 2700 импульсных пар в секунду.

Контрольно-юстировочная аппаратура служит для определения выхода за пределы допусков основных параметров ДРМ (излучаемой мощности, кодовых интервалов между импульсами, аппаратурной задержки и т. п.) и выдачи сигналов на систему управления и переключения (вводится только при двух комплектах ДРМ) и на соответствующие индикаторы. Эти сигналы могут использоваться для выключения ДРМ.

Азимутально-дальномерный радиомаяк TACAN состоит из радиоприемного и радиопередающего устройств, антенной системы и контрольно-юстировочной аппаратуры. В стационарном варианте радиомаяка TACAN используется аппаратура ДРМ DME со специальной антенной системой, которая обслуживает как канал азимута, так и канал дальности.

Канал азимута системы TACAN (Tactical air navigation system) работает в диапазоне 960–1216 МГц и, как и стандартный VOR, основан на фазовом методе: азимут определяется путём измерения фазы огибающей принимаемых амплитудно-модулированных колебаний относительно опорного сигнала. Реализован двухшкальный метод отсчёта. Для этого азимутальный маяк формирует многолепестковую диаграмму направленности излучающей антенны, представляющую собой кардиоиду в горизонтальной плоскости, на которую наложена периодическая функция угла, имеющая девять периодов по 40 градусов каждый. Диаграмма вращается с частотой 15 оборотов в секунду, что приводит к амплитудной модуляции принимаемого колебания частотами 15 и 135 Гц, причём фаза огибающей на каждой частоте есть функция азимута точки приёма. На частоте 15 Гц эта функция однозначная, поэтому эта частота образует однозначную, но грубую шкалу отсчёта. На частоте 135 Гц образована точная, но многозначная шкала. Азимутальный сигнал имеет импульсный характер, однако частота следования импульсов велика и не искажает форму диаграммы направленности антенны.

Опорные сигналы передаются с помощью группы импульсов, излучаемых каждый раз, когда основной или дополнительный максимум диаграммы

проходит восточное направление. Опорные сигналы служат для синхронизации бортовых генераторов частот 15 и 135 Гц.

Антенная система радиомаяка ТАСАН состоит из приемопередающего активного элемента и пассивных вибраторов.

Активный элемент представляет собой вертикальный широкополосный вибратор, с помощью которого осуществляется прием сигналов запроса дальности и излучение ответных сигналов, а также передача опорных сигналов для канала азимута и сигналов опознавания. Вибратор расположен по оси пластмассовых цилиндров, на которых укреплены пассивные вибраторы.

Пассивные вибраторы служат для амплитудной модуляции сигналов, излучаемых активным вибратором, и размещены по образующим двух цилиндров с радиусами 7,5 и 45 см. Цилиндры вращаются синхронно с угловой скоростью 15 об/с. На внутреннем цилиндре размещен один пассивный вибратор, который при вращении цилиндра модулирует излучаемые сигналы с частотой 15 Гц. Вибраторы, расположенные по образующим внешнего цилиндра на угловом расстоянии в 40° друг от друга, предназначены для амплитудной модуляции излучаемых сигналов с частотой 135 Гц. Глубина модуляции составляет примерно 20 % как на частоте 15 Гц, так и на частоте 135 Гц.

Антенная система имеет диаграмму направленности, максимум которой находится под углом около 5° к горизонту.

Датчики импульсов, размещенные на оси вращения цилиндров, выдают за каждый оборот пассивной системы 1,9 и 90 импульсов соответственно. Первые две последовательности импульсов служат для формирования в аппаратуре радиомаяка опорных сигналов, а третья используется для получения сигналов опознавания радиомаяка.

Система стабилизации обеспечивает постоянство частоты вращения пассивных вибраторов с погрешностью не более 1%. Эта система производит сравнение частоты следования импульсов, снимаемых с третьего датчика (1350 Гц), с частотой стабилизированного камертоном генератора. Сигнал ошибки, вырабатываемой данной системой, воздействует на электродвигатель привода цилиндров с пассивными вибраторами, изменяя соответствующим образом скорость его вращения.

Бортовое оборудование канала азимута имеет два практически идентичных тракта грубого и точного измерения азимута, каждый из которых построен по компенсационному принципу.

Каналы дальности всех РБН используют запросный метод и реализуют временной вариант измерения дальности при импульсном сигнале. В состав канала входит бортовой запросчик с измерителем дальности и наземный дальномерный радиомаяк (ответчик дальности). Несущие частоты запросного и ответного сигналов различны. Запросный канал работает на частотах 772–812,2 МГц (РСБН) и 1025–115 МГц (DME и ТАСАН), канал ответа 939,6–1000,5 МГц и 960–1215 МГц, соответственно. Импульсный характер

сигналов позволяет маяку работать одновременно с несколькими запросчиками.

Существует ряд морских РБН.

Отечественная разностно-дальномерная, многочастотная, фазовая радионавигационная система «Марс-75» разработана по заказу Минобороны и предназначена для обеспечения судовождения, выполнения гидрографических и специальных работ, а также полетов самолетов со скоростями, не превышающими 1000 км/час. Система эксплуатируется с 1976 года; серийный выпуск наземных станций прекращен. Работа действующих цепей планируется до выработки технического ресурса. Зарубежных аналогов система не имеет.

ТТХ системы следующие:

- количество станций 3–4,
- диапазон рабочих частот 64–92 МГц,
- площадь рабочей зоны 0.8–1.0 млн. кв.км,
- погрешность определения места (СКО) 60–350 м.

Отечественная разностно-дальномерная время-фазовая система БРАС-3 предназначена для обеспечения судовождения в прибрежной зоне плавания и при подходе к портам. Серийный выпуск системы прекращен, она снимается с эксплуатации и заменяется системой РС-10.

ТТХ системы следующие:

- количество станций 3,
- диапазон рабочих частот 2.2 МГц,
- дальность действия 200 км,
- погрешность определения места (СКО) 12–60 м.

Отечественная система РС-10 по назначению и принципу действия аналогична системе БРАС-3, но имеет более высокие характеристики. Система принята в эксплуатацию в 1987 году. Аналогами систем РС-10 и БРАС-3 являются системы «Жеолок» (Франция) и «Хайперфикс» (Англия).

ТТХ системы следующие:

- количество станций 3–6,
- диапазон рабочих частот 1.0–2.2 МГц,
- дальность действия 250 км,
- погрешность определения места (СКО) 3.6–12 м.

Отечественная дальномерная двухканальная система ГРАС (ГРАС-2) предназначена для решения задач гидрографии и других специальных задач, требующих высокоточное определение координат. Система принята в эксплуатацию в 1975 году, в настоящее время серийный выпуск ее прекращен, по мере выработки ресурса станции системы будут сниматься с эксплуатации.

ТТХ системы следующие:

- количество станций 1,
- диапазон рабочих частот 4100–4300 МГц,
- дальность действия 60 км,
- погрешность определения места (СКО) 0.5–1.5 м.

Отечественная дальномерная фазовая радиогеодезическая система «Крабик» предназначена для высокоточной привязки подвижных и стационарных надводных объектов в прибрежной зоне. Ее первые модификации «Крабик-Д» и «Крабик-Б» носили сугубо мирный характер. Система «Крабик-Б» разработана в 1986 году. В перспективе она будет использоваться до внедрения радиогеодезического комплекса «Крабик-БМ», имеющего двойное назначение. Разработка последнего начата в 1990 году. В комплексе реализованы четыре режима работы: разностно-дальномерный, дальномерный, комбинированный и активный дистанционный (с использованием буйковых радиомаяков-ретрансляторов).

ТТХ системы следующие:

- количество станций 1–3, в системе 2–8,
- диапазон рабочих частот 321–331 МГц,
- дальность действия 100 км,
- погрешность определения места (СКО) 1.0 м.

Литература: [1, с.91–97], [2, с. 76–122], [3, с. 101–120], [4, с. 64–87], [5, с. 199–202], [конспект лекций, тема 5], данные Интернет.

2.5. Радиосистемы дальней навигации

Радиосистемы дальней навигации предназначены для определения местоположения корабля на расстояниях до 1500 км и более. Системы состоят из радиопередающих устройств (опорных станций), стационарно расположенных на земной поверхности в точках с известными координатами, и бортового оборудования. Последнее производит измерение разности расстояний до опорных станций и вычисляет координаты корабля. К радиосистемам дальней навигации (РДН) относятся время-фазовые и фазовые длинноволновые и сверхдлинноволновые системы, а также временные средневолновые системы. Наибольшее распространение получили системы «Лоран-А», «Лоран-С», «Лоран-Д», система «Омега», а также отечественные системы «Чайка» и «Маршрут».

Системы «Лоран» обеспечивают навигацию в наиболее важных районах земного шара (побережье США, район Японии, район Скандинавии и др.), а система «Омега» обеспечивает глобальную навигацию.

Система «Лоран-А» (LORAN – long range navigation) относится к классу временных (импульсных) разностно-дальномерных (гиперболических) РДН и образуется цепочками, состоящими из нескольких передающих станций. В настоящее время система, как устаревшая, выводится из эксплуатации.

Система «Лоран-С» относится к классу время-фазовых разностно-дальномерных (гиперболических) РДН и образуется, как и система «Лоран-А», цепочками станций. Система разрабатывалась в 1950–1956 гг. по заказу МО США для навигационного обеспечения ВМС США. В настоящее время система широко используется военными и гражданскими потребителями на

морских, воздушных и наземных объектах. Построено 68 станций, работающих цепочками по 3–5 станций в количестве 26. США планировали эксплуатацию системы до 2015 г., однако после развертывания спутниковой системы навигации второго поколения рассматривается вариант прекращения ее эксплуатации. Независимо от решений США по данному вопросу РБН продолжает развиваться в других странах в качестве региональных средств. Основные ГТХ системы следующие:

- рабочая частота 100 кГц,
- дальность действия на суше 1400–1800 км,
на море 1800–2000 км,
- мощность излучения станций 200–1000 кВт,
- погрешность местоопределения (СКО) не более 230 м,
- общая площадь рабочих зон около 100 млн. кв. км.

Система «Лоран-Д» представляет собой мобильный вариант системы «Лоран-С».

Существует отечественный вариант системы «Лоран», носящий название «Тропик» («Чайка»). Технические характеристики ее полностью соответствуют системе «Лоран-С», в частности, погрешность определения плановых координат составляет (СКО) 100–700 м., общая площадь рабочих зон равна 20 млн. кв. км.

В эксплуатации находятся три (четыре) цепочки системы:

- Европейская, в составе пяти станций, расположенных в районах городов Брянск (ведущая), Петрозаводск (РФ), Слоним (р. Беларусь), Симферополь (Украина), Сызрань (РФ). Цепочка принята в эксплуатацию в 1972 году;
- Восточная, в составе четырех станций, расположенных в районах городов Александровск-Сахалинский (ведущая), Петропавловск-Камчатский, Уссурийск, и Охотск. Цепочка принята в эксплуатацию в 1986 году;
- Северная (и Северо-Западная), в составе пяти станций, расположенных в районах г. Дудинка (ведущая), п. Таймылыр, о. Панкратьева, г. Инта (ведущая-ведомая) и п. Туманный. Цепочка принята в эксплуатацию в 1996 году.

В двух регионах мира (Японское и Охотское моря, Скандинавия) обеспечена совместная работа этих систем с общей синхронизацией маяков.

Следует отметить, что кроме стационарного варианта системы «Чайка» был разработан и серийно выпускался подвижный вариант этой системы.

Длительное время эксплуатируется фазовая разностно-дальномерная система морской навигации «Декка». Система работает в диапазоне длинных волн (70–130 кГц) и предназначена для местоопределения судов и самолетов. Как и РНС «Лоран», система «Декка» строится в виде цепочек и обеспечивает навигацию практически во всех районах земного шара; зарегистрировано 50 цепей. Каждая цепь включает в себя, как правило, четыре береговых передающих станции: одна ведущая и три ведомых. Дальность действия системы составляет 250–300 миль при расстояниях между станциями цепочки 60–120 миль. «Декка» создает поле когерентной структуры с высокой разрешающей способностью, может периодически изменять ее и загроублять при переходе в

режим устранения неоднозначности. В основном режиме точных фазовых измерений станции излучают незатухающие гармонические сигналы на частотах, являющихся гармониками одной, так называемой базисной частоты f : ведущая станция $6f$, ведомые станции $5f$, $8f$ и $9f$. Каждая цепочка имеет свое значение базисной частоты f и находится в пределах 14–14.7 кГц.

В аппаратуре потребителя для каждой базы цепочки принимаются два сигнала от разных маяков на разных частотах. Затем эти частоты приводятся к одной частоте, являющейся наименьшей кратной: $6f$ и $8f$ дают $24f$, $6f$ и $9f$ дают $18f$, $6f$ и $5f$ дают $30f$. На кратных частотах для конкретных баз измеряются разности фаз и по ним строятся линии положения в виде точных гипербол. Как видно, ширина фазовых дорожек на разных базах различна, но в любом случае наблюдается неоднозначность определения гипербол в рабочем секторе системы. Для устранения неоднозначности изредка все станции переходят в другой режим работы, при котором поочередно излучают четыре частоты. После обработки этих частот создаются для всех баз сигналы частоты f , на которой производится оценка гипербол грубой шкалы. Фазометры имеют погрешность около 0.01 фазового цикла, что соответствует погрешности линии положения 4–6 м. Реальная погрешность увеличивается за счет влияния условий распространения радиоволн и других факторов, однако точность системы «Декка» высокая.

Система «Омега» разрабатывалась с 1957 г. по заказу ВМС США с участием стран-партнеров в целях обеспечения всепогодной радионавигации воздушных и морских потребителей гражданского и военного применения с погрешностью (СКО) 1–2 км днем и 3–4 км ночью. Отличительной особенностью системы является возможность местоопределения подводных лодок в погруженном состоянии на глубине приемной антенны до 20 метров. Система относится к классу фазовых разностно-дальномерных (гиперболических) систем и образуется сетью из восьми станций, размещённых в различных точках земного шара. Точное измерение разности расстояний производится на основной частоте 10,2 кГц. Частоты 11,33 и 13,6 кГц используются для устранения неоднозначности путём измерения разности фаз на разностных частотах. Разделение сигналов станций временное, излучение производится длинными импульсами, сигналы всех станций когерентны. С конца 1997 года США прекратили эксплуатацию системы полностью.

Отечественная фазовая разностно-дальномерная система дальней навигации «Маршрут» («Альфа») предназначена для обеспечения континентальных и океанических полетов самолетов, плавания морских надводных и подводных судов в открытых водах. Состав системы – 5 станций, расположенных в районах Новосибирска (ведущая), Краснодара, Комсомольска-на-Амуре, Мурманска и Чарджоу (ведомые). Система построена по типу «Омега», однако ее параметры отличны от прототипа. РДН разработана в шестидесятые годы прошлого века, в 2000 г завершены ее государственные испытания. Система позволяет обеспечить определение плановых координат с погрешностью (СКО) 1–5 км на расстояниях до 13000 км от наземных станций и обеспечивает покрытие до 70 процентов земной поверхности.

Литература: [1, с. 98–100], [2, с. 35–68], [3, с. 76–100], [5, с. 203–210], [конспект лекций, тема 6], данные Интернет.

2.6. Автономные измерители скорости

Автономные радионавигационные системы получают первичную навигационную информацию на борту корабля без использования сторонних источников радиоизлучения. Кроме радиосистем в навигации к автономным относятся инерциальные системы и системы, анализирующие физические поля Земли и Космоса.

Автономные системы, как правило, реализуют метод счисления пути, реже – обзорно-сравнительный метод. Возможны системы, использующие метод позиционных линий.

Вектор путевой скорости в аэронавигации измеряется с помощью доплеровских измерителей скорости, работающих в радиодиапазоне. Радиодоплеровский измеритель определяет модуль путевой скорости и угол сноса самолёта, т.е. вектор скорости относительно продольной оси корабля. Скорость в топоцентрической системе координат, в которой решается навигационная задача, определяется относительно направления на север. Это означает, что информация с доплеровского измерителя должна быть дополнена результатом измерения курсового угла самолёта. Последний определяется каким-либо компасом: магнитным, индукционным или гироскопическим.

Доплеровский измеритель представляет собой приёмо-передатчик с направленной антенной, излучающей и принимающей сигнал под некоторым углом к земной поверхности. В зависимости от количества составляющих вектора скорости различают доплеровские измерители вектора полной скорости и доплеровские измерители путевой скорости и угла сноса (ДИСС). Первые обычно используются на вертолётах, вторые – на самолётах.

Доплеровская навигационная система на базе измерителя ДИСС-3 имеет следующие технические характеристики.

Диапазон измерения	
путевой скорости	200–1300 км в час,
угла сноса	0–25 град.
Погрешность измерения среднеквадратическая	
путевой скорости	0,7 %,
угла сноса	30 мин.
Диапазон рабочих высот	20–20000 м.
Вид излучения	непрерывное немодулированное.
Мощность излучения	5 Вт.
Чувствительность приёмника	минус 133 дБ/ Вт.
Число лучей	4.
Частота коммутации лучей	5 Гц.
Несущая частота	в диапазоне 10 ГГц.

В состав измерителя входят: высокочастотный и электронный блоки, вычислитель, индикатор и блок питания. Функциональная схема высокочастотной части измерителя приведена на рис. 2.1.

стотного и электронного блоков приведена на рис. 2.1, где введены следующие обозначения: А-1 и А-2 – передающая и приемная антенны; ВЧБ – высокочастотный блок; К – коммутаторы; БС – балансные смесители; УПЧ – усилители промежуточной частоты; УНЧ – усилитель низкой частоты; АРУ – автоматическая регулировка усиления; ДС – детекторная секция; ФВн – ферритовый вентиль; ГВЧ – генератор высокой частоты; ФВ – фазовращатель; УС – узел стабилизации частоты; ЭБ – электронный блок; См – смесители; УПФ – узкополосный фильтр; ПУ – полосовой усилитель; ФИ – формирователь импульсов; СЗ – схема захвата; ГК – генератор контроля; СИ – счетчик импульсов; СС – схема слежения; И – интеграторы; П – сигнал «Память»; ВУ – вычислитель; ПУпр – пульт управления; ПК – пульт контроля; НВ – навигационный вычислитель; – УпрС – управляющий сигнал.

Высокочастотный блок измерителя конструктивно объединяет антенную систему, передатчик и приёмник. Антенная система состоит из двух волноводно-щелевых частотно-независимых антенн, работающих в режиме стоячей волны. Каждая из антенн в зависимости от фазы (0 или 180 град) питающего напряжения одновременно формирует два диаметрально противоположных луча (1 и 3 или 2 и 4). Соответствующие выводы антенн подключаются к передатчику и приёмнику коммутаторами. Угол наклона лучей к горизонту 60° угол поворота пар лучей к продольной оси корабля 45° , ширина луча в вертикальной плоскости около $4,5^\circ$, в другой – около 7° . Передатчик представляет собой магнетронный генератор с устройствами стабилизации УС частоты. Защита магнетрона осуществляется ферритовым вентиляем ФВ. Мощность генерируемых колебаний контролируется через детекторную секцию ДС. Приёмник собран по супергетеродинной схеме с двойным преобразованием частоты, в качестве гетеродина используется клистронный генератор. Сигнал доплеровской частоты после второго преобразования выделяется и усиливается в блоке УНЧ со схемой АРУ.

Электронный блок предназначен для выдачи в вычислитель и сопряжённые с ДИСС бортовые системы сигналов, несущих информацию о доплеровских частотах, а также для синхронизации коммутаторов. На входе блока стоит схема узкополосной фильтрации, состоящая из фильтра со средней частотой 70 кГц с полосой пропускания примерно равной максимальной ширине спектра сигнала, и преобразователей частоты, переносящих спектр на частоту 70 кГц и обратно. Схема измерения частоты построена по принципу счёта числа переходов через ноль и служит для получения пропорционального частоте постоянного тока для управления генератором схем слежения. Средняя частота следования переходов через ноль равна средней доплеровской частоте. Схема захвата предназначена для перехода из режима поиска в режим слежения, а схемы слежения вместе с соответствующими интеграторами замыкают цепи обратной связи при слежении и вырабатывают пропорциональный доплеровской частоте сигнал постоянного тока для вычислителя ДИСС. Генератор контроля ГК служит для получения колебаний двух частот, имитирующих доплеровский сдвиг в режиме «Контроль».

Вычислитель представляет собой аналоговое электромеханическое устройство, вырабатывающее напряжения постоянного тока, пропорциональные путевой скорости и углу сноса. В дальнейшем эти напряжения поступают на указатели угла и скорости и на бортовую ЭВМ, где вычисляются текущие координаты.

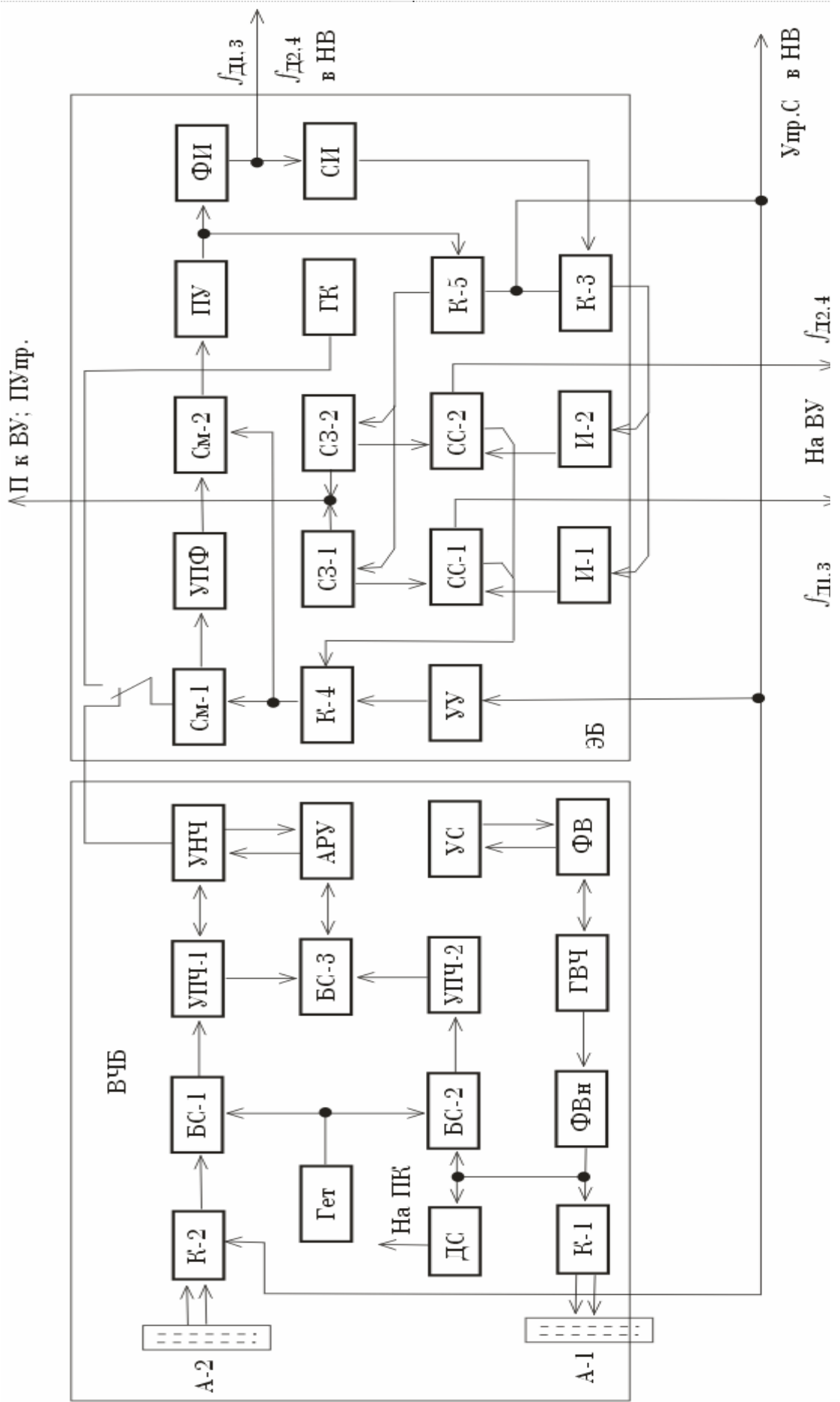


Рис. 2.1. Функциональная схема высокочастотного и электронного блоков измерителя ДИСС-3

Доплеровская навигационная система на базе измерителя ДИСС-013 имеет следующие характеристики.

Диапазон измерения	
путевой скорости	180–1300 км/час,
угла сноса	30 град.
Среднеквадратическая погрешность измерения	
путевой скорости	0,2 %,
угла сноса	10 мин.
Диапазон рабочих высот	10–15000 м.
Вид излучения	непрерывное частотно-модулированное.
Мощность передатчика	0.3 Вт.
Чувствительность приёмника	минус 139 дБ/Вт.
Число лучей	3.
Частота коммутации лучей	3 Гц.
Несущая частота	в диапазоне 10 ГГц.

В состав измерителя входят следующие блоки: высокочастотный, низкочастотный и индикатор. Функциональная схема высокочастотного и низкочастотного блоков представлена на рис. 2.2, где использованы следующие обозначения: ВЧБ – высокочастотный блок; А-1, А-2 – передающая и приемная антенны; К – коммутаторы; БС – балансный смеситель; УПЧ – усилитель промежуточной частоты; СД – синхронный детектор; УНЧ – усилитель низкой частоты; АРУ – автоматическая регулировка усиления; НО КЧ – направленный ответвитель контроля частоты; НО – направленный ответвитель; НО КМ – направленный ответвитель контроля мощности; УЧ – умножитель частоты; В – вентиль; ГВЧ – генератор высокой частоты; ГМЧ – генератор модулирующей частоты; УВ – устройство возбуждения; НЧБ – низкочастотный блок; УС – устройство слежения; Пр – преобразователь; УГ – управляемые гетеродины; ВУ – вычислитель; Дск – дискриминатор; УУ – устройство управления; ВСК – устройство встроенного контроля; П – сигнал включения памяти; И – индикатор; Море – сигнал от переключателя «Суша – море»; «Контроль» – сигнал включения контроля.

Высокочастотный блок конструктивно объединяет антенную систему, передатчик, приёмник и высоковольтный выпрямитель.

Антенная система состоит из двух волноводно-щелевых антенн, волноводы которых работают в режиме бегущей волны. Приёмная и передающая антенны формируют по три луча с А-образным расположением. Знаки угло-частотной зависимости для приёмной и передающей антенн противоположны и антенная система оказывается частотно-независимой. Установочные углы лучей: в вертикальной плоскости 64° , в горизонтальной 35° от продольной оси корабля для двух задних лучей. Ширина диаграммы направленности в вертикальной плоскости около 4.5° , в другой плоскости около 10° .

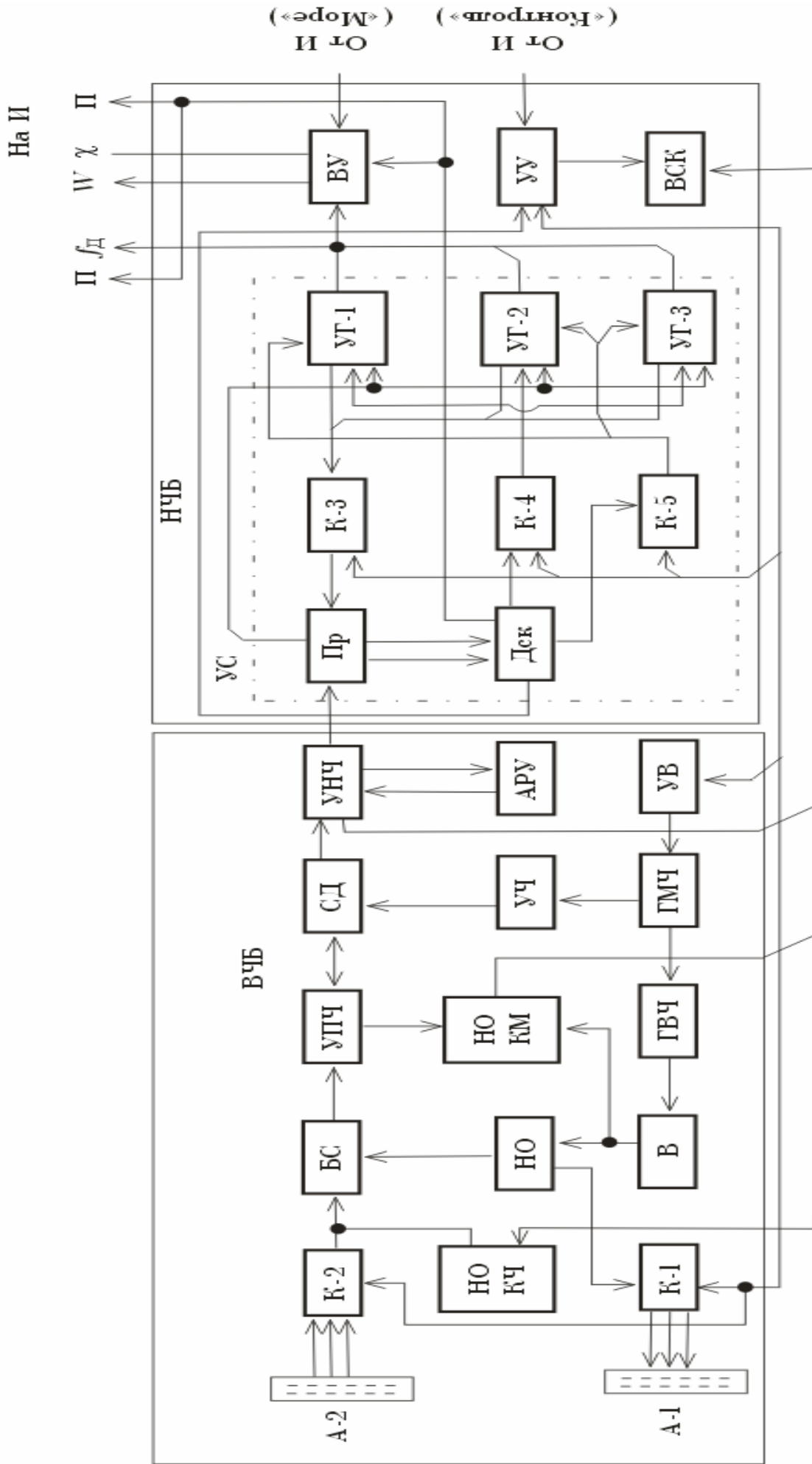


Рис. 2.2. Функциональная схема высокочастотного и низкочастотного блоков ДИСС-013

Передачик представляет собой генератор на клистроне с частотной модуляцией. Для уменьшения влияния на генератор антенно-волноводного тракта используется вентиль в виде трёхплечевого ферритового циркулятора В. Частотная модуляция осуществляется путём изменения напряжения на отражателе клистрона по синусоидальному закону. Среднее значение модулирующей частоты равно 1 МГц, при этом частота изменяется по пилообразному закону (вобуляция частоты) в пределах 150–200 кГц в каждую сторону синхронно с коммутацией лучей.

Приёмник собран по схеме с двойным преобразованием частоты. Для первого преобразования на балансный смеситель БС подаётся часть излучаемой мощности. Первая промежуточная частота равна 3 МГц (третья гармоника модулирующей частоты) с соответствующим доплеровским сдвигом. Для второго преобразования на синхронный детектор подаётся напряжение с частотой 3 МГц, которое формируется в умножителе частоты УЧ.

Низкочастотный блок состоит из устройств слежения и управления, вычислителя и схемы встроенного контроля. Устройство слежения представляет собой трёхканальный узкополосный следящий измеритель частоты. Это устройство обеспечивает поиск и обнаружение спектра доплеровского сигнала, захват и слежение за этим спектром и выдачу в вычислитель ДИСС и навигационный вычислитель последовательности импульсов, частоты следования которых равны средним доплеровским частотам по каждому из лучей. Устройство управления обеспечивает синхронное переключение лучей антенной системы и коммутацию каналов устройства слежения, а также синхронизирует напряжение вобуляции. Вычислитель представляет собой аналоговое электромеханическое устройство и выдаёт напряжения, пропорциональные путевой скорости и углу сноса. Устройство встроенного контроля ВСК проверяет работоспособность измерителя на двух значениях имитируемых сигналов доплеровских частот.

Доплеровская навигационная система на базе измерителя ДИСС-7 предназначена для непрерывного вычисления трех составляющих полного вектора скорости в самолетной системе координат W_x W_y W_z , что эквивалентно измерению путевой скорости, угла сноса и угла в вертикальной плоскости. Измеритель имеет следующие характеристики.

Погрешность измерения средней путевой скорости	0,9 %
Диапазон рабочих высот	200–20000 м.
Вид излучения	непрерывное.
Мощность передатчика	2 Вт.
Чувствительность приёмника	минус 143 дБ/Вт.
Число лучей	4.
Частота коммутации лучей	2.5 Гц.
Несущая частота	13325±40 МГц.
Диапазон измеряемых доплеровских частот ..	1,5–32 кГц.
Масса	29 кг.

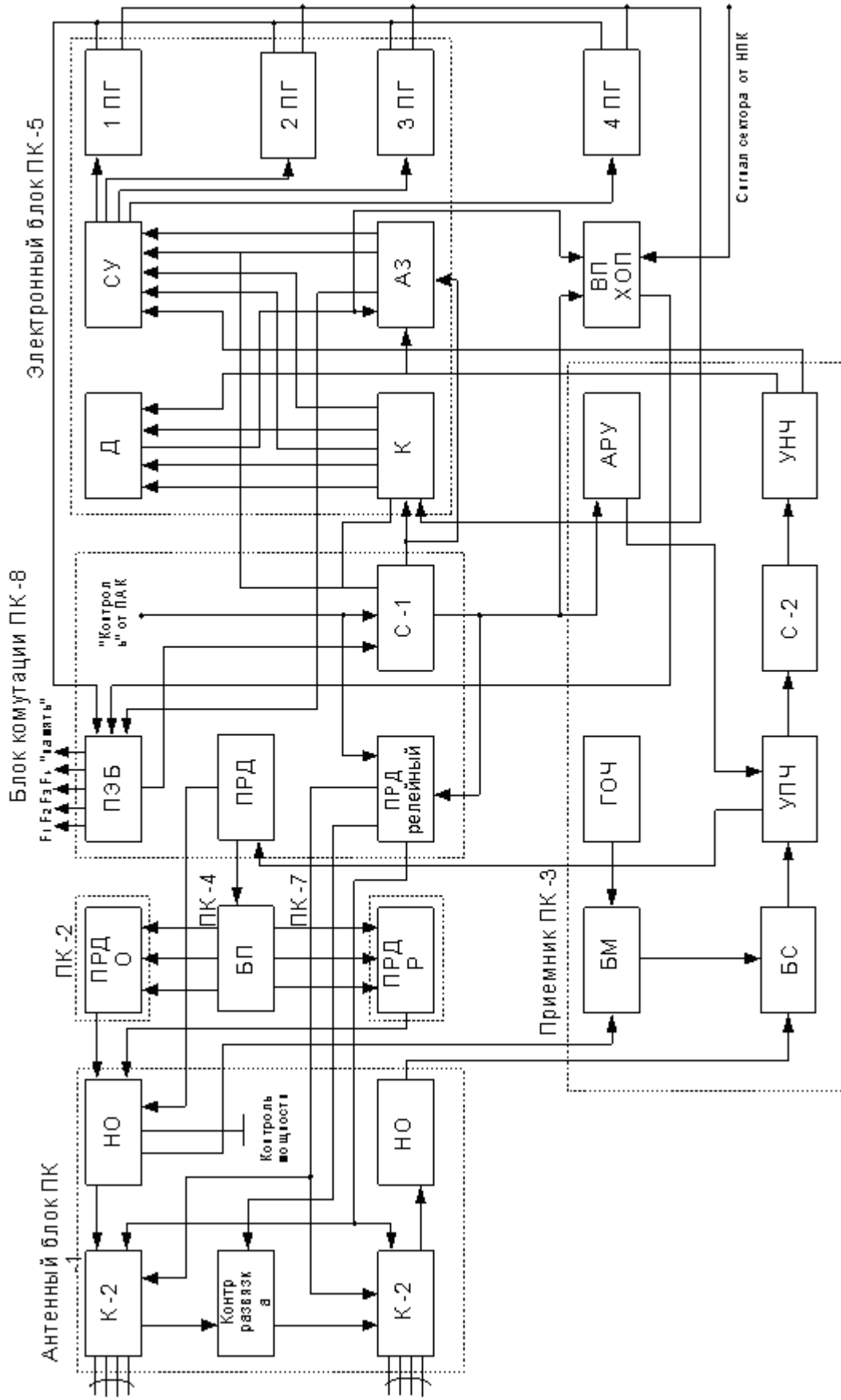


Рисунок 2.3. Функциональная схема измерителя ДИСС-7

В состав комплекта ДИСС-7 входят следующие блоки: антенный блок ПК1, передатчик ПК2, приемник ПК3, блок питания низковольтный ПК4, электронный блок ПК5, блок питания высоковольтный ПК7 и блок коммутации ПК8. Функциональная схема измерителя представлена на рис. 2.3. Обозначения элементов на рисунке следующие: ГОЧ – генератор образцовой частоты, СУ – схема управления, Д – дискриминатор, ПГ – перестраиваемый генератор, АЗ – автомат захвата, ВП ХОП – вычислитель поправки на характер отражающей поверхности, ПРД(О) – основной передатчик, ПРД(Р) – резервный передатчик, ПРД – переключатель передатчиков, ПЭБ – переключатель электронных блоков, С1 – синхронизатор, БС – балансный смеситель, ПРД релейный – переключатель релейный, БП – блок питания, БМ – балансный модулятор, НО – ответвитель, К2 – коммутатор лучей.

Лучи измерителя расположены несимметрично относительно продольной оси самолета: три из них отвернуты на 45° относительно продольной оси, четвертый направлен вдоль оси вперед. Такое расположение объясняется различными функциями их: три луча служат для измерения трех проекций вектора скорости, четвертый – для автоматического формирования поправки на зависимость результатов от характера отражающей поверхности (учета «морского эффекта»).

Литература: [1, с. 101–110], [2, с. 200–240], [3, с. 161–179], [4, с. 113–148], [5, с. 211–219], [конспект лекций, тема 7].

2.7. Радиовысотомеры

Радиовысотомер – бортовое устройство для определения истинной высоты полёта летательного аппарата радиотехническим методом.

В общем случае измерение высоты основано на измерении времени задержки сигнала, отражённого от поверхности земли, относительно излучённого сигнала.

По типу излучаемых сигналов радиовысотомеры делятся на следующие группы.

- Радиовысотомеры с непрерывным излучением и модуляцией: с частотной модуляцией (по гармоническому, линейному, симметричному и случайному законам); с амплитудной модуляцией; с комбинированной модуляцией. Такие высотомеры используются как высотомеры малых высот.

- Радиовысотомеры с квазинепрерывным излучением. При этом типе радиосигнала излучаются импульсы с малой скважностью и дополнительной внутриимпульсной модуляцией для разделения во времени моментов излучения и приёма радиоволн.

- Радиовысотомеры с импульсным излучением, используемые в качестве высотомеров больших высот.

Все высотомеры малых высот, а их большинство, имеют непрерывный частотно модулированный сигнал. Работа высотомера с частотной модуляцией сигнала основана на измерении времени запаздывания отражённого сигнала относительно излучённого путём измерения частоты биений, получаю-

щихся при сложении излучённого и отражённого сигнала. Частота биений определяется выражением:

$$F_b = \frac{4\Delta f H}{c T_m},$$

где F_b – частота биений;

Δf – девиация частоты;

T_m – период модуляции;

c – скорость распространения сигнала;

H – измеряемая высота.

Классическая схема построения частотных высотомеров предполагает выделение и измерение частоты биений с последующим пересчетом этой частоты во временную задержку и высоту. По такой схеме выполнены модели высотомеров ранних разработок (РВ-2, РВ-5 и др.), которые здесь не представлены. Следующее поколение частотных высотомеров серии РВ по следящей схеме и предполагает измерение меняющегося периода модуляции сигнала в момент, когда частота биений окажется равной заданной величине (РВ-20 и др.).

В последнее время разрабатываются и вводятся в эксплуатацию комбинированные измерители, позволяющие кроме высоты измерять вектор скорости самолета. По структуре такие измерители повторяют многолучевые доплеровские измерители скорости и угла сноса (см. 2.6). По каждому из лучей измеряется доплеровский сдвиг частоты (среднее значение доплеровского спектра частот) и частота биений (среднее значение спектра дальномерных частот).

Ниже приведены последние модели высотомеров и их основные технические характеристики.

Радиовысотомер РВ УМ.

Диапазон измеряемых частот.....	от 0 до 600.
Точность измеряемой высоты.....	$\pm 5 \text{ м} \pm 8\% \text{ от } H$.
Средняя частота генератора.....	$444 \pm 6 \text{ МГц}$.
Полоса модуляции.....	$17 \pm 2 \text{ МГц}$.
Частота модуляции.....	$70 \pm 15 \text{ Гц}$.
Излучаемая мощность.....	0,2 Вт.
Потребляемая мощность по сети 115 В, 400 Гц...100 Вт.	
Вес (без кабелей, ЗИП и фильтра).....	11,5 кг.

Радиовысотомер А-040-01.

Назначение: для дистанционно пилотируемых летательных аппаратов, но может быть установлен на любой тип летательных аппаратов.

Диапазон частот.....	4,2–4,4 ГГц
Диапазон измеряемых высот.....	10–1000 м.
Погрешность измерения высоты по цифровому выходу.....	$\pm(1+0,08H)$ в диапазоне от 10 м до 75м,

	где H – измеряемая высота, м, $\pm 0,08H$ в диапазоне высот от 75 м и более, где H – измеряемая высота, м.
Вид выдаваемой информации.....	параллельный 12-ти разрядный код, напряжение постоянного тока положительной полярности с крутизной 0,0150 В/м, отклонение от заданных высот (3 высоты) с крутизной 0,3 В/м, производная от высоты с крутизной 0,5 В/м/с.
Среднее время наработки на отказ.....	8000 ч.
Масса приёмопередатчика с антенной.....	1,1 кг.
Масса измерителя.....	0,6 кг.
Габаритные размеры:	
- приёмопередатчика с антенной.....	58x112x200 мм,
- измерителя.....	50x85x200 мм.
Электропитание.....	27 В.
Энергопотребление.....	12 Вт.
<u>Радиовысотомер А-052.</u>	
Назначение: для вертолетов, но может быть установлен на любой тип летательных аппаратов.	
Диапазон частот.....	4,2–4,4 ГГц.
Диапазон измеряемых высот.....	0–1500 м.
Диапазон индикации.....	0–300 м, 0–750 м, 0–1500 м.
Погрешность измерения высоты цифровой выход.....	$\pm(0,45+0,01H)$ м,
индикатор.....	$\pm 2,0$ м в диапазоне высот от 0 до 20 м $\pm 0,1H$ в диапазоне от 20 м и выше, где H – измеряемая высота, м.
Вид выдаваемой информации.....	параллельный фазоманипулированный двоичный код с тактовой частотой 1 МГц,

	напряжение постоянно- го тока положительной полярности с крутизной 0,02 В/м.
Среднее время наработки на отказ.....	7200 ч.
Масса приёмопередатчика.....	3,0 кг.
Масса индикатора высоты.....	1,0 кг.
Масса антенны (2шт).....	0,4 кг.
Габаритные размеры:	
- приёмопередатчик.....	100x100x251 мм,
- индикатор высоты.....	65x65x175 мм,
- антенна.....	30x110x123 мм.
Электропитание.....	27 В.
Энергопотребление:	
- приёмопередатчик	17 Вт,
- приёмопередатчик с двумя индикаторами.....	40 Вт.

Радиовысотомер А-053.

Назначение: для авиации общего назначения, самолетов магистральных авиалиний и вертолетов.

Диапазон частот.....	4,2–4,4 ГГц.
Диапазон измеряемых высот.....	0–1500 м.
Диапазон индикации.....	0–300 м, 0–750 м, 0–1500 м.
Погрешность измерения высоты	
цифровой выход.....	$\pm 0,45$ м в диапазоне высот от 0 до 23 м $\pm 0,02$ H в диапазоне от 23 м и выше, где H – измеряемая высота, м,
индикатор.....	$\pm (1,5 + 0,05 H)$ м, где H – измеряемая высота, м.
Вид выдаваемой информации.....	последовательный цифровой код по ГОСТ 18977-79, РТМ 1495-81, напряжение постоянно- го тока положительной полярности с крутизной 0,02 В/м.
Среднее время наработки на отказ.....	8000 ч.
Масса приёмопередатчика.....	2,0 кг.
Масса индикатора высоты.....	1,0 кг.
Масса антенны (2шт).....	0,2 кг.
Габаритные размеры:	

- приёмопередатчик.....	100x110x228 мм,
- индикатор высоты.....	65x65x175 мм,
- антенна.....	30x110x123 мм.
Электропитание.....	27 В.

Энергопотребление:

Приёмопередатчик 75 Вт.

Приёмопередатчик с двумя индикаторами..... 40 Вт.

Радиовысотомер А-075.

Назначение: для установки на самолетах скоростной авиации.

Диапазон частот.....4,2–4,4 ГГц.

Диапазон измеряемых высот.....0–25000 м.

Погрешность измерения высоты..... $\pm(1,5+0,015H)$ м, где
H – измеряемая высота, м.

Среднее время наработки на отказ..... 2500 ч.

Масса приёмопередатчика..... 6 кг.

Масса индикатора высоты..... 1,5 кг.

Масса антенны (2шт).....0,55 кг.

Габаритные размеры:

- приёмопередатчик.....380x124x194 мм,

- индикатор высоты.....85x85x212 мм,

- антенна.....65x86 мм.

Электропитание.....27 В.

Энергопотребление.....75 Вт.

Радиовысотомерная система Волна-2К-01.

Назначение: трехканальное измерение высоты экранопланов, оценка высоты морских волн.

Диапазон частот.....4,2–4,4 ГГц.

Диапазон измеряемых высот.....0–30, м,
0–1000 м.

Погрешность измерения высоты..... $\pm(0,3+0,03H)$ м, где
H – измеряемая высота, м.

Электропитание (сеть).....220 В, 400 Гц.

Энергопотребление.....150 Вт.

Масса блока приёмопередатчиков..... 15 кг.

Масса индикатора высоты..... 1,2 кг.

Масса антенны..... 0,75 кг.

Масса пульта управления.....0,8 кг.

Габаритные размеры:

- приёмопередатчик.....530x155x450 мм,

- индикатор высоты.....85x85x172 мм,

- антенна.....165x115 мм,

- пульт управления.....0,8146x144x151 мм.

Литература: [2, с. 200–217], [3, с. 180–190], данные Интернет.

2.8. Комплексование навигационных средств

Современное состояние развития навигационной техники характеризуется значительным усложнением её, дублированием различных измерителей, наличием избыточной информации, использованием бортовых ЭВМ для её обработки и т.д. Такие сложные системы называются комплексами и строятся по новым принципам.

Основным свойством комплексов является получение и обработка избыточной информации. Избыточная информация в навигации используется давно, однако суть комплексования состоит в том, что избыточность получается от навигационных датчиков, имеющих различную физическую природу и производящих оценку навигационных параметров с различными характеристиками. В аэронавигации используются навигационно-пилотажные комплексы, состоящие из нескольких радиоизмерителей и нескольких общих средств навигации, таких как барометрические высотомеры, инерциальные измерители ускорения, различные компасы, измерители воздушной скорости и другие. Совместная обработка информации производится бортовой ЭВМ.

Литература: [1, с. 151–157],[3, с. 201–217], [5, с. 238–240], [конспект лекций, тема 9].

2.9. Рекомендуемая литература

1. Дудко Б.П. Радионавигация: Учебное пособие. – Томск: Томск. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2003.
2. Сосновский А.А. Авиационная радионавигация. Справочник. – М.: Транспорт, 1980.
3. Бакулев П.А. Радионавигационные системы: Учебник для вузов/. П.А.Бакулев, А.А. Сосновский. – М.: Радиотехника, 2005.
4. Дудко Б.П. Радионавигационные системы. Лабораторный практикум. – Томск: Томск. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2005.
5. Денисов В.П., Дудко Б.П. Радиотехнические системы: учеб. Пособие – Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2006.
6. Бакулев П.А. Радионавигационные системы: Учебник для вузов/ П.А.Бакулев, А.А. Сосновский. – М.: Радиотехника, 2005.

3. Расчет энергетических характеристик навигационных радиолиний

3.1. Сведения из теории

В измерительных навигационных радиолиниях используются беззапросный и запросный режимы работы аппаратуры. Беззапросный режим предполагает прохождение сигнала от передающей части к приемной в одном направлении, в запросном режиме канал запроса и канал ответа фактически представляют собой отдельные радиолинии, в которых также сигнал распространяется только в одну сторону. Это приводит к тому, что расчет энергетических характеристик всегда производится для радиолинии с прохождением сигнала в одну сторону.

При распространении в свободном пространстве в дальней зоне относительно источника излучения электромагнитное поле имеет характер волны со сферическим фазовым фронтом и ортогональными векторами \vec{E} и \vec{H} , перпендикулярными к направлению распространения. Векторы \vec{E} и \vec{H} синфазны во времени, а их модули связаны соотношением:

$$Z_0 = \frac{E_m}{H_m} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi = 377 \text{ Ом.}$$

Величина Z_0 имеет размерность сопротивления и называется характеристическим (иногда волновым) сопротивлением.

Заметим, что дальняя зона (зона Фраунгофера) определяется соотношением:

$$R \geq 2L^2/\lambda,$$

где L – максимальный размер излучающей области,
 λ – длина волны.

На расстоянии R от всенаправленного источника излучения мощностью P_u плотность потока мощности Π или вектор Пойтинга равна

$$\Pi = \frac{P_u}{4\pi R^2}, \frac{Wm}{m^2}.$$

Величина Π определяется либо как мощность, приходящаяся на единицу площади поверхности сферы $4\pi R^2$, либо как среднее за период значение энергии на единицу поверхности сферы (вектор Пойтинга):

$$\Pi = \frac{1}{2} E_m \cdot H_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_m^2}{120\pi}.$$

Эти две формулы позволяют рассчитать напряженность поля на удалении R от источника излучения:

$$E_m = \frac{\sqrt{60P_u}}{R}.$$

В этой формуле напряженность имеет размерность Вольт/метр, если мощность определена в Ваттах, а расстояние в метрах. Можно мощность выра-

жать в киловаттах, а расстояние в километрах, тогда напряженность (амплитуда E_m и эффективное значение $E_э$) рассчитывается по следующей формуле:

$$E_m = \sqrt{2} \cdot E_э = \frac{173 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{P_u}}{R}, \frac{MB}{M}.$$

В случае использования направленной антенны в качестве излучающей, имеющей коэффициент усиления G_u и нормированную диаграмму направленности $f(\alpha, \beta)$, формулы для Π и E_m будут иметь вид:

$\Pi = \frac{P_u G_u}{4\pi R^2}$, $E_m = \frac{\sqrt{60 \cdot P_u G_u}}{R}$ для направления, соответствующего максимальному излучению антенны и

$\Pi = \frac{P_u G_u}{4\pi R^2} \cdot f^2(\alpha, \beta)$, $E_m = \frac{\sqrt{60 P_u G_u}}{R} \cdot f(\alpha, \beta)$ для произвольного направления по ортогональным углам α и β .

Прием ЭМ волны антенной сопровождается ее преобразованием в электрическую волну на выходе (на нагрузке) антенны.

Приемная антенна производит преобразование ЭМ волны в электрический сигнал, который проявляется как ЭДС e_m на выходе антенны или как мощность P_A на нагрузке антенны. Характеристики принятого сигнала рассчитываются по параметрам приемной антенны. В качестве такого параметра обычно используют эффективную поверхность $S_{эф}$ для антенны высокочастотных диапазонов и действующую длину (высоту) l_0 для низкочастотной антенны, и соответственно формулы имеют вид:

$$P_A = \Pi \cdot S_{эф} = \Pi \cdot \frac{\lambda^2 \cdot D}{4\pi} \cdot u \cdot e_m = E_m \cdot l_0.$$

Здесь D – коэффициент направленного действия (КНД) приемной антенны. Более правильно и в этой формуле использовать вместо КНД величину коэффициента усиления приемной антенны $G_{пр}$, которые связаны между собой соотношением:

$$D = \frac{4\pi S_{эф}}{\lambda^2} = \frac{G_{пр}}{\eta},$$

где η – к.п.д. антенны.

Ослабление энергии ЭМ волны при распространении в свободном пространстве за счет сферичности волны принято называть основными ослаблениями или основными потерями, которые вводятся как отношение мощностей $W_0 = P_{пр} / P_u$ при $G_u = G_{пр} = 1$ и определяются по формуле:

$$W = \frac{\lambda^2}{(4\pi R)^2}.$$

Часто эта величина выражается в децибелах:

$$W, \text{дБ} = 10 \cdot \lg W = 20 \cdot \lg \frac{\lambda}{4\pi R} = 20 \cdot \lg \frac{c}{4\pi R f}.$$

При расчетах обычно в качестве основных потерь используется обратная величина:

$$W = \frac{(4\pi R)^2}{\lambda^2} \text{ и, соответственно, } W, \text{дБ} = 20 \lg \frac{4\pi R}{\lambda}.$$

Здесь λ – длина волны, f – частота сигнала, c – скорость света.

Как видно, ослабление определяется расстоянием R , нормированным к длине волны. Однако, зависимость от λ здесь условная и появилась из-за использования понятия эффективной площади антенны не в чистом виде, а в виде производной от нее – коэффициента усиления антенны. Если ввести в формулу $S_{\text{эф}}$, то зависимости от λ не будет; иногда такой формулой пользуются и тогда под основными потерями понимают величину $\frac{1}{R^2}$. Аналогично вводится понятие основных потерь через характеристики напряженности. В виде зависимости от дальности формула имеет вид:

$$W_E = \frac{1}{R},$$

однако величины W_E , дБ и W , дБ совпадают, т.к. в этом случае

$$W_E, \text{дБ} = 20 \lg W_E.$$

Практически во всех значимых случаях распространение ЭМ волны происходит не в свободном пространстве, а на реальных трассах: в атмосфере Земли, вблизи земной поверхности, при наличии на трассе объектов и т.д. Наличие таких обстоятельств (условий распространения радиоволн) приводит к изменениям характеристик фронта волны, приведенных выше и к изменению представленных формул.

Прежде всего, это относится к уровню принимаемого сигнала, т.е. реальное ослабление сигнала будет, как правило, больше, чем основное. Это дополнительное ослабление учитывается введением коэффициента F к величине принимаемого сигнала. Этот коэффициент меньше единицы, называется множителем ослабления и вводится относительно величины напряженности поля или ЭДС на выходе антенны:

$$E_m = E_{m0} \cdot F = \frac{\sqrt{60 \cdot P \cdot G}}{R} \cdot F(R).$$

При необходимости использования величины F при оценке плотности потока мощности или мощности сигнала ее следует вводить как

$$\Pi = \frac{P \cdot G}{4\pi R^2} \cdot F^2(R).$$

Величина F зависит от условий распространения, которые в свою очередь определяются видом трассы, на которой проявляются различные механизмы распространения ЭМ волн.

Тип трассы определяется прежде всего наличием прямого распространения (прямой видимости) между точками излучения и приема. На данном

этапе говорят о наличии открытых и закрытых трасс. Для открытых трасс прямое распространение должно выполняться с некоторым запасом. Закрытые трассы образуются либо за счет того, что одна из антенн (или обе) располагаются ниже горизонтальной плоскости относительно другой антенны, либо за счет того, что вблизи антенны располагаются предметы, экранирующие прохождение сигнала. В первом случае говорят о закрытии земной поверхностью, во втором – о закрытии местными предметами.

На открытых трассах возможно влияние атмосферы, которая приводит к рефракции волны, и влияние отраженных сигналов, обуславливающих интерференционный механизм распространения.

На закрытых трассах проявляется рефракция, интерференция и дифракция сигнала на препятствиях или на земной поверхности.

Каждый из механизмов распространения теоретически достаточно глубоко развит и доведен до расчетных формул. На конкретной трассе определяется основной механизм и обычно только для него и ведется расчет сигнала в форме оценки величины множителя ослабления.

Далее приводятся особенности распространения и расчетные формулы оценки множителя ослабления для некоторых типовых трасс распространения радиоволн.

1. Открытые трассы малой протяженности.

Рассматривается случай поднятых над поверхностью Земли антенн, однако выполняется условие малости высоты относительно длины трассы. Сама поверхность представляется гладкой и плоской.

В точке приема интерферируют два сигнала: прямой и отраженный. Результирующее поле зависит от коэффициента отражения от земной поверхности \bar{K} и разности путей распространения по прямому лучу и по лучу отражения.

Интерференционные изменения уровня относительно сигнала в отсутствии влияния Земли являются множителем ослабления (функций ослабления), который равен:

$$F = \sqrt{1 + |R|^2 + 2|K| \cdot \cos \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda R} + \phi}.$$

Здесь K – модуль коэффициента отражения, ϕ – фаза коэффициента отражения, h_1, h_2 – высота антенны над земной поверхностью.

Величину K для различных классов поверхностей можно найти, например, в [1]. Формула упрощается во многих практически значимых случаях, когда выполняются следующие условия:

- распространение происходит вдоль Земли, т.е. высоты различаются не более, чем в несколько раз;
- модуль коэффициента отражения близок к 1 (море, сухая и вязкая почва);
- фаза коэффициента отражения $\phi \approx 180^\circ$.

Тогда функция ослабления приобретает вид:

$$F(R) = 2 \cdot \left| \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{h_1 \cdot h_2}{R} \right) \right|.$$

Из формулы следует, что уровень сигнала в зависимости от протяженности трассы имеет максимальные и минимальные значения; такая же зависимость получается от высоты, или же в зависимости от угла в вертикальной плоскости. Последняя зависимость обычно трактуется как лепесткование диаграммы направленности антенны. Во всех случаях максимальное значение множителя ослабления равно $+6 \text{ дБ}$, минимальное значение отрицательное и может быть $-(20 \div 50) \text{ дБ}$. Однако пространственная область положительных значений множителя большая, отрицательных – малая.

Последнюю формулу можно считать расчетной для оценки множителя ослабления в большинстве случаев.

Заметим, что зависимость множителя ослабления от расстояния приводит к квадратичной зависимости напряженности поля от расстояния:

$$E_m = \frac{\sqrt{60P \cdot G}}{R^2} \cdot \frac{4\pi \cdot h_1 \cdot h_2}{\lambda}.$$

Если P подставить в формулу в киловаттах, h_1, h_2, λ – в метрах, R в километрах, то действующее значение напряженности имеет размерность микровольт на метр и рассчитывается как

$$E_g = \frac{2,18\sqrt{P \cdot G} h_1 h_2}{\lambda \cdot R^2}.$$

Изменение во времени модуля и фазы коэффициента отражения приводит к временным изменениям уровня суммарного сигнала.

2. Открытые трассы средней протяженности.

Рассматривается случай поднятых над землей антенн (при условии малости высоты относительно протяженности трассы). Поверхность Земли представляется гладкой, сферической.

Отличие от варианта 1. состоит во введении в расчетные формулы вместо истинных высот антенны приведенных высот. Последние определяются не как высота над земной сферой, а как высота над горизонтальной плоскостью, касательной к сфере в точке формирования отраженного луча. Приведенные высоты рассчитываются по формулам:

$$h_1^1 = h_1 - \frac{R_{1-0}}{12,8}, \quad h_2^1 = h_2 - \frac{R_{2-0}}{12,8},$$

если высота выражается в метрах, а расстояния от антенны до точки отражения R_{1-0} , R_{2-0} – в километрах.

Некоторую проблему представляет расчет нахождения точки отражения и расстояния R_{1-0} и R_{2-0} . Задача упрощается при малых R и больших R относительно расстояния прямой видимости R_{ng} :

при малых R ($R \ll R_{ng}$):

$$R_{1-0} = R \cdot \frac{h_1}{h_1 + h_2}; R_{2-0} = R \cdot \frac{h_2}{h_1 + h_2},$$

при больших R ($R \approx R_{ng}$):

$$R_{1-0} = R \cdot \frac{\sqrt{h_1}}{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}}; R_{2-0} = R \cdot \frac{\sqrt{h_2}}{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}}.$$

Для промежуточных случаев положение точки отражения выбирается приближенно внутри интервала значений, определяемых крайними случаями.

Временные флуктуации сигнала из-за изменения условий отражения также присутствуют.

3. Трассы с закрытием прямой видимости препятствием.

Множитель ослабления для оценки уровня сигнала за препятствием имеет монотонный характер, обусловленный процессом дифракции радиоволн. Величина множителя рассчитывается с помощью приближенных методов, основанных на результатах работ по теории дифракции с учетом аппроксимации реальных препятствий сферами, радиус которых определяется конкретным видом препятствия. Наименьшее ослабление вызывают препятствия с малым радиусом (остроконечные, клиновидные препятствия).

Реальная трасса может иметь не одно, а несколько препятствий. Они могут быть разнесены на большие расстояния, могут группироваться на ограниченном участке трассы. Для всех указанных видов трасс существуют расчетные формулы, изложенные, например, в [1,4]. Там же изложена методика оценки множителя для различных видов трасс. В любом случае расчет начинается с выявления препятствий и оценки их характеристик. Делается это путем построения профиля трассы при заданных координатах конечных точек путем использования высотных данных о местности вдоль трассы. Такая информация может быть получена по данным топографических карт, обычно или электронных, или путем измерения высот.

4. Загоризонтные трассы (область полутени и тени) [2].

Распространение ЭМ волны за горизонт происходит за счет дифракции на поверхности Земли. Теоретически задача расчета напряженности поля для этого случая решена В.А.Фоком, однако вычислительные сложности и необходимость учета электрических параметров Земли приводят к тому, что пользуются упрощенными результатами решения.

Для области тени множитель ослабления представляется произведением трех сомножителей:

$$F = F(x) \cdot F(y_1) \cdot F(y_2),$$

где $F(x)$ – функция, зависящая от расстояния и параметров почвы, $F(y_1) \cdot F(y_2)$ – функции, зависящие от высоты подъема приемной и передающей антенн.

Параметры x, y_1, y_2 определяются через масштабы расстояния (L) и высот (H) следующим образом:

$$x = \frac{R}{L}, y_1 = \frac{h_1}{H}, y_2 = \frac{h_2}{H}, L = \left(\frac{R_3^2 \cdot \lambda}{\pi} \right)^{1/3}, H = \frac{1}{2} \left(\frac{R_3 \lambda^2}{\pi^2} \right)^{1/3}.$$

Здесь параметр x является нормированной длиной трассы, y_1, y_2 – нормированные высоты антенн, R_3 – радиус Земли.

В УКВ диапазоне при $\lambda > 10 м$ для горизонтальной поляризации волны и при $\lambda < 1 м$ для вертикальной правомерна следующая аппроксимация:

$$F(x) = 2\sqrt{\pi \cdot x} \cdot e^{-2,02 \cdot x},$$

$$F(y), \text{дБ} = -1,386 + 2,22y + 19 \cdot \lg(y) \text{ при } 0,01 \leq y \leq 1,$$

$$F(y), \text{дБ} = -1,29 + 1,16y + 30,1 \cdot \lg(y) \text{ при } 0,01 \leq y \leq 40.$$

В зоне полутени формулы аппроксимации усложняются. Часто используется следующий метод. Нормированные параметры трассы x, y_1, y_2 определяются, как и для области тени. Рассчитывается нормированное расстояние прямой видимости:

$$x_{не} = \sqrt{y_1} + \sqrt{y_2}.$$

Множитель ослабления равен:

$$F = F_{не}(\mu) - 17,1 \cdot \xi, \text{дБ},$$

где первое слагаемое определяет ослабление на границе прямой видимости, второе – дополнительное ослабление при переходе в область получения; параметр определяет удаление от границы прямой видимости и равен:

$$\xi = x - x_{не}.$$

Ослабление на границе прямой видимости аппроксимируется выражением:

$$F_{не}(\mu) = 14,33 - 18,8\mu - 11,18\sqrt{\mu} + 0,185 \exp \mu,$$

$$\text{где } \mu = \sqrt{\frac{\sqrt{y_1 y_2}}{\sqrt{y_1} + \sqrt{y_2}}}.$$

Множитель ослабления и уровень сигнала претерпевают временные изменения за счет изменения параметров почвы и расстояния до радиогоризонта из-за рефракции на трассе.

5. Распространение УКВ в условиях города [3].

Условия распространения УКВ в районах городской застройки существенно отличаются от условий на приземных трассах. Строения, размеры которых во много раз превышают длину волны, создают обширные теневые зоны, а рассеянные и отраженные волны придают процессу распространения многолучевой характер и формируют сложную интерференционную структуру с глубокими и резкими пространственными замираниями.

Обычно выделяют три случая организации радиолиний в условиях города:

- связь между пунктами в условиях прямой видимости;
- связь между пунктом и высоким расположением антенны и подвижным наземным пунктом;
- связь между двумя подвижными наземными пунктами.

В первом случае ослабление сигнала обычно рассматривают как ослабление при распространении над неровной поверхностью, а уровень сигнала описывают скорректированной квадратичной формулой Введенского. Такой

подход лежит в основе целого ряда эмпирических формул, лежащих в основе методики расчета уровня сигнала. Корректирующие множители зависят от расстояния, частоты, неровностей рельефа, характера застройки и высот антенн. В частности, такая методика предложена и для расчета линий второго случая (базовая станция сотовой связи и подвижный пункт).

В нижней части УКВ-диапазона в первом случае экспериментальные данные на расстояниях более 10 км близки к расчетным по квадратичной формуле. Во втором случае корректирующие добавки радикально изменяют характер зависимости. В верхней части диапазона такие методы оценки среднего уровня сигнала оказываются неприемлемыми.

Для второго случая накоплен очень большой экспериментальный материал. Основные закономерности сводятся к следующему.

- Медианное значение интенсивности поля убывает обратно пропорционально кубу расстояния на дальностях до 15–20 км при высоте базовой станции 150 м. Последующее увеличение дальности приводит к более быстрому уменьшению сигнала.

- Ослабление сигнала возрастает с увеличением частоты. Если мощность сигнала считать пропорциональной некоторой степени длины волны, то эта степень на частоте 100 МГц близка к нулю, а на частотах 1–2 ГГц – к единице.

- На радиальных улицах уровень сигнала на 10–15 дБ выше, чем на поперечных по отношению к трассе распространения. Различие уменьшается при увеличении протяженности трассы.

Третий случай построения трасс, когда высоты антенн составляют 2–5 м, приводит к наибольшему экранирующему влиянию строений. Уже на расстояниях около 1 км множитель ослабления составляет 20–60 дБ в диапазоне 0,64–0,69 ГГц и сильно зависит от близкорасположенных строений, ориентации улиц, высоты и материала зданий и т.д. На дальностях до 3–5 км зависимость уровня поля от расстояния обратно пропорциональна степени от 2 до 6, часто указывается степень 4.

Как уже отмечалось, сигнал в условиях города для всех трех случаев образования трасс имеет глубокие и малоразмерные периоды изменения в пространстве. Изменение положения одной из конечных точек приводило к появлению изменений уровня (флуктуаций уровня) во времени. Этот эффект наиболее существен для третьего случая, однако и для первых двух случаев он имеет место из-за временных изменений коэффициента отражения сигнала или других условий на трассе.

Расчет среднего уровня поля методами теории многократного рассеяния также приводит к экспоненциально-степенной зависимости от расстояния. При увеличении расстояния возрастает роль волны, распространяющейся над городской застройкой: на низких частотах ее вклад становится определяющим на расстояниях более 1,5–2 км и зависит от укрытия каждого из пунктов, создаваемых близко расположенными зданиями.

Для расчета уровня поля основным считается метод Кирхгофа, первоначально предложенный для решения задач дифракции. Для расчета поля в

условиях городской застройки разработан модифицированный метод Кирхгофа.

6. Ослабление в тропосфере.

Потери в тропосфере F_T возникают за счет поглощения и рассеяния в кислороде и неконденсированных парах воды. В диапазоне сантиметровых волн рассеяние ничтожно мало и основное ослабление происходит из-за поглощения. Существует расчетная формула для оценки интегрального ослабления сигнала из-за поглощения во всей толще тропосферы (или части ее) в зависимости от длины волны и угла места радиолуча. Для расчета необходимы сведения о вертикальных профилях СВЧ спектров поглощения кислорода и паров воды, коэффициенте преломления тропосферы и метеорологических параметрах, характеризующих состояние тропосферы. Формула, перечисленные характеристики и результаты расчетов ослабления содержатся во многих источниках, в частности, в [1]. На приземных трассах, протяженность которых не велика, в сантиметровом, дециметровом и метровом диапазонах потери в тропосфере малы и не учитываются.

7. Влияние метеорологических образований.

В тропосфере периодически возникают метеорологические образования в виде дождя, снега, грозы, тумана, облаков. Они являются еще одним источником ослабления. Наибольшее ослабление дает град, наиболее существенное – дождь и облака (по силе и по вероятности появления). Например, дождь интенсивностью 5 мм в час в слое 1 км дает ослабление менее 0,1 дБ, 50 мм в час – 1,5 дБ (длина волны 3 см). Средняя продолжительность дождя интенсивностью 5 мм в час равна 100 часов, 50 мм в час – 1 час. Вероятность дождей 1 – 5 мм в час равна $\approx 0,2\%$, 50 мм в час – $\approx 0,2\%$. В слое облачности толщиной 1.0 км с водностью 8 г/м^3 ослабление равно 1–2 дБ (длина волны 3 см), с водностью 1 г/м^3 – около 0.2 дБ.

Учет ослабления за счет метеообразований производится обычно по статистике их для района расположения трассы путем оценки вероятности определенного ослабления. Возможна и оперативная оценка ослабления по состоянию метеоусловий, что часто используется при обработке экспериментальных данных.

Более полную информацию о статистике дождей и ослаблений можно найти в [1].

3.2. Методика расчета радиолиний УКВ диапазона

3.2.1. Исходные данные

1. Методика позволяет рассчитать один из энергетических параметров радиолинии УКВ диапазона заданной протяженности и рабочей длины волны или частоты, остальные должны быть заданы или выбираются.

2. Методика применима для расчета предельной протяженности трассы при всех заданных энергетических характеристиках. Процесс вычисления становится итерационным, поскольку искомая протяженность входит в два члена уравнения, а все уравнение оказывается трансцендентным.

3. Энергетическими характеристиками радиолинии являются:

- мощность передатчика P_u , Вт или дБ/Вт;
- коэффициент усиления излучающей антенны G_u , безразмерная величина или дБ;
- коэффициент усиления приемной антенны G_{np} , безразмерная величина или дБ;
- реальная чувствительность приемника P_{np} , Вт или дБ/Вт – для высокочастотного диапазона, E_{np} , В/м – для низкочастотного диапазона.

Указанные характеристики могут быть заменены другими, однозначно связанными с ними. Это эффективная или геометрическая площадь антенны, коэффициент направленного действия, пороговая чувствительность приемника, превышение сигнала над шумом приемника или вероятность ошибки при передаче и т.п.

4. Задаются также длина волны λ (частота f) и геометрические характеристики трассы:

- протяженность трассы R , км (непосредственно или координатами пунктов);
- высоты расположения антенн h_u, h_{np} , м (над окружающей местностью или над уровнем моря);
- другие характеристики, конкретизирующие характер трассы (сухопутная, над гористой, гладкой и т.п. местностью и пр.).

5. Предполагается, что направленные антенны согласованы по углу (направления максимумов диаграмм совпадают с направлением трассы) и по поляризации.

3.2.2. Методика расчета энергетических характеристик

Основные формулы для расчета приведены выше и имеют вид:

$$P_A = \frac{P_u \cdot G_u \cdot G_{np} \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 R^2} \cdot F^2,$$

$$e_m = l_d \cdot \frac{\sqrt{60 P_u G_u}}{R} \cdot F.$$

Обозначения в формулах соответствуют вышеприведенным, кроме них l_d – действующая длина (высота) антенны.

Мощность сигнала P_A на выходе приемной антенны должна превышать чувствительность приемника P_{np} , т.е. должно выполняться условие:

$$P_{np} \leq P_A = \frac{P_u G_u G_{np}}{4\pi R^2} F^2.$$

Аналогичное условие должно выполняться и для расчетов по напряжению на нагрузке антенны.

Если в последней формуле исключить мощность сигнала P_A и представить всю формулу в относительных единицах, то получим следующее выражение, которое является расчетным:

$$P_u, \text{дБ}/\text{Вт} + G_u, \text{дБ} + G_{np}, \text{дБ} - P_{np}, \text{дБ}/\text{Вт} \geq W - F,$$

где: $W = 20 \lg \frac{4\pi R}{\lambda}$ – основные потери,

$F(\text{дБ}) = 20 \lg F$ – множитель ослабления (величина отрицательная),

$G, \text{дБ} = 10 \lg G$;

$P, \text{дБ}/\text{Вт} = 10 \lg P (\text{дБ})$.

Поскольку величина F по определению меньше единицы, то выраженная в децибелах она имеет отрицательное значение. В соответствии с формулой основные потери энергии и дополнительные складываются.

Аналогично может быть получено выражение для оценки энергетических параметров в низкочастотной части диапазона.

Уточним некоторые энергетические характеристики, входящие в последнюю формулу.

Коэффициент усиления антенны определяется эффективной площадью антенны $S_{эф}$, которая связана с геометрической S коэффициентом использования поверхности $k_{и}$, обычно равным $0,5 \div 0,8$: $S_{эф} = k_{и} S$.

Реальная чувствительность приемников рассчитывается по формуле:

$$P_{np} = \kappa_p q P_u = q N k T \Delta f \kappa_p,$$

где $P_u = N k T \Delta f$ – мощность собственного шума приемника,

q – отношение внешних шумов к собственным (внутренним),

κ_p – коэффициент различимости, равный отношению сигнала к полному шуму (по мощности),

N – коэффициент шума приемника,

Δf – полоса пропускания приемника.

Часто шумовые свойства (пороговая чувствительность) приемников оцениваются шумовой температурой T_u :

$$P_u = k T_u \Delta f.$$

Здесь

$$T_u = T_{u,np} + T_{u,\phi} + (T_{u,a} + T_a) \eta,$$

где $T_{u,np}$ – собственные тепловые шумы приемника, которые можно определить через коэффициент шума приемника N следующим образом:

$$T_{u,np} = T_{np} (N - 1),$$

$T_{u,\phi}$ – тепловые шумы антенно-фидерного тракта, которые при условии согласования его волнового сопротивления со входным сопротивлением приемника можно определить по термодинамической температуре фидера как $T_{u,\phi} = T_\phi (1 - \eta)$,

$T_{u,a}$ – температура собственного теплового шума антенны,

T_a – антенная температура от внешних источников шума,

η – потери в фидере.

На реальных трассах множитель ослабления F изменяется во времени в широком спектре частот. Изменяется он и в пространстве. Флуктуации множителя проявляются во флуктуациях уровня принимаемого сигнала, приводящих к временному пропаданию сигнала или временному уменьшению отношения сигнал/шум. Для устранения указанного эффекта энергетические характеристики аппаратуры выбираются с запасом, определяемым статистикой флуктуаций и допустимой вероятностью пропадания сигнала. В формуле величина F представляется в виде суммы:

$$F = \bar{F} + \Delta F,$$

где \bar{F} – медианное значение,

ΔF – запас на флуктуации множителя ослабления для обеспечения определенной вероятности присутствия сигнала.

3.2.3. Расчет множителя ослабления

Определение медианного значения множителя ослабления является основным действием при расчете энергетических характеристик радиолинии. Разнообразие типов трасс и механизмов распространения приводит к значительному числу вариантов расчета, в некоторых случаях приходится разбивать всю трассу на несколько участков с различными преобладающими механизмами.

Расчет множителя ослабления начинается с уточнения характеристик трассы в следующей последовательности.

1. Строится профиль трассы в ортогональных координатах расстояние-высота антенн и местности в так называемом параболическом масштабе. В таком масштабе земная поверхность (уровень моря) изображается параболой и линии равных высот – также параболой. Сама парабола строится симметричной относительно геометрической середины трассы. Кривизна параболы определяется средними многолетними условиями рефракции, т.е. эквивалентный радиус Земли равен $R_{3,9} = 1,33 R_3$.

Траектория радиолуча с учетом нормальной рефракции в таком масштабе представляется прямой линией. По вертикальной оси наносятся высоты точек трассы с учетом неровностей рельефа, растительности, строений и пр. Пример простейшего профиля трассы представлен на рис. 3.1.

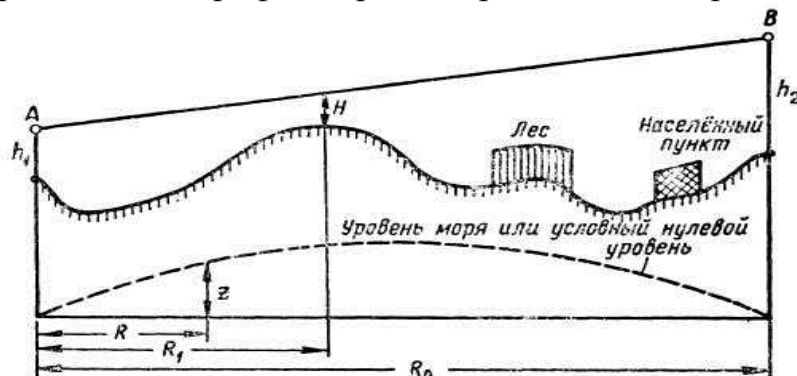


Рис. 3.1. Профиль трассы в параболическом масштабе

При наличии сведений о конкретных условиях рефракции параболический масштаб может строиться не для эквивалентного радиуса Земли, а для действительного.

2. По профилю трассы определяется «просвет» трассы H как расстояние между высотами антенн и наибольшей высотой трассы (см. рис. 3.1.). Для более сложного профиля можно выделить несколько просветов H_1, H_2, \dots для высоких точек трассы. Величина H может быть как положительной (открытые трассы), так и отрицательной; при отрицательном просвете трасса становится закрытой. Закрытие может обеспечиваться как возвышенностями, лесом или строениями, так и сферичностью земной поверхности (параболой нулевой высоты или заданной высоты).

3. По величине H с помощью профиля трассы определяется тип трассы с учетом некоторого минимального просвета H_0 , определяемого по формуле:

$$H_0 = \sqrt{\frac{1}{3} R \cdot \lambda \cdot k (1 - k)}$$

и необходимого для сбора энергии в пределах большей части первой зоны Френеля. Здесь k – относительная координата расположения места наибольшей высоты на трассе, определяемая как отношение расстояния от начала трассы до места к полной длине трассы.

Если $H > H_0$, то трасса считается открытой, которая может разделяться на два подтипа в зависимости от протяженности трассы:

- а) открытая трасса малой протяженности,
- б) открытая трасса большой протяженности.

Если $H < 0$, то трасса закрытая с подтипами:

- в) трасса с закрытием препятствия,
- г) трасса с закрытием сферической поверхности Земли (загоризонтная трасса).

Иногда выделяют полузакрытые трассы, на которых выполняется условие:

$$H_0 < H < 0.$$

Здесь также возможны два подтипа:

- д) полузакрытая за препятствием,
- е) полузакрытая в окрестностях границы прямой видимости.

Можно выделить еще несколько подтипов трасс, например, следующие:

- ж) трасса в условиях города,
- з) морская трасса.

4. Для дальнейшего уточнения подтипа трассы рассчитывается расстояние прямой радиовидимости до радиогоризонта над сферической земной поверхностью. Расстояние рассчитывается для средних условий рефракции по формуле:

$$R_{ng} = 4,12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}).$$

Результат получается в километрах, если высота выражена в метрах.

Для других условий рефракции формула имеет вид:

$$R_{ng} = 3,57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})\sqrt{\beta},$$

где
$$\beta = \frac{R_{3Э}}{R_3} = \frac{1}{1 + \frac{R_3 \cdot g}{2}},$$

g – вертикальный градиент диэлектрической проницаемости тропосферы, соответствующий моменту расчета.

Для трасс малой протяженности расчет R_{ng} может не выполняться.

5. Для конкретного подтипа трассы производится оценка медианного множителя ослабления. Расчетные формулы для типовых трасс и методические указания со ссылками на подробную методику приведены в разделе 3.1.

При этом следует пользоваться следующим соответствием:

- подтип а – случай 1,
- подтип б – случай 2,
- подтип в – случай 3,
- подтип г – случай 4,
- подтип д – случай 3,
- подтип е – случай 4,
- подтип ж – случай 5,
- подтип з – материала здесь нет.

Уточнение подтипа трассы может быть произведено по протяженности трассы относительно расстояния до радиогоризонта:

- подтип а (случай 1) обеспечивается при $R < 0,2 R_{ng}$,
- подтип в (случай 2) обеспечивается при $0,2 R_{ng} < R < 08 R_{ng}$,
- подтип г (случай 4) обеспечивается при $R > R_{ng}$,
- подтип е (случай 4) обеспечивается при $08 R_{ng} < R < 1,2 R_{ng}$.

6. Оценка запаса энергетика на флуктуации множителя ослабления ΔF определяется по теоретическим или экспериментальным распределениям мгновенных значений множителя ослабления. Обычно флуктуации разделяют на две независимые области спектра: медленные флуктуации и быстрые флуктуации.

Быстрые флуктуации обычно определяются как изменение мгновенных значений в минутных интервалах (3–5 минут). Принято считать, что они имеют релеевское распределение с дисперсией, характерной для определенного подтипа трасс.

Медленные флуктуации (изменение средних по минутным сеансам на больших интервалах времени: часы, сутки, месяцы. Конкретный интервал времени определяется тем, за какое время получено медианное значение F). Принято считать, что медленные флуктуации подчинены логонормальному закону (множитель, выраженный в децибелах, имеет нормальное распределе-

ние). Поскольку быстрые и медленные флуктуации являются независимыми, то

$$\Delta F = \Delta F_H \cdot \Delta F_B \text{ или } \Delta F, \text{ дБ} = \Delta F_M, \text{ дБ} + \Delta F_B, \text{ дБ}.$$

Сведения о дисперсиях флуктуации для трасс различных подтипов можно найти в рекомендованной и другой литературе.

7. При наличии на трассе метеообразований, вносящих дополнительное ослабление сигнала, их влияние учитывается введением еще одного множителя ослабления, пусть F_M .

Метеообразования имеют определенную протяженность, часто занимающую часть трассы. Обычно пользуются экспериментальными данными по ослаблению, которые выражаются в виде погонного ослабления для конкретного вида образований. Ослабление тогда определяется произведением погонного ослабления $\delta, \text{ дБ/км}$ на протяженность метеообразования R_M :

$$\Delta F_M = \delta \cdot R_M, \text{ дБ}.$$

8. Подсчитывается сумма всех составляющих множителя ослабления, выраженных в децибелах.

Литература: [1, с. 27–136], [2, с. 10–60. 77–104], [3, с. 47–88], [4, с. 7–167].

3.3. Расчетные задания

А. Рассчитать энергетический потенциал приемного пункта при следующих условиях:

- протяженность радиолинии самолет-самолет 5–500 км,
- длина волны 1–100 см,
- усиление передающей антенны 10–100,
- мощность передатчика 1–1000 Вт,
- полоса радиосигнала 0,1–10,0 МГц.
- дополнительные потери на трассе отсутствуют (присутствуют).

Б. Рассчитать предельную дальность действия запросного дальномера, имеющего следующие характеристики:

- длина волны 1–100 см,
- мощности передатчиков 10–1000 Вт,
- коэффициенты усиления антенн 10–10000,
- чувствительность приемников 10^{-10} – 10^{-15} Вт,
- дополнительные потери на трассе отсутствуют (присутствуют).

Примечание. Конкретные цифры в задании определяет преподаватель.

3.4. Рекомендуемая литература

1. Каменский Н.Н. Справочник по радиорелейной связи. / Н.Н. Каменский В.Н. Мандель и др. - М.: Радио и связь, 1981.
2. Мандель А.Е. Распространение радиоволн: Учеб. пособие / А.Е. Мандель, В.А. Замотринский. - Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2006.
3. Пономарев Г.А. Распространение УКВ в городе /Г.А. Пономарев, А.Н. Куликов, Е.Д. Тельпуховский. – Томск: МП «РАСКО», 1991.
4. Калинин А.И. Расчет трасс радиорелейных линий. – М.: Связь, 1964.

4. Анализ и синтез функциональных схем радионавигационных устройств и систем

Первая часть раздела предполагает анализ функциональных схем радионавигационных систем, общее описание и схемы которых даны во втором разделе настоящего пособия. Вторая часть имеет целью составление подробных функциональных схем радионавигационных устройств и систем, техническое описание которых также дано во втором разделе.

Задание 1. Провести анализ предложенной функциональной схемы четырехлучевого доплеровского измерителя скорости и угла сноса самолета ДИСС-3 (см. описание измерителя в разделе 2.6).

Задание 2. Провести анализ предложенной функциональной схемы трехлучевого доплеровского измерителя скорости и угла сноса самолета ДИСС-013 (см. описание измерителя в разделе 2.6).

Задание 3. Провести анализ предложенной функциональной схемы четырехлучевого доплеровского измерителя полного вектора скорости самолета ДИСС-7 (см. описание измерителя в разделе 2.6).

Задание 4. Составить подробную функциональную схему запросного радиодальномера, работающего в составе радиосистемы ближней навигации .

Исходные данные.

- Метод дальнометрии – временной.
- Форма сигналов – импульсный сигнал.
- Предусмотреть кодирование сигнала запроса и сигнала ответа.
- Разделение канала запроса и канала ответа частотное.
- Предусмотреть стабилизацию интенсивности потока ответных импульсов при изменении интенсивности запросных сигналов.
- Обеспечить выделение в запросчике ответных импульсов на свой запрос из совокупности ответных импульсов для всех запросчиков.

Задание 5. Составить подробную функциональную схему запросного радиодальномера, обеспечивающего измерение расстояния между двумя точками.

Исходные данные.

- Метод дальнометрии – временной.
- Форма несущего сигнала – непрерывный.
- Разделение канала запроса и канала ответа частотное.
- Обосновать выбор структуры информативного сигнала.

Задание 6. Составить подробную функциональную схему доплеровского измерителя скорости и угла сноса самолета.

Исходные данные.

- Количество лучей – четыре.
- Антенны расположены на поворотной платформе.
- Форма несущего сигнала – непрерывный немодулированный.

Задание 7. Составить подробную функциональную схему аналоговой аппаратуры потребителя системы дальней навигации «Омега».

Исходные данные.

- Количество приемных каналов – три.
- Предусмотреть элементы схемы для ликвидации неоднозначности фазовых измерений разности расстояний.

Задание 8. Составить подробную функциональную схему цифровой аппаратуры потребителя системы дальней навигации «Омега».

Исходные данные.

- Количество приемных каналов – три.
- Предусмотреть элементы схемы для ликвидации неоднозначности фазовых измерений разности расстояний.

Задание 9. Составить функциональную схему аппаратуры потребителя системы спутниковой навигации ГЛОНАСС.

Исходные данные.

- Количество приемных каналов – четыре.
- Использовать открытый код дальномерного сигнала.

Задание 10. Составить функциональную схему бортовой аппаратуры системы ближней навигации РСБН.

Исходные данные.

- Количество каналов – два: канал измерения дальности и канал измерения азимута.

Задание 11. Составить функциональную схему бортовой аппаратуры системы ближней навигации VOR/DME.

Исходные данные.

- Количество каналов – два: канал измерения дальности и канал измерения азимута.

Задание 12. Составить функциональную схему частотного высотомера малых высот.

Исходные данные.

- Количество каналов – один.
- Вариант построения схемы – классический с измерением частоты биений.

Задание 13. Составить функциональную схему комплекса, состоящего из частотного высотомера малых высот и доплеровского измерителя скорости и угла сноса.

Исходные данные.

- Количество каналов – четыре.
- Вариант построения схемы – классический с измерением средней дальномерной частоты и средней частоты доплеровского спектра.

ЧАСТЬ 2

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ»**

1. Методические указания для проведения практических занятий по дисциплине «Радионавигационные системы» для специальности 210304

А. Цель проведения занятий

Практические занятия направлены на закрепление и расширение знаний, полученных на лекциях; объем занятий – 18 часов.

Практические занятия по курсу специализации направлены на изучение основ радионавигации и принципов построения систем, принятых технических решений, структурных и функциональных схем наиболее важных и сложных навигационных радиосистем. Некоторое внимание уделено решению расчетных задач, в частности, расчету энергетических характеристик радиолиний.

Предусмотрен тестовый контроль полученных знаний в объеме, определенном рейтинговой раскладкой для данной дисциплины (см. раздел 3 настоящей части пособия). Тестовый контроль проводится в виде трех контрольных тестовых работ по изучаемым темам; каждая контрольная содержит четыре варианта по 10 вопросов.

Б. Содержание занятий

Занятие 1.

Тема. Вводное занятие (2 часа).

Содержание. Решение организационных вопросов, ознакомление с рейтинговой раскладкой, входной контроль по характеристикам радиоэлектронных устройств: антенн, приёмников, передатчиков, измерителей параметров сигналов.

Форма проведения. Тестовая контрольная работа №1 (см. раздел 4 настоящей части пособия). Каждый студент получает список вопросов, письменные ответы сдаются преподавателю. Второй час отводится на анализ знаний студентов.

Тематический план.

Решение организационных вопросов – 15 минут.

Тестовая контрольная работа – 30 минут.

Анализ результатов контрольной работы – 45 минут.

Занятие 2.

Тема. Местоопределение корабля (2 часа).

Содержание. Методы навигации. Позиционный метод местоопределения. Погрешности определения линий положения и местоопределения методом позиционных линий.

Форма проведения. Самостоятельная работа по методическому пособию по проведению практических занятий.

Тематический план.

Самоподготовка по методическому пособию по проведению практических занятий и рекомендованной литературе – 1 час.

Собеседование – 1 час.

Занятие 3.

Тема. Местоопределение корабля (2 часа).

Содержание. Анализ аналитических выражений для среднего квадрата ошибки места и границы рабочей области для некоторых вариантов систем.

Форма проведения. Подгруппа студентов из 4 – 6 человек получает вариант системы и работает самостоятельно.

Тематический план.

Самоподготовка по методическому пособию по проведению практических занятий – 30 минут.

Пользуясь пособием и литературой, необходимо рассчитать погрешность места для заданной точки расположения корабля. Отчётность – по рабочей тетради – 30 минут.

Тестовая контрольная №2 (см. раздел 4 настоящей части пособия) – 30 минут.

Занятие 4.

Тема. Расчет энергетических характеристик навигационных радиолиний (2 часа).

Содержание. Выполняется расчет: а) одного из параметров бортовой аппаратуры при заданной энергетике радиомаяка и протяженности трассы; б) протяженности трассы при заданной энергетике наземной и бортовой аппаратуры.

Тематический план.

Анализ уравнения дальности в варианте распространения сигнала в одном направлении (изучение по методическому пособию и обсуждение) – 45 минут.

Расчеты для нескольких значений параметров – 30 минут.

Обсуждение результатов – 15 минут.

Рекомендации. Уравнение дальности представить в обычной и логарифмической формах. Расчет вести, выражая величины в относительных единицах (дБ/Вт).

Занятие 5.

Тема. Измерение навигационных величин радиоэлектронными средствами (2 часа).

Содержание. Классификация измерителей. Варианты измерения углов и расстояний: объяснение принципа, запись алгоритма пересчета измеряемого параметра сигнала к навигационной величине, построение функциональной схемы.

Форма проведения. Задание выдаётся подгруппе студентов из 4 – 6 человек, по 1 – 2 варианта на занятие. Отчет по рабочей тетради.

Тематический план.

Самоподготовка – 45 минут.

Работа над заданием – 30 минут,

Отчетность – 15 минут.

Занятие 6.

Тема. Измерение навигационных величин радиоэлектронными средствами (2 часа).

Содержание. Варианты измерения разности расстояний и скоростей: объяснение принципа, запись алгоритма пересчета измеряемого параметра сигнала к навигационной величине, построение функциональной схемы.

Форма проведения. Задание выдаётся подгруппе студентов из 3 – 4 человек, по 1 – 2 варианта на занятие. Отчет по рабочей тетради.

Тематический план.

Самоподготовка – 25 минут.

Работа над заданием – 30 минут.

Отчетность – 15 минут.

Тестовая контрольная №3 (см. раздел 4 настоящей части пособия) – 20 минут.

Занятие 7.

Тема. Радионавигационные системы и устройства (2 часа).

Содержание. Построение функциональных схем эксплуатируемых систем и устройств.

Форма проведения. Подгруппе студентов из 3 – 4 человек выдаётся по одной схеме на занятие

Тематический план.

Изучение системы – 30 минут.

Работа над схемой – 30 минут.

Рассмотрение представленного варианта функциональной схемы – 30 минут.

Занятие 8.

Тема. Радионавигационные системы и устройства (2 часа).

Содержание. Построение функциональных схем эксплуатируемых систем и устройств.

Форма проведения. Подгруппе студентов из 3 – 4 человек выдаётся по одной схеме на занятие

Тематический план.

Изучение системы – 30 минут.

Работа над схемой – 30 минут.

Рассмотрение представленного варианта функциональной схемы – 30 минут.

Занятие 9.

Тема. Итоговое занятие (2 часа).

Содержание. Устранение задолженностей и подведение итогов.

Тематический план.

Устранение недоработок – 30 минут.

Ликвидация задолженностей – 30 минут.

Подведение рейтингового итога – 30 минут.

В. Примечания.

1. Некоторые темы занятий по усмотрению преподавателя могут быть заменены на семинарские занятия, на которых заслушиваются и обсуждаются доклады по темам рефератов, выдаваемым согласно рейтинговой раскладке по лекционному курсу.

2. При самоподготовке следует пользоваться конспектами лекций, настоящим учебно-методическим пособием и рекомендованной в разделах пособия литературой.

2. Методические указания для проведения практических занятий по дисциплине «Радионавигационные системы» для специальности 160905.

А. Цель проведения занятий

Практические занятия направлены на закрепление и расширение знаний, полученных на лекциях; объем занятий – 26 часов (2 семестра: 1 семестр – 18 часов, 2 семестр – 8 часов).

Практические занятия по курсу специализации направлены на изучение основ радионавигации и принципов построения систем, принятых технических решений, структурных и функциональных схем наиболее важных и сложных навигационных радиосистем. Некоторое внимание уделено решению расчетных задач, в частности, расчету энергетических характеристик радиолиний.

Предусмотрен тестовый контроль полученных знаний в объеме, определенном рейтинговой раскладкой для данной дисциплины. Тестовый контроль проводится в виде пяти контрольных тестовых работ (3 – в первом семестре, 2 – во втором), каждая контрольная содержит четыре варианта по 10 вопросов.

Б. Содержание занятий

Занятие 1.

Тема. Вводное занятие (2 часа).

Содержание. Решение организационных вопросов, ознакомление с рейтинговой раскладкой, входной контроль знаний о характеристиках радиоэлектронных устройств: антенн, приёмников, передатчиков, измерителей параметров сигналов и др.

Форма проведения. Тестовая контрольная работа №1 (см. раздел 4 настоящей части пособия). Каждый студент получает лист с вопросами, заполненные листы сдаются преподавателю. Оставшееся время отводится на анализ знаний студентов.

Тематический план.

Решение организационных вопросов – 15 минут.

Тестовая контрольная работа – 30 минут.

Анализ результатов контрольной работы – 45 минут.

Занятие 2.

Тема. Местоопределение корабля (2 часа).

Содержание. Задачи и методы навигации. Системы координат. Радионавигационные устройства, системы и комплексы.

Форма проведения. Самостоятельная работа по методическому пособию по проведению практических занятий.

Тематический план.

Самоподготовка по методическому пособию по проведению практических занятий и рекомендованной литературе – 1 час.

Собеседование – 1 час.

Занятие 3.

Тема. Местоопределение корабля (2 часа).

Содержание. Позиционный метод местоопределения. Погрешности определения линий положения и места.

Форма проведения. Самостоятельная работа по методическому пособию по проведению практических занятий.

Тематический план.

Самоподготовка по методическому пособию по проведению практических занятий – 30 минут.

Пользуясь пособием и литературой, необходимо рассчитать погрешность места для заданной точки расположения корабля. Отчётность – по рабочей тетради – 30 минут.

Занятие 4.

Тема. Местоопределение корабля (2 часа).

Содержание. Анализ аналитических выражений для среднего квадрата ошибки места и границы рабочей области для некоторых вариантов систем.

Форма проведения. Подгруппа студентов из 3 – 4 человек получает вариант системы и работает самостоятельно.

Тематический план.

Самоподготовка по методическому пособию по проведению практических занятий – 30 минут.

Пользуясь пособием и литературой, необходимо рассчитать погрешность места для заданной точки расположения корабля. Отчётность – по рабочей тетради – 30 минут.

Тестовая контрольная №2 (см. раздел 4 настоящей части пособия) – 30 минут.

Занятие 5.

Тема. Расчет энергетических характеристик навигационных радиолоний (2 часа).

Содержание. Выполняется расчет: а) одного из параметров бортовой аппаратуры при заданной энергетике радиомаяка и протяженности трассы; б) протяженности трассы при заданной энергетике наземной и бортовой аппаратуры.

Тематический план.

Анализ уравнения дальности в варианте распространения сигнала в одном направлении (изучение по методическому пособию и обсуждение) – 45 минут.

Расчеты для нескольких значений параметров – 30 минут.

Обсуждение результатов – 15 минут.

Рекомендации. Уравнение дальности представить в обычной и логарифмической формах. Расчет вести, выражая величины в относительных единицах (дБ/Вт).

Занятие 6.

Тема. Измерение навигационных величин радиоэлектронными средствами (2 часа).

Содержание. Классификация измерителей. Варианты измерения углов и расстояний: объяснение принципа, запись алгоритма пересчета измеряемого параметра сигнала к навигационной величине, построение функциональной схемы.

Форма проведения. Задание выдается подгруппе студентов из 3 – 4 человек, по 1 – 2 варианта на занятие. Отчет по рабочей тетради.

Тематический план.

Самоподготовка – 45 минут.

Работа над заданием – 30 минут.

Отчетность – 15 минут.

Занятие 7.

Тема. Измерение навигационных величин радиоэлектронными средствами (2 часа).

Содержание. Варианты измерения разности расстояний и суммы расстояний. Объяснение принципа, запись алгоритма пересчета измеряемого параметра сигнала к навигационной величине, построение функциональной схемы.

Форма проведения. Задание выдается подгруппе студентов из 4 – 6 человек, по 1 – 2 варианта на занятие. Отчет по рабочей тетради.

Тематический план.

Самоподготовка – 45 минут.

Работа над заданием – 30 минут.

Отчетность – 15 минут.

Занятие 8.

Тема. Измерение навигационных величин радиоэлектронными средствами (2 часа).

Содержание. Варианты измерения радиальной и угловой скоростей и вектора скорости. Объяснение принципа, запись алгоритма пересчета измеряемого параметра сигнала к навигационной величине, построение функциональной схемы.

Форма проведения. Задание выдаётся подгруппе студентов из 3 – 4 человек, по 1 – 2 варианта на занятие. Отчет по рабочей тетради.

Тематический план.

Самоподготовка – 25 минут.

Работа над заданием – 30 минут.

Отчетность – 15 минут.

Тестовая контрольная №3 (см. раздел 4 настоящей части пособия) – 20 минут.

Занятие 9.

Тема. Итоговое занятие за первый семестр. (2 часа).

Содержание. Устранение задолженностей и подведение итогов.

Тематический план.

Анализ результатов контрольной работы – 30 минут.

Устранение недоработок и задолженностей – 30 минут.

Подведение рейтингового итога – 30 минут.

Занятие 10.

Тема. Повторение материала первого семестра (2 часа).

Содержание. Решение организационных вопросов, ознакомление с рейтинговой раскладкой на второй семестр, контроль знаний о местопределении и измерении навигационных величин радиоэлектронными средствами.

Форма проведения. Тестовые контрольные работы №2 и №3 (см. раздел 4 настоящей части пособия). Каждый студент получает 2 листа с вопросами, заполненные листы сдаются преподавателю. Оставшееся время отводится на анализ знаний студентов.

Тематический план.

Решение организационных вопросов – 15 минут.

Тестовые контрольные работы – 40 минут.

Анализ результатов контрольных работ – 35 минут.

Занятие 11.

Тема. Радионавигационные системы и устройства (2 часа).

Содержание. Построение функциональных схем эксплуатируемых систем и устройств.

Форма проведения. Подгруппе студентов из 3 – 4 человек выдаётся по одной схеме на занятие.

Тематический план.

Изучение системы – 30 минут.
 Работа над схемой – 30 минут.
 Рассмотрение представленного варианта функциональной схемы – 30 минут.

Занятие 12.

Тема. Радионавигационные системы и устройства (2 часа).

Содержание. Построение функциональных схем эксплуатируемых систем и устройств.

Форма проведения. Подгруппе студентов из 3 – 4 человек выдается по одной схеме на занятие.

Тематический план.

Изучение системы – 30 минут.

Работа над схемой – 30 минут.

Рассмотрение представленного варианта функциональной схемы – 30 минут.

Занятие 13.

Тема. Итоговое занятие за второй семестр (2 часа).

Содержание. Устранение задолженностей и подведение итогов.

Тематический план.

Анализ результатов контрольной работы – 30 минут.

Устранение недоработок и задолженностей – 30 минут.

Подведение рейтингового итога – 30 минут.

В. Примечания.

1. Некоторые темы занятий по усмотрению преподавателя могут быть заменены на семинарские занятия, на которых заслушиваются и обсуждаются доклады по темам рефератов, выдаваемым согласно рейтинговой раскладке по лекционному курсу.

2. При самоподготовке следует пользоваться конспектами лекций, настоящим учебно-методическим пособием и рекомендованной в разделах пособия литературой.

3. Рейтинговая раскладка практических занятий

Специальность 210304 (Форма отчетности – экзамен).

Общее количество баллов – 40.

По пунктам контроля:

- посещаемость – 9 баллов;

- контрольные тестовые работы – 3 работы по 8 баллов, итого 24 балла;

- активность – 7 баллов.

Специальность 160905

Осенний семестр (форма отчетности – зачет).

Общее количество баллов – 60.

По пунктам контроля:

- посещаемость – 9 баллов;
- контрольные тестовые работы – 3 работы по 11 баллов, итого 33 балла;
- активность – 18 баллов.

Весенний семестр (форма отчетности – экзамен).

Общее количество баллов – 40.

По пунктам контроля:

- посещаемость – 8 баллов;
- контрольные тестовые работы – 2 работы по 12 баллов, итого 24 балла;
- активность – 8 баллов.

4. Вопросы тестового контроля

Контрольная №1. Тема «Проверка остаточных знаний».

1. Пороговая чувствительность приемника зависит от:
 - а) – полосы пропускания, б) – коэффициента усиления,
 - в) – потерь в фидере, г) – коэффициента усиления антенны.
2. Реальная чувствительность приемника зависит от:
 - а) – коэффициента шума, б) – коэффициента усиления,
 - в) – потерь в фидере, г) – коэффициента усиления антенны.
3. Выражение для реальной чувствительности приемника отличается от выражения для пороговой присутствием:
 - а) – полосы пропускания, б) – коэффициента усиления,
 - в) – коэффициента различимости, г) – коэффициента усиления антенны
4. Выбрать правильное написание формулы пороговой чувствительности приемника.

а) $P = kTK_u \Delta FK_p$	б) $P = kTK_u \Delta F$
в) $P = TK_u \Delta FK_p$	г) $P = kTK_u \Delta FK_p G$
5. Выбрать правильное написание формулы реальной чувствительности приемника.

а) $P = kTK_u \Delta FK_p$	б) $P = kTK_u \Delta F$
в) $P = TK_u \Delta FK_p$	г) $P = kTK_u \Delta FK_p G$
6. Действующая высота антенны обеспечивает пропорциональное увеличение:
 - а) – напряжения сигнала,
 - б) – мощности сигнала,

- в) – полосы пропускания, г) – КПД.
7. Коэффициент усиления антенны обеспечивает пропорциональное увеличение:
- а) – напряжения сигнала, б) – мощности сигнала,
в) – полосы пропускания, г) – КПД.
8. Выражение для коэффициента усиления антенны отличается от выражения для коэффициента направленного действия наличием:
- а) – шумовой температуры, б) – нормированной диаграммы направленности,
в) – полосы пропускания, г) – КПД.
9. КНД антенны определяется выражением:
(написать)
10. В диапазоне СВЧ используются следующие типы антенн, кроме:
- а) – линзовые, б) – рупорные,
в) – спиральные, г) – штыревые.
11. Укажите предельные значения коэффициента усиления антенн в диапазоне СВЧ:
- а) (30 – 40) дБ, б) (40 – 50) дБ,
в) (50 – 60) дБ, г) (60 – 70) дБ.
12. Укажите предельные значения реальной чувствительности приемников в диапазоне СВЧ:
- а) – (80–100) дБ/Вт, б) – (100–130) дБ/Вт,
в) – (130–160) дБ/Вт, г) – (160–200) дБ/Вт.
13. Выберите правильное определение диаграммы направленности приемной антенны:
- а) – зависимость напряженности поля у антенны от угла поворота,
б) – зависимость уровня сигнала на выходе от угла поворота,
в) – зависимость фазы выходного сигнала от угла поворота,
г) – зависимость времени прихода сигнала к антенне от угла поворота.
14. Главное свойство когерентных сигналов:
- а) – равенство частот, б) – равенство амплитуд,
в) – равенство фаз, г) – равенство времени появления.
15. Как разделить два когерентных сигнала в одной точке приема?
- А. – Путем переноса на разные частоты.
Б. – Путем нахождения квадратур.
В. – Путем корреляционной обработки.

Г. – Невозможно.

16. Два сигнала с разными частотами могут быть когерентными при условии:
- | | |
|-------------------------------|------------------------------------|
| а) – нет условий, | б) – равенство времен образования, |
| в) – равенство начальных фаз, | г) – равенство пересчитанных фаз. |
17. Импульсный сигнал является:
- | |
|---|
| а) – амплитудно-модулированным непрерывным, |
| б) – время-модулированным непрерывным, |
| в) – фазо-модулированным непрерывным, |
| г) – самостоятельным видом, не связанным с непрерывным. |
18. Напряжение в промышленной электрической сети 220 вольт. Мгновенное значение его изменяется в пределах:
- | | |
|----------------------|----------------------|
| а) – не изменяется, | б) – $0 \dots 220$, |
| в) – $0 \dots 310$, | г) – $0 \dots 380$. |
19. Верхняя граница частот звукового сигнала, воспринимаемого человеком:
- | | |
|---------------------|--------------------|
| а) – около 3,5 кГц, | б) – около 10 кГц, |
| в) – около 15 кГц, | г) – около 20 кГц. |
20. Скорость распространения радиоволн в тропосфере равна:
- | | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| а) – скорости света, | б) – больше скорости света, |
| в) – меньше скорости света, | г) – скорости звука. |
21. Указать ошибочный механизм распространения радиоволн:
- | | |
|---------------------|-----------------|
| а) – интерференция, | б) – дифракция, |
| в) – диссипация, | г) – рефракция. |
22. Диапазон СДВ имеет следующий преобладающий механизм распространения:
- | | |
|-----------------|-----------------------------------|
| а) – рефракция, | б) – дифракция, |
| в) – рассеяние, | г) – волноводное распространение. |
23. Поляризация электромагнитной волны определяется расположением в пространстве:
- | | |
|-----------------------------------|------------------------------|
| а) – электрической составляющей, | б) – магнитной составляющей, |
| в) – направления распространения, | г) – вектора Умова-Пойтинга. |
24. Величина постоянного тока в электрической цепи, согласно закону Ома, равна:
- | |
|---|
| а) – отношению напряжения и сопротивления, |
| б) – произведению напряжения и сопротивления, |

- в) – отношению мощности и сопротивления,
 г) – произведению мощности и сопротивления.

25. Перевод мощности сигнала в относительные единицы (дБ/Вт) производится по формуле:

- а) $20 \lg P$, б) $10 \lg P$, в) $20 \ln P$ г) $10 \ln P$.

26. Уменьшить сетевое напряжение можно с помощью следующих элементов, кроме:

- а) – трансформатора, б) – резистора,
 в) – фильтра, г) – емкости.

27. Указать несуществующий вид модуляции электрического сигнала:

- а) – амплитудная, б) – частотная,
 в) – временная, г) – поляризационная.

Контрольная № 2. Тема «Местоопределение».

- Какой метод местоопределения не существует?
 А. Обзорно-сравнительный. Б. Координатный.
 В. Позиционных линий. Г. Счисления пути.
- Метод счисления пути предполагает измерение:
 а – расстояния, б – угла,
 в – скорости, г – угловой скорости.
- Метод позиционных линий допускает измерение:
 а – расстояния, б – ускорения,
 в – скорости, г – угловой скорости.
- Метод счисления пути требует априорной информации в виде:
 а – параметров маршрута, б – начальной скорости,
 в – начальных координат, г – параметров измерения.
- Метод позиционных линий требует априорной информации в виде:
 а – параметров маршрута, б – параметров аппаратуры,
 в – координат маяков, г – начальных координат.
- Обзорно-сравнительный метод требует априорной информации в виде:
 а – карт реального курса, б – параметров аппаратуры,
 в – карт заданного курса, г – начальных координат.
- Погрешность местоопределения растет с увеличением времени движения при реализации метода:

16. Погрешность определения линии положения связана с погрешностью измерения навигационной величины коэффициентом K , равным (дальномерный вариант):
 а – $K=1$. б – $K=R$. в – $K=1/R$. г – $K=1/2$.
17. Погрешность определения линии положения связана с погрешностью измерения навигационной величины коэффициентом K , равным (угломерный вариант):
 а – $K=1$. б – $K=R$. в – $K=1/R$. г – $K=1/2$.
18. Погрешность определения места методом позиционных линий не определяется:
 а – погрешностью определения линий положения,
 б – углом пересечения линий положения,
 в – числом линий положения,
 г – погрешностью задания начальных координат движения.
19. Погрешность определения места методом счисления пути не определяется:
 а – погрешностью измерения навигационной величины,
 б – временем движения,
 в – погрешностью задания координат опорных точек,
 г – погрешностью задания начальных координат.
20. В какой системе координат не принято решать основную задачу навигации самолетов?
 А. Географической. Б. Геоцентрической инерциальной.
 В. Геоцентрической связанной. Г. Ортодромической.
21. Дальность действия навигационной системы не зависит от:
 а – энергетических параметров аппаратуры,
 б – погрешности определения места,
 в – характеристик надежности аппаратуры,
 г – погрешности определения линий положения.
22. Рабочая область радионавигационной системы определяется по основному критерию:
 а – энергетические параметры аппаратуры,
 б – погрешность определения места,
 в – характеристика надежности,
 г – погрешность определения линий положения.
23. Корреляция погрешностей измерения линий положения влияет на погрешность места следующим образом:
 а – увеличивает, б – не влияет,

б – уменьшает,

г – вопрос не имеет смысла.

24. Интегрированию в методе счисления пути подлежит (без внесения поправок):

а – воздушная скорость,

б – путевая скорость,

в – угловая скорость,

г – радиальная скорость.

Контрольная №3. Тема «Радионавигационные измерители».

1. Частотные РНУ позволяют измерять:

а – расстояние, угол, скорость, разность расстояний,

б – только расстояние, угол, разность расстояний,

в – только расстояние, угол, скорость,

г – только расстояние, скорость, разность расстояний,

д – только угол, скорость, разность расстояний.

2. Частотные дальномерные устройства используются в качестве:

а – высотомеров малых высот,

б – высотомеров больших высот,

в – высотомеров малых и больших высот.

3. Автономные частотные измерители скорости обрабатывают:

а – отраженный сигнал,

б – ретранслированный сигнал,

в – излученный сигнал.

4. Связь доплеровского сдвига частоты с путевой скоростью в автономных частотных измерителях скорости следующая (θ - угол наклона луча от горизонта):

$$а - f_d = \frac{2W}{\lambda} \sin \theta, \quad б - f_d = \frac{2W}{\lambda} \cos \theta,$$

$$в - f_d = 2Wf \sin \theta, \quad г - f_d = 2Wf \cos \theta.$$

5. Ошибка «Морского эффекта» в ДИСС возникает из-за наличия:

а – волнения морской поверхности.

б – большой проводимости морской воды,

в – зависимости коэффициента отражения от угла падения волны,

г – зависимости ослабления сигнала над морем от угла падения.

6. Частотные измерители скорости ДИСС работают в диапазоне волн:

а – (0,2–0,3) см, б – (2–3) см, в – (20–30) см, г – (200–300) см.

7. Однолучевые ДИСС имеют низкую точность измерения:

а – скорости, б – угла сноса, в – скорости и угла сноса.

8. Лучшие энергетические характеристики имеют ДИСС, работающие в режиме излучения:

- а – импульсное некогерентное,
- б – непрерывное немодулированное,
- в – частотно-модулированное непрерывное,
- г – импульсное когерентное.

9. В ДИСС наиболее часто используются следующий тип антенн:

- а – зеркальные, б – линзовые,
- в – волноводно-щелевые, г – спиральные.

10. Временные корреляционные устройства не позволяют измерять:

- а – расстояние и угол, б – расстояние и скорость,
- в – скорость и угол, г – скорость и ускорение.

11. Временные корреляционные измерители скорости имеют следующий алгоритм расчета скорости:

$$а - W = \frac{dc}{2t}, \quad б - W = \frac{d}{2t}, \quad в - W = \frac{dc}{4t}, \quad г - W = \frac{d}{4t}.$$

12. Различие спектров принимаемых сигналов корреляционного измерителя скорости и ДИСС состоит в следующем:

- а – спектры различные,
- б – спектры одинаковые полностью,
- в – спектры одинаковые, но имеют относительное смещение.

13. Амплитудные устройства позволяют измерять:

- а – расстояния и направления,
- б – расстояния и разности расстояний,
- в – направления и разности расстояний,
- г – сумму расстояний и направления.

14. Амплитудный способ измерения расстояния использует следующую зависимость:

$$а - E = \frac{kPW}{R}, \quad б - E = \frac{k\sqrt{PW}}{R}, \quad в - E = \frac{kPW}{\sqrt{R}}, \quad г - E = \frac{kPW}{R^2}.$$

15. Устройством, определяющим принцип задания направления, является:

- а – антенна, б – приемник, в – детектор, г – индикатор.

16. Разнесенные антенны для амплитудных РНУ не имеют следующего свойства:

- а – направленное излучение,

- б – прием кроссполяризованной компоненты поля,
- в – диапазонность,
- г – неизменность формы диаграммы во времени.

17. Рамочные антенны для амплитудных РНУ не имеют следующего свойства:

- а – направленное излучение,
- б – прием кроссполяризованной компоненты поля,
- в – диапазонность,
- г – неизменность формы диаграммы во времени.

18. Разнесенные антенны амплитудных РНУ имеют многолепестковую структуру излучения при следующих условиях:

- а – $\varphi_n = 0, \frac{d}{\lambda} \leq \frac{1}{2}$, б – $\varphi_n = 180, \frac{d}{\lambda} \leq \frac{1}{2}$, в – $\varphi_n = 180, \frac{d}{\lambda} \geq \frac{1}{2}$, г – $\varphi_n = 0, \frac{d}{\lambda} = \frac{1}{2}$.
 (φ_n – дополнительная разность фаз сигналов, вводимая при их сложении).

19. Управление положением диаграммы направленности антенны путем перераспределения уровня сигнала производится при помощи следующего элемента:

- а – фазовращателя, б – гониометра, в – аттенюатора, г – коммутатора.

20. Радиопеленгаторы предназначены для работы по маякам типа:

- а – маркерный, а – курсовой, а – приводной, г – пеленговый.

21. Курсовые радиомаяки только СВЧ-диапазона реализуют следующий принцип:

- а – несущая частота, максимум излучения,
- б – несущая частота, минимум излучения,
- в – частота модуляции, равносигнальное направление,
- г – частота модуляции, минимум излучения.

22. Пеленговые радиомаяки требуют для определения угла на борту следующее устройство:

- а – радиопеленгатор, б – радиовысотомер,
- в – радиоприемник, г – радиодальномер.

23. Временные устройства не позволяют измерять:

- а – расстояния и углы,
- б – расстояния и разности расстояний,
- в – скорость и сумму расстояний,
- г – скорость и ускорение.

24. Запросные временные дальномеры для работы на очень малых расстояниях используют следующий способ:

- а – применение коротких импульсов,
- б – задержку сигнала в ответчике,
- в – применение различных несущих частот,
- г – временное стробирование приемника.

25. В беззапросных временных дальномерах для измерения временных интервалов не применяется:

- а – сигнал системы единого времени,
- б – канал синхронизации,
- в – эталоны времени.

26. В ответчике временного импульсного дальмера стабилизация передатчика по мощности производится:

- а – схемой АРУ по шуму,
- б – схемой запираания приемника после каждого импульса,
- в – схемой запуска передатчика шумами.

27. В разностно-дальномерных временных устройствах для устранения двузначности линий положения в пределах полуплоскости используется:

- а – временная задержка одного из импульсов,
- б – кодирование сигналов разных передатчиков,
- в – излучение на разных частотах,
- г – излучение с различной частотой повторения.

28. Какой из методов фиксации временного положения импульсов во временных устройствах не используется:

- а – с постоянным порогом по переднему фронту,
- б – с плавающим порогом по заднему фронту,
- в – с двойным дифференцированием импульса,
- г – с плавающим порогом по заднему фронту.

29. Автоматические измерители временных интервалов между импульсами используют следующий метод:

- а – непосредственного измерения,
- б – косвенного измерения,
- в – компенсационного измерения,
- г – корреляционного измерения.

30. Автоматические измерители временных интервалов, работающие в режиме поиска, для исключения сопровождения чужих ответных импульсов используют:

- а – разделение ответных импульсов по несущей частоте,
- б – разделение сигналов по кодовым группам,
- в – десинхронизацию импульсов разных запросчиков.

31. Фазовые устройства не позволяют измерять:

- | | |
|-----------------|--------------------------|
| а – расстояние, | б – разность расстояний, |
| в – скорость, | г – угол. |

32. Разделение сигналов запроса и ответа в фазовых радиодальномерах производится путем:

- а – разнесения несущих частот,
- б – временного стробирования,
- в – кодирования сигналов,
- г – разнесения частот модуляции.

33. Дробно-кратное преобразование частоты в некоторых фазовых устройствах необходимо для:

- а – упрощения аппаратуры,
- б – устранения взаимного влияния каналов,
- в – устранения неоднозначности измерений.

34. В фазовых устройствах, работающих на частоте модуляции, отношение между несущими частотами каналов запроса и ответа не может быть:

- | | |
|---------------------|---------------------|
| а – кратным, | в – равным 1, |
| б – дробно-кратным, | г – любым, кроме 1. |

35. Устранение неоднозначности измерения параметра в фазовых РНУ производится способами, кроме:

- а – привязки к известной точке,
- б – изменения частоты при постоянном параметре,
- в – применения набора разных частот модуляции,
- г – изменения базы при постоянном параметре,
- д – применения кодировки.

36. Фазометры РНУ не строятся по схеме:

- а – с непосредственным измерением,
- б – с косвенным измерением,
- в – с компенсационным измерением,
- г – с корреляционным измерением.

37. Какие элементы схемы не используются при построении фазометров с компенсационным измерением:

- а – фазовращатель,
- б – линия задержки,
- в – индикатор нулевой фазы.

38. Какие элементы схемы не используются при построении фазометров с косвенным измерением:

- а – преобразователь разности фаз в напряжение,

- б – преобразователь разности фаз в число интервалов,
- в – корреляционный детектор,
- г – схема сумма-разность,
- д – коммутатор фазы.