

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УЧЕБНИК

Под редакцией Ю.М.КАЗАРИНОВА

Допущено

*Министерством образования и науки Российской Федерации
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки «Радиотехника»*



Москва
Издательский центр «Академия»
2008

УДК 621.396.6(075.8)

ББК 32я73

P15

Авторы:

Ю. М. Казаринов — введение, гл. 1, 3, 5 (кроме подразд. 5.4), гл. 6 (кроме подразд. 6.8), гл. 7, 8; *Ю. А. Коломенский* — подразд. 5.4, 10.1, 10.2, 10.4, гл. 11 (кроме подразд. 11.6); *В. М. Кутузов* — подразд. 6.8, гл. 12, 14, 15; *В. В. Леонтьев* — гл. 2; *А. С. Маругин* — гл. 4; *В. К. Орлов* — подразд. 10.3, 10.5, 10.6, 10.7, 11.6; *Б. П. Подкопаев* — гл. 13; *Ю. Д. Ульяницкий* — гл. 4, 9, подразд. 11.6, гл. 12, 15

Рецензенты:

зав. кафедрой «Радиосистемы» Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого, проф., д-р техн. наук *Л. А. Рассветалов*;
зав. кафедрой «Радиотехнические приборы» МЭИ (ТУ), проф., д-р техн. наук *А. И. Баскаков*

Радиотехнические системы : учебник для студ. высш. учеб. заведений / [Ю. М. Казаринов и др.] ; под ред. Ю. М. Казаринова. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — 592 с. ISBN 978-5-7695-3767-7

Изложены физические основы, теория и принципы построения радиолокационных радионавигационных систем, рассмотрены вопросы обнаружения и различения сигналов, оценки и фильтрации их неизвестных параметров, проанализированы методы местоопределения объектов на поверхности и в пространстве. Содержатся конкретные примеры построения и расчета радиолокационных и радионавигационных систем.

Для студентов высших учебных заведений.

УДК 621.396.6(075.8)

ББК 32я73

Оригинал-макет данного издания является собственностью Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом без согласия правообладателя запрещается

© Казаринов Ю.М., Коломенский Ю.А., Кутузов В.М., Леонтьев В.В., Маругин А.С., Орлов В.К., Подкопаев Б.П., Ульяницкий Ю.Д., 2008

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2008

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2008

ISBN 978-5-7695-3767-7

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- А — антенна
- АДРМ — азимутально-дальномерный радиомаяк
- АКФ — автокорреляционная функция
- АМ — амплитудная модуляция
- АП — антенный переключатель
- АПВ — автоматическая подстройка времени
- АПЧ — автоматическая подстройка частоты
- АРМ — азимутальный радиомаяк
- АРУ — автоматическая регулировка усиления
- АЦП — аналого-цифровой преобразователь
- АЧХ — амплитудно-частотная характеристика
- БАРУ — быстродействующая автоматическая регулировка усиления
- БПФ — быстрое преобразование Фурье
- БСПС — бортовые системы предупреждения столкновений
- ВАРУ — выносная автоматическая регулировка усиления
- ВИКО — выносной индикатор кругового обзора
- ВОРЛ — вторичный обзорный радиолокатор
- ВПП — взлетно-посадочная полоса
- ВС — воздушное судно
- ВТО — высокоточное оружие
- ВУ — видеоусилитель
- ГВЧ — генератор высокой частоты
- ГЛОНАСС — глобальная навигационная спутниковая система
- ГРМ — глассадный радиомаяк
- ГУН — генератор, управляемый напряжением
- ДИСС — доплеровский измеритель скорости и угла сноса
- ДНА — диаграмма направленности антенны
- ДПФ — дискретное преобразование Фурье
- ДРМ — дальномерный радиомаяк
- ДЦ — движущаяся цель
- ЗИП — запасное имущество и принадлежности
- ЗУР — зенитные управляемые ракеты
- ИКО — индикатор кругового обзора
- ИСЗ — искусственный спутник Земли
- ИФРНС — импульсно-фазовая радионавигационная система
- КА — канал азимута
- КД — канал дальности
- ККС — контрольно-корректирующая станция

- КНД — коэффициент направленного действия
- КО — круговой обзор
- КРМ — курсовой радиомаяк
- КРП — контррадиопротиводействие
- ЛА — летательный аппарат
- ЛГ — линия глассады
- ЛК — линия курса
- ЛП — линия положения
- МАП — максимум апостериорной плотности вероятности
- МКРР — международная комиссия распределения радиочастот
- МП — максимум правдоподобия
- МРМ — маркерный радиомаяк
- МСН — межсамолетная навигация
- МПРЛС — многопозиционные радиолокационные системы
- НБШ — нормальный белый шум
- ОГ — опорный генератор
- ОЗУ — оперативное запоминающее устройство
- ОЛС — оптическая локационная система
- ОМП — оценка максимального правдоподобия
- ОпС — оптическая система
- ОП — отношение правдоподобия
- ОрГ — орбитальная группировка
- ОФК — обобщенная функция корреляции
- ПВ — плотность вероятности
- ПВО — противовоздушная оборона
- ПВФ — пространственно-временной фильтр
- ПЗС — приборы с зарядовой связью
- ПЗУ — постоянное запоминающее устройство
- ПИ — приемоиндикатор
- ПОИ — пункт обработки информации
- ПРО — противоракетная оборона
- РЛ — радиолокация
- РЛС — радиолокационная станция
- РЛИ — радиолокационная информация
- РМ — радиомаяк
- РН — радионавигация
- РНП — радионавигационный параметр
- РНС — радионавигационная система
- РНТ — радионавигационная точка
- РП — радиопеленгатор
- РПД — радиопротиводействие
- РСБН — радиосистема ближней навигации
- РТС — радиотехническая система
- РЭБ — радиоэлектронная борьба
- РЭС — радиоэлектронные средства
- САУ — система автоматического управления
- СВРЛ — система вторичной радиолокации
- СД — синхронный детектор; средства диагностирования

- СДЦ — селекция движущихся целей
- СК — система координат
- СКО — среднеквадратическое отклонение
- СМ — смеситель
- СП — системы посадки
- СПМ — спектральная плотность мощности
- СРНС — спутниковая радионавигационная система
- СФ — согласованный фильтр
- СШП — сверхширокополосный
- ТТХ — тактико-технические характеристики
- УВД — управление воздушным движением
- УВЧ — усилитель высокой частоты
- УМ — усилитель мощности
- УПОИ — устройство первичной обработки информации
- УПЧ — усилитель промежуточной частоты
- ФАПЧ — фазовая автоподстройка частоты
- ФАР — фазированная антенная решетка
- ФВ — фазовращатель
- ФВН — функция взаимной неопределенности
- ФД — фазовый детектор; функциональное дополнение
- ФМ — фазовая манипуляция
- ФН — функция неопределенности
- ФНЧ — фильтр нижних частот
- ФРНС — фазовая радионавигационная система
- ФЦР — фазовый центр рассеяния
- ФЧХ — фазово-частотная характеристика
- ХИП — хаотическая импульсная помеха
- ЧМ — частотная модуляция
- ЧПК — череспериодный компенсатор
- ЭЛТ — электронно-лучевая трубка
- ЭМС — электромагнитная совместимость
- ЭПР — эффективная площадь рассеяния
- ADT — автоматическое обнаружение и сопровождение (Automatic Detection and Tracking)
- AWACS — система раннего обнаружения и управления (Airborne Warning And Control System)
- DME — оборудование для измерения дальности (Distance Measurement Equipment)
- GPS — глобальная система позиционирования (Global Position System)
- ICAO — Международная организация гражданской авиации (International Civil Aviation Organization)
- ILS — система инструментальной посадки (Instrument Landing System)
- LORAN — система дальней навигации (Long Range Navigation System)
- MLS — микроволновая система посадки (Microwave Landing System)
- Navstar — навигационные спутники измерения времени и дальности (Navigational Satellit of Time and Ranging)

- Radar — 1. радиолокация; 2. радиолокатор, радиолокационная станция, РЛС (Radio detection and ranging)
- SAR — РЛС с синтезированием апертуры (Synthetic Aperture Radar)
- TACAN — навигационная система для тактической авиации (Tactical Air Navigation System)
- TCAS — система предупреждения столкновений (Traffic Collision Avoidance System)
- VOR — всенаправленный радиомаяк УКВ диапазона (VHF Omnidirectional Radio Range)

ВВЕДЕНИЕ

Радиотехнические системы (РТС) относятся к классу информационно-управляющих технических систем, осуществляющих извлечение, передачу или разрушение информации с помощью радиоволн. Отличительный признак РТС — наличие радиоканала, состоящего из источника радиоволн, являющихся носителем информации, среды распространения радиоволн и приемника, извлекающего информацию путем соответствующей обработки радиоволн, достигающих антенны РТС. Радиоволны, несущие ту или иную информацию, называются *радиосигналом*.

Таким образом, характерным признаком радиосистемы является использование радиосигнала в качестве носителя информации. Назначение информации — один из признаков классификации радиосистем. По этому признаку радиосистемы подразделяются на системы передачи, извлечения и разрушения информации, а также системы радиуправления. В свою очередь, каждая из этих групп имеет свои разновидности, отличающиеся функциональным назначением радиосистем. Так, среди систем передачи информации различают системы радиосвязи, телеметрии или передачи команд, радиовещания и телевидения.

К системам извлечения информации относятся радиолокационные и радионавигационные системы, системы радиоастрономии, радионаблюдения поверхности Земли или других планет, радиоразведки радиотехнических средств противника.

Системы разрушения информации (радиопротиводействия) служат для создания условий, затрудняющих или делающих невозможной работу радиосредств противника.

Системы радиуправления используются для управления работой различных объектов (чаще всего движущихся) с помощью радиосигналов.

По виду применяемых сигналов различают непрерывные, импульсные и цифровые радиосистемы. В *непрерывных системах* информация отображается изменением параметров (амплитуды, частоты, фазы) непрерывного, обычно гармонического сигнала. В *импульсных системах* сигнал представляет собой последовательность радиоимпульсов, в которой информацию могут нести изменяющиеся параметры как отдельных импульсов (амплитуда, частота, фаза, длительность), так и всей последовательности (число

импульсов в последовательности, интервал между ними). В *цифровых системах* передаваемый сигнал предварительно квантуется по времени и уровню. Каждому уровню соответствует кодовая группа импульсов, которая и модулирует несущие колебания.

Для создания радиосистем различного назначения используется практически весь диапазон радиоволн: от миллиметровых ($\lambda = 1 \dots 10$ мм) до дециметровых ($\lambda = 10 \dots 100$ км). Лазерные системы, тесно примыкающие по принципу действия к радиотехническим, работают в инфракрасном и оптическом диапазонах электромагнитных волн. Следует отметить, что использование того или иного диапазона радиоволн так же, как и ширина спектра частот, отводимого радиосистеме того или иного типа, регламентируется международной комиссией распределения радиочастот (МКРР). Эти ограничения влияют на выбор вида радиосигнала и построение радиосистемы и, в конечном счете, сказываются на ее тактико-технических характеристиках (ТТХ).

При создании системы стремятся получить наилучшие характеристики для определенных условий ее работы. Для сравнения вариантов построения проектируемой системы и выбора наилучшего (оптимального) варианта необходимо обоснованно выбрать показатель качества системы (критерий оптимизации). Поскольку требования к системе многочисленны и часто противоречивы, желательно оптимизировать систему по какому-то обобщенному критерию, учитывающему основные требования к ней. В качестве такого обобщенного критерия может применяться *эффективность системы*, под которой чаще всего имеют в виду количественную характеристику качества выполнения системой заданных функций, отнесенную к затратам (энергетическим, информационным и экономическим).

Однако на практике оценку качества работы системы обычно производят по ее основным ТТХ (зоне действия, точности и достоверности, разрешающей способности, пропускной способности, быстродействию, помехозащищенности, надежности).

Основные параметры РТС имеют вероятностный (статистический) характер, что предопределяет необходимость статистического подхода к анализу и синтезу РТС. Деятельность разработчиков радиотехнических систем и комплексов немыслима без применения методов статистической радиотехники, многие разделы которой непосредственно связаны с развитием радиолокационной и радионавигационной техники. Статистическая теория радиосистем позволяет оценить предельные значения основных параметров радиосистем и найти оптимальные технические решения для приближения к этим значениям.

Радиоволны, являющиеся носителем информации в РТС, представляют собой электромагнитные поля. Поскольку поле математически описывается скалярной (напряженность) или векторной

(при учете поляризационных эффектов) функцией времени и пространственных координат, радиосигнал является пространственно-временным.

Помехи, которые обычно имеют место при работе РТС, есть не что иное, как некоторое вредное поле, взаимодействующее с сигнальным. При таком взаимодействии образуется результирующее поле, которое и воспринимается приемной антенной РТС. В силу своей непредсказуемости помеха разрушает однозначную связь поля в месте приема с переносимым сообщением, и задачей статистической теории является ответ на вопрос, как наилучшим способом использовать пространственные и временные свойства сигналов и помех для эффективного функционирования радиосистем различного назначения.

В большинстве практических случаев сигнал можно рассматривать как функцию времени, на которую тем или иным способом наложено передаваемое сообщение. На приемной стороне (наблюдатель) сигнал доступен лишь в смеси с помехой, и задачей наблюдателя является извлечение с наибольшей достоверностью полезной информации, содержащейся в сигнале. Под извлечением информации понимают процедуры обнаружения сигналов и оценки их параметров, которые, в конечном счете, сводятся к различению сигналов, т. е. к установлению, какой из возможных сигналов присутствует в принимаемых колебаниях или отсутствует вообще.

В ряде случаев (пассивная локация, радиоастрономия, радио-разведка) отправитель сообщения независим от создателя или пользователя радиосистемы и задача сводится к выбору оптимального метода приема и обработки сигнала (извлечения информации). В других случаях (полуактивная локация, передача информации, радионавигация, радиоуправление) отправитель информации в той или иной степени подчинен разработчику системы. При этом, придерживаясь так называемого системного подхода, наряду с оптимальным приемом предусматривается рациональный выбор как самих сигналов, так и способов их кодирования.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

1.1. Основные понятия и определения

Радиолокацией (РЛ) называется область науки и техники, объединяющая методы и технические средства обнаружения, измерения координат и параметров движения, а также определения некоторых характеристик различных объектов (радиолокационных целей), основанные на использовании радиоволн, излучаемых, ретранслируемых или отражаемых (рассеиваемых) этими объектами. Процесс обнаружения объектов, измерение их координат и параметров движения называется *радиолокационным наблюдением* (иногда радиолокацией цели), а используемые для этого системы — *радиолокационными станциями* (РЛС), или *радиолокаторами*. В иностранной литературе для радиолокации и РЛС принято название Radar (Radio detection and ranging), отражающее основные функции радиолокационной системы.

Радионавигация — область науки и техники, охватывающая радиотехнические методы и средства вождения кораблей, летательных и космических аппаратов, а также других движущихся объектов.

Таким образом, радиолокация и радионавигация тесно связаны общностью решаемой ими задачи: определение координат объектов.

Радиоуправление — область техники, включающая в себя радиотехнические методы и средства управления объектами, в частности их движением. Совокупность технических средств для такого управления называется *системой радиоуправления*. В радиоуправлении могут быть использованы как радиолокационные, так и радионавигационные системы (РНС).

В зависимости от природы возникновения электромагнитных волн, достигающих антенны РЛС и доставляющих информацию об объектах радиолокационного наблюдения, различают активную, полуактивную, активную с активным ответом и пассивную радиолокацию.

При *активной радиолокации* сигнал, принимаемый приемником РЛС, создается в результате отражения (рассеяния) объек-

том электромагнитных колебаний, излучаемых антенной РЛС и облучающих объект.

Сигнал, излучаемый антенной РЛС, называется *прямым*, или *зондирующим*, а принимаемый приемной антенной РЛС, — *отраженным* (рассеянным), или *радиолокационным*. Таким образом, при активной радиолокации применяется передатчик, генерирующий зондирующий сигнал, и информацию об объекте извлекают при обработке отраженного (рассеянного) объектом сигнала.

При *полуактивной радиолокации* носителем информации также является сигнал, отраженный объектом, но источник облучающих объект радиоволн вынесен относительно приемника РЛС и может действовать независимо от него. Например, передающее устройство, создающее сигнал, облучающий цель, может быть расположено на земле или корабле, а приемник, использующий отраженный сигнал, — на ракете, направленной на объект (цель). Такая радиолокация в ряде источников называется радиолокацией «с подсветом» и используется, например, в случае, когда требуется обеспечить скрытность получателя информации о цели.

Возможность обнаружения и измерения параметров объектов, не являющихся источниками радиоизлучения, является достоинством активного и полуактивного методов радиолокации.

При *активной радиолокации с активным ответом* (часто называемой вторичной радиолокацией, в отличие от активной, называемой первичной) применяют сигнал, ретранслируемый (перезлучаемый) специальным приемопередатчиком — *ответчиком*, установленным на объекте. Приемник ответчика принимает сигнал, излучаемый РЛС, который вызывает формирование и излучение ответного сигнала. Ответный сигнал может иметь мощность значительно большую, чем отраженный, поэтому применение активного ответа позволяет существенно повысить дальность действия и помехозащищенность такой системы.

Кроме того, ответный сигнал может быть использован для передачи дополнительной информации с объекта (например, бортовой номер самолета, высота объекта и др.). С помощью ответчика решается и задача опознавания объекта, например отличия «своих» самолетов от «чужих» (устройства опознавания «свой — чужой»). Принцип активного ответа широко применяется в радионавигации и радиоуправлении, например в радиосистемах ближней навигации (РСБН) и системах управления воздушным движением (УВД).

В *пассивной радиолокации* сигналом, принимаемым приемником РЛС, является собственное излучение объекта в радиодиапазоне. Это может быть излучение передающих устройств различных РТС, излучение гетеродинов приемников, паразитное излучение радиоэлектронных приборов, которые размещены на объекте. К естественному излучению объектов относится и тепловое излучение

в инфракрасном диапазоне. Пассивная радиолокация, использующая для обнаружения объектов их тепловое излучение, называется *радиотеплолокацией*. Таким образом, в этом случае, так же как и в активной радиолокации, для обнаружения объектов и определения их координат применяют радиосигнал. Однако природа этого сигнала другая: зондирование (облучение) объекта отсутствует, поэтому одна пассивная РЛС может определить направление на объект — *пеленг*, т. е. осуществить *радиопеленгование* последнего. При наличии двух и более пассивных РЛС, разнесенных в пространстве на известное расстояние, может быть решена задача определения координат объекта. В настоящее время в пассивной радиолокации разработаны специальные методы определения дальности по сферичности фронта принимаемой радиоволны, которые дают «грубую» оценку дистанции до излучающего объекта. Пассивная радиолокация тесно связана с *радиопеленгацией* — отраслью радионавигации, основанной на определении направления на объекты, имеющие источники излучения.

Таким образом, основой радиолокационного обнаружения, определения координат, скорости и некоторых других характеристик (размеров, формы, физических свойств) объектов является радиосигнал, отраженный, переизлученный или излученный объектом наблюдения. В активной радиолокации электромагнитные колебания зондирующего сигнала становятся носителем информации об объекте, т. е. радиолокационным сигналом, только после их отражения (рассеяния) объектом наблюдения. Однако от вида и параметров зондирующего сигнала (энергии, несущей частоты, длительности и ширины спектра) зависят основные характеристики РЛС: дальность действия, точность измерения координат и скорости объектов, разрешающая способность, т. е. тот объем информации, который может быть получен при обработке радиолокационного сигнала.

В общем случае напряжение модулированного сигнала можно записать в комплексной форме:

$$s(t) = S(t) \cos[2\pi f_0 t + \gamma(t) + \phi] = \operatorname{Re} \dot{S}(t) \exp[j(2\pi f_0 t + \phi)], \quad (1.1)$$

где $S(t)$ и $\gamma(t)$ — функции амплитудной и угловой модуляции соответственно; $\dot{S}(t)$ — комплексная огибающая сигнала, $\dot{S}(t) = S(t) \exp(j\gamma(t))$; f_0 — центральная (несущая) частота; ϕ — начальная фаза.

Под зондирующим обычно понимается сигнал, излучаемый антенной РЛС, поэтому его модуляция оказывается связанной также с параметрами антенной системы и ее движением. Так, при повороте диаграммы направленности антенны (ДНА) относительно направления на объект амплитуда отраженного или принятого объектом сигнала изменяется, т. е. появляется дополнительная амплитудная модуляция, параметры которой зависят от ширины и формы ДНА, а также скорости ее поворота.

Если отражающий объект попадет в зону облучения РЛС (в пределы ширины ДНА), то создается отраженный сигнал, несущий информацию об объекте. Факт приема сигнала приемником РЛС свидетельствует об обнаружении объекта, а параметры принятого сигнала (амплитуда, фаза, частота, вид поляризации, время задержки относительно зондирующего сигнала, направление прихода к приемной антенне) позволяют определить координаты объекта и параметры его движения, а при наличии нескольких объектов в зоне наблюдения — разделить их (разрешить), т. е. выделить объект с требуемыми свойствами и т. д.

1.2. Радиотехнические методы определения координат и их производных

В общем случае мгновенное положение объекта в пространстве характеризуется тремя координатами x_i ($i = 1, 2, 3$) в той или иной системе координат (СК). Для характеристики движения объектов необходимы также производные координат $x_i^{(n)}$, число которых зависит от траектории движения объекта. На практике чаще всего используют производные не выше второго порядка, т. е. скорость объекта $v_i = x_i^{(1)}$ и ускорение $a_i = x_i^{(2)}$. При этом обычно имеют в виду координаты центра тяжести объекта, а при радиолокации — его центра отражения. Часто измеряют непосредственно лишь координаты, а их производные получают вычислительным путем. Возможно также непосредственно оценить составляющую относительной скорости объекта, перпендикулярную фронту приходящей к антенне волны, и радиальную составляющую путем измерения доплеровского смещения частоты сигнала, отраженного или излученного объектом. Интегрированием радиальной скорости можно получить соответствующее перемещение, а ее дифференцированием — радиальное ускорение.

При активной радиолокации с учетом распространения сигнала от РЛС до цели и обратно частота отраженного сигнала вследствие эффекта Доплера отличается от частоты излучаемого на значение

$$F_v = 2f_n v_r / c = 2v_r / \lambda_n,$$

где f_n — несущая частота зондирующего сигнала; v_r — радиальная составляющая относительной скорости объекта; c — скорость распространения радиоволн; λ_n — длина волны излучаемых колебаний.

Таким образом, радиальная составляющая скорости v_r может быть вычислена по формуле

$$v_r = \frac{\lambda_n F_v}{2} = \frac{c F_v}{2 f_n}, \tag{1.2}$$

если известна λ_n и измерено доплеровское смещение частоты F_v .

Следует отметить, что формула (1.2) применима лишь при значениях скорости v_r , много меньших скорости распространения радиоволн c , когда допустимо не учитывать релятивистский эффект.

При радиолокационном определении координат в основу положено свойство радиоволн распространяться в однородной среде прямолинейно и с постоянной скоростью.

Скорость распространения радиоволн зависит от электромагнитных свойств среды и составляет в свободном пространстве (вакууме) $c \approx 299\,792\,458$ м/с. Там, где это не вызывает существенных погрешностей, обычно применяют округленные значения $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с = $= 3 \cdot 10^5$ км/с.

Постоянство скорости и прямолинейность распространения радиоволн позволяют вычислить дальность D от РЛС до объекта по измеренному времени прохождения сигнала τ_D (времени задержки сигнала) от РЛС до объекта и обратно

$$\tau_D = 2D/c. \quad (1.3)$$

Свойство прямолинейности распространения радиоволн является основой радиотехнических методов определения координат по направлениям прихода сигнала. В радионавигации процесс определения направления на источник излучения называется радиопеленгованием. При этом используются направленные свойства антенных систем.

Радиотехнические методы позволяют также непосредственно найти разность дальностей до двух разнесенных передатчиков (радиомаяков) радионавигационной системы путем измерения разности времени приема их радиосигналов на объекте, определяющем свое местоположение.

В радионавигации наибольшее распространение получили *позиционные системы*, в которых местоположение объектов определяется относительно *радиомаяков* (станций) с известными координатами (позицией). Для таких систем вводят понятия радионавигационного параметра, поверхностей и линий положения.

Радионавигационным параметром (РНП) называется физическая величина, непосредственно измеряемая РНС (расстояние, разность или сумма расстояний, угол).

Под *поверхностью положения* понимают геометрическое место точек, имеющих одно и то же значение РНП.

Линия положения — это линия пересечения двух поверхностей положения. Местоположение объекта задается пересечением трех поверхностей положения или поверхности и линии положения.

Соответственно с видом непосредственно измеряемых координат различают три основных метода определения местоположения (местоопределения) объекта: угломерный, дальномерный и

разностно-дальномерный. Широко применяют также комбинированный угломерно-дальномерный метод.

Угломерный метод. Этот метод является самым старым, поскольку возможность определения направления прихода радиоволн была установлена А. С. Поповым еще в 1897 г. при проведении опытов по радиосвязи на Балтийском море. При этом используются направленные свойства антенн при передаче и приеме радиосигнала. Существует два варианта построения угломерных систем: радиопеленгаторный и радиомаячный. В *радиопеленгаторной системе* используется *радиопеленгатор* — приемник с направленной антенной, а источник сигнала (радиомаяк) имеет ненаправленное излучение. При расположении радиопеленгатора (РП) и радиомаяка (РМ) в одной плоскости, например на поверхности земли, направление на маяк характеризуется пеленгом α (рис. 1.1, а). Если пеленг отсчитывается от географического меридиана (направление север—юг), то он называется *истинным пеленгом*, или *азимутом*. Часто азимутом называется угол в горизонтальной плоскости, отсчитанный от любого направления, принятого за нулевое. Определение направления производят в месте расположения РП, и если последний находится на борту объекта, то местоопределение осуществляется непосредственно на объекте (рис. 1.1, в).

В *радиомаячной системе* (рис. 1.1, б) используются *радиомаяк* с направленной антенной и ненаправленный приемник. В этом случае в месте расположения приемника измеряют *обратный пеленг* α_0 относительно нулевого направления, проходящего через точку расположения радиомаяка.

Часто применяют маяк с вращающейся ДНА. В момент совпадения оси ДНА с нулевым (например, северным) направлением вторая ненаправленная антенна маяка излучает нулевой (северный) сигнал, который принимается приемником на объекте,

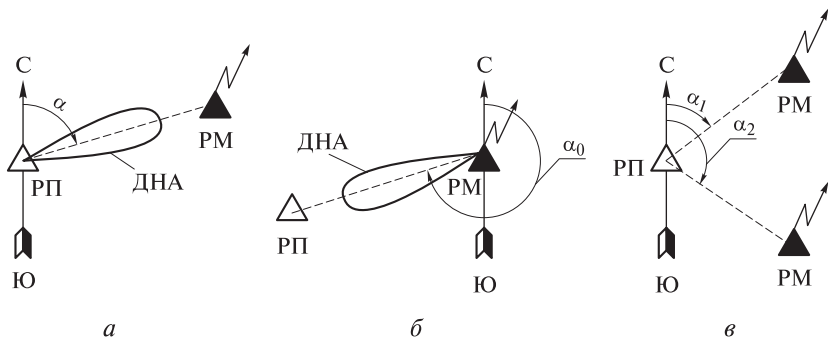


Рис. 1.1. Угломерный метод определения местоположения объекта:

а — радиопеленгаторный вариант; б — радиомаячный вариант; в — определение места по двум маякам

определяющем свое местоположение, и является началом отсчета углов. Фиксируя момент совпадения оси вращающейся ДНА маяка с направлением на приемник (например, по максимуму сигнала), можно определить обратный пеленг α_0 , который при равномерном вращении ДНА маяка пропорционален промежутку времени между приемом нулевого сигнала и сигнала в момент пеленга (максимума сигнала). В этом случае приемник упрощается, так как не требуется применять направленную антенну, что весьма важно во многих случаях.

Поверхностью положения угломерной РНС, измеряющей угол в горизонтальной плоскости (азимут), является вертикальная плоскость, проходящая через линию пеленга. При измерении углов в вертикальной плоскости, называемых в радиолокации *углами места цели* и отсчитываемых от горизонтальной плоскости (например, земной поверхности), проходящей через точку расположения антенны РЛС, поверхностью положения является коническая поверхность, образующей которой является линия пеленга.

При использовании наземных или морских РП и РМ линия положения называется *ортодромией*, являющейся дугой большого круга (сечения Земли, проходящего через ее центр), соединяющей точки расположения РП и РМ. Таким образом, ортодромия — это линия пересечения поверхности положения при измерении азимута с земной (морской) поверхностью. При расстояниях, малых по сравнению с радиусом Земли, ортодромия аппроксимируется отрезком прямой линии, соединяющей точки расположения РП и РМ. Для определения местоположения РП (см. рис. 1.1, в) необходим второй РМ. По двум пеленгам (азимутам) α_1 и α_2 можно найти местоположение РП как точку пересечения двух линий положения на земной поверхности (пересечение двух ортодромий). Если система расположена в пространстве, то для определения местоположения РП необходим третий РМ. При определении местоположения предполагают, что координаты радиомаяков известны.

В морской и воздушной навигации используется понятие *курса* — угла между продольной осью корабля (проекцией продольной оси самолета на поверхность земли) и направлением начала отсчета углов в горизонтальной плоскости, в качестве которого выбирают или меридиан (географический или магнитный), или линию ортодромии. Соответственно различают географический, магнитный и ортодромический курсы.

В воздушной навигации в качестве третьей координаты летательного аппарата (ЛА) используют барометрическую высоту полета H , отсчитываемую по барометрическому высотомеру относительно условного начального уровня (за который обычно принимают уровень Балтийского моря), и истинную высоту над поверхностью под ЛА, измеряемую радиовысотомером (РВ). При

применении радиовысотомера местоположение ЛА определяется комбинацией угломерного и дальномерного методов измерения координат.

Дальномерный метод. Этот метод основан на измерении расстояния D между точками излучения и приема радиосигнала по времени его распространения между этими точками. В радионавигации дальномерный метод используется в двух вариантах: запросном и беззапросном. В первом местоопределение осуществляется при измерении времени распространения сигнала запроса τ_3 от передатчика запросчика З (рис. 1.2, а) до приемника ответчика О и ответного сигнала τ_0 , формируемого ответчиком при приеме сигнала запросчика. Полагая $\tau_3 = \tau_0$ и пренебрегая временем формирования ответного сигнала, получим формулу измерения дальности D в таком радиодальномере:

$$D = \frac{c(\tau_3 + \tau_0)}{2} = c\tau_3 = c\tau_0. \quad (1.4)$$

В качестве ответного может быть использован и отраженный сигнал, что имеет место при измерении дальности активной РЛС или высоты радиовысотомером.

При беззапросном дальномерном методе, используемом, например, в спутниковых РНС, дальность вычисляется при измерении времени распространения сигнала, излучаемого передатчиком на искусственном спутнике Земли (ИСЗ), до приемника потребителя. При этом для точного измерения D необходимо обеспечить жесткую синхронизацию колебаний опорного генератора аппаратуры потребителя с сигналами аппаратуры ИСЗ.

Поверхностью положения дальномерной системы является поверхность сферы с радиусом, равным D . При расположении дальномерной системы на плоскости (например, на поверхности земли при расстояниях D , много меньших радиуса Земли R_3) образуются линии положения в виде окружностей, являющихся линиями пересечения сферы радиуса D с поверхностью, на которой расположены запросчик и ответчик дальномерной системы (поэтому дальномерные системы называются также *круговыми*). Местоположение объекта, на котором расположен запросчик З (рис. 1.2, б), определяется как точка пересечения двух окружностей с радиусами, равными дальностям D_1 и D_2 до ответ-

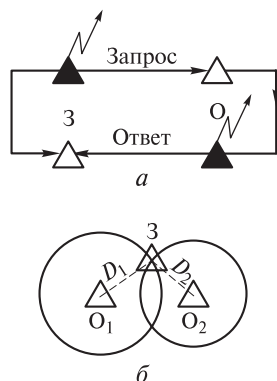


Рис. 1.2. Запросный дальномерный метод определения местоположения объекта:

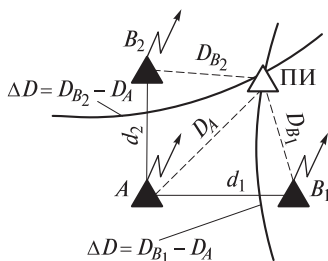
а — принцип работы; б — линии положения

чиков O_1 и O_2 с известными координатами. Имеющаяся при этом двузначность (две точки пересечения окружностей) устраняется применением дополнительных средств ориентирования, точность которых может быть невысокой, но достаточной для достоверного выбора одной из двух точек пересечения.

Поскольку измерение времени задержки сигнала, на котором основан дальномерный метод, может производиться с очень малыми погрешностями, дальномерные РНС позволяют найти координаты с высокой точностью. Радиодальномерные методы начали применяться позже угломерных. Первые радиодальномеры, основанные на фазовых измерениях временной задержки, были разработаны в СССР под руководством Л. И. Мандельштама, Н. Д. Папалекси и Е. Я. Щеголева в 1935—1937 гг. Импульсный метод измерения дальности был применен в импульсной РЛС, разработанной в 1936—1938 гг. под руководством Ю. Б. Кобзарева.

Разностно-дальномерный метод. С помощью приемоиндикатора (ПИ), расположенного на борту объекта, определяют разность времени приема сигналов двух опорных станций A и B . Станцию A разностно-дальномерной системы называют ведущей, так как ее сигналы используются для синхронизации ведомых станций. Измерение разности расстояний до ведущей и ведомой станций, пропорциональной временному сдвигу сигналов от станций A и B , позволяет найти лишь поверхность положения, соответствующую этой разности и имеющую форму гиперболоида с фокусами в точках расположения станций A и B . Если приемоиндикатор и станции A и B расположены на поверхности земли, то измерение разности $\Delta D = D_B - D_A$ позволяет получить линию положения на земной поверхности в виде гиперболы с $\Delta D = \text{const}$ (поэтому разностно-дальномерные РНС носят также название гиперболических). Для двух станций A и B можно построить семейство гипербол с фокусами в точках расположения станций A и B . Расстояние между ведущей и ведомой станциями называется *базой*. Для заданной базы семейство гипербол можно нанести на карту, заранее оцифровать и непосредственно использовать для местоопределения, что и делалось в первые годы применения РНС. Однако одна пара станций позволяет определить лишь линию положения, на которой расположен объект. Для определения его местоположения необходима вторая пара станций, база которой d_2 должна располагаться под углом к базе d_1 первой пары (рис. 1.3). Обычно ведущая станция A является общей и синхронизирует работу обеих ведомых станций B_1 и B_2 . Сетка линий положения такой системы образуется двумя семействами пересекающихся гипербол, позволяющих найти местоположение объекта непосредственно по карте, если на нее нанесены оцифрованные линии положения. Сейчас местоопределение осуществляется с помощью приемоиндикаторов, представляющих собой приемник, сопряженный с вычислитель-

Рис. 1.3. Разностно-дальномерный метод определения местоположения объекта



ным устройством и устройством отображения для непосредственного считывания координат объекта.

По точности разностно-дальномерный метод местоопределения несколько уступает дальномерному с запросным сигналом, но имеет бесспорное преимущество перед ним, обеспечивая неограниченную пропускную способность, поскольку наземные станции разностно-дальномерной системы могут обслуживать любое число приемоиндикаторов, принимающих сигналы станций, тогда как в дальномерной системе с запросом требуется конечное время для формирования ответного сигнала. Это и ограничивает пропускную способность дальномерной системы с запросным сигналом. Такое ограничение снимается при беззапросном варианте дальномерного метода, но его осуществление связано с очень жесткими требованиями к параметрам сигнала и устройствам его формирования и обработки.

Гиперболические линии положения разностно-дальномерных РНС при расстояниях от центра базы, значительно превышающих ее величину, аппроксимируются прямыми, исходящими из центра базы, в результате чего разностно-дальномерная система может быть использована как угломерная.

В зависимости от вида сигналов наземных станций и методов измерения временного сдвига сигналов, принимаемых приемоиндикатором, различают импульсные, фазовые и импульсно-фазовые разностно-дальномерные РНС.

Надо заметить, что с развитием спутниковых РНС (СРНС) применение РНС наземного базирования существенно сократилось. Однако некоторые системы, например сверхдлинноволновая РНС «Омега», в силу уникальной возможности приема сигналов станций этой системы на некоторой глубине будут использоваться, пока существует потребность местоопределения объектов под водой.

Комбинированный угломерно-дальномерный метод. Достоинством этого метода является возможность определять координаты объектов из одной точки, что и используется в РЛС, измеряющих наклонную дальность D , азимут α и угол места β (рис. 1.4). Угол места β отсчитывается от горизонтальной плоскости до направления на точку M расположения объекта. Азимут α отсчитывают от направления, принятого за нулевое (например, северного), до проекции наклонной дальности на горизонтальную плоскость. Путем

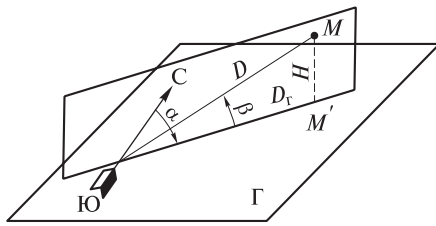


Рис. 1.4. Угломерно-дальномерный метод определения местоположения объекта

пересчета непосредственно измеряемых координат D , α и β в сферической системе координат можно вычислить высоту H и горизонтальную дальность $D_r = D \cos \beta$, а при необходимости перейти в другую СК (чаще всего прямоугольную). Определение местоположения объектов из одной точки и с помощью одной станции является большим преимуществом комбинированного метода, который кроме радиолокации широко используется также в радиосистемах ближней навигации.

Из рис. 1.4 видно, что точка M расположения объекта является точкой пересечения вертикальной плоскости, заданной азимутом α , конической поверхности, образующая которой составляет с горизонтальной плоскостью угол β (а с осью вращения — угол $(\pi/2 - \beta)$), и сферы с радиусом D и центром в точке расположения РЛС.

Рассмотренные методы определения местоположения относительно точек с известными координатами, называемых радионавигационными точками (РНТ), с помощью поверхностей и линий положения называются *позиционными*, как и РНС, в которых эти методы используются.

Кроме позиционных методов в навигации применяются методы *счисления пути* интегрированием скорости, измеренной доплеровским, корреляционным или воздушным измерителями, или ускорения, измеряемого инерциальным измерителем.

Применяются также *обзорно-сравнительные методы*, основанные на сравнении телевизионных, радиолокационных и других изображений местности с соответствующими картами.

Используются и *корреляционно-экстремальные методы* навигации, основанные на определении структуры какого-либо физического поля, характерного для данной местности (например, рельефа), и сравнении измеряемых параметров этого поля с соответствующими параметрами, хранящимися в памяти измерительного устройства такой системы. Преимуществами этих методов является автономность, малое влияние помех и отсутствие накапливающихся погрешностей определения местоположения, что свойственно инерциальным навигационным устройствам.

1.3. Классификация радиолокационных и радионавигационных систем. Тактические и технические характеристики

Радиолокационные станции. Радиолокационные станции (радиолокационные системы) принято классифицировать по следующим признакам:

- происхождение радиосигнала, принимаемого приемником РЛС — активные (с активным ответным или отраженным сигналом), полуактивные и пассивные;

- используемый диапазон радиоволн: декаметровый, метровый, дециметровый, сантиметровый и миллиметровый диапазоны;

- вид зондирующего (излучаемого) сигнала: непрерывный немодулированный или модулированный по частоте или фазе сигнал, импульсный (с большой и малой скважностью, когерентный и некогерентный, с внутриимпульсной частотной или фазовой модуляцией);

- число применяемых каналов излучения и приема сигналов — одноканальные и многоканальные с частотным или пространственным разделением каналов;

- число и вид измеряемых координат — одно-, двух- и трехкоординатные;

- способ измерения, отображения и съема координат объекта;

- место установки — наземные, корабельные, самолетные, спутниковые;

- функциональное назначение: от миниатюрных доплеровских измерителей скорости движения автомобилей до огромных наземных систем противовоздушной (ПВО) и противоракетной (ПРО) обороны.

Перечислим основные типы используемых РЛС и решаемые ими задачи.

Наземные РЛС:

- обнаружения воздушных целей и наведения на них истребителей;

- управления воздушным движением (обзорные и диспетчерские РЛС УВД);

- обнаружения и определения координат баллистических ракет и ИСЗ;

- целеуказания станциям управления зенитной артиллерией и зенитными управляемыми ракетами (ЗУР);

- управления зенитной артиллерией и ЗУР;

- определения координат ведущих стрельбу артиллерийских орудий и минометов;

- метеорологические и исследования окружающей среды;

- обзора акваторий порта;
- обзора летного поля аэропортов;
- обнаружения и измерения скорости наземных подвижных объектов;
- загоризонтного обнаружения декаметрового диапазона.

Корабельные РЛС:

- обеспечения безопасного кораблевождения;
- обнаружения надводных объектов и низколетящих ЛА и крылатых ракет, определения их координат;
- обнаружения и определения координат высоколетящих самолетов;
- управления ЗУР и зенитной артиллерией.

Самолетные РЛС:

- обнаружения самолетов и предотвращения столкновений;
- панорамные РЛС обзора земной поверхности;
- перехвата и прицеливания;
- наведения управляемых ракет;
- бокового обзора (в том числе с синтезированием апертуры);
- подповерхностного зондирования.

По существу радиолокационными системами являются и устанавливаемые на самолетах и других ЛА высотомеры и доплеровские измерители путевой скорости и угла сноса (ДИСС), использующие сигналы, отраженные от поверхности, над которой перемещается самолет.

Радиолокационные станции космического базирования размещаются на ИСЗ и других космических аппаратах. Особенности таких станций связаны с большой скоростью перемещения относительно земной поверхности и большим расстоянием от нее. Последнее обеспечивает большую дальность радиогоризонта и слабое влияние отражений по боковым лепесткам ДНА. При создании таких станций возникают специфические проблемы энергетического обеспечения и размещения аппаратуры, особенно антенных систем с узкой и управляемой ДНА. При размещении РЛС на средневысотных орбитах требуемая мощность источника питания РЛС иногда достигает 30 кВт, что требует создания мощных солнечных батарей.

Совершенствование элементной базы и широкое применение цифровой обработки позволяет непрерывно улучшать параметры РЛС, приближая их к потенциально возможным при заданных тактико-технических ограничениях. Осуществилось создание многофункциональных РЛС импульсно-доплеровского типа; РЛС с синтезированием апертуры инверсного типа; РЛС с трехмерным изображением окружающего пространства; РЛС с селекцией медленно движущихся объектов на фоне подстилающей поверхности. При этом все более широко в РЛС используются фазированные антенные решетки (ФАР), позволяющие оперативно изменять

форму и параметры ДНА, что открывает дополнительные функциональные возможности РЛС.

Перечисленные типы РЛС не исчерпывают всех областей их применения. По мере совершенствования РЛС эти области стремительно расширяются.

В последние годы нарастала интенсивность освоения миллиметрового диапазона радиоволн для решения различных радиолокационных задач. Примером может служить РЛС миллиметрового диапазона для измерения кинематических характеристик артиллерийского снаряда на начальном этапе полета. Радиолокационная станция работает в когерентном режиме с использованием метода Доплера в интерферометрическом (фазовом) варианте.

Широкое развитие получили методы радиолокационного наблюдения поверхности Земли и других планет с ИСЗ и других космических аппаратов. При этом используются широкополосные и сверхширокополосные сигналы (с полосой, превышающей 25 % несущей частоты), что вместе с синтезированием апертуры с автофокусировкой позволило довести разрешающую способность таких РЛС до долей метра.

Радионавигационные системы. Радионавигационные системы классифицируются по следующим признакам:

- способ определения местоположения объекта — позиционные (угломерные, дальномерные, разностно-дальномерные, комбинированные); использующие счисление пути интегрированием скорости и ускорения; основанные на обзорно-сравнительных методах местоопределения;
- вид несущей информацию и непосредственно измеряемого системой параметра радиосигнала — амплитудные, частотные, фазовые и импульсно-фазовые;
- диапазон используемых радиоволн: от декаметровых, применяемых в сверхдлинноволновых РНС, до оптических, используемых в лазерных системах местоопределения;
- дальность действия систем — космические, глобальные, дальней и ближней навигации;
- место расположения опорных станций — системы наземного и космического базирования.

Основные параметры системы составляют ее ТТХ. Перечень параметров зависит от назначения системы, но часть из них, относящихся к основным, в той или иной форме входят в ТТХ любых РНС и РЛС. Однако в зависимости от назначения радиосистемы смысловое содержание некоторых характеристик может изменяться, поэтому целесообразно дать определения основных параметров, составляющих тактико-техническую характеристику системы.

Тактические характеристики. *Тактическими* называются характеристики системы, определяющие ее функциональные возмож-

ности при практическом, в том числе и военном, применении (откуда и произошло название «тактические характеристики»).

К основным тактическим характеристикам РЛС и РНС относятся:

- зона (область) действия, или рабочая зона, системы, заданная сектором обзора (поиска) по измеряемым системой параметрам;
- время обзора (поиска) заданного сектора, или скорость обзора;
- определяемые параметры (координаты), их число и точность измерения;
- разрешающая способность по соответствующим координатам;
- пропускная способность;
- помехозащищенность;
- надежность функционирования.

Поскольку эти параметры широко используются для оценки качества функционирования различных систем, приведем их общие определения, которые в дальнейшем могут быть уточнены применительно к конкретным типам РЛС и РНС.

Зоной действия, или рабочей областью, системы называется часть пространства, в которой система надежно выполняет функции, соответствующие ее назначению. Для РЛС обнаружения зоной действия является область пространства, в которой объекты с определенными характеристиками отражения обнаруживаются с заданными вероятностями ошибок: ложной тревоги $p_{л.т}$ и пропуска сигнала $p_{п.с}$.

Для РЛС точного измерения координат и РНС границы рабочей зоны характеризуются допустимыми погрешностями местопределения объектов.

Почти всегда одним из параметров, определяющих рабочую зону, является дальность действия системы.

Под *дальностью действия* системы понимают максимальное расстояние, на котором обеспечивается получение основных показателей системы не хуже заданных. Чаще всего *максимальная дальность* действия системы зависит от допустимой погрешности при измерении координат и параметров движения объектов. Под дальностью действия РЛС обнаружения имеют в виду максимальную дальность, на которой отношение сигнала к шуму еще достаточно для его обнаружения с заданными качественными показателями.

Иногда зона действия ограничена и со стороны минимальных значений дальности. В этих случаях РТС характеризуется двумя параметрами: минимальной D_{\min} и максимальной D_{\max} дальностями действия.

Временем обзора (поиска) называется время, необходимое для однократного обзора заданной зоны действия системы при задан-

ном качестве. Это время связано с маневренностью наблюдаемых или управляемых объектов, объемом пространства обзора, уровнем сигнала и помех, а также рядом тактических и технических характеристик системы.

Точность системы характеризуется погрешностями измерения координат и параметров движения объекта. Причинами погрешностей являются несовершенство применяемого метода измерения и измерительной аппаратуры, влияние внешних условий и радиопомех, субъективные качества оператора, если процессы получения информации и ее реализации не автоматизированы. Требования к точности системы зависят от ее назначения. Неоправданное завышение требований к точности приводит к усложнению системы, удорожанию ее разработки, производства и эксплуатации, а иногда и снижению надежности функционирования.

Разрешающей способностью системы называется способность раздельного обнаружения, измерения параметров двух или нескольких близко расположенных в пространстве (или отличающихся по скорости) объектов, раздельного их отображения, а возможно и управления ими.

Различают разрешающую способность по дальности и угловым координатам, а также по соответствующим составляющим скорости. Разрешающую способность количественно принято оценивать минимальной разностью значений измеряемых параметров соседних объектов, при которой они воспринимаются системой раздельно, т.е. по каждому объекту принимается решение о его обнаружении и измерении параметров с показателями качества не хуже заданных. Для ряда типов РЛС разрешающая способность является основной характеристикой, определяющей качество системы.

В радионавигации обычно определяют собственные координаты объекта (единственного для измерителя) и понятие разрешающей способности часто связывают с возможностью разделения сигнала, несущего полезную информацию о координатах объекта с различными помехами (отражениями от ионосферы, местных предметов и т.п.), подобными по форме полезному сигналу, но достоверной информации об определяемых координатах не содержащими.

При обнаружении сигналов от полезных объектов на фоне таких сигналоподобных помех разрешающая способность системы становится важнейшей характеристикой.

Пропускная способность характеризуется числом объектов, обслуживаемых системой одновременно или в единицу времени. Пропускная способность зависит от принципа действия системы и ряда ее тактических и технических параметров, в частности рабочей зоны, точности и разрешающей способности. Радионавига-

ционные системы, в которых используется одна линия связи (разностно-дальномерная или угломерная радиомаячного типа), обладают неограниченной пропускной способностью, так как могут одновременно обслуживать любое число объектов.

Пропускная способность дальномерных систем, основанных на использовании двух линий связи запросного и ответного сигналов, как уже отмечалось, ограничена ответчиком, в котором для формирования ответного сигнала на каждый запрос необходимо некоторое время. В этом случае пропускную способность характеризуют вероятностью обслуживания заданного числа объектов при заданном периоде повторения запросов каждым из объектов, находящихся в рабочей зоне системы.

Эти определения используются для оценки пропускной способности радиолокационных и радионавигационных систем при их практическом применении, например при управлении воздушным движением. Однако любая РТС содержит один или несколько каналов связи и, следовательно, всегда существуют ограничения пропускной способности канала связи, определяемые его полосой пропускания и энергетическими характеристиками полезного сигнала и помехи.

Помехозащищенность РЛС и РНС — способность выполнения ими заданных функций при воздействии непреднамеренных и специально организованных помех. Помехозащищенность определяется скрытностью работы системы и ее помехоустойчивостью. Под *скрытностью* системы понимают показатель, характеризующий трудность обнаружения ее работы и определения параметров используемых сигналов, а следовательно, и создания при необходимости специально организованных (прицельных) помех. Скрытность обеспечивается применением остронаправленного и по возможности кратковременного излучения сигнала в каждом направлении, использованием шумоподобных широкополосных сигналов с низким уровнем мощности, изменением основных параметров сигнала во времени (законов модуляции и несущей частоты).

Количественной оценкой *помехоустойчивости* РЛС и РНС является отношение энергии сигнала к спектральной плотности мощности (СПМ) помехи на входе приемника в полосе частот, занимаемой сигналом, при котором погрешность измерения заданного параметра не превосходит допустимой с требуемой вероятностью. Для РЛС обнаружения при этом должно обеспечиваться обнаружение сигнала с заданной вероятностью правильного обнаружения $p_{п.о}$ при допустимых значениях вероятности ложной тревоги $p_{л.т}$. Требуемая помехоустойчивость достигается рациональным выбором параметров радиосигнала системы, характеристик ДНА и устройств приема и обработки сигнала.

Надежность — свойство системы и входящих в нее устройств сохранять во времени в установленных пределах значения пара-

метров, характеризующих способность выполнения требуемых функций в заданных режимах и условиях применения, хранения и транспортировки.

В зависимости от причин, вызывающих отказы в работе системы, различают следующие разновидности надежности:

- аппаратная, связанная с состоянием аппаратуры;
- программная, обусловленная состоянием программ вычислительных устройств, используемых в системе;
- функциональная, т. е. надежность выполнения отдельных функций, возлагаемых на систему, и, в частности, извлечения, передачи и обработки информации. В этом смысле помехозащищенность также может быть отнесена к функциональной надежности радиосистемы.

Экономические показатели системы, масса и габариты составляющих ее устройств являются важными параметрами, влияющими на совокупную оценку качества системы.

Технические характеристики. К основным *техническим характеристикам* радиосистемы относятся параметры, непосредственно определяющие ее тактические характеристики и возможности применения. Применительно к РЛС и РНС основными техническими характеристиками являются:

- метод обзора (поиска) и измерения координат и параметров движения объектов;
- рабочие частоты, их стабильность, мощность излучения, вид модуляции, ширина спектра излучаемых колебаний;
- форма и ширина ДНА, ее коэффициент направленности;
- чувствительность, динамический диапазон и полоса пропускания приемника;
- вид и параметры устройств отображения и съема информации;
- потребление энергии устройствами, входящими в систему, их масса и габаритные размеры.

В дальнейшем взаимосвязь тактических и технических характеристик будет обсуждаться для конкретных типов РЛС и РНС.

1.4. Структурная схема РЛС кругового обзора. Основные характеристики

Различают РЛС, построенные по *некогерентной* и *когерентной* схемам. В первом случае отдельные зондирующие импульсы некогерентны между собой, начальные фазы их несущих частот случайны, независимы между собой и равномерно распределены в интервале $[-\pi, \pi]$, что делает невозможным синфазное суммирование пачки импульсов на радиочастоте. Решение об обнаружении отраженного целью сигнала в таких РЛС принимается либо

на основе приема одиночного импульса, либо на основе приема пачки импульсов с суммированием после амплитудного детектирования. В когерентных РЛС фазовые соотношения между отдельными импульсами сохраняются неизменными на определенном интервале времени, что позволяет осуществлять их когерентное накопление в приемнике радиолокатора. Как известно, когерентное суммирование пачки импульсов обеспечивает больший выигрыш в отношении сигнал/шум, чем некогерентное. Кроме того, когерентные РЛС позволяют с высокой точностью измерять доплеровское смещение частоты отраженного движущейся целью сигнала и эффективно осуществлять селекцию движущихся целей (СДЦ) на фоне пассивных помех естественного и искусственного происхождения.

Рассмотрим принцип действия и взаимодействие элементов некогерентной РЛС кругового обзора, структурная схема которой представлена на рис. 1.5, *а*.

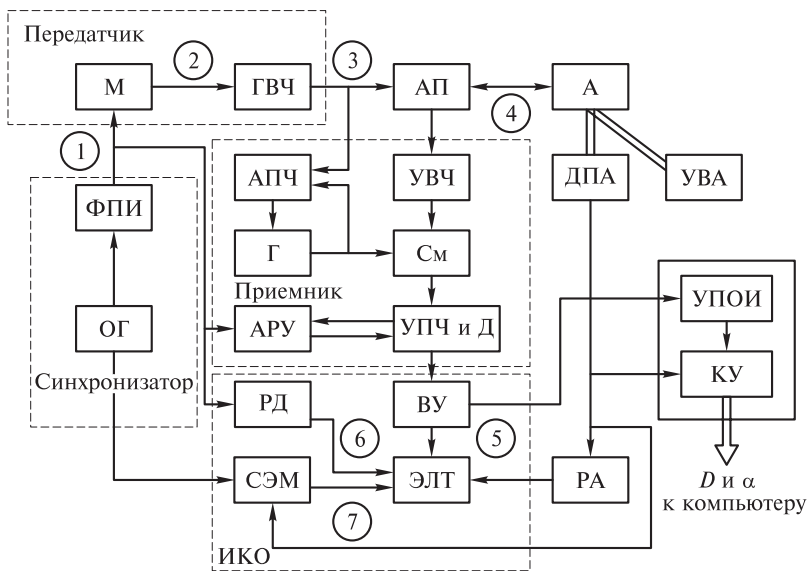
Такие станции позволяют обнаруживать цели, определять их дальность D и азимут α в процессе непрерывного обзора пространства вокруг станции, ограниченного максимальной дальностью РЛС D_{\max} и шириной ДНА по углу места β_A . Диаграмма направленности антенны вращается с постоянной скоростью, осуществляя за время одного оборота T_0 круговой обзор по азимуту. Принимаемые приемником РЛС сигналы, отраженные целями (Ц), с выхода приемника подаются на управляющий электрод электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) индикатора кругового обзора (ИКО), линия развертки которого вращается синхронно с вращением ДНА (рис. 1.5, *б*). Момент излучения зондирующего импульса антенной (А) определяет начало развертки дальности, а азимутальное положение линии развертки совпадает с положением оси ДНА. Отраженный от цели сигнал после преобразования, усиления и детектирования в приемнике РЛС модулирует электронный луч ЭЛТ по интенсивности (яркости), подсвечивая точку развертки, соответствующую временной задержке сигнала от цели, т. е. ее дальности.

Сигналы, отраженные от цели, поступают на вход приемника в течение времени поворота ДНА на угол, равный ее ширине α_A по азимуту. За это время будет принята пачка импульсов, число которых

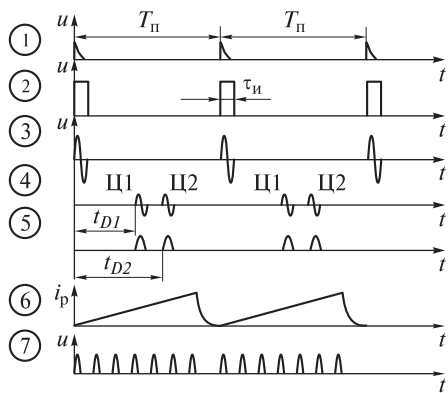
$$N_{\text{пач}} = \frac{\alpha_A T_0}{2\pi T_{\Pi}}$$

определяется шириной ДНА α_A , временем обзора T_0 и периодом повторения зондирующих импульсов T_{Π} . Каждый из сигнальных импульсов подсвечивает точку на соответствующей линии развертки.

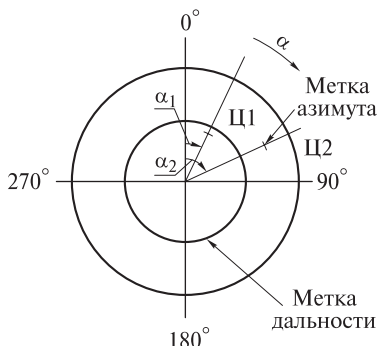
При приеме пачки импульсов $N_{\text{пач}}$ на экране ЭЛТ создается отметка цели в виде дужки с протяженностью по азимуту α_A , се-



а



б



в

Рис. 1.5. Структурная схема некогерентной РЛС кругового обзора (а), временные диаграммы (б) и отметки на экране ИКО (в):

- ① — импульсы синхронизатора; ② — импульсы модулятора; ③ — ВЧ импульсы; ④ — сигнал на входе приемника; ⑤ — видеосигнал; ⑥ — ток развертки i_p дальности; ⑦ — импульсы меток дальности

редина которой соответствует азимуту цели α , а ее расстояние от центра экрана (начала развертки) — дальности D (рис. 1.5, в). Таким образом, протяженность отметки на экране ИКО по азимуту определяется шириной ДНА α_A (если размеры цели малы сравнительно с линейной шириной ДНА ($\alpha_A D$) и цель можно считать точечной), а протяженность по дальности (вдоль линии развертки) — скоростью развертки и длительностью принимаемого сигнала. Протяженность отметки целей на экране ИКО непосредственно связана с разрешающей способностью по дальности, азимуту (угловой разрешающей способностью) и скоростью развертки. Увеличение скорости развертки ИКО позволяет улучшить разрешающую способность РЛС, но при этом сокращаются пределы измеряемой дальности (шкалы дальности) индикатора, поэтому в ИКО предусматривается несколько шкал дальности, что позволяет обеспечить измерение дальности в заданных пределах и повысить четкость изображения на экране ИКО переходом на более крупный масштаб. Для пояснения взаимодействия элементов структурной схемы РЛС воспользуемся временными диаграммой, представленной на рис. 1.5, б.

Устройством, обеспечивающим согласованную во времени работу (синхронизацию) всех элементов РЛС, является синхронизатор (см. рис. 1.5, а), состоящий из высокостабильного опорного генератора (ОГ), колебания которого заданной частоты и формы (обычно синусоидальной) используются для формирования пусковых импульсов (ФПИ). Эти импульсы имеют требуемую частоту повторения $F_{\text{п}}$ и используются для запуска модулятора (М) и схемы развертки дальности (РД).

Импульсы модулятора определяют длительность $\tau_{\text{и}}$ и частоту повторения $F_{\text{п}}$ высокочастотных импульсов, формируемых генератором высокой частоты (ГВЧ), которые через антенный переключатель (АП) поступают к излучателю антенной системы, формирующей требуемую диаграмму направленности. На время излучения импульса АП блокирует вход приемника, защищая его от воздействия мощных колебаний. По окончании излучения импульса через некоторое время $\tau_{\text{в}}$ чувствительность приемного устройства восстанавливается и РЛС переходит в режим приема отраженных сигналов. Таким образом, длительность зондирующего импульса $\tau_{\text{и}}$ и время восстановления чувствительности $\tau_{\text{в}}$ ограничивают минимальную дальность действия (мертвую зону) РЛС:

$$D_{\text{min}} \geq c(\tau_{\text{и}} + \tau_{\text{в}}) / 2.$$

Радиосигнал, принятый от цели, усиливается усилителем высокой частоты (УВЧ) приемника непосредственно на радиочастоте принимаемого сигнала f_c , которая при наличии радиальной скорости цели v_r отличается на величину доплеровского смещения

$$F_v = \pm f_{\text{и}} \frac{2v_r}{c}$$

от несущей частоты излучаемого импульса $f_{\text{и}}$. Знак плюс соответствует приближению цели, а минус — ее удалению. Основное усиление сигнала осуществляется усилителем промежуточной частоты (УПЧ) на частоте $f_{\text{п.ч}}$. Переход на $f_{\text{п.ч}}$ осуществляется с помощью преобразователя, состоящего из смесителя (См) и гетеродина (Г). Применение автоматической подстройки частоты (АПЧ) гетеродина обеспечивает равенство частоты сигнала после смесителя $f_{\text{п.ч}}$ частоте настройки УПЧ $f_{\text{п.ч0}}$. АПЧ необходима, поскольку обычно в РЛС кругового обзора в качестве ГВЧ используется магнетрон, обеспечивающий наиболее экономичный способ получения мощных высокочастотных колебаний в сантиметровом диапазоне радиоволн. Недостатком магнетронного генератора является недостаточная стабильность частоты генерируемых колебаний и их некогерентность от импульса к импульсу. Последнее и заставляет осуществлять подстройку частот гетеродина $f_{\text{Г}}$ под частоту колебаний $f_{\text{и}}$ при излучении каждого импульса.

Полоса пропускания УПЧ определяет обычно и полосу пропускания всего приемного устройства, которая должна быть согласована с шириной спектра сигнала. При простом импульсном сигнале ширина его спектра определяется длительностью и обычно принимается равной $\Delta f_{\text{и}} \approx 1/\tau_{\text{и}}$. Из статистической теории радиосистем известно, что при фиксированном отношении энергии сигнала к спектральной плотности мощности нормального белого шума ширина спектра сигнала определяет разрешающую способность и точность при измерении дальности. Улучшение этих характеристик связано также с расширением полосы пропускания приемного устройства (более подробно это рассмотрено в гл. 4).

После детектирования импульсных радиосигналов детектором (Д) выделяются их огибающие, называемые обычно видеоимпульсами. После усиления видеоусилителем (ВУ) эти импульсы подаются на управляющий электрод ЭЛТ (сетку или катод в зависимости от полярности импульсов), обеспечивая модуляцию электронного луча по интенсивности (яркости отметки на экране).

Радиально-круговая развертка, применяемая в ИКО, формируется с помощью схем развертки по дальности (РД) и по азимуту (РА). Чаще всего в ИКО используют ЭЛТ с электромагнитным отклонением, поэтому для линейного отклонения луча ЭЛТ по радиусу схемой РД создается линейно нарастающий ток во взаимно перпендикулярных отклоняющих катушках. Вращение ДНА достигается соответствующей модуляцией амплитуды этого тока с помощью схемы РА, управляемой от датчика положения диаграммы направленности антенны.

В РЛС кругового обзора чаще всего используются антенны рефлекторного типа, в которых для формирования ДНА используется рефлектор параболической формы. Зондирующий сигнал подается на излучатель, размещаемый в фокусе отражателя. Возможно получить вращающуюся ДНА и при неподвижной антенной системе, состоящей из трех ФАР с электронным управлением положением ДНА. Однако этот способ формирования вращающейся ДНА сложнее и поэтому применяется значительно реже.

Для измерения дальности на экране ИКО формируются метки дальности в виде светящихся колец, расстояние между которыми зависит от периода повторения импульсов, формируемых схемой электронных меток (СЭМ). Специальной схемой формируются и электронные метки азимута в виде импульсов, подсвечивающих более ярко линии развертки через заданные интервалы по азимуту (например, через 10°).

Видеосигналы с выхода приемника поступают на устройство первичной обработки информации (УПОИ), выделяющее сигналы целей из помех. Первичная обработка может быть осуществлена непосредственно в аналоговом виде или после преобразования сигналов в цифровую форму. При необходимости построения траекторий движения целей осуществляется вторичная обработка информации вычислительным устройством после преобразования сигналов в цифровую форму кодирующим устройством (КУ). Траектория может наблюдаться и непосредственно на экране ИКО, благодаря большому времени послесвечения фосфоресцирующего слоя экрана ЭЛТ, возбуждаемого вспышками флуоресцирующего слоя при воздействии электронного луча. Время послесвечения существенно превышает время однократного обзора T_0 , и остаточные метки сохраняются на два-три оборота антенны РЛС, что и позволяет судить о перемещении отметки на экране ИКО.

Отличие когерентной схемы построения РЛС заключается в том, что при формировании излучаемого сигнала и его приеме используются одни и те же высокостабильные ВЧ и СВЧ генераторы, число которых определяется числом преобразований частоты в приемнике. Структурная схема когерентно-импульсной РЛС с двойным преобразованием частоты представлена на рис. 1.6, на котором с целью унификации многие функциональные блоки сохранили обозначение, принятое для некогерентной РЛС, представленной на рис. 1.5.

Выходной сигнал высокостабильного ГВЧ поступает на модулятор (М), на второй вход которого подается модулирующее напряжение в виде последовательности видеоимпульсов длительностью τ_n с периодом T_n . На выходе модулятора формируется последовательность радиоимпульсов с несущей частотой $f_{п.ч}$, которые после преобразования «вверх» на рабочую частоту РЛС f_n в смесителе (СМ1) усиливаются в усилителе мощности (УМ) и через