

Я.Д. Ширман

Теоретические основы радиолокации

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621.39
ББК 32
Я11

Я11 **Я.Д. Ширман**
Теоретические основы радиолокации / Я.Д. Ширман – М.: Книга по Требованию, 2023. – 560 с.

ISBN 978-5-458-43291-7

Книга представляет учебное пособие для радиотехнических факультетов высших учебных заведений, готовящих специалистов по радиолокации. Её особенностью является использование статистических методов анализа как единой базы курса. Даются принципы построения и теория устройств оптимального обнаружения при наличии помех; рассматриваются методы получения радиолокационной информации с учетом достижений в области оптимальной обработки сложных радиолокационных сигналов, закономерностей вторичного излучения и распространения радиоволн. Приводится большое число примеров, позволяющих читателю быстрее усвоить главные вопросы теории и ее приложения. Наряду с этим приведен набранный петитом дополнительный материал, рассчитанный на более углубленное изучение отдельных вопросов курса. Книга может быть полезна инженерам и аспирантам радиолокационного профиля, а также специалистам смежных областей, занимающимся вопросами обработки широкополосных сигналов.

ISBN 978-5-458-43291-7

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2023
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригиналe, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

Работа по написанию книги была выполнена авторским коллективом и распределялась следующим образом. Около половины ее была написана Я. Д. Ширманом и В. Н. Голиковым (§ 2.1—2.8, 3.1—3.21, 4.1—4.10, 5.15, 6.1—6.7, 6.13—6.18, 6.20—6.21 и приложения 3—6, 9—10); Я. Д. Ширманом и В. И. Поляковым написаны § 7.1—7.21; Я. Д. Ширманом и Г. А. Костиным написаны § 1.1—1.2, 1.4—1.5, 2.9—2.10; Г. А. Костиным написаны, кроме того, § 2.11—2.16, 6.8—6.9; И. Н. Бусыгиным написаны § 5.12—5.14, 5.16; В. Н. Манжосом написаны § 5.1—5.7, 5.10—5.11, приложение 7 и совместно с Н. Н. Минервиным § 5.8—5.9; Н. Н. Минервиным написаны § 1.3, 5.21, 6.19 и приложение 8; Б. В. Найденовым написаны § 5.17—5.20, 5.23, 6.10—6.12; А. С. Челпановым написаны § 5.22, 8.1—8.5, приложения 1—2, 11, 12. При написании § 5.12—5.20 с согласия автора частично использовано пособие, изданное в 1963 г. С. И. Красногоровым. Общее редактирование проводилось Я. Д. Ширманом, принимавшим участие в разработке всего материала; его лекции были положены в основу большей части книги. Существенную помощь в редактировании и подготовке рукописи к печати оказывали В. Н. Голиков и И. Н. Бусыгин.

Авторы выражают свою признательность тт. А. Ф. Богомолову и Л. А. Щернаковой (кафедра радиоприборов МЭИ), коллективу кафедры ЛИАП, руководимому Н. А. Сусловым, тт. С. Е. Фальковичу, А. И. Палию, А. А. Казакову, А. П. Кривелеву, М. А. Лисенкову, Л. Н. Рудневу, М. З. Чашнику за сделанные замечания, способствовавшие улучшению книги.

ГЛАВА 1

ВВЕДЕНИЕ

§ 1.1. Общие сведения о радиолокации

Радиолокация — отрасль радиоэлектроники, обеспечивающая получение сведений об объектах за счет приема и анализа радиоволн.

Объекты радиолокации, т. е. физические тела, сведения о которых представляют практический интерес, называются *радиолокационными целями*.

В зависимости от области применения радиолокации цели могут быть: аэродинамическими (самолеты, крылатые ракеты), баллистическими и космическими (боеголовки, спутники), наземными и надводными (танки, корабли); возможны цели природного происхождения (облака, планеты, ориентиры на местности).

Совокупность сведений о целях, получаемых средствами радиолокации, называют *радиолокационной информацией*.

Технические средства получения радиолокационной информации называют *радиолокационными станциями* (РЛС) или *радиолокаторами*. Радиолокаторы представляют собой сложные комплексы, которые помимо радиотехнических устройств могут содержать системы автоматики и вычислительные устройства.

Процесс получения радиолокационной информации, во многих случаях единый, удобно разделить на следующие этапы:

- обнаружение целей;
- измерение координат и параметров движения;
- разрешение;
- распознавание целей.

Обнаружение состоит в принятии решения о наличии или отсутствии цели в каждом выделенном участке пространства с минимально допустимыми вероятностями ошибочных решений.

Измерение сводится к выработке оценок координат и параметров движения цели с минимально допустимыми погрешностями. При использовании сферической системы координат обычно измеряют дальность до цели r , а также ее азимут β и угол места φ (рис. 1.1). В качестве параметров движения цели могут вводиться производные координат, либо другие параметры траектории цели.

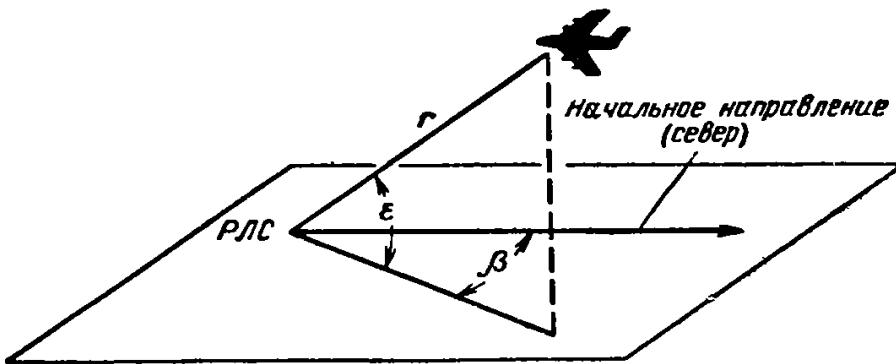


Рис. 1.1. Сферические координаты цели

Разрешение состоит в выполнении задач обнаружения и измерения параметров произвольной цели при наличии других, кроме выбранной для наблюдения. Говорят о разрешении целей по дальности, угловым координатам, скорости и т. д. Разрешающую способность по координатам характеризуют **элементарным объемом**. Размеры последнего по дальности — Δr , в азимутальной плоскости — Δl_β и в угломестной — Δl_ε (рис. 1.2) устанавливаются так, что наличие цели в соседнем объеме практически не ухудшает показателей качества обнаружения и измерения координат цели, которая расположена в центре выделенного объема. Выделенный таким образом элементарный объем называют *разрешаемым объемом* (при импульсном облучении цели — *импульсным объемом*).

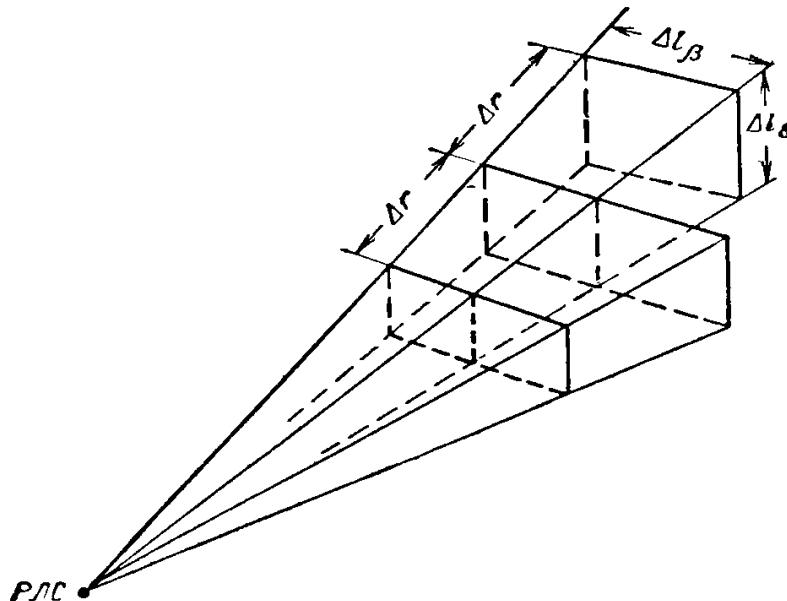


Рис. 1.2. Пояснение разрешаемого объема и разрешающей способности по координатам

Распознавание заключается в установлении принадлежности разрешаемой цели к определенному классу. В одних случаях необходимо установить принадлежность «свой — чужой» с помощью запросно-ответных устройств радиолокационного опознавания, в других — распознать боеголовку баллистической ракеты на фоне ее корпуса, ложных целей, метеорных следов и т. п. или определить характер искусственного спутника Земли с помощью специальной аппаратуры селекции.

Скоротечность и сложность радиолокационной обстановки требуют, как правило, высокого *темпа выдачи данных*, образующих потоки с большим объемом информации. Поэтому каждая из задач: обнаружение, измерение, разрешение и распознавание, для любого конечного объема пространства должна решаться за *ограниченное время*.

К средствам выработки радиолокационной информации предъявляется требование высокой *помехозащищенности* по отношению к естественным и искусственным помехам. Создание искусственных помех — один из важных способов *противодействия со стороны противника системам радиолокации*. Эти помехи создаются, например, в виде *мешающих излучений* (активные помехи) или *мешающих отражений* (пассивные помехи), которые *маскируют* полезные сигналы или *имитируют* цели.

Помехозащищенность — это способность радиолокатора поддерживать на заданном уровне показатели качества обнаружения, измерения (или распознавания) при наличии помех, а также способность использовать сами помехи как источник информации.

Термин «радиолокация» образован из двух латинских слов: «*locus*» — место и «*radio*» — излучение. Первое слово кратко характеризует одну из основных задач радиолокации, второе — указывает способ ее решения, основанный на использовании радиоволн.

Термин «радиоволны» по своему лексическому смыслу означает волны излучения произвольного вида и может быть распространен, например, на ультразвуковые волны, используемые в гидролокации для обнаружения подводных объектов. Тем не менее, исторически радиоволнами называют только колебания электромагнитного происхождения в условно ограниченном диапазоне длин волн в свободном пространстве. Принято называть *радиоволнами* такие электромагнитные колебания, частота которых ниже 3000 Гц. Наиболее важную роль играют диапазоны метровых, сантиметровых и миллиметровых волн. Однако в настоящее время и более коротковолновое электромагнитное излучение (инфракрасное, световое) также начинает использоваться для решения задач локации. Поэтому наряду с вопросами собственно радиолокации целесообразно рассматривать некоторые примыкающие вопросы инфра- и светолокации, расширяя тем самым условные границы диапазона радиоволн.

§ 1.2. Принципы получения радиолокационной информации

Основные принципы получения радиолокационной информации могут быть сформулированы в виде следующих положений.

1. Информация получается за счет *возвращения* с *цели*, целью, в частности *за счет эффекта излучения целью радиоволн*.

2. Для получения необходимой информации учитываются и *используются реальные закономерности распространения радиоволн в пространстве*.

3. *Выделение слабых сигналов, приходящих от цели, и разрешение целей обеспечивается за счет различий сигналов и помех, а также сигналов от разных целей между собой*.

4. Информация о целях получается параллельно или последовательно во времени и выдается в виде *информационных потоков*.

Рассмотрим перечисленные положения более подробно.

К видам излучения относятся: *вторичное излучение, переизлучение и собственное излучение* радиоволн. В первом и втором случаях радиолокатор излучает в направлении на цель мощный зондирующий сигнал; в последнем случае облучения цели не требуется.

Радиолокация с использованием вторичного излучения и переизлучения (ретрансляции) называется *активной*, а радиолокация с использованием собственного излучения — *пассивной*.

Активную радиолокацию с переизлучением называют радиолокацией с *активным ответом* (рис. 1,3, б). При использовании вторичного излучения можно по аналогии говорить о радиолокации с *пассивным ответом* (рис. 1,3, а).

Явление вторичного излучения позволяет обнаружить цели, не являющиеся источниками собственных радиоизлучений или переизлучений. Принимаемый сигнал при этом называют *отраженным*.

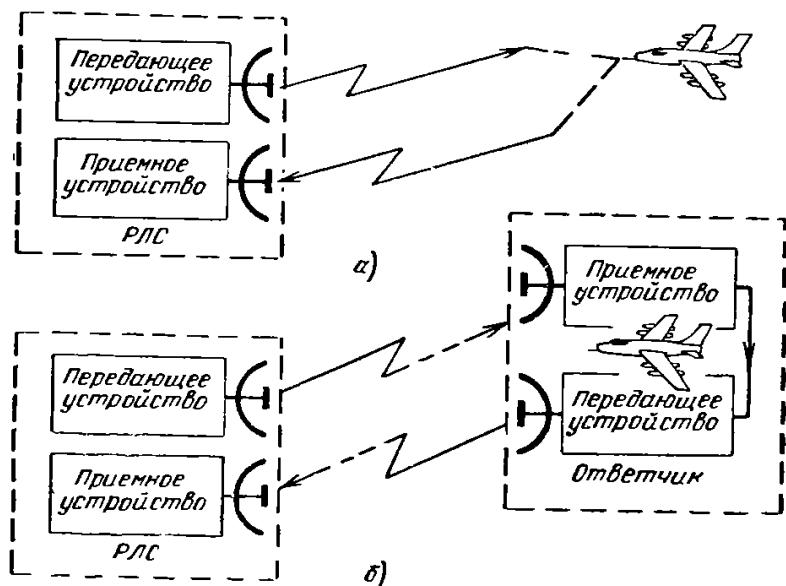


Рис. 1.3. Активная радиолокация с пассивным ответом (а) и с активным ответом (б)

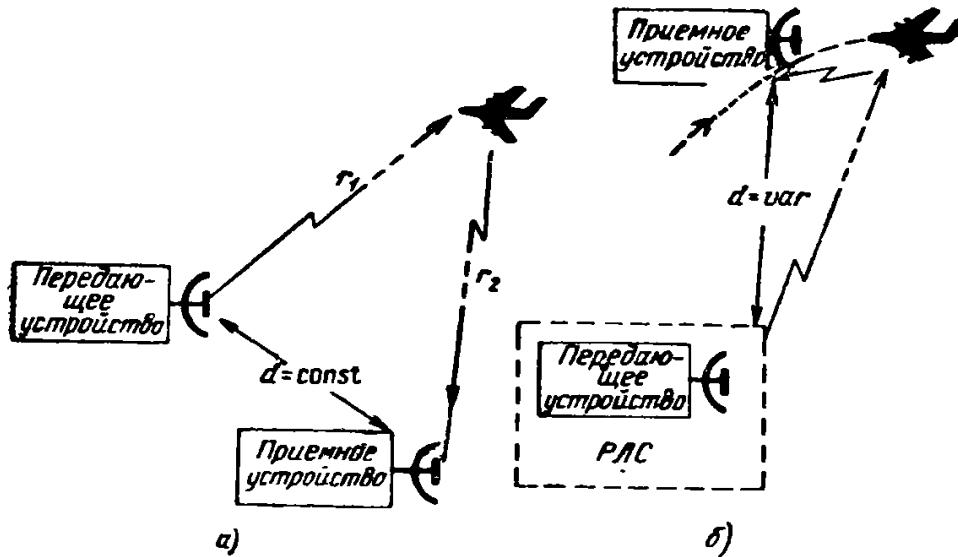


Рис. 1.4. Разнесенная система активной радиолокации:
 а) $d = \text{const}$; б) $d = \text{var}$

Активный ответ находит широкое применение при радиолокации и опознавании своих объектов: самолетов, ракет, противоракет и искусственных спутников Земли. На объекте в данном случае устанавливается приемо-передатчик (ответчик), обеспечивающий достаточно большую интенсивность переизлученного сигнала.

Системы активной радиолокации могут быть **совмещенными** и **разнесеными**. В совмещенном радиолокаторе передающее и приемное устройства располагаются совместно (рис. 1.3), возможно поочередное использование одной и той же антенны для передачи и приема.

В **разнесенной** системе передающее и приемное устройства располагают на удалении d друг от друга (рис. 1.4). Для наземной разнесенной системы (рис. 1.4, а) характерно постоянство расстояния d между приемным и передающим пунктами. При расположении передающего пункта на Земле, а приемного на самонаводящейся ракете (рис. 1.4, б) расстояние d является переменным.

В случае **пассивной** радиолокации (рис. 1.5) цель электромагнитными колебаниями не облучается. Электромагнитные колебания создаются элементами цели: ее нагретыми частями (тепловое излучение в диапазоне инфракрасных или миллиметровых волн), радио-

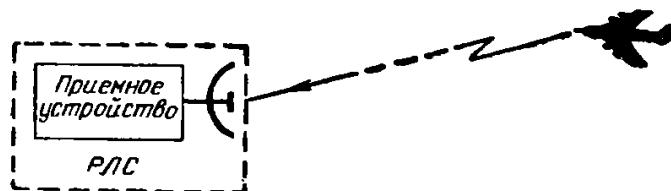


Рис. 1.5. Пассивная радиолокация

техническими устройствами связи, навигации, локации, радиопротиводействия (обычное радиоизлучение), а также колеблющимися частицами ионизированных участков атмосферы в окрестности цели (радиоизлучение при запуске ракеты или ядерном взрыве, распространяющееся в сверхдлинноволновом диапазоне на очень большие расстояния вокруг Земли). Прием может осуществляться одним или несколькими разнесенными приемными устройствами.

При определении координат цели в любой радиолокационной системе используются определенные *закономерности распространения радиоволн*. В данном параграфе ограничимся пока случаем распространения радиоволн в свободном пространстве, которое является однородным, изотропным и недиспергирующим. Иначе говоря, для всех точек этого пространства скорость распространения радиоволн одинакова, не зависит от поляризации волны и частоты колебаний ($c \approx 3 \cdot 10^8$ м/сек). При этом зондирующий и отраженный сигналы распространяются по прямолинейной траектории и без искажения своей формы. Время запаздывания t_3 отраженного сигнала относительно зондирующего (рис. 1.6) для *разнесенной* системы определяется соотношением

$$t_3 = \frac{r_1 + r_2}{c}$$

(r_1 и r_2 — расстояния от цели до передающего и приемного пунктов соответственно рис. 1.4) и для *совмещенной* системы радиолокации (рис. 1.3, а) — соотношением

$$t_3 = \frac{2r}{c}.$$

В последнем случае *дальность до цели*

$$r = \frac{ct_3}{2}$$

или

$$r_{[m]} = 150 t_3 [мксек],$$

$$r_{[km]} = 150 t_3 [мсек].$$

Концентрация излучаемой энергии в каком-то одном направлении и *направленный прием* обеспечивают существенное *увеличение*

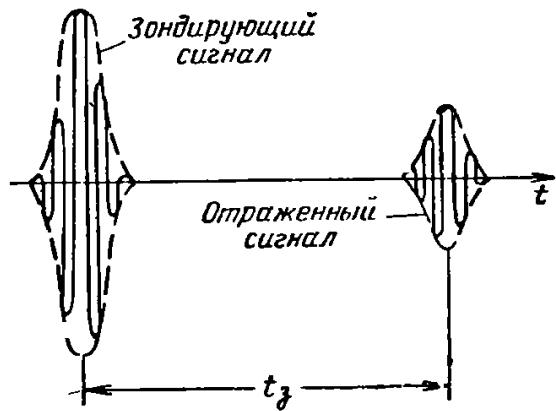


Рис. 1.6. Пояснение запаздывания отраженного сигнала

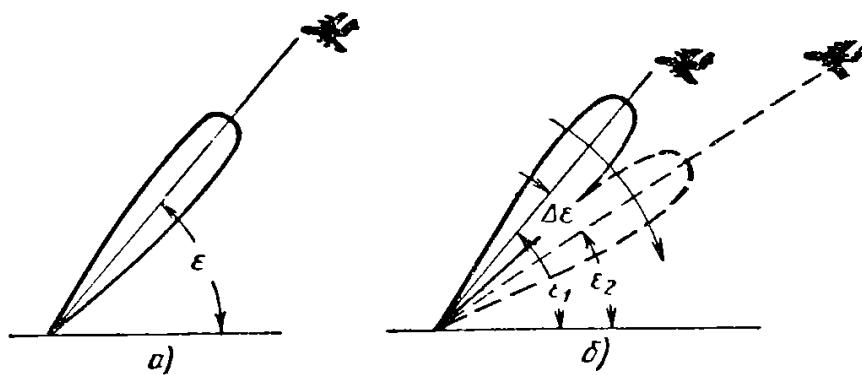


Рис. 1.7. Измерение угловой координаты (а) и разрешение целей (б) при направленном приеме

дальности радиолокации. Появляется возможность измерять угловые координаты цели — азимут и угол места, например, по максимуму отраженного сигнала (рис. 1.7, а), а также разрешать цели по угловым координатам (рис. 1.7, б). Ширина диаграммы (характеристики) направленности антенны радиолокатора определяется отношением ее геометрических размеров к длине волны. Поэтому высокие направленные свойства обеспечиваются за счет увеличения размеров антennы и использования дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн.

Даже при остронаправленном облучении цели от ее поверхности отражается незначительная часть излучаемой энергии. Еще в большей степени рассеяние энергии проявляется на пути от цели до приемной антенны в силу слабой направленности вторичного излучения. Приходящие сигналы, особенно на больших дальностях, оказываются слабыми и нужно принять ряд мер, чтобы выделить их на фоне помех (собственных шумов приемника, шумов космического происхождения, помех от других радиоустройств и т. п.). К числу этих мер относятся: увеличение средней мощности

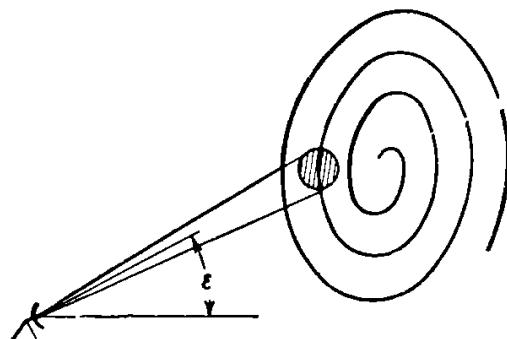


Рис. 1.8. Пояснение принципа последовательного составления потока радиолокационной информации

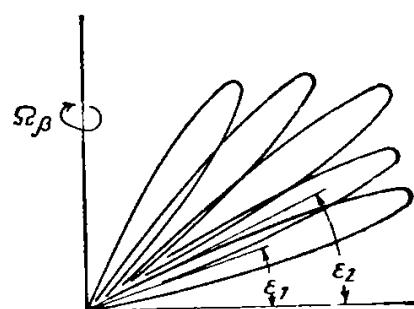


Рис. 1.9. Пояснение принципа составления параллельного потока радиолокационной информации по углу места и последовательного — по азимуту

зондирующих колебаний, габаритов антенн, применение высокочувствительных (малошумящих) элементов приемника. Наряду с этим должна предусматриваться такая обработка смеси слабых сигналов и помех, при которой обеспечивается *наилучшее использование взаимных различий сигнала и помех для решения задач радиолокации*. Взаимные различия должны наилучшим образом использоваться и при *разрешении* сигналов от нескольких целей.

Большинство современных радиолокаторов вырабатывает *поток информации* о целях в участке пространства, содержащем весьма большое число разрешаемых объемов. При этом могут использоваться принципы *последовательного, параллельного и параллельно-последовательного* составления потоков информации. Эти принципы закладываются в основу построения отдельного радиолокатора и системы радиолокаторов.

Рис. 1.8 поясняет принцип последовательного обнаружения целей радиолокатором с лучом игольчатого вида. Закон перемещения луча может быть различным, например, по спирали.

Рис. 1.9 поясняет принцип *параллельного* получения нескольких потоков информации. Создается пучок игольчатых лучей, каждому из которых соответствует свой приемник.

Если по одной из угловых координат (углу места) поток информации получается параллельно, а по другой (азимуту) — последовательно, например, за счет вращения многоканальной антенной системы, имеет место *параллельно-последовательное* составление потока информации.

Последовательные, параллельные и параллельно-последовательные потоки информации могут быть образованы также с помощью двух и более *раздельных радиолокаторов*. Например, радиолокаторы (дальномеры) с диаграммой, изображенной на рис. 1.10 сплошной линией, образуют последовательный поток информации об азимуте целей. Специальные радиолокаторы (высотомеры) с узкой диаграммой направленности в вертикальной плоскости (пунктир на

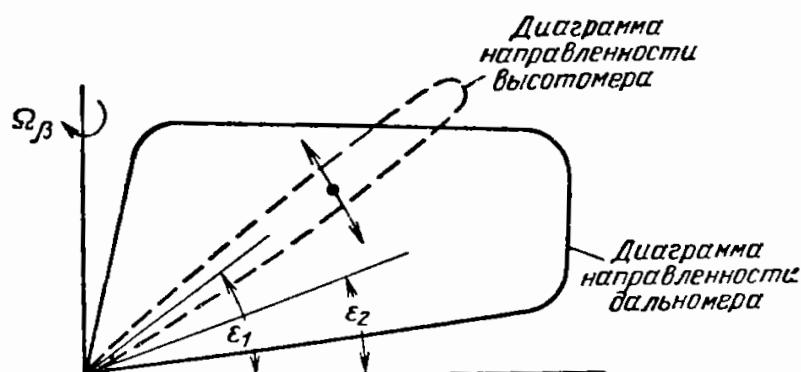


Рис. 1.10. Пояснение принципа составления последовательного потока информации по азимуту и углу места

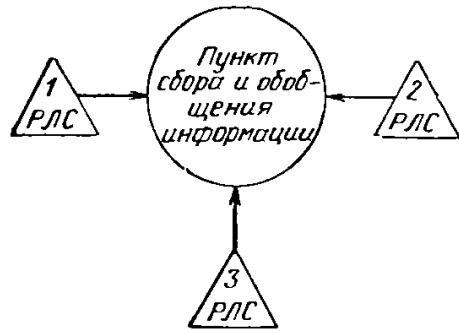


Рис. 1.11. Радиолокационный узел

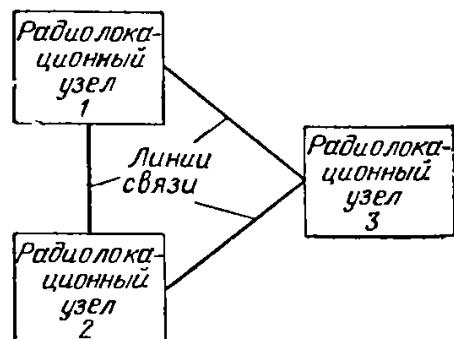


Рис. 1.12. Радиолокационная система

рис. 1.10) производят последовательный обзор по углу места и определяют высоту целей на тех азимутах, где они обнаружены дальномером. Для объединения и обработки информации нескольких радиолокаторов могут создаваться *радиолокационные узлы* (рис. 1.11). Несколько радиолокационных узлов, обменивающихся информацией, образуют *радиолокационную систему* (рис. 1.12).

В соответствии с выполняемыми функциями различают радиолокаторы *обнаружения* целей, *точного измерения* координат и параметров движения целей, *распознавания* и т. д. Если радиолокаторы обнаружения обычно являются многоцелевыми, то радиолокаторы точного измерения координат и параметров могут быть также одн целевыми или рассчитанными на малое число целей. Радиолокаторы, обеспечивающие выполнение ряда функций (обнаружения, распознавания, точного измерения координат и параметров движения целей), называют *многофункциональными* радиолокаторами.

По мере развития радиолокационной техники расширяется многообразие известных типов радиолокационных устройств. Современные радиолокаторы дальнего обнаружения космических объектов могут представлять собой гигантские сооружения с размерами антенн порядка десятков и сотен метров, со значениями средней мощности излучаемых колебаний порядка сотен и даже тысяч киловатт. Наряду с этим широко используются значительно меньшие по размеру подвижные наземные радиолокаторы обнаружения аэrodинамических объектов, радиолокаторы наведения и т. д. Широкое применение находят бортовые радиолокационные устройства обнаружения и наведения, обзора и картографирования земной поверхности, определения путевой скорости и измерения угла сноса. Наряду с самолетными и корабельными радиолокаторами могут использоваться миниатюрные переносные радиолокационные устройства весом порядка одного килограмма или даже сотен граммов, способные обнаружить движущуюся автомашину или передвигающегося человека, оценить угловую координату, дальность и скорость.