

**Ю.Б. Кобзарев**

**Современная  
радиолокация**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 53  
ББК 22.3  
Ю11

Ю11 **Ю.Б. Кобзарев**  
Современная радиолокация / Ю.Б. Кобзарев – М.: Книга по Требованию,  
2024. – 702 с.

**ISBN 978-5-458-47357-6**

Излагается теория современной радиолокации, рассматриваются вопросы расчета и приводятся примеры проектирования радиолокаторов различного назначения.

**ISBN 978-5-458-47357-6**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2024

© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2024

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 оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном 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.



Серия Книжный Ренессанс

[www.samizday.ru/reprint](http://www.samizday.ru/reprint)



## ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Предлагаемая вниманию читателей книга «Современная радиолокация», изданная в США в 1965 г., составлена по материалам лекций, прочитанных во время специальных летних сессий, проводившихся Электротехнической школой Моора Пенсильванского университета в 1960—61 годах.

Лекции на этих сессиях читались крупными специалистами, многие из которых хорошо известны советским радиоинженерам как авторы ряда книг и статей в специальных журналах. Стоявшая перед ними задача — изложить основы теории радиолокации, дать ясные представления о применяемых в радиолокации методах и физических явлениях и процессах в радиолокационных устройствах — была, конечно, весьма непроста, а необходимость координации работы большого количества лекторов (14 человек!) осложняла ее еще и дополнительно. Некоторых нарушений стройности изложения и повторений избежать не удалось. Однако следует признать, что в целом задача была решена удовлетворительно. Книга, созданная на основе прочитанных лекций, может служить хорошим пособием для изучения современной теории радиолокации.

Большим достоинством книги является простота изложения, не обремененного чрезмерно громоздкими математическими выкладками и в то же время позволяющего проследить весь ход рассуждений.

Основное внимание в книге обращено на теоретические основы, причем здесь излагаются лишь фундаментальные вопросы теории, без которых невозможно понимание работы радиолокационных систем и тем более грамотное их проектирование. Описания и анализа конкретных схем или тех или иных инженерных решений читателей в книге не пойдет. Однако это не является недостатком книги, поскольку такая задача перед авторами не ставилась. Зато изложение теоретических вопросов часто доводится до конкретных примеров и иллюстративных расчетов.

С момента выхода книги в США до настоящего времени прошло более трех лет, что при современных темпах технического прогресса является немалым сроком. За это время в теории и технике радиолокации обозначился ряд новых направлений, которые в книге, естественно, не отражены или затронуты лишь частично. Так,

в книге не освещены вопросы теории последовательного статистического анализа и техники управляемого обзора, очень кратко изложена проблема синтеза сигналов по заданной функции неопределенности, ничего не говорится о методах бокового обзора.

Делать какие-либо дополнения, которые дали бы представление о развитии теории радиолокации за последние годы, было признано нецелесообразным. Однако по инициативе А. И. Шестакова в книгу введены приложения в виде ряда графиков Маркума и Сверлинга, представляющих большую самостоятельную ценность для выполнения расчетов, производимых в процессе выбора схем построения РЛС (IRE Trans., 1960, Apr., IT-6, № 2).

Для удобства пользования графиками редакция снабдила их соответствующими пояснениями. По аналогичным соображениям включены также и таблицы Пачареса, ранее у нас не издававшиеся (IRE Trans., 1958, March, IT-4, № 1).

Большая работа по переводу книги была выполнена П. К. Гороховым, Г. Ю. Кобзаревым, И. Ц. Пиком, А. И. Шестаковым. Все они проявили большую энергию и инициативу, направленные на обеспечение лучшей доходчивости книги до нашего читателя. Я выражаю им свою глубокую признательность и, в особенности, благодарю А. И. Шестакова, давшего много ценных советов, которые содействовали улучшению книги.

Можно надеяться, что книга окажется полезной как радиоинженерам, работающим в области радиолокации, так и студентам и аспирантам указанной специальности.

*Ю. Кобзарев*

Москва  
1968 год

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Целью настоящей книги является сжатое изложение методов, постоянно используемых при проектировании радиолокационных систем, их расчете и анализе. Изложение начинается с математических и физических основ, затем рассматриваются реальные устройства и способы принятия инженерных решений. Глубина изложения материала позволяет инженеру приобрести кругозор, необходимый для оценки применимости различных методов к какой-либо радиолокационной системе. В конце каждой главы приводится список литературы, которая может помочь читателю углубить свои знания или применять их в специальных случаях. Книга содержит 6 частей, первые три из которых являются вводными и теоретическими; в последних трех подробно излагаются специальные методы. Каждая часть начинается с введения, в котором дается содержание глав и характеризуются связь их с другими частями. Мы надеемся, что книга будет полезным справочником для инженеров, рассчитывающих и проектирующих системы, а также явится основой курса для обучения студентов.

Мы рассматриваем настоящую книгу как естественное продолжение работ, выполненных во время второй мировой войны и после нее. Хотя изложенные в ней методы были разработаны после 1950 г., большинство из них не излагалось в сжатых рамках курса радиолокации. В части I дается подробное изложение уравнения радиолокации и его применения. Часть II содержит теоретический анализ сигналов, включая применение преобразований Лапласа и интеграла Фурье, свойств и методов анализа хаотического шума и использование комплексного представления узкополосных сигналов. В части III излагается применение статистических теорий проверки гипотез и оценки параметров к проблемам радиолокационного обнаружения и определения положения целей. В части IV рассматривается «функция неопределенности», подробно описывается метод сжатия импульсов при частотной модуляции, способ оптической корреляции и применение псевдослучайных кодовых последовательностей. Часть V содержит унифицированные расчеты распространения радиоволн, обзор методов конструирования антенн, обсуждение вопроса о шумовой температуре как ограничивающего дальность действия РЛС фактора, а также некоторые сведения о свойст-

вах малошумящих усилителей. Наконец, в части VI рассматриваются такие специфические методы, как применение дискретных фильтров для повышения уровня сигнала и разрешения цели, использование теории решений при оценке рабочих характеристик поисковых РЛС, приложение статистических методов к расчету систем, работающих по флюктуирующим цепям, и методология проектирования и расчета РЛС сопровождения. Уделяется большое внимание вопросам сопровождения спутников и космических объектов.

Как редактор, я хочу выразить признательность всем моим соавторам за их терпеливость и стремление к совместной работе. Я особенно признателен моим коллегам Вальтеру Вейнстоку, Давиду Бартону и Бернарду Стейнбергу за техническую помощь и идеи, которые были весьма благотворными как для создания программы специальной летней сессии, так и для составления текста.

Я очень обязан директору школы Моора профессору Брейнерду и координатору специальной летней сессии Морису Рубинову за их поддержку и готовность всемерно содействовать созданию рукописи. Я хотел бы специально отметить прекрасную работу мисс Б. Фиксман по перепечатке большей части окончательной рукописи.

Наконец, я хочу поблагодарить студентов, слушавших мой курс радиолокационных систем, прочитанный в 1961—1962 и 1963—1964 гг., за их комментарии и предложения по оформлению окончательного варианта рукописи, особенно Кришнану, Фросту, Котрилу и Родеману.

*Раймонд С. Берковиц*

Филадельфия, шт. Пенсильвания  
Август, 1965 г.

## Часть I

# ОСНОВЫ РАДИОЛОКАЦИИ

Мы начинаем эту книгу двумя вводными главами. В первой из них излагаются принципы радиолокации, даются основные определения, а также кратко рассматриваются возможности радиолокации и области ее применения. Во второй главе вводится понятие «уравнение радиолокации», связывающее воедино ряд концепций, необходимых для общей оценки радиолокационных устройств, и указывающее пути детального рассмотрения методов, описываемых в последующих главах.



## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ РАДИОЛОКАЦИИ

Р. С. БЕРКОВИЦ <sup>1</sup>

Радиолокация<sup>2</sup> представляет собой средство расширения возможностей человека определять наличие и положение объектов за счет использования явлений отражения радиоволн этими объектами. Ее ближайшим конкурентом при выполнении этих функций является оптическая техника, включающая телескопы, которые обладают высокой точностью и обычно имеют фотографические регистрирующие устройства. Преимущество радиолокационных средств по сравнению с оптическими состоит в том, что радиолокационные устройства могут работать в темноте и сквозь облака, обладают большой дальностью действия и позволяют определять дальность до объекта со значительно большей точностью, нежели оптические устройства. Хотя световые волны также являются электромагнитными, но в радиолокации частота их намного ниже. Это позволяет применять радиотехнические методы и схемы.

Развитие радиолокации является важной частью технической революции двадцатого века. Военная техника, использующая принципы радиолокации, впервые была создана перед самым началом второй мировой войны; с этого времени наблюдается быстрый и непрерывный прогресс в указанной области.

Основная идея радиолокации состоит в том, что электромагнитные волны распространяются через атмосферу по определенным законам с известной скоростью, приблизительно равной скорости света в вакууме. Любые препятствия или изменения характеристик среды на пути распространения радиоволн приводят к возникновению отражений, которые могут быть обнаружены и, таким образом, становятся источником информации о наличии и свойствах таких препятствий или изменений. Измерение времени запаздывания отраженного сигнала по отношению к излученному позволяет получить данные о положении препятствия, т. е. «цели». В случае

<sup>1</sup> R a u m o n d S. B e r k o w i t z. The Moore School of Electrical Engineering. University of Pennsylvania. Philadelphia, Pennsylvania.

<sup>2</sup> В подлиннике применяется получивший в США широкое распространение термин «радар», раскрываемый как сокращение наименования «Radio Detection and Ranging» — радиообнаружение и определение дальности. В отечественной научной литературе этот термин не используется. (Прим. ред.)

обычной «однопозиционной» радиолокации (когда передатчик и приемник совмещены и расположены в одном месте в отличие от «двухпозиционных» систем, в которых отраженный сигнал принимается в пункте, удаленном от передатчика) время запаздывания непосредственно характеризует расстояние от места расположения приемника и передатчика до цели. Измерение времени запаздывания облегчается, если передатчик излучает короткие импульсы электромагнитной энергии. Идея импульсного излучения лежит в основе большинства практических применений радиолокации.

Информация о скорости целей может быть получена измерением доплеровского сдвига частоты между излученными и принятыми колебаниями, а угловые координаты удаленных целей — посредством сопоставления характеристик отраженных сигналов с диаграммами направленности передающей и приемной антенн. Наконец, сведения о размерах, форме и отражательной способности цели можно получить путем сравнения формы огибающей отраженных и излученных колебаний.

В зависимости от особенностей применения радиолокационная информация может быть представлена в различном виде. Имеется ряд методов индикации с использованием осциллографов, которые создают оператору удобные условия для наблюдения за наличием, положением и размерами целей. Так, в радиолокационных станциях (РЛС) обнаружения целей индикатор кругового обзора (ИКО) с яркостной отметкой является эффективным средством отображения «картины» расположения целей вокруг РЛС. С другой стороны, изменения положения цели могут явиться источником формирования напряжений, управляющих положением антенны (в случае РЛС сопровождения цели) для обеспечения прицеливания и стрельбы соответствующими видами оружия, либо для управления полетом ракет путем использования линии связи. Чтобы решить некоторые важные задачи, данные, полученные при помощи радиолокационной станции, запоминаются в соответствующей форме для дальнейшей их обработки на электронной вычислительной машине.

Практические применения радиолокации в настоящее время отличаются большим разнообразием. Некоторые из наиболее важных задач радиолокации связаны с ее применением в военной технике; сюда относится обзор пространства и обнаружение самолетов противника и наземных подвижных объектов, обеспечение данных для управления орудийным огнем, а также данных для управления ракетами в полете. Кроме того, радиолокационные средства широко используются в навигации как самолетов, так и кораблей (особенно в ночное время и в условиях тумана); они являются важным элементом современных систем управления воздушным движением, используются с целью управления движением автомашин и имеют большое значение для обеспечения прогнозов погоды. Радиолокация — отличное средство для исследования земной атмосферы и ионосферы, а также для изучения метеоров. В настоящее время радиолокационные устройства используются для обзора космического

пространства, обнаружения и слежения за искусственными спутниками Земли, а также в системах противоракетной обороны. Совсем недавно радиолокация начала применяться для астрономических наблюдений соседних космических тел солнечной системы: Луны, Солнца, Венеры, Марса и Юпитера. Области применения радиолокации по мере дальнейшего освоения космического пространства, по всей вероятности, будут все больше расширяться.

Радиолокационная техника, с одной стороны, использует многие передовые отрасли современной техники, с другой стороны, способствует их развитию. Как указывается в последующих главах книги, на всех этапах своего развития и применения радиолокация тесно переплетается с другими областями науки и техники.

В заключение главы полезно указать на некоторые другие типы систем, родственных радиолокации: звуколокационные системы работают по такому же принципу, как и РЛС, но используют вместо радиоволн акустические волны; радионавигационная система Лоран, хотя и не основана на использовании отраженных сигналов, однако для определения расстояний здесь также необходимо измерять время запаздывания при распространении радиоволн. Многие методы анализа и расчета радиолокационных систем полностью применимы и к этим родственным системам.

Для более глубокого изучения основ радиолокации и истории ее развития следует обратиться<sup>1</sup> к приводимой далее литературе [1—2].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Skolnik M. I. Introduction to Radar System. McGraw-Hill Book Co., New York, 1962, ch. 1. См. также: Сколник. Введение в радиолокацию. Пер. с англ. Изд-во «Мир», 1965.
2. Encyclopedia Britannica, 1964 printing, article on Radar, vol. 18, p. 869—873x.

---

<sup>1</sup> См. также статью «Радиолокация» в Большой советской энциклопедии. (Прим. ред.)

## УРАВНЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИИ

Д. К. БАРТОН<sup>1</sup>2.1. ВЫВОД И ЗНАЧЕНИЕ УРАВНЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИИ<sup>2</sup>

## Классическая форма уравнения радиолокации

Вывод классической формы уравнения радиолокации дан в ряде книг [1—4]. В наиболее общей форме это уравнение определяет зависимость мощности принятого сигнала  $S$  от мощности передатчика  $P_t$ , усиления антенны  $G$ , длины волны  $\lambda$ , отражающей площади цели  $\sigma$  и расстояния до цели  $R$ :

$$S = \underbrace{\frac{P_t G}{4\pi R^2}}_{(a)} \times \underbrace{\frac{\sigma}{4\pi R^2}}_{(b)} \times \underbrace{\frac{G\lambda^3}{4\pi}}_{(c)} = \frac{P_t G^2 \lambda^3 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}. \quad (2.1)$$

Здесь первый сомножитель  $(a)$  дает величину плотности мощности облучающей волны на дальности  $R$ , выраженной в ваттах на единицу площади; это соотношение непосредственно вытекает из формулы для площади сферы ( $4\pi R^2$ ) и определения коэффициента усиления антенны [5, 6]. Во втором сомножителе  $(b)$  эквивалентная отражающая площадь  $\sigma$ , или, как принято говорить, «радиолокационная эффективная площадь рассеяния» цели, деленная на  $4\pi$ , соответствует в пределах единичного телесного угла мощности, отраженной в направлении на источник облучения и приходящейся на единицу плотности мощности облучающей волны [6]. После деления на  $R^2$  сомножитель  $(b)$  становится равным отношению плотности мощности отраженной волны у радиолокационной станции к плотности мощности излученной волны у цели. Таким образом, произведение сомножителей  $(a)$  и  $(b)$  дает плотность мощности отраженной волны у РЛС в ваттах на единицу площади. Наконец, третий сомножитель  $(c)$  представляет собой эффективную площадь приемной антенны  $A_r$ , выраженную через длину волны и коэффициент усиления антенны [3]. Эта эффективная площадь, умножен-

<sup>1</sup> David K. Barton. Raytheon Company. Wayland, Massachusetts.

<sup>2</sup> Автор выражает благодарность за помощь и поддержку С. М. Шерману, сотруднику фирмы RCA, под руководством которого он работал во время подготовки этих лекций.