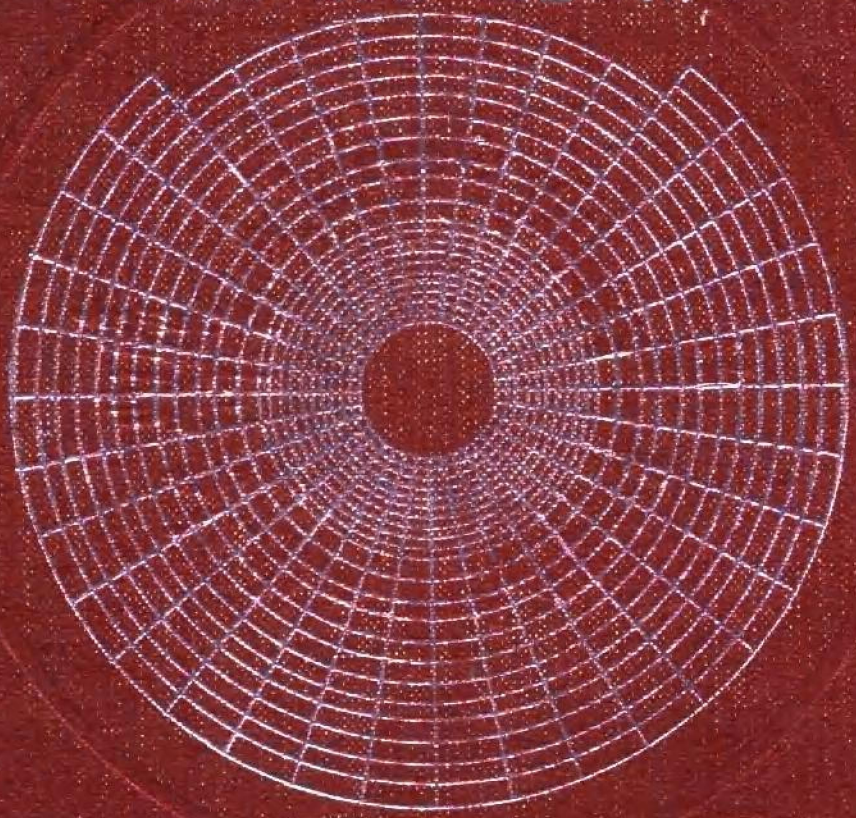
现代雷达原理

〔美〕杰里 L.伊代斯 爱德华 K.里迪 编
卓荣邦 杨士毅 张金生 等译



电子工业出版社

现代雷达原理

〔美〕杰里L. 伊伏斯　爱德华K. 里迪　编

卓荣邦　杨士毅　张金全　等译

電子工業出版社

内容简介

本书对现代雷达的原理及其基本组成单元作了较详细的讨论，为读者提供了设计和使用现代雷达系统所必需的理论基础和专业技术知识。如对从杂乱回波背景下的信号检测（如噪声中的检测、杂乱回波的特性及影响、自适应门限技术等）、跟踪技术及应用(包括距离、角度及多普勒跟踪)、雷达波形设计及应用(如连续波、脉冲多普勒、脉冲压缩及合成孔径雷达)以及雷达的基本组成单元(如发射机、天线、接收机和显示器）和目标反射特性及多径效应都作了讨论，并专门用了两章的篇幅来讨论八十年代雷达的热门课题——雷达目标识别问题。对于许多雷达专业书中不予以重视的雷达反干扰技术也作了专门的讨论。

本书内容较新颖、物理概念清楚、说理明白，并特别注重于工程实践。本书可供从事于雷达系统设计、制造及运用的工程技术人员参考，也可作为高等院校雷达专业的参考教材。

PRINCIPLES OF MODERN RADAR

Van Nostrand Reinhold Company New York 1987

现代雷达原理

〔美〕杰里L．伊伏斯　爱德华K．里迪　编

卓荣邦　杨士毅　张金全　等译

责任编辑　王昌喜

*

电子工业出版社出版(北京海淀区万寿路)

电子工业出版社发行　各地新华书店经售

山东电子工业印刷厂印刷(淄博市周村)

*

开本：850×1168毫米1/32　印张：23.375　字数：586千字

1991年3月第一版　1991年3月第一次印刷

印数：1—2000册　定价：16 50元(精)

印数：1-1000册　定价14.25元(平)

ISBN7-5053-1310-X/TN·381 (精)

ISBN7-5053-1311-8/TN·382 (平)

中 译 本 序

雷达在第二次世界大战中曾大显身手，屡建奇功，一直是军事应用的宠儿。而现代军用雷达则已成为各类军事武器装备的重要组成都分，从尖端武器到常规武器，从防御性武器到进攻性武器，都需要它。近二十年来，现代雷达还成为环境遥感领域中的一个重要方面。雷达除继续不断地向前发展，以满足日益增长的军事应用以外，其触须正伸向民用领域，开辟应用范围极为广泛的民用市场，为国民经济服务。

不可忽视的是，现代军用雷达的发展和生存能力正受到恶劣的电磁环境、先进的反辐射导弹以及包含隐身技术在内的复杂目标特性的挑战和威胁，然而，要生存就得发展，就得主动接受挑战。面对威胁和挑战，现代雷达正向以下几个方面发展：

一、为使雷达能具备抗侦察、抗干扰、抗反辐射导弹和反隐身技术的能力，军用雷达正在开展一系列新技术的研究和应用，诸如技术参数多变、低截获率反侦察技术、多模式抗干扰技术、探测信号频谱展宽技术、自适应技术和多基地雷达、谐波雷达及空间雷达等。

二、提高探测信号的信息量并从回波中提取尽可能多的有用信息。现在，再用最大辐射功率(能量)跟回波信号最小功率（能量)比来评定雷达已远远不够了。对于现代雷达说来，除要求精确测定目标坐标及运动轨迹外，还要求雷达能够从回波信号中提取用于识别目标和增加从干扰背景下区分出信号的附加信息。为此，正在向此方向努力。

三、提高雷达输出信息的自动化程度和完善信息的处理方式。因为不论是军用雷达还是民用雷达，现代雷达大多用作大型

自动化电子系统不可缺少的探测器，而这些大型电子系统又正是雷达输出信号的直接用户。在信息容量不断的增加，对信息的反应也应更为迅速的情况下，对信息的处理和输出数据的形式便均应向自动化的方面发展。

四、雷达的结构构成方式将以采用组件结构为主，而且采用的组件将同需要解决的技术问题有机地结合起来。此外，由不多的几个集成组件(模块)构成的雷达也将成为现实。由于雷达将普遍采用微电子组装技术，作到了体积小、重量轻，所以将不再会有移动式雷达或便携式雷达之类的差别。

五、雷达的可靠性和维修性还将进一步提高。现代雷达的MTBF虽已可达800～1200小时，但仍比要求值低了一个数量级。由于开展可靠性设计和采用高可靠性器件，雷达的可靠性和维修性也将会大大地提高。

尽管现代雷达正采用各种新体制和新技术及新工作模式，但万变不离其宗，其基本工作原理仍大体上保持不变。可以说，现代雷达的理论与技术已发展成为一门内容包罗极广的多科性边缘学科，并正与其它学科相互渗透又各自向前发展。鉴于美国佐治亚技术研究所J．L．伊伏斯和 E．K．里迪合编的《现代雷达原理》一书比较系统地介绍了现代雷达的原理和组成，又有较多的技术实践方面的内容，因此特组织长虹机器厂部分高级工程师将此书翻译成中文，奉献给国内从事于雷达研究的同行们。

国营长虹机器厂
厂长

1989．12

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

原　序

《现代雷达原理》这部书成因于(美国)佐治亚技术研究所举办的“现代雷达原理”短期讲习班。从1969年开始，技术研究所每年举办一期这种讲习班。十七年来，已积累成厚厚的成套讲稿。1986年的讲稿又扩充为二十二章，而且所有的讲稿撰写人，除Barret先生外，都是佐治亚技术研究所的正式成员。

由于得到大学和雷达界各方人士的许多鼓励，我们便挑起了整理讲稿和出版此书的重担。本书比较偏重于实践，因为每一位撰稿人都是从事于实际工作的工程师或科学家，而且都是专门被邀请来撰写各自熟悉的那一门专题的。主要的如分别由E. F. Knott，G. W. Ewell和N. C. Currie撰写的第二章，第五章和第十章。此三位研究专家都被雷达界公认为是其所从事的技术领域中的专家，每人都有权威性的论著发表。其它几位作者，包括Bodnar博士，Bruder先生，Corriher先生，Reedy博士，Trebits博士和Scheer先生，也都发表过重要的论著。

《现代雷达原理》一书除了导论之外共有七个部分。第一部分为“雷达的外界因素”，包括电磁波的反射和传播过程以及多径现象和效应。第二部分则分别讨论雷达的基本组成部分。雷达的基本任务和目的就是要在被噪声及杂乱回波所“污染的环境中进行检测”，这便是本书第三部分的内容，它各用一章来讨论噪声、杂乱回波、目标模型和门限检测技术。第四部分为“雷达波形及应用”，它用四章的篇幅分别讨论在时域、频域、空域中如何采用波形设计和信号处理去提高雷达性能的专门技术。有关距离跟踪、角跟踪和多普勒频率跟踪的问题则是本书第五部分“雷达跟踪技术及应用”的内容。最后在第六部分和第七部分中

将分别讨论“目标鉴别及识别”和“雷达电子抗干扰”。这两方面是大多数雷达专业书中都未曾讨论的重要课题。第二十章和第二十一章论述目标识别的极化技术。这是八十年代雷达方面的一个极其重要的课题。第二十二章讨论电子干扰，这本应是任何一部雷达都不可分割的组成部分，却往往被雷达设计人员和雷达专著的作者所忽略。

很多人都为本书的出版作出了贡献，在此一一表示感谢。其中有些人一再鼓励我们承担编辑本书的重任，其中包括所有为本书撰写相应章节的同仁，没有他们的帮助便不会有这部书。还要特别感谢 Melvin McGee 先生和他的助手Joseph McKee 先生和Melanie Luke 女士，他们为编排和整理手稿作了很多工作。此外，还要特别感谢Shirley Washington 女士对举办短期讲习班和出版本书的支持。最后，还要感谢原在佐治亚技术研究所现在亚特兰大科学公司任职的H. Allen Eckev 博士，他早在1969年便组织和指导了“现代雷达原理”短期班教材的第一版，并邀请我们参加授课而最终便促成了本书的出版。

Jerry L. Eaves　杰里L. 伊伏斯

Edward K. Reedy　爱德华K. 里迪

译 者 前 言

《现代雷达原理》一书，系美国佐治亚州亚特兰大佐治亚技术研究所一些理论水平较高并具有丰富实践经验的雷达专家撰写的一部专著。原书由该研究所每年举办一期“现代雷达原理”讲习班的讲稿演变而来。自1969年开始，该研究所每年举办一次这种讲习班，至1986年，已举办了十七次，讲稿也不断补充、更新和完善。应美国雷达界人士的要求，为了满足读者的需要，即由该研究所雷达和仪器实验室主任里迪博士和副主任伊伏斯担任主编，将讲稿加以整理并正式出版。里迪博士曾任美国政府和工业部门的雷达顾问，伊伏斯则是美国陆军和西屋公司研制和发展雷达的关键性人物。本书的有些作者，如E.F. 诺特、G. W. 尤厄尔和N. C. 柯里，都是美国公认的雷达权威人士，而D. G. 博德纳博士、J. A. 布鲁德、H. A. 柯里尔、R. N. 特里比茨博士。J. A. 希尔和 N. F. 埃兹奎尔拉等人，也都是在雷达某一专业方面造诣颇高，论著甚丰的专家和学者。

本书的特点是，比较系统地讲述了现代雷达的基本原理和其主要组成，内容新颖，物理概念清楚，说理明白，讲解有深度又简明扼要。尤其是能特别注意工程技术实践。由于此书介绍了设计和研制现代雷达设备所必需的系统理论基础知识和专业技术知识，对从事于研究、设计、制造和使用雷达的专业技术人员颇有参考价值。因此，我们特将此书译成中文，奉献给读者。

本书由机电部国营长虹机器厂设计所部分同志为主进行翻译。在此书的翻译过程中，曾得到工厂有关部门和领导的大力支持和帮助。厂长、研究员级高工倪润峰同志为中译本撰写了序言。总工程师、研究员级高工卓荣邦等领导同志还参加了有关章节的

翻译工作，并对整个工作给以关心和指导。参加本书翻译工作的有：卓荣邦(第十一、二十二章)，研究员级高工杨士毅(第一、二、三、十、十五、十七、二十一章)，研究员级高工张金全(第十二、十三、十四章)，副总工程师、研究员级高工郑信孚(第十六章)，副厂长、高工韩培龙(第七章)，研究员级高工杨铨(第九章)，高工高文斗(第五、六、二十章)，副总工程师、高工林祥复(第八章)，研究员级高工韩邦栋(第十八章)和机电部技术情报所的高工汪育农(第四、十九章)。全书由杨士毅、张金全和高文斗同志负责审校和统稿。研究员级高工余启福、高工江纬基、高工沈桂夏、研究员级高工郑永洪、研究员级高工李云根同志等对译稿进行了审阅和校核，航空航天部一院研究员魏津同志对全部译稿作了最后的审校。高工王显金和高工何武珍以及研究员级高工陈祥春同志帮助做了一些工作，高工王建林同志还参加了第十五章初期的翻译工作，译者对此均表示深切的谢意。考虑到目前有关专业术语还不够统一的情况，我们特编拟了一份本书英汉专业术语对照，附在书末，供读者参考。鉴于我们水平有限，译文中难免有错误和欠妥之处，敬请读者指正。

译者

1989年12月27日

目　　录

第一章　雷达导论　J.L.Eaves……（1）

第一部分　雷达的外界因素……（31）

第二章　电磁波和反射过程　E.F.Knott……（32）

第三章　传播过程　D.G.Bodnar……（51）

第四章　多径现象及多径效应　H.A.Corriher, Jr.……（72）

第二部分　雷达系统的基本单元……（106）

第五章　雷达发射机　G.W.Ewell……（108）

第六章　雷达天线　D.G.Bodnar……（148）

第七章　雷达接收机　T.L.Lane……（182）

第八章　雷达指示器和显示器　J.A.Scheer……（238）

第三部分　污染环境中的信号检测……（257）

第九章　噪声背景下的检测　J.D.Echard……（259）

第十章　杂乱回波特性及效应　N.C.Currie……（288）

第十一章　目标模型　C.R.Barrett, Jr.……（353）

第十二章　自适应门限和自动检测　C.R.Barrett, Jr.
……（378）

第四部分　雷达波形和应用……（404）

第十三章　连续波雷达　W.A.Holm……（406）

第十四章　动目标显示和脉冲多普勒雷达　C.R.Barrett, Jr.
……（433）

第十五章　脉冲压缩雷达　M.N.Cohen……（480）

第十六章　合成孔径雷达　R.N.Trebits……（518）

第五部分　跟踪雷达技术和应用……（556）

第十七章　距离跟踪　J.A.Bruder……（557）

第十八章　角跟踪　G.W.Ewell, N.T.Alexander……（585）

第十九章　多普勒频率跟踪　G.V.Morris……（618）

第六部分　目标鉴别及识别 ……（637）
第二十章　极化基础及技术　W.A.Holm ……（638）
第二十一章　目标识别问题研究　N.F.Ezquerra ……（663）
第七部分　雷达电子抗干扰 ……（698）
第二十二章　雷达电子抗干扰的考虑和对抗技术　E.K.Reedy
……（699）
本书英汉专业术语 ……（721）
原编者简介 ……（737）

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

第一章　雷达导论

J.L.Eaves

1.1　引言

雷达这个名称是美国海军在第二次世界大战的1940年使用的一个保密代号。它是“无线电探测和测距”（Radio Detection and Ranging)这句英文的缩写。雷达有着广泛的用途。其中有些特殊的应用可能包含极其复杂和极为完善的工程技术和设计。不过，大多数雷达的基本构成形式都非常简单，如图1-1所示，雷达的基本任务是探测感兴趣的目标，并从中提取诸如目标距离、角坐标、速度和反射特征方面的信息。

由雷达发射机产生的电磁能，经收发转换开关之后，便传输给天线。收发转换开关用来使单个天线既能发射电磁波又能接收电磁波。天线起着将电磁能耦合至大气中的转换作用。电磁能在大气中以光的速度(约3×10^{8}米/秒)传播。雷达天线通常会形成一个集中向某一给定方向传播电磁能的波束。因此，通过机械和电气的组合，将天线有效地指向某方向，便使波束指在所需的角坐标上。

位于天线波束内的物体或目标将会截取一部分传播的电磁能。目标将被截取的能量向各个方向散射。一般说来，总有些能量会向雷达的方向反射。可证明，从雷达发射电磁波到距离R处的目标反射回信号之间的延迟时间的关系是

$$t_d=\frac{\text{距离}}{\text{速度}}=\frac{2R}{c} \tag{1-1}$$

式中，c 为光速。反射回的能量称为后向散射，以区别于双向散

射或电磁波在其它方向的散射。

一部分后向散射的电磁波将被雷达天线获取，从大气或其他传播的介质中搜集到的能量通过传输线和收发转换开关馈给雷达接收机。

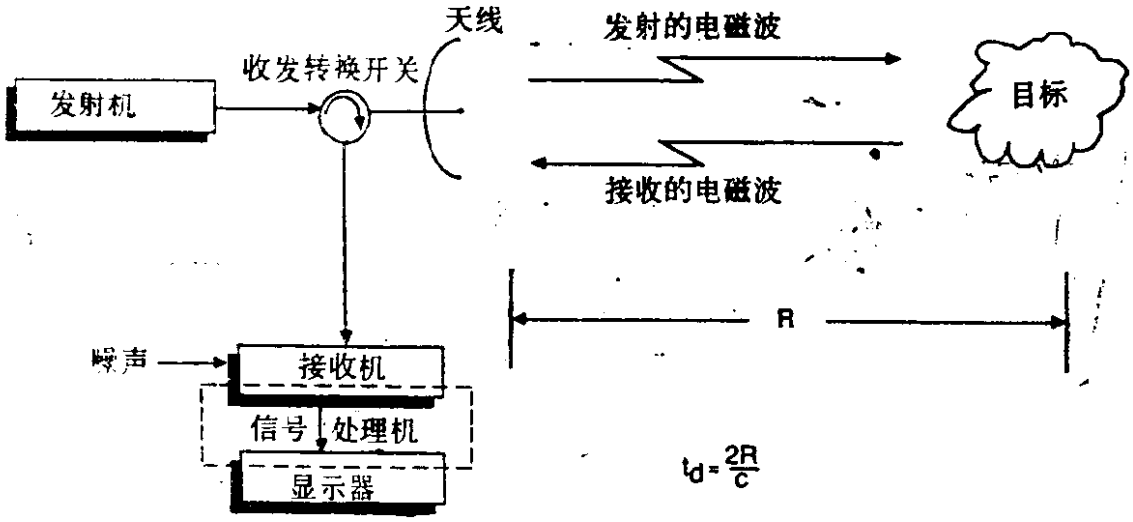


图1-1　雷达的原理及其基本组成

雷达接收机将收到的微弱回波信号予以放大，然后将包含在射频中的信息转换为视频和/或基带信息。经接收机处理的信号再加到雷达显示器或显示装置。此时，在接收机(信号处理机)内

表1-1　目标数据的提取

目标信息	提取方式	
	接收信号	发射信号
大小 (雷达散射截面)	强度与	功率相比
距离	延迟相对于	时间基准
角坐标	天线波束位置相对于	天线波束基准位置
径向速度 (多普勒频率)	射频相对于	频率基准
散射特性	极化散射矩阵(PSM)相对于	电磁波基准
识别	测定的极化散射矩阵(PSM)跟存贮的特征对	电磁波基准

获取的数据(距离、速度、幅度、方向等等)便给雷达操作人员展示出来。

一般地说，雷达是在将回波信号跟发射信号相关连之后，方才获得目标信息的。雷达能够获取的目标信息和与之相关的提取方式已列于表1-1中。

1.2 雷达系统的基本组成

任何功能的雷达都有四个基本组成部分：发射机、天线、接收机和显示器。这种基本结构已示于图1-1中。图中虽然将收发转换开关当成一个组成部分，但是，更确切地说，将它当作射频传输线的一个组成部分要比当作雷达的组成更为恰当。图 1-1 还提出将信号处理机当作雷达的第五个组成部分。在很多情况下，信号处理可以将接收机和显示器的某些运用合并起来。

发射机 发射机的功能是产生某一所需功率电平的射频波形。所需之射频功率可直接由功率振荡器(如磁控管)或长区振荡器(EIO)产生，或由射频放大器或放大器链(行波管放大器，交叉场放大器或长区放大器(EIA)，固态器件放大器等等)提供。波形则由雷达系统的特定要求确定。从简单的动目标显示(MTI)雷达用的未经调制的连续波(CW)到某些先进军用雷达的复杂的频率、相位和时间编码调制波形都有。雷达发射机将在第五章再作较详细的讨论。

天线 雷达天线的基本功能是将射频能量从雷达传输线耦合到传播介质中或由传播介质耦合给传输线。除此之外，天线还为发射和接收电磁能量提供波束的方向性和增益。各种天线的概念和技术将在第六章中介绍和讨论。

接收机 雷达接收机的主要功能是接收微弱的目标信号，并将信号放大到可资使用的电平。随后，再将射频包含的信息变换到基带信号。使用了各式各样的接收机、包括晶体检波式、射频

放大器、零拍接收机和超外差接收机。其中，超外差接收机在雷达接收机中是应用最广泛的一种。这些接收机都将在第七章中讨论。当设法使接收机的频谱特性跟发射波形为最佳匹配时，便可获得所谓的理想或匹配接收机。此时，就可得到最大的输出信噪比。在大多数情况下，雷达设计人员就得谋求折衷的设计，出于其它方面(简化设计或测距精度)的考虑，而牺牲一些信噪比。因此，很难实现理想的匹配接收机。不过，理想匹配接收机都普遍用作性能比较的参考基准。

显示器 雷达显示器的基本功能和用途是将目标信息传递给用户。显示器的结构形式和信息展现的方式取决于雷达的特定用途和用户的需要。两种常用的显示器是：(1) 平面位置显示器(PPI)，对于监视雷达来说，阴极射线管上显示的是供监视雷达用的目标距离和角度数据。(2) 声频扬声器或耳机，将动目标的出现用多普勒频率信号表示，例如，在报警雷达中。各种类型的显示器和其应用将在第八章中介绍。

1.3 发 展 史

尽管雷达在第二次世界大战期间获得了广泛的应用和发展，但在此之前，它却未能得到应有的声誉，而雷达的工作原理则是早在一九〇〇年便为很多现在卓有声誉的科学家所知晓和提出来了。表1-2列举了导致在第二次世界大战期间使雷达技术得以飞跃发展的若干大事和转折点。

第二次世界大战以来，雷达的应用扩展得十分惊人。它不仅仅在许多军事方面获得了应用，而且在民用及商用方面也获得了广泛的应用。第二次世界大战以来，促使雷达获得广泛应用的一些主要技术发展有以下一些方面：

- 高功率速调管
- 低噪声行波管

·参量放大器和量子放大器(脉泽)
·长区振荡器和长区放大器
·单脉冲技术
·超视距雷达
·窄脉冲技术
·合成孔径雷达
·相控阵雷达
·固态器件
·集成电路技术
·数字计算机
·信号处理
脉冲压缩
动目标显示和脉冲多普勒
频率捷变
极化技术
数字技术
超高速集成电路

表1-2 第二次世界大战前雷达发展大事记及转折点

1886年	赫兹进行电波从金属和介质物体反射的试验。
1903年	德国工程师胡尔斯梅耶(Hulsmeyer)探测到从船舰反射的电波。
1922年	马可尼向无线电工程师学会(IRE)(现改名为电气与电子工程师学会(IEEE))发表演说，主张用短波无线电探测物体。
1922年	美海军实验室(NRL)的泰勒(Taylor)及杨(Young)用5米波长的连续波探测到木质船舰。
1930年	海军实验室的海兰德(Hyland)用连续波探测到飞机。
1934～1936年	英瓦特逊-瓦特爵士和美海军实验室佩芝(Page)进行了脉冲雷达试验。
1930年代后期	出于第二次世界大战前的军事需要，雷达日益受到美国海军实验室和美国陆军通讯兵部和英国各个实验室的重视。
1940	英国科学家访美，提供磁控管，并建议美国研制微波机载雷达和防空火

续表

	控雷达。
1940年11月	美国麻省理工学院(MIT)成立辐射实验室。据英国建议，实验室主要由物理学家组成，开始仅40余人，到1945年已扩充到4000余人。实验室的研究工作和科研成果，已记载在卷帙浩繁的报告中。第二次世界大战后，曾公开出版过二十八卷本的“辐射实验室丛书”，向广大工程师和科学家公开了雷达方面和有关学术领域的大批技术资料和新技术。

1.4 雷达方程

雷达距离方程或简称为雷达方程，乃是对雷达设计人员和研究者提供的一个最简单和最有用的数学关系式。写得最完整的雷达方程不仅包含了雷达系统每项重要参数的影响，而且还包含了目标、目标背景和传播途径及传播介质的影响。因之，根据不同的参数和折衷的考虑或是以雷达、目标及环境条件为基础，可以用雷达方程来估算雷达的性能和进行成本核算分析。

对于实践的雷达工程师来说，对雷达方程的透彻理解十分必要。在大多数雷达专业教科书中已对相应的关系式作了推导，但因雷达方程有着举足轻重的重要性，所以本书还要对此作些讨论。

假设雷达发射机产生P_t瓦的功率，并将之馈送给天线，由天线将电磁能量作各向同性(全方向)的辐射，如图1-2(a)所示。由于电磁能量以等强度向所有的方向辐射，一个以雷达所在之处为球心，半径为 R 的假设球体的表面上的功率密度便是常数。此外，根据能量守恒原理，球的全部表面上的总功率必定准确地等于P_t瓦(假定传播介质无损耗)。因此，与雷达相距为R处的单位表面积上的功率密度将是球体表面上的总功率除以球的总表面积$4\pi R^2$。因此，在距离雷达R处时，

$$\text{功率密度} = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad \text{瓦/米}^2 \tag{1-2}$$

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com