

雷达技术丛书  
<http://www.phei.com.cn>

# 雷达天线 技术

张祖稷  
金林  
束咸荣

编著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

雷达技术丛书

# 雷 达 天 线 技 术

张祖稷 金 林 束咸荣 编著

電 子 工 業 出 版 社

**Publishing House of Electronics Industry**

北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

天线作为空间能量转换器和空域信号处理器是雷达必不可少的最重要分系统之一。本书着重介绍了雷达天线系统的作用、特点、功能和性能指标,以及常用类型雷达天线的基本原理、设计和应用,如各种反射面天线和阵列天线,特别是多功能相控阵天线,还给出了雷达天线测试技术和雷达天线罩的有关内容。

本书作为雷达技术丛书的一个分册,不同于一般的天线设计手册,除专业性较强外,在对雷达天线设计技术的描述中,强调基本概念清晰、设计目标明确,以及先进性和工程实用性的结合,并运用实例说明实际设计经验和体会。

本书的设计性和实用性对于从事雷达天线系统研究、制造的工程技术人员是一本很有实战价值的工具书,对于广大从事雷达装备使用与维护的雷达部队官兵和各行业操作人员来说也是系统学习雷达天线技术知识的参考书,同时它还适合作为高等学校相关专业高年级学生和硕士研究生的教材或参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

雷达天线技术/张祖稷,金林,束咸荣编著. —北京:电子工业出版社,2005.11  
(雷达技术丛书)  
ISBN 7-121-01974-4

I. 雷… II. ①张… ②金… ③束… III. 雷达—天线 IV. TN957.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 137211 号

责任编辑:刘宪兰 特约编辑:王银彪 联 霞

印 刷:北京智力达印刷有限公司印刷

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×960 1/16 印张:29 字数:550 千字

印 次:2005 年 11 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:72.00 元

购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。



张祖稷

研究员，国务院特殊津贴专家，中国电子学会高级会员，曾多年担任天线分会委员。1961年毕业于成都电讯工程学院（现电子科技大学）并分配到原电子工业部第十四研究所，1970年至今工作在中国电子科技集团公司第三十八研究所，40余年一直从事雷达天馈系统工作。曾负责三种类型的宽带米波雷达天线及中国第一个堆积多波束三坐标雷达天线和第一个C波段DBF试验台的研制。曾获得国家科技进步一等奖和多项部级成果奖。多年担任第三十八研究所微波部主任和天馈部主任，参加、组织或指导过多个不同类别的雷达天线及预研课题的攻关和研制工作。



金林

研究员，分别于1986年和1989年毕业于北京航空航天大学电子工程系，获得学士和硕士学位。2002年获得北京航空航天大学电磁场与微波技术学科工学博士学位。1989年供职于中国电子科技集团公司第十四研究所机载电子设备研究部，从事雷达天线技术的研究和工程设计。在低副瓣、超低副瓣波导裂缝阵列天线技术研究和工程设计方面有较深的造诣。现从事雷达系统技术的研究，包括阵列超分辨技术，雷达电磁环境、目标特性和目标识别技术的研究。1994年获部级科技进步特等奖，1995年获国家科技进步二等奖，2000年获江苏省科工委系统青年科技标兵荣誉称号，2001年获江苏省优秀科技工作者荣誉称号，2001年获2000年度江苏省有突出贡献的中青年专家荣誉称号，2003年获江苏省五四青年奖章，2003年获国防科学技术二等奖。发表论文和译著二十余篇。



束成强

研究员，1967年毕业于复旦大学数学系。1979年前供职于原电子部O八七一总厂技术科，从事雷达天线的研制工作。1982年毕业于南京雷达研究中心微波电磁场专业，获硕士学位。同年进入中国电子科技集团公司第十四研究所工作，曾任该所天线研究室主任、党支部书记。现为天线与微波技术国家级重点实验室研究员。其间参加和负责过远程警戒和超宽带等多项雷达天线研制和省级常规及特殊场形广播电视发射天线的工程项目。主持和负责国家高技术863-308主题的“密度加权相控阵天线工程应用”课题的研究并获电子部科技进步二等奖。负责和参与《相控阵雷达天线技术》及《空间探测相控阵雷达》等书的撰写。在国内、外专业期刊发表学术论文五十多篇。

“雷达技术丛书”编辑委员会

主 任： 王志刚

副 主 任： 王小谟 张光义 徐步荣 左群声 王 政 文宏武

委 员： (以下按姓氏笔画为序)

于景瑞 弋 稳 王德纯 平丽浩 匡永胜 李文辉 吴顺君

吴曼青 张祖稷 张润遼 张德斌 周文瑜 金 林 郑 新

柯建波 保 铮 贺瑞龙 贲 德 梅晓春 黄 槐 黄培康

董庆生 焦培南 薛海中

主 编： 王小谟 张光义

编辑部主任： 邱荣钦

编辑部副主任： 刘宪兰 赵玉洁 赵启成

编 辑： 李玉兰 毛 宏 李盛沐 王炳如 黄昭华

## 出版说明

“雷达技术丛书”是由中国工程院王小谟院士和张光义院士倡导并担任主编、中国电子科技集团公司负责组织、电子工业出版社负责出版的一套大型设计性系列丛书。这套“雷达技术丛书”（以下简称“丛书”）共 16 册，是我国雷达界多个单位的知名专家学者集体智慧的结晶，是他们长期实践经验的总结，是一套理论与实践相结合的佳作。

这套“丛书”的内容十分丰富，概括地说包括了 3 个主要方面的内容：一是介绍了影响雷达性能的目标特性和环境特性，包括目标（含隐身目标）的频率特性、散射特性、极化特性和起伏特性，地杂波、海杂波和气象杂波特性，噪声与干扰特性，大气与电离层传播特性等；二是介绍了雷达各分系统的设计，包括面天线与阵列天线、微波网络与微波传输线、固态与电子管发射机、频率源与模数接收机、信号处理与数据处理的基本原理、技术指标、设计方法和性能测试，还介绍了雷达系统与分系统的结构设计与制造工艺，包括微组装与柔性制造工艺，可靠性、可维性、环境适应性设计以及传动、架拆与运输规范的设计等；三是介绍了典型雷达系统的设计，包括各种二坐标与三坐标防空雷达、有源与无源相控阵雷达、机载预警与火控雷达、多普勒与相控阵制导雷达、脉冲与连续波精密跟踪测量雷达、合成孔径与逆合成孔径成像雷达、天波与地波超视距雷达等的基本原理、技术体制、战技性能、设计方法和联试与试飞等。

这套“丛书”的定义准确，原理清晰，语言简练，图文并茂，公式齐全，数据丰富，集设计性、实用性、新颖性于一体，是雷达科技工作者的设计指南，是雷达部队培训的良好教材，是高校电子工程专业及相关专业师生不可多得的教材和参考书。

“雷达技术丛书”编辑委员会编辑部

2004 年 12 月 29 日

## 序

雷达在第二次世界大战中得到迅速发展，为适应战争需要，交战各方研制出从米波到微波的各种雷达装备。战后美国麻省理工学院辐射实验室集合各方面的专家，总结二战期间的经验，于 1950 年前后出版了雷达丛书共 28 本，大幅度推动了雷达技术的发展。我刚参加工作时，就从这套书中得益不少。随着雷达技术的进步，28 本书的内容已趋陈旧。20 世纪后期，美国 Skolnik 编写了雷达手册，其版本和内容不断更新，在雷达界有着较大的影响，但它仍不及麻省理工学院辐射实验室众多专家撰写的 28 本书的内容详尽。

我国的雷达事业，经过几代人 40 余年的努力，从无到有，从小到大，从弱到强，许多领域的技术已经进入了国际先进行列。总结这些成果，为我国今后的雷达事业发展做点贡献是我长期以来的心愿，在出版社的鼓励下，我和张光义院士倡导并担任主编，由中国电子科技集团公司负责组织编写了这套“雷达技术丛书”（以下简称“丛书”）。它是我国众多专家、学者长期从事雷达科研的经验总结，具有较好的系统性、新颖性和实用性。

雷达技术发展之快，使得传统的雷达观念、体系结构不断更新，在 20 世纪 50 年代的接收、发射、天线、显示典型的分机基础上，又发展到现在的雷达数据处理和信号处理分系统。本“丛书”就是按此体系进行了分册。随着微电子技术的发展，数字化还在不断前移，天线收发已经并继续不断引入了数字处理内容，信号和数据处理的界限越来越模糊，雷达体系正从流程型向网络型转变，由于目前其技术都尚未成熟，本“丛书”只在现有的体系中把这些新的内容进行了分别叙述。

“丛书”内容共分 3 个部分 16 分册：第一部分主要介绍雷达的目标特性和环境，第二部分介绍了雷达各组成部分的原理和设计，第三部分按典型应用雷达系统的分类对各雷达系统作了深入浅出的介绍。“丛书”各册著者不同，写作风格各异，但其内容的科学性和完整性是不容置疑的，通过对各分册结构和内容的审定，使各分册之间既具有较好的衔接性，又保持了各分册的独立性，读者可按需

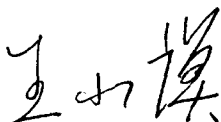
要读取其中一册或数册。希望此次出版的“丛书”能对从事雷达设计、制造的工程技术人员，雷达部队的干部、战士以及高校电子工程专业及相关专业的师生有所帮助。

“丛书”是从事雷达技术领域各项工作专家们集体智慧的结晶，是他们长期工作成果的总结与展示，专家们既要完成繁重的科研任务，又要在百忙中抽出时间保质保量地完成书稿，工作十分辛苦，在此，我代表“丛书”编委会向各分册作者和审稿专家表示深深的敬意！

“丛书”的出版，得到了中国电子科技集团公司、电子科学研究院、南京电子技术研究所、华东电子工程研究所等各参与单位领导的大力支持，得到了电子工业出版社领导和参与编辑们的积极推动，得到了“丛书”编辑部各同志的热情帮助，借此机会，一并表示衷心的感谢！

中国工程院院士

中国电子科技集团公司科技委副主任





## 前 言

1949年,美国辐射实验室 S.Silver 主编的丛书第十二卷《微波天线理论和设计》系统地总结了雷达诞生以来电磁辐射、天线基本理论和工程设计的成果,对雷达天线技术和研制的发展产生了划时代的影响。

五十多年来,天线和雷达都有惊人的发展,但基本原理没有重大突破。目前,天线的种类形态层出不穷,性能要求越来越高,应用领域不断扩展。现代高性能天线的综合是需要对多个相互矛盾的战技指标进行加权折中和全局优化,并以清晰的物理概念和先进的技术手段求解复杂电磁理论和工程设计的系统问题。军事装备和国民经济的迫切需求推动和牵引着天线理论和技术的日新月异地发展。

尽管每年都有浩如烟海的天线技术文献问世,其中不乏值得借鉴,以及学术和应用价值颇高的教科书、设计手册和专题讲座资料,但是还没有发现适合工程设计人员使用、内容新颖、篇幅适中和便于掌握的雷达天线设计专著。

本书是“雷达技术丛书”中的一册,拟满足我国雷达工程技术人员的需要,使之成为集先进性和实用性一体的雷达天线设计指导性工具书。由于雷达天线涉及的内容广泛,全书的篇幅限制又比较严格,因此本书的编排除了必备的基础知识和物理概念介绍外,均割舍了冗长的数学推导,而直接提供常用的公式和图表。

本书侧重于典型、常用和发展中的雷达天线原理、设计和应用。由于现在许多重大项目的设计计算已有专门的仿真软件,因此物理概念清晰、方案选择正确才显得十分重要。希望本书的基本概念和专业知识的对雷达天线工程项目的方案论证和设计研制有所帮助。

全书共10章。第1章由金林撰写;第2章由郑学誉撰写;第3章由束咸荣撰写;第4章由李建新撰写;第5章主要由郭先松、向广志撰写,其中5.5节由谭继兆撰写;第6、10章由张祖稷撰写;第7章由王盛举撰写;第8章由谭继兆撰写;第9章由张强撰写。全书由张祖稷和束咸荣统稿。所有作者均具有研制雷达天线系统十多年或更长的工程经历和经验,特别对所负责撰写章节的专业更是如此。

本书末附有本专业常用术语名称符号的对照表。列入表中的仅在本书首次出现时才加以说明,当读者从中间章节查阅本书遇到疑问时可参阅此表。书中物理

量在每次使用之后均有说明。少数常用物理量（如波束宽度和电波传播常数等），由于习惯的原因采纳了两种等效的标注。

丛书主编王小谟院士和张光义院士多次审阅了本书的目录、样章和初稿，对全书的编写原则、内容、结构等重大问题提出了指导性意见。本书特邀信息产业部第十四研究所副总工程师胡明春审核了第1~5章和第9章，第三十八研究所天馈部主任张玉梅审核了第6~8章和第10章。

丛书编辑部主任邱荣钦仔细审阅了本书部分初稿，提出许多宝贵意见。出版社高级策划编辑刘宪兰多次悉心指导本书写作。对于所有帮助本书写作和出版的同志，作者致以诚挚的敬意。

作者还要对十四所和三十八所的领导、科技委、保密委以及天馈部所给予本书写作的大力支持，对书中引用的文献资料的原作者致以深切的谢意。

编 著 者  
2005年8月

# 目 录

<b>第 1 章 概论</b> .....	(1)
1.1 雷达天线的发展.....	(2)
1.2 天线在雷达中的作用.....	(5)
1.3 天线基本理论.....	(8)
1.3.1 矢量位和波动方程.....	(8)
1.3.2 理想电偶极子.....	(9)
1.3.3 直线电流源辐射场.....	(13)
1.3.4 任意电流分布的辐射场.....	(15)
1.3.5 远场条件.....	(16)
1.3.6 辐射方向图.....	(17)
1.3.7 方向性系数和增益.....	(20)
1.3.8 输入阻抗、驻波及损耗.....	(21)
1.4 天线常用定理和原理.....	(23)
1.4.1 互易定理.....	(23)
1.4.2 对偶原理.....	(25)
1.4.3 镜像原理.....	(29)
1.4.4 等效源定理.....	(31)
参考文献.....	(31)
<b>第 2 章 辐射单元</b> .....	(33)
2.1 对称振子.....	(34)
2.1.1 方向图.....	(37)
2.1.2 阻抗.....	(39)
2.1.3 互耦.....	(42)
2.1.4 馈电.....	(44)
2.2 波导口辐射器.....	(46)
2.2.1 口面场.....	(47)
2.2.2 辐射场.....	(48)
2.3 波导裂缝.....	(51)
2.3.1 裂缝阻抗.....	(51)

2.3.2 有源阻抗 .....	(54)
2.4 微带贴片 .....	(56)
2.4.1 贴片材料 .....	(56)
2.4.2 分析方法 .....	(57)
2.4.3 品质因素、带宽和效率 .....	(70)
2.4.4 互耦 .....	(75)
2.4.5 公差 .....	(76)
参考文献 .....	(77)
<b>第3章 阵列天线</b> .....	<b>(81)</b>
3.1 引言 .....	(82)
3.2 一维阵列 .....	(82)
3.2.1 阵因子 .....	(83)
3.2.2 单元因子 .....	(85)
3.2.3 单元间距 .....	(86)
3.2.4 口径分布 .....	(86)
3.2.5 方向性 .....	(95)
3.3 二维阵列 .....	(97)
3.3.1 阵列分析 .....	(98)
3.3.2 口径分布 .....	(99)
3.3.3 方向图综合 .....	(105)
3.4 互耦 .....	(110)
3.4.1 单元间互耦 .....	(111)
3.4.2 逐元法 .....	(112)
3.4.3 周期结构理论 .....	(123)
3.4.4 互耦补偿 .....	(124)
参考文献 .....	(126)
<b>第4章 相控阵天线</b> .....	<b>(129)</b>
4.1 基本理论 .....	(130)
4.1.1 原理及特点 .....	(130)
4.1.2 天线类型 .....	(141)
4.1.3 发展趋势 .....	(143)
4.2 关键技术 .....	(145)
4.2.1 相位量化效应 .....	(145)
4.2.2 虚位技术 .....	(146)

4.2.3	零控的相位加权技术	(148)
4.2.4	波束展宽的相位加权技术	(150)
4.2.5	方向图赋形的相位加权技术	(152)
4.3	工程设计考虑	(154)
4.3.1	单元选择	(154)
4.3.2	扫描空域分析	(155)
4.3.3	宽角阻抗匹配	(159)
4.3.4	误差分析	(160)
4.3.5	天线带宽	(161)
4.4	有源相控阵天线	(162)
4.4.1	发展概况	(162)
4.4.2	失效分析	(163)
4.4.3	多阶振幅量化	(165)
4.4.4	工程设计考虑	(168)
	参考文献	(169)
<b>第 5 章</b>	<b>波导裂缝阵列天线</b>	<b>(177)</b>
5.1	引言	(178)
5.2	基本概念	(178)
5.2.1	驻波阵	(179)
5.2.2	行波阵	(180)
5.3	平板裂缝天线设计	(182)
5.3.1	天线结构	(182)
5.3.2	波导口径和裂缝间距选择	(184)
5.3.3	口径分布及子阵划分	(185)
5.3.4	裂缝特性参数	(185)
5.3.5	阵面裂缝设计	(188)
5.3.6	二阶效应考虑	(192)
5.4	波导窄边裂缝天线设计	(193)
5.4.1	基本理论	(194)
5.4.2	阵列设计	(199)
5.5	频率扫描波导裂缝阵列天线	(210)
5.5.1	简述	(210)
5.5.2	频扫平面阵列天线	(217)
5.5.3	应用	(218)

参考文献 .....	(219)
<b>第 6 章 反射面天线分析</b> .....	(221)
6.1 概述 .....	(222)
6.2 基本分析方法 .....	(223)
6.2.1 几何光学法 .....	(224)
6.2.2 几何绕射理论 .....	(230)
6.2.3 其他分析方法简述 .....	(235)
6.2.4 反射面天线综合 .....	(238)
6.3 口径辐射 .....	(242)
6.3.1 口径分布和辐射场的关系 .....	(243)
6.3.2 线源和矩形口径辐射 .....	(244)
6.3.3 圆形口径辐射 .....	(245)
6.3.4 口径相位分布的影响 .....	(247)
6.4 反射面天线特性分析 .....	(250)
6.4.1 方向图及其有关参数 .....	(250)
6.4.2 偏焦和扫描特性 .....	(253)
6.4.3 公差影响 .....	(259)
6.4.4 极化特性 .....	(262)
6.4.5 阻挡和后瓣 .....	(264)
6.4.6 其他因素或特性 .....	(266)
参考文献 .....	(267)
<b>第 7 章 反射面天线的设计和应用</b> .....	(269)
7.1 引言 .....	(270)
7.1.1 反射面天线设计的两个层次 .....	(270)
7.1.2 反射面天线可满足多种雷达的需要 .....	(271)
7.1.3 设计思路和设计过程 .....	(271)
7.2 简单抛物面天线 .....	(272)
7.2.1 抛物柱面天线 .....	(273)
7.2.2 圆口径抛物面天线 .....	(275)
7.2.3 椭圆口径抛物面天线 .....	(277)
7.2.4 典型馈源介绍 .....	(278)
7.3 双弯曲反射面天线 .....	(279)
7.3.1 概念和应用 .....	(279)
7.3.2 反射面生成 .....	(280)

7.3.3	远场方向图计算 .....	(282)
7.3.4	典型馈源介绍 .....	(285)
7.4	堆积多波束抛物面天线 .....	(289)
7.4.1	概念和应用 .....	(290)
7.4.2	设计考虑 .....	(291)
7.4.3	设计实例之一——正置多波束天线 .....	(293)
7.4.4	设计实例之二——偏置多波束天线 .....	(296)
7.5	卡塞格伦天线 .....	(298)
7.5.1	特点和应用 .....	(298)
7.5.2	基本设计方法 .....	(299)
7.5.3	单脉冲卡塞格伦天线 .....	(302)
7.5.4	整形双反射面天线 .....	(308)
7.5.5	典型馈源介绍 .....	(311)
7.6	其他反射面天线 .....	(312)
7.6.1	球反射面天线 .....	(313)
7.6.2	抛物桶反射面天线 .....	(314)
7.6.3	阵列馈电反射面天线 .....	(315)
	参考文献 .....	(317)
<b>第 8 章</b>	<b>天线测试技术</b> .....	<b>(319)</b>
8.1	概述 .....	(320)
8.1.1	历史回顾 .....	(320)
8.1.2	天线测试的概念和分类 .....	(320)
8.1.3	雷达天线测试的特点 .....	(321)
8.2	天线远场测试技术 .....	(322)
8.2.1	远场测试的一般考虑 .....	(322)
8.2.2	反射场法 .....	(325)
8.2.3	斜距场法 .....	(331)
8.2.4	高架场法 .....	(336)
8.2.5	远场增益测试 .....	(337)
8.2.6	测试方法的比较和选择 .....	(339)
8.2.7	自动化远场测试系统 .....	(340)
8.3	缩距场测试技术 .....	(344)
8.3.1	静区要求 .....	(344)
8.3.2	均匀平面波的形成 .....	(345)

8.3.3 缩距场暗室 .....	(347)
8.3.4 缩距场法的测试和应用 .....	(349)
8.4 近场扫描测试技术 .....	(349)
8.4.1 平面扫描近场测试技术 .....	(349)
8.4.2 测试系统实例 .....	(356)
8.4.3 近场暗室设计 .....	(363)
8.4.4 柱面近场扫描测试技术简介 .....	(367)
8.5 超低副瓣天线测试的考虑 .....	(368)
参考文献 .....	(370)
<b>第9章 天线罩</b> .....	<b>(373)</b>
9.1 引言 .....	(374)
9.1.1 历史与背景 .....	(374)
9.1.2 功能简述 .....	(375)
9.1.3 分类和选用原则 .....	(376)
9.2 技术参数 .....	(377)
9.3 天线罩的基本要求 .....	(378)
9.3.1 环境要求 .....	(379)
9.3.2 设计指标 .....	(380)
9.4 电性能设计技术 .....	(385)
9.4.1 多层介质平板设计 .....	(385)
9.4.2 壳体罩——天线的综合性能分析 .....	(396)
9.4.3 空间骨架天线罩设计 .....	(403)
参考文献 .....	(416)
<b>第10章 雷达天线技术的发展趋势</b> .....	<b>(419)</b>
10.1 引言 .....	(420)
10.2 多功能相控阵雷达天线 .....	(423)
10.3 超宽频带及多频段天线 .....	(426)
10.4 升空平台雷达天线 .....	(431)
10.5 低成本相控阵天线 .....	(432)
10.6 高可靠性、高生存力天线 .....	(436)
10.7 新概念、新材料、新工艺对天线发展的影响 .....	(437)
参考文献 .....	(442)
<b>附录A 常用文字符号的物理意义</b> .....	<b>(445)</b>



# 第1章

## 概 论

