

国防电子信息技术丛书

Phased Array Antenna Handbook
Second Edition

相控阵天线手册

(第二版)

[美] Robert J. Mailloux 著

南京电子技术研究所 译

罗 群 朱和平 周万幸 陈国海 总审
胡明春 陈志杰 林幼权 邢文革 总校



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

<http://www.phei.com.cn>

相控阵天线手册 (第二版)

Phased Array Antenna Handbook, Second Edition

相控阵天线手册(第二版)在第一版的基础上进行了全面的修订,是 Artech House 出版的经典著作。本书阐述了关于阵列天线和系统的最新和最具概括性的观点。借助350多个公式和270多幅插图的帮助,本书提供了透彻和详细的设计资料,使得实际工作者可以快速而自信地规划阵列系统。

本书第二版的新增内容包括

- 处理天线系统噪声的具体方法
- 天线方向图综合
- 子阵技术开发
- 阵列结构和组成的深入介绍
- 雷达与通信阵列系统方面的扩展

实践指导可以使专业人员

- 确定满足阵列系统规范的优化结构
- 评估增益、副瓣电平和噪声等基本天线参数
- 计算天线系统噪声
- 设计已知带宽的子阵几何图形

作者简介

Robert J. Mailloux 是一位已退休的美国空军实验室资深科学家,现为阿默斯特·马萨诸塞大学的研究教授。他具有哈佛大学应用物理专业的博士学位,是 IEEE 天线与传播协会的成员和前任会长。

ISBN 7-121-03570-7



9 787121 035708 >



责任编辑:周宏敏
责任美编:毛惠康

本书贴有激光防伪标志,凡没有防伪标志者,属盗版图书

ISBN 7-121-03570-7 定价:59.00元

国防电子信息技术丛书

相控阵天线手册

(第二版)

Phased Array Antenna Handbook

Second Edition

[美] Robert J. Mailloux 著

南京电子技术研究所 译

罗 群 朱和平 周万幸 陈国海 总审

胡明春 陈志杰 林幼权 邢文革 总校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

相控阵天线是目前许多军用雷达或卫星应用的主要天线方式。本书作者堪称天线界的元老，书中介绍了相控阵天线与系统的最新、最全面的知识，侧重工程应用，涵盖了许多设计细节，如天线系统噪声处理、天线方向图分析、子阵列天线技术开发以及关于天线结构的深入探讨等。书中也包括了雷达和通信技术的内容。本书适用于从事天线和雷达系统设计的技术人员。

© 2005 ARTECH HOUSE, INC.
685 Canton Street, Norwood, MA 02062.

本书中文翻译版专有出版权由 Artech House Inc. 授予电子工业出版社，未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字：01-2006-5248

图书在版编目 (CIP) 数据

相控阵天线手册：第2版 / (美) 梅洛克斯 (Mailloux, R. J.) 等著；南京电子技术研究所译。
北京：电子工业出版社，2007.1
(国防电子信息技术丛书)
书名原文：Phased Array Antenna Handbook, Second Edition
ISBN 7-121-03570-7

I. 相... II. ①梅... ②南... III. 相控阵天线 - 手册 IV. TN821-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 143368 号

责任编辑：周宏敏

印 刷：北京民族印刷厂

装 订：北京鼎盛东极装订有限公司

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

开 本：787 × 1092 1/16 印张：23.75 字数：608 千字

印 次：2007 年 1 月第 1 次印刷

定 价：59.00 元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题，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。邮购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlls@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。

国防电子信息技术丛书

● 国防电子基础

General Defense Electronics

雷达信号处理基础

信号谱分析

微波电路设计(第二版)

● 天线工程

Antenna Engineering

天线(第三版)

相控阵天线手册(第二版)

● 雷达系统

Radar System

合成孔径雷达——系统与信号处理

● 微波成像

Microwave Imaging

合成孔径雷达图像理解

合成孔径雷达成像——算法与实现

● 红外及光学技术

Infrared and Electro-Optical Technology

成像光谱——基本原理与应用

● 建模、仿真与测试

Modeling, Simulation and Testing

雷达系统分析与建模

● 卫星技术及应用

Satellite Technology and Application

全球定位系统——信号、测量与性能(第二版)

GPS原理与应用(第二版)

推荐出版及购书热线

Tel: 010-8825 4557

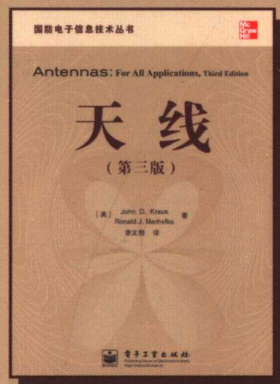
E-mail: malan@phei.com.cn

Fax: 010-8825 4560

试读结束 如需全本请在线购买:

www.ertongbook.com

相关图书



书号: 7-121-02977-4

定价: 128.00 元

本书是关于天线的经典著作，全面覆盖了有关天线的各方面内容。前 12 章介绍了天线的各种基础知识，后 12 章详细展开了这些内容。书中包括大量实例和习题，便于读者实践并掌握相关技术。全书图文并茂，更有助于读者的直观理解。书中加入了包括无线革命在内的许多全新的现代应用，对参考文献列表也进行了相应的更新。本书概念清晰，层次分明。无论读者需要的是仅介绍天线基础知识的一个学期的课程，还是计划更深入地进一步学习，本书都能够提供切实的帮助。

本书可作为相关专业高等院校的本科生和研究生的教学用书，以及工程技术人员的参考用书。

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail : dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

《相控阵天线手册》编委会

总 审 罗 群 朱和平 周万幸 陈国海
总 校 胡明春 陈志杰 林幼权 邢文革
技术顾问 张光义 贲 德 华海根 方能航

翻译委员会

主 任 倪嘉骊
副 主 任 杨小雷 金 林 蒋微波
委 员 朱宝明 邓大松 邵余红 陈文英 邵锡军 周 宁 马 磊 张 蕾
张春雁 宋于卿 汪 洋 毋美莲 周 琪 张军华 刘湘梅 王金元
陈绪元 吴道庆

校对委员会

主 任 马 林
副 主 任 周 苑 严 伟 王宏哲
委 员 史国庆 程 钧 何炳发 冯 华 刘 颖 陈俊宇 路金宝 李学良
吴 迺 王 震 吴明敏 童勤勋

编辑委员会

主 任 徐 进
副 主 任 陈 玲 陈勇华
委 员 李 明 陆 萍 蔡晓睿 王炳如 杨慰民 朱峥嵘 刘 芳 童文俊
汪 琳 史江瑾 林 璨 宋于卿 张文勇 谷 静 强素军 张 权
周建兴 吴勇斌 王兴江 陈 艳 黄晓宁 林 晶 于 勤 曹玉林

译校者序

为设计出先进的集多目标探测、跟踪、目标识别与成像及隐身性能等多种功能于一体的雷达系统，相控阵雷达体制是首选的方案。目前，不但在战略监视、跟踪雷达中，而且在三坐标警戒雷达、精密跟踪雷达、机载、舰载预警、火控雷达、隐形飞机用低后向反射率雷达中都广泛采用了相控阵雷达。此外，通信、广播、导航、电子对抗、气象探测等领域也越来越多地采用相控阵雷达。研制多种性能先进、多用途的相控阵雷达是当前我国雷达工业的工作重点，对我国国防和国民经济具有重大意义，为此迫切需要与相控阵天线工程设计有关的资料和书籍。

关于相控阵天线理论的书早有出版，可是从工程设计、应用方面论述相控阵天线的中外文献却为数不多，这本美国 Artech House 公司出版的由知名相控阵天线专家 R. J. Mailloux 编著的《相控阵天线手册》(2005 年第二版)正好弥补了这方面的空缺。书中收集了散见于杂志、会议录及多种书籍中有关相控阵天线工程技术方面的资料，内容丰富、广泛，对实际从事相控阵天线的科研、技术人员具有较大的参考价值，其详细内容可参见本书前言和目录。

为使更多技术人员能利用这本书中的资料，以促进我国相控阵天线事业的发展，我所各级部门和空军装备研究院雷达与电子对抗研究所给予了大力支持，由各情报研究室组织人员将其翻译，并请雷达、天线专家对译文从内容上和文字上进行了审校，以保证译文的正确性和完美性。经过细致的努力和辛勤的劳动，终于完成并交付出版，以此作为对相控阵天线事业的微薄贡献。但由于水平有限，译文中难免仍有差错和不足之处，敬请读者指正。

中国电子科技集团公司第十四研究所所长



第二版前言

本书第二版与第一版的基本结构相同,但第二版进行了一些更新,从而使其对某些情况的表达更加清晰明了,而且能够以对工程应用更有益的方式来讲述,第二版主要是反映自第一版于1994年问世以来在技术上的一些进展。本书的目的也是通过覆盖面广泛的“手册”形式来讲述阵列的工程应用问题,但它包含足够的细节,从而使有兴趣的读者可以重新推导出许多更为重要的结果,并从其数学推导中有所获益。第1章中的式(1.49)将阵列远场表示为单元方向图与时间上延迟的阵列因子的乘积。该方程并不表示任何实际的阵列,更确切地说,其实阵列技术的有趣方面是该方程以外的一些内容。这个方程甚至没有暗示制约条件一开始就是阵列技术发展的真实驱动力。

阵列技术不断发展的主要原因在于实际工程所施加的以下一些限制条件:费用、尺寸、重量、可制造性、极化的电磁问题、副瓣及增益要求、相位限制、幅度控制和可靠性。这些限制条件推动着整个技术的创新和进步。自本书第一版问世以来的11年间,这些激励因素使得印制天线、共形阵、固态T/R组件、时延器件、光学和数字波束形成以及各种更有效的新的计算和综合方法得到了更为广泛的应用。

第二版包括许多新的内容和大量新增的参考文献。第1章中加入了有关阵列控制元器件及整个控制选择的部分,目的在于突出阵列结构技术并解释由这些元器件所引起的一些设计局限性。这一章还包括修订过的有关阵列噪声计算的内容。自第一版问世以来的11年间,方向图的综合也得到了显著的发展,这主要是通过使用一些数值优化技术[比如神经网络综合、基因算法及合成退火(synthetic annealing)]实现的。尽管没有花太多篇幅对这些技术进行全面的讨论,但书中还是包含了使这些设计方法实用化的一些细节,原因在于它们既适用于阵列综合,又能使对各种限制条件的处理变得比较简便。关于综合的其他内容包括:通过改变阵列协方差矩阵来形成阵列方向图槽、关于阵列故障校正的讨论和新增的一些参考文献。第二版还增加了一些内容和文献来描述阵列所采用的各种新部件,包括微带线、带状线和宽带张大口单元。

第8章变动很大,其中增加了一些新内容,最重要的是强调了Skobelev及其同事们所开展的新的研究工作,他们对有限视场天线做出了很大的贡献。为了包含宽带阵列的时间延迟、重叠子阵的部分重叠内容以及非常规形状子阵的数据,该章还谈到了一些有关子阵的新的研究工作。

第一版前言

用传输线激励的任何一堆白铁罐都可称为天线。显然，实际上这样一堆铁罐不能算一个好的天线，所以非常有必要探索一些特性，以便用来区分一堆普通铁罐和能够成为好天线的铁罐。

这段引人入胜的话是我的朋友 Phil Blacksmith 从 MIT 辐射实验室系列丛书 *The Principles of Microwave Circuits* (《微波电路原理》)(C. G. Montgomery 等编, McGraw-Hill 于 1948 年出版) 的第 8 卷中发现的。对于试图论述当今天线阵列工程发展状况的一本书, 这是一个非常贴切的引言。天线技术的现在和未来与方向图控制程度有关, 其远非是简单地选择一堆或另一堆铁罐的问题。目前的天线阵列是天线技术和控制技术的一种结合, 它们合成了数以千计的天线的辐射来形成具有波束峰值方向(可通过电子控制)、极低副瓣电平及方向图零点(可以移动以抑制不希望方向上出现的辐射)的精确方向图。

因为一直在不断地变化, 所以天线技术始终能够引起人们的兴趣。在过去的许多年中, 天线技术一直在发展: 从在一个平面内扫描的频扫和电控阵列到使用数字系统的精确二坐标控制(包括单元间的相互作用)。自适应控制已被用来移动天线方向图零点以抑制干扰信号。即便是基本单元和传输线也发生了变化: 各种微带线、带状线和其他辐射器已替代了通过同轴线或波导馈电的传统的偶极子或缝隙。最后, 器件和自动化这两个领域的发展将使我们步入一个新的时代: 相控阵可实现自动化生产, 无需一片一片地组装, 而后者在以前是一种标准做法。制造和器件集成技术的革命将完全支配新型阵列结构, 它强调用基本新单元来实现单片制造, 并采用各种平面单片传输媒质。

通过采用数字处理或模拟器件, 未来的阵列将最终拥有时间延迟能力, 从而使得实现宽带性能成为可能。在许多情况下, 它们将具有可重构的孔径, 能够在许多频率上谐振, 或允许通过重构整个阵面来形成可实现不同功能的几个阵列。最后, 未来阵列必须可靠, 并应具备故障弱化能力, 所以它们可能会以一些传感器件来测量孔径上的性能状况, 并采用冗余电路来对故障器件、单元或子阵重新进行编程。

尽管还包含一些介绍性资料, 但本书的主要意图是为雷达和通信系统设计人员以及阵列设计师们提供收集在一起的设计数据。除了必须理解的基本内容外, 一些推导性的细节往往被省略了。这一点在有关综合内容的章节中尤为突出, 在那些章节中, 其主题内容在其他文献中已有详细的推导。此外, 本书只是简单地描述了电磁分析的一些细节, 尽管这一主题是天线研究的核心。该主题是值得进一步详细讨论的, 但不是在这样一本内容宽泛的书中讨论。

第 1 章是从希望在系统中使用阵列的人们的角度来写的。本章强调阵列选择问题, 重点放在那些决定阵列的基本可测量特性的参数上, 这些参数是增益、波束宽度、带宽、尺寸、极化和栅瓣辐射。本章还包含一些有助于折中选择所谓“有源”阵列(每个单元有放大器)和“无源”阵列(有单个的功率源)的信息。对由于相位-时间延迟控制、传输线损耗以及容差效应引起的阵列性能限制问题也进行了讨论。最后还讨论了用来减少阵列(在有限空间

的扇区内扫描)控制数量的特殊技术以及通过时间延迟使阵列天线获得宽带性能的方法。本章具有的“系统层面”介绍性的简化结构决定了其不可避免地经常引用后面章节(包含更详细的阵列设计方法)的内容。

第2章及本书其他所有章节论述了天线设计者需要掌握的知识,其中包括辐射积分的基本定义及阵列设计中的许多重要问题。该章对单元方向图效应及互耦进行了定性分析,相关的更详细的内容将在第6章中阐述。该章的主题内容是天线方向图及其方向性特性。此外,第2章还讲述了几种特殊类型的阵列,包括端射扫描阵列和薄阵列。

第3章对阵列综合进行了简单的分析,并列出了产生低副瓣或赋形天线方向图的大量技术的基本公式和参考文献。该章包括对方向图优化技术的讨论,比如自适应阵列天线技术。第4章分析了非平面阵列。第5章描述了各种阵列单元、相关的传输线及阵列结构。

第6章和第7章对制约阵列天线性能的几个因素进行了研究。第6章介绍了阵列单元间互耦的一些影响。这种相互作用改变了有源阵单元的方向图,并使阻抗随扫描发生很大变化。这一复杂内容依托两个附录来进行分析。第7章描述了由于阵列单元的随机相位和幅度误差以及阵列上的相位和幅度量化的方向图失真。

第8章(最后一章)对用于3种专用阵列的技术进行了归纳,它们是多波束系统、有限扇区扫描阵列及宽带时延馈电阵列。一种既能满足这些特殊需要又能最大限度地降低费用的重要技术已被研究成功。在这一技术基础上,通过采用扫描阵列以及微波准光学系统或先进的子阵方法已开发出了人们支付得起的高增益电子扫描系统。

致 谢

在完成第二版时，我又想起了致使本书第一版问世以及使我对该研究领域产生热情的巨大推动力。其中一些动力来源于我就读于哈佛大学和 Carl Sletten 大学时的导师 R. W. P. King 和 T. T. Wu 以及在 Air Force Cambridge Research Laboratory 的两位已故的同事 Philipp Blacksmith 和 Hans Zucker，他们中间有一位善于从实用角度进行研究，另一位看问题比较深远。我还要感谢我在 Air Force 的一些同事：Allan Schell、Jay Schindler、Peter Franchi、Hans Steyskal、Jeff Herd、John McIlvenna、Boris Tomasic 以及 Arcon 公司的 Ed Cohen。Hans Steyskal、Jeff Herd、Harvey Schuman 及 Marat Davidovitz 对第二版的问世提供了很多帮助。

非常感谢 Livio Poles 和 David Curtis，他们对该技术的一些新的重要领域具有敏锐的洞察力，并且在 Air Force Research Laboratory 建立了一个很有价值的研究项目，此外还要感谢 Arje Nachman 和 Air Force Office of Scientific Research 在天线研究的众多基础领域方面所提供的支持。

再次特别感谢我妻子 Marlene 的支持，她又一次容忍了我随处乱放参考书和笔记本所造成的杂乱；感谢我的女儿 Patrice、Julie 和 Denise 给予我的爱和鼓励。

目 录

第 1 章 雷达和通信系统中的相控阵	1
1.1 引言	1
1.1.1 雷达和通信天线的系统要求	1
1.2 雷达和通信系统的阵列特性	9
1.2.1 相控阵理论的基本结果	9
1.2.2 阵列尺寸的确定	26
1.2.3 时延补偿	32
1.3 阵列结构和控制技术	33
1.3.1 阵列孔径	33
1.3.2 馈电结构	35
1.3.3 波束形成方式与相关结构	39
1.3.4 用于阵列控制的射频部件	41
参考文献	44
第 2 章 线阵和平面阵的方向图特性	47
2.1 阵列分析	47
2.1.1 辐射积分	47
2.1.2 单元方向图效应、互耦和根据单元方向图计算的增益	50
2.2 线阵和平面阵特性	56
2.2.1 线阵特性	56
2.2.2 平面阵特性	62
2.3 至端射方向的扫描	65
2.4 稀疏阵	68
2.4.1 密度锥削阵的平均方向图	69
2.4.2 变稀阵的概率分析	71
2.4.3 量化幅度分布的变稀阵	74
参考文献	79
第 3 章 线阵和平面阵方向图综合	82
3.1 具有可分离分布的线阵和平面阵	82
3.1.1 傅里叶变换法	82
3.1.2 谢昆诺夫型综合法	83
3.1.3 Woodward 综合法	85

3.1.4	切比雪夫综合法	88
3.1.5	泰勒线源综合	92
3.1.6	修正的 $\sin \pi z/\pi z$ 方向图	98
3.1.7	Bayliss 线源差方向图	101
3.1.8	以泰勒方向图为基础的综合方法: Elliott 修正的泰勒方向图和 Elliott 的迭代方法	103
3.1.9	通过根匹配和迭代使连续口径照射离散化	108
3.1.10	有复数根方向图的综合与功率方向图的综合	109
3.2	圆平面阵列	119
3.2.1	泰勒圆阵列综合	119
3.2.2	圆形阵列的 Bayliss 差方向图	121
3.3	方向图优化方法/自适应阵列	122
3.3.1	方向图优化	122
3.3.2	自适应阵列	124
3.3.3	副瓣对消器、相控阵和多波束阵列综合的 S/N 优化	126
3.3.4	用做副瓣对消器	129
3.3.5	全自适应相控阵或多波束阵列	131
3.3.6	宽带自适应控制	133
3.4	以协方差矩阵求逆的通用方向图	136
3.5	利用被测量的单元方向图来综合方向图	138
	参考文献	141
第 4 章	非平面阵列天线的方向图	146
4.1	引言	146
4.1.1	一般共形阵的分析方法	147
4.2	圆和圆柱阵列的方向图	148
4.2.1	圆阵列的相位模激励	150
4.2.2	方向图和仰角扫描	153
4.2.3	定向单元圆阵列和圆柱阵列	155
4.2.4	导体圆柱面上的扇形阵	156
4.3	球形阵列和半球形阵列	174
4.4	截顶圆锥阵列	175
	参考文献	176
第 5 章	相控阵天线的单元	180
5.1	阵列单元	180
5.2	自由空间中无限小单元的极化特性	180
5.3	电流(线)天线单元	182
5.3.1	具有非圆横截面的线结构等效半径	182
5.3.2	偶极子和单极子	182
5.3.3	偶极子和单极子的专用馈电装置	188

5.3.4	偏心馈电偶极子	190
5.3.5	套筒偶极子和单极子	190
5.3.6	蝴蝶结形偶极子和其他宽带偶极子	192
5.3.7	折叠偶极子	192
5.3.8	微带偶极子	195
5.3.9	其他线天线结构	196
5.3.10	宽带渐张切口、Vivaldi 和背腔天线	197
5.4	口径天线单元	200
5.4.1	缝隙单元	200
5.4.2	波导辐射器	202
5.4.3	脊形波导单元	204
5.4.4	喇叭单元	205
5.5	微带贴片单元	206
5.5.1	微带贴片	206
5.5.2	Collings 平衡馈电辐射器	212
5.6	其他可用的传输线单元	213
5.7	一维扫描的单元和行(列)阵	214
5.7.1	波导缝隙阵线源的单元	214
5.7.2	印制电路串馈阵	217
5.8	极化分集用的单元和极化器	218
	参考文献	222
第 6 章	单元波瓣和互阻抗效应概述	231
6.1	互阻抗效应	231
6.2	有限及无限阵列中辐射和耦合的积分方程表述	232
6.2.1	有限阵列的公式和结果	232
6.2.2	无限阵列的表述公式和结果	236
6.3	阵列盲区和表面波	242
6.4	性能良好的无限扫描阵列的阻抗和单元波瓣	251
6.5	半无限和有限阵列	260
6.6	宽角和宽带扫描阻抗匹配	261
6.6.1	减小单元间距	261
6.6.2	介质 WAIM 薄板	261
6.7	非平板表面的互耦现象	263
6.8	评估相控阵扫描特性的小阵列和波导模拟器	267
6.8.1	几种有用的模拟器	270
	参考文献	271
第 7 章	阵列误差的影响	278
7.1	引言	278