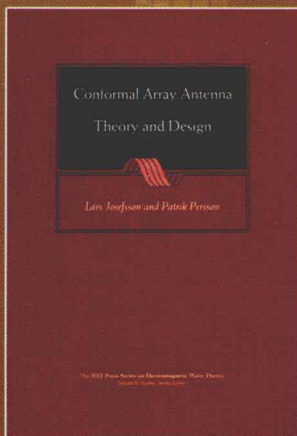


国外电子与通信教材系列



# 共形阵列天线 理论与应用

Conformal Array Antenna Theory and Design



[瑞典] Lars Josefsson 著  
Patrik Persson

肖绍球 刘元柱 宋银锁 译



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

国外电子与通信教材系列

# 共形阵列天线理论与应用

Conformal Array Antenna Theory and Design

[瑞典] Lars Josefsson 著  
Patrik Persson

肖绍球 刘元柱 宋银锁 译

电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是直至目前为数不多的共形天线理论与技术领域的专著。全书共 11 章,从基础理论到工程应用、从简单的圆柱共形天线到复杂的双曲面共形天线,由简入深、循序渐进地阐述了共形天线的基本理论及其分析方法,同时还介绍了一些共形天线阵列分析设计中的经典范例。内容包括:共形天线概念与共形阵列原理、共形阵列分析设计的理论方法、圆柱及单曲面/双曲面上共形天线、共形阵列天线的电磁特性及其机械安装问题、共形阵列波束形成网络及其方向图综合方法,最后讨论了共形阵列的散射及其雷达散射截面的缩减问题。

全书取材新颖、内容丰富,可供天线及系统工程领域的专家学者参阅,也可作为学习高等天线的研究生教材或教学参考书。

Conformal Array Antenna Theory and Design

ISBN: 978-0-471-46584-3

Lars Josefsson, Patrik Persson

Original English Edition Copyright © 2006 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved.

This translation published under license.

Authorized Translation of the Edition published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the back cover are unauthorized and illegal.

本书中文简体版专有出版权由 John Wiley & Sons, Inc. 授予电子工业出版社。专有出版权受法律保护。

本书封底贴有 John Wiley & Sons, Inc. 防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2011-3687

### 图书在版编目(CIP)数据

共形阵列天线理论与应用/(瑞典)约瑟夫森(Josefsson, L.), (瑞典)珀森(Persson, P.)著;肖绍球,刘元柱,宋银锁译. —北京:电子工业出版社, 2012. 3

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Conformal Array Antenna Theory and Design

ISBN 978-7-121-15483-6

I. ①共… II. ①约… ②珀… ③肖… ④刘… ⑤宋… III. ①共形天线: 阵列天线-高等学校-教材 IV. ①TN82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 259293 号

策划编辑: 冯小贝

责任编辑: 周宏敏

印 刷: 北京丰源印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

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: 19 字数: 537 千字

印 次: 2012 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 55.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

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

服务热线:(010)88258888。

## 序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授  
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

## 出版说明

进入 21 世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入 WTO 后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在 2000 年至 2001 年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了 40 余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

## 教材出版委员会

主任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐	北京邮电大学校长、教授、博士生导师
	杨千里	总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事、博士生导师
委员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 国务院学位委员会学科评议组成员
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员 中国电子学会常务理事
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘彩	中国通信学会副理事长兼秘书长，教授级高级工程师 信息产业部通信科技委副主任
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员
	张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究学院院长
	范平志	西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长

## 译 者 序

本书是 Lars Josefsson 博士和 Patrik Persson 博士合著并于 2002 年由 IEEE 出版社出版的 *Conformal Array Antenna Theory and Design* 一书的中译本。两位作者是天线领域的著名专家,在共形天线理论与技术领域具有很高的造诣,Lars Josefsson 博士也因在共形天线领域的突出贡献被吸纳为 IEEE 会员(IEEE Fellow)。原著是目前为数极少的较为系统阐述共形天线理论与技术的专著<sup>①</sup>,是业界和相关学术机构高度合作而获得的非常难得的成果。

近年来,译者们从事了一系列共形天线及其阵列领域的研究工作,并从该书原著中得到了很多帮助,因此萌发了将其译成中文的想法。经过我们大家长达一年多的共同努力,终于完成了相关翻译工作,从而有机会将其介绍给更多的中文读者,为此我们感到非常荣幸和欣慰。

本书一方面较为系统地阐述了共形天线基本理论,同时也介绍了一些共形天线阵列分析设计中的实际经验。我们希望该书能成为天线和系统工程师的一个有用参考书,使其更好地理解 and 设计这个神奇的天线。书中大量采用了图表图解,使得阅读理解更为容易,因此我们也希望该书能带领那些即将进入共形天线研究领域的年轻学者走进共形天线这一神奇而有趣的领域。由此看来,本书可作为工程研发人员的参考书籍,也可作为学习高等天线及天线系统的研究生课程教材或教学参考书。

本书由电子科技大学的肖绍球教授和微网社区创始人刘元柱博士组织微网社区(<http://www.mwtee.com>)的专家学者合译而成。南昌大学罗斌副教授翻译了本书的第 1 章和第 5 章;尹昌刚翻译了本书第 2 章;张卫兵翻译了本书第 3 章;洛阳 014 中心雷达技术研究所的陈智慧博士翻译了本书第 4 章;肖绍球教授翻译了本书第 6 章;赖生建博士、唐明春博士翻译了本书第 7 章;洛阳 014 中心雷达技术研究所耿江东博士翻译了本书第 8 章;洛阳 014 中心雷达技术研究所天线/天线罩首席专家宋银锁翻译了本书第 9 章;刘元柱博士翻译了本书第 10 章、前言及附录;北京航天长征飞行器研究所的研究员张生俊翻译了本书第 11 章。稿件由肖绍球、刘元柱、宋银锁进行了统稿和校对。需要说明的是,本书中的变量和函数均采用了英文原著的字体。在翻译过程中得到微网社区、电子科技大学应用物理研究所计算电磁学及其应用教研室以及洛阳 014 中心雷达技术研究所天线专业室的帮助,在此谨表谢意。

译者虽然在共形天线领域进行了多年的研究,但由于译者们才疏学浅,加之时间仓促,译稿难免存在诸如译词不当及疏误之处,敬请读者不吝指正。

译 者  
2011 年 6 月

<sup>①</sup> 据译者所知,是第一部该领域的专著。——译者注

## 关于作者

Lars Josefsson, 1939 年出生于瑞典诺尔雪平港, 1962 年毕业于斯德哥尔摩皇家理工学院并获得科学工程硕士学位, 1978 年获哥德堡查尔摩斯工学院博士学位。1981 年获马库斯瓦伦堡基金会资助, 次年获傅尔布莱特奖学金, 1982 ~ 1983 年期间, 于美国加州大学洛杉矶分校作客座研究员。1983 ~ 1986 年期间, 在查默斯大学任天线技术领域兼职教授, 1996 ~ 2003 年, 在斯德哥尔摩皇家理工学院任相同职位, 现又回到查默斯大学任信号与系统学院兼职教授。

Lars Josefsson 在瑞典默恩达尔爱立信微波系统公司工作四十余年, 专职负责新天线技术和系统引进、内部研发项目以及和天线相关的教学工作。2001 年被任命为高级天线系统专家, 2004 年因其对几代机载雷达天线发展的贡献, 瑞典航空学会授予他图林银奖。1999 年当选为 IEEE 会士, 现为《IEEE 天线与传播学报》(*IEEE Transactions on Antennas and Propagation*) 副主编。

Patrik Persson, 1973 年出生于瑞典斯德哥尔摩。于 1997 年和 2002 年分别获斯德哥尔摩皇家理工学院科学工程硕士学位和电磁理论领域博士学位。现为皇家理工学院电磁理论部助理研究员, 主要研究方向为共形阵列分析设计工具的发展。

2003 年 Patrik Persson 担任第三届欧洲共形天线研讨会副主席, 2005 年是第四届欧洲共形天线研讨会主席及组织者。他当选为欧洲第六届架构规划委员会天线高级研究中心合作伙伴, 尤其是共形天线项目。

2000 ~ 2001 年, 他以访问学者身份在哥伦比亚的俄亥俄州立大学电子科学实验室进行了长达六个月的研究, 主攻共形天线的高频模型发展。2002 年 2 月 ~ 2004 年 4 月, 以客座教授的身份任职于瑞典林雪平大学理论物理部物理学与测量技术系, 期间主要研究多平面共形天线。

2002 年, Patrik Persson 获 IEEE 颁发的河斯图尔特金书奖。



# 目 录

第1章 引言	1
1.1 共形天线的定义	1
1.2 为什么是共面天线	1
1.3 历史	3
1.4 金属天线罩	6
1.5 声呐阵	6
参考文献	6
第2章 圆形阵列理论	9
2.1 引言	9
2.2 基本理论	10
2.2.1 线性阵列	10
2.2.2 圆形阵列	11
2.3 相模理论	14
2.3.1 引言	14
2.3.2 离散单元	17
2.3.3 定向单元	19
2.4 全向方向图的波纹问题	22
2.4.1 各向同性辐射器	22
2.4.2 高次相模	24
2.4.3 定向辐射器	25
2.5 仰角方向图	27
2.6 聚焦波束方向图	28
参考文献	30
第3章 共形天线的形状	31
3.1 引言	31
3.2 360°覆盖	33
3.2.1 使用平面表面实现360°覆盖	33
3.2.2 使用曲面实现360°覆盖	34
3.3 半球覆盖	35
3.3.1 引言	35
3.3.2 使用平面表面实现半球覆盖	37
3.3.3 半球面	37
3.3.4 圆锥面	37
3.3.5 椭球面	39
3.3.6 抛物面	39

3.3.7 各种形状的对比 .....	41
3.4 多平面表面 .....	42
参考文献 .....	44
<b>第4章 分析方法 .....</b>	<b>46</b>
4.1 引言 .....	46
4.2 问题的提出 .....	47
4.3 电小表面分析方法 .....	48
4.3.1 引言 .....	48
4.3.2 模式法 .....	48
4.3.3 积分方程和矩量法 .....	50
4.3.4 时域有限差分法 .....	51
4.3.5 有限元法(FEM) .....	54
4.4 电大表面分析法 .....	56
4.4.1 介绍 .....	56
4.4.2 PEC 表面高频分析方法 .....	57
4.4.3 电介质涂层表面的高频方法 .....	58
4.5 实例 .....	60
4.5.1 引言 .....	60
4.5.2 缝隙天线 .....	60
4.5.3 微带贴片天线 .....	61
4.6 算法比较 .....	63
附录4A 射线理论介绍 .....	64
4A.1 Waston 变换 .....	64
4A.2 Fock 替代 .....	65
4A.3 SDP 积分 .....	65
4A.4 表面波 .....	66
4A.5 普适性 .....	67
参考文献 .....	68
<b>第5章 曲面上的测地线 .....</b>	<b>81</b>
5.1 引言 .....	81
5.1.1 表面及相关参数的定义 .....	82
5.1.2 测地线方程 .....	83
5.1.3 测地线方程求解和测地线的存在性 .....	84
5.2 单曲面 .....	86
5.3 双曲面 .....	88
5.3.1 引言 .....	88
5.3.2 锥面 .....	89
5.3.3 旋转对称双曲面 .....	90
5.3.4 双曲面测地线的特性 .....	91
5.3.5 测地线分裂 .....	93

5.4	任意形状表面 .....	97
5.4.1	混合表面 .....	97
5.4.2	解析描述的表面 .....	97
	参考文献 .....	98
<b>第6章</b>	<b>单曲面天线 .....</b>	<b>100</b>
6.1	引言 .....	100
6.2	圆柱面上的缝隙天线 .....	101
6.2.1	引言 .....	101
6.2.2	理论 .....	101
6.2.3	互耦 .....	102
6.2.4	辐射特性 .....	116
6.3	一般凸柱面上的缝隙天线 .....	126
6.3.1	引言 .....	126
6.3.2	互耦 .....	126
6.3.3	辐射特性 .....	128
6.4	多面体柱面缝隙天线 .....	133
6.4.1	引言 .....	133
6.4.2	互耦 .....	134
6.4.3	辐射特性 .....	135
6.5	介质涂层圆柱缝隙天线 .....	136
6.5.1	引言 .....	136
6.5.2	互耦 .....	136
6.5.3	辐射特性 .....	141
6.6	介质涂覆圆柱微带贴片天线 .....	145
6.6.1	引言 .....	145
6.6.2	理论 .....	146
6.6.3	互耦 .....	146
6.6.4	辐射特性 .....	150
6.7	圆锥 .....	153
6.7.1	引言 .....	153
6.7.2	互耦 .....	154
6.7.3	辐射特性 .....	157
	参考文献 .....	161
<b>第7章</b>	<b>双曲面天线 .....</b>	<b>167</b>
7.1	引言 .....	167
7.2	缝隙天线 .....	168
7.2.1	引言 .....	168
7.2.2	互耦 .....	169
7.2.3	辐射特性 .....	179
7.3	微带贴片天线 .....	181

7.3.1	引言	181
7.3.2	互耦	181
7.3.3	辐射特性	184
	参考文献	186
<b>第8章</b>	<b>共形阵列特性</b>	<b>189</b>
8.1	引言	189
8.2	机械因素	189
8.2.1	阵列形状	189
8.2.2	曲线上的单元分布	190
8.2.3	多平面问题解	190
8.2.4	瓦片结构	191
8.2.5	静应力和动态应力	192
8.2.6	其他电磁因素	193
8.3	辐射方向图	193
8.3.1	引言	193
8.3.2	栅瓣	194
8.3.3	扫描-恒定方向图	197
8.3.4	相位-扫描方向图	197
8.3.5	微带阵列的简单缝隙模型	199
8.4	阵列阻抗	201
8.4.1	引言	201
8.4.2	相模阻抗	203
8.5	极化	206
8.5.1	极化定义	206
8.5.2	圆柱阵列	207
8.5.3	双曲面阵列中的极化	209
8.5.4	极化控制	213
8.6	精选共形阵列特性	215
8.6.1	近平面阵列	215
8.6.2	圆形阵列	215
8.6.3	圆柱阵列	215
8.6.4	圆锥阵列	216
8.6.5	球形阵列	217
8.6.6	抛物面阵列	218
8.6.7	椭圆阵列	220
8.6.8	其他形状	220
	参考文献	221
<b>第9章</b>	<b>波束形成</b>	<b>226</b>
9.1	引言	226
9.2	正交波束简介	226

9.3	模拟馈电系统 .....	227
9.3.1	向量转移矩阵系统 .....	227
9.3.2	开关矩阵系统 .....	227
9.3.3	巴特勒矩阵馈电系统 .....	230
9.3.4	RF 透镜馈电系统 .....	232
9.4	数字波束形成 .....	237
9.5	自适应波束形成 .....	238
9.5.1	引言 .....	238
9.5.2	样本矩阵求逆法 .....	239
9.5.3	使用环形阵列的自适应波束形成仿真 .....	239
9.6	馈电系统摘要 .....	241
	参考文献 .....	242
<b>第 10 章</b>	<b>共形阵列方向图综合 .....</b>	<b>247</b>
10.1	引言 .....	247
10.2	形状优化 .....	248
10.3	环形阵列的傅里叶法 .....	248
10.4	道尔夫-切比雪夫方向图综合 .....	249
10.4.1	全向单元 .....	249
10.4.2	定向单元 .....	252
10.5	口径投影法 .....	253
10.6	交错投影法 .....	253
10.7	自适应阵列法 .....	254
10.8	最小均方法(LMS) .....	255
10.9	极化方向图综合 .....	256
10.10	其他优化方法 .....	257
10.11	计入互耦的综合实例 .....	257
10.12	综合方法对比 .....	262
	参考文献 .....	262
<b>第 11 章</b>	<b>共形阵列天线散射 .....</b>	<b>265</b>
11.1	引言 .....	265
11.2	定义 .....	265
11.3	RCS 分析 .....	266
11.3.1	概述 .....	266
11.3.2	导电圆柱上的阵列分析方法 .....	266
11.3.3	介质涂覆导电圆柱上的阵列分析方法 .....	268
11.4	圆柱阵列 .....	268
11.4.1	分析与实验——矩形网格 .....	268
11.4.2	高阶波导模式 .....	271
11.4.3	三角形网格 .....	272
11.4.4	由 PEC 共形阵列分析得出的结论 .....	274

11.5 介质涂覆圆柱阵列 .....	274
11.5.1 有介质涂层的单个单元 .....	275
11.5.2 介质涂覆阵列 .....	276
11.6 辐射与散射的权衡 .....	278
11.6.1 引言 .....	278
11.6.2 单个单元结果 .....	280
11.6.3 阵列结果 .....	282
11.7 讨论 .....	284
参考文献 .....	285

# 第1章 引言

## 1.1 共形天线的定义

共形天线是一种和物体外形保持一致的天线。在我们描述的实例中,它要和事先规定的物体外形共形。这些形状可以是飞机、高速列车或其他交通工具上的某些部位。研究目的是要建立一种能够和物体结构相融合,而又不会带来额外负担的天线。当然还包括天线集成时,在诸如城市等环境下天线工作性能较少地被干扰,天线不易被人眼所发现。在现代军事防御系统中,一个典型的额外要求就是,当天线被敌方雷达发射机发射的微波照射时不产生后向散射(即天线具有隐形特性)。

在 IEEE 标准定义中(IEEE Std 145—1993),给出了天线术语的如下定义:

2.74 共形天线[共形阵列]:和物体外形保持一致的天线或天线阵,这里的物体外形是由非电气因素决定的,例如空气动力学因素或流体力学因素。

2.75 共形阵:参见“共形天线”。

严格来说,此定义也适用于平面阵,只要这种平面形状不是由电气因素决定的,但这种情况一般并不常见。共形天线通常是圆柱状、球状或其他形状,天线辐射单元被安装或集成到光滑的弯曲表面上。当然,共形天线也存在多种变体,例如由若干个平面拼接而成的近似光滑表面,这是一种比较实际的解决方法,以简化辐射器及有源、无源馈电装置的组装。

## 1.2 为什么是共面天线

一架现代飞机,其机身上伸出有多种天线,如导航天线、各种通信系统用天线、机控降落系统天线、雷达测高计天线等等(见图 1.1)。可能有 20 多种甚至更多不同的天线(据报道,某典型军用飞机上有多达 70 种天线[Schneider et al.,2001]),这些天线对飞机的飞行造成不可忽视的阻力及增加更多油耗。迫切需要将把这些天线集成到飞机外壳中[Wingert & Howard,1996]。如果天线设计带宽足够宽,应该可以将若干天线功能用同一副天线来实现。为实现如卫星通信和军用车载监视雷达功能所必需的大型孔隙,对共形天线提出了更为迫切的需求。

一个集成在飞机机翼前缘的典型共形实验天线阵[Kanno et al.,1996]如图 1.2 所示,这个 X 波段阵列的形状和近似椭圆的机翼前缘横截面保持一致。图 1.3 给出了一个更为贴近实际机翼形状的 C 波段阵列(试比较文献[Steyskal,2002])。

辐射单元安装在柱体、球体或锥体等表面上,且形状不是由空气动力学或类似原因决定的阵列天线一般也通常被称为共形阵。这些天线的形状可能是由一些特定的电磁需求决定,如天线波束形状和(或)角度覆盖范围等。把它们称为共形阵列天线和上述提到的 IEEE 定义并不严格一致,但是我们还是遵循这些当今已经约定俗成的说法。

柱面阵列或环形阵列都具有 360°覆盖范围的潜力,可以使用全向波束、多波束,或者是一个可以在 360°范围内调整的窄波束实现。典型应用就是移动通信系统中的基站天线。如今,通用解决方案是使用 3 个独立天线,每个天线覆盖 120°区域;但可以使用一个柱面阵列来替代它们,使其结构更紧凑、成本更低。

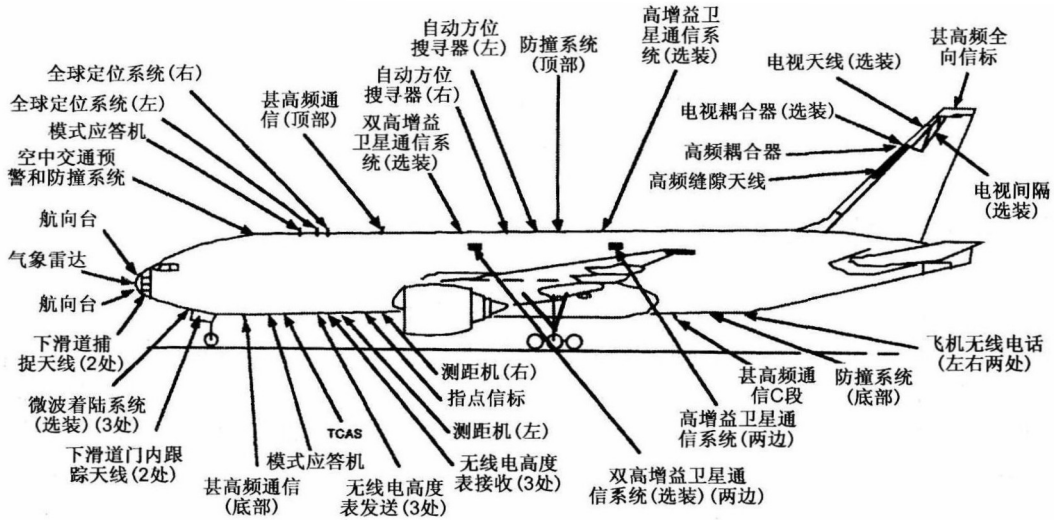


图 1.1 一架现代飞机:至少有 20~30 副天线从其机身上伸出[图片取自文献 [Hopkins et al.,1997],美国航空航天学会授权重印]

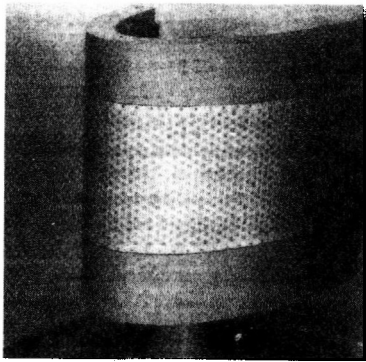


图 1.2 整合到飞机机翼上的共形阵列天线 [kanno et al.,1996]

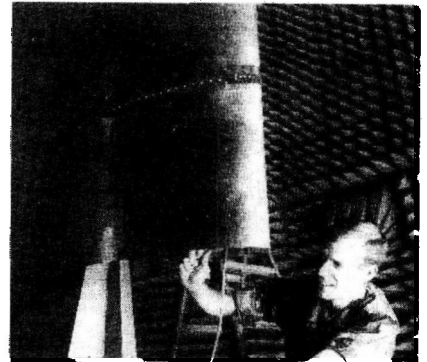


图 1.3 风洞试验阶段,与机翼剖面共形的微带阵列 [美国空军研究实验室授权/美国汉斯科姆空军基地,天线技术部]

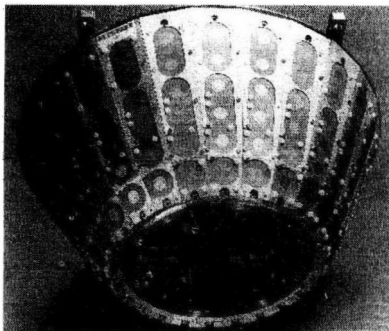


图 1.4 用于卫星数据通信的圆锥共形阵列天线

另一个天线形状由覆盖范围决定的例子如图 1.4 所示。这是一个星载圆锥阵列(因此,这里不用考虑阻力问题<sup>①</sup>。)

有关对共形阵列支持与否的争论我们可以详细讨论一下,由于应用和需求的多变性致使其结论也不尽相同。暂时先不考虑这些,为了能进一步展开讨论,我们在 Guy [1999]、Watkins [2001] 及其他人思考的基础上,将其归纳于表 1.1 中。

① 太空中运行的卫星不用考虑空气阻力问题。——译者注



表 1.1 平面阵与共形阵的比较

参数	平面阵	共形阵
技术	成熟	尚未完全建立
分析工具	有	研制中
波束控制	幅度固定,只需控制相位	需要控制幅度和相位,因而更复杂
极化	可以采用单极化(通常更希望双极化)	需要极化控制
增益	随扫描范围提高而下降	可控,取决于形状
频率带宽	典型情况下 20%	可能获得比平面阵更宽的带宽
角覆盖	受限于大约 $\pm 60^\circ$	很宽,半球状
散射截面	大的反射散射截面	小于平面阵
安装平台	平面形状,受限于天线的展开面积	结构集成化,留下额外空间,无拖曳
天线罩	有相差效应	无传统天线罩,无视差
电气封装	著名的多层 PCB 解决方案	若存在大弯曲则尺寸受限,可能采用多个小平面

### 1.3 历史

从第二次世界大战一直到 1975 年左右,相控阵天线一直都是一个非常活跃的研究领域。在这段时期,人们做了很多先驱性的工作,其中也包括了共形天线方面的研究。然而,直到人们有了给天线阵馈电和切换的必要手段之后,电扫相控阵天线才得到广泛应用。集成电路(IC)技术,包括单片微波集成电路(MMIC)技术填补了这一技术空白,甚至能为非常复杂的阵列天线提供可靠、低成本的技术解决方案。另一个重要因素则是数字处理器的发展,能够处理相控阵系统中产生的不断增加的海量信息率。数字处理技术使人们在相控阵天线系统上的花费更经济,即用户的花费物有所值。

一般对相控阵而言上述情况属实,当然对共形阵天线也同样适用,但是在共形阵领域,电磁建模和设计技巧还有待进一步发展。在过去的 10~20 年间,数值技术、电磁分析方法以及对弯曲表面上天线的理解都有所进展。在高频技术领域也取得重要的进展,包括对表面波绕射的分析以及在弯曲表面上辐射源的建模。

共形阵的起源至少可追溯到 20 世纪 30 年代,Chireix [1936] 分析了一个排列成圆形的环形偶极子阵列系统。后来,到 50 年代,出版了一些关于这个课题的出版物,如文献 [Knudsen, 1953a, b]。由于环形阵具有旋转对称性,这使其很有吸引力。适当调整相位可以产生能在  $360^\circ$  方位扫描的定向波束,可用于广播、通信,后来也被用于导航和测向。法国的 RIAS 实验雷达系统 [Dorey et al., 1989; Colin, 1996] 就是大型环形阵的一个高级的最新应用。

在第二次世界大战期间,德国研制了用于无线电信号情报收集和测向的高频环形阵列。这些所谓的 Wullenweber<sup>①</sup> 阵列非常巨大,直径大约 100 m。战后,在伊利诺斯州立大学,研制了一个实验用 Wullenweber 阵列(如图 1.5 所示)。该阵列在反射屏前有 120 个辐射单元,直径大约 300 m,请注意图中中心位置处建筑物的大小 [Gething, 1966]。在冷战时期,其他国家也建造了许多类似系统,其中有些至今还在使用,也可参见 [IRE PGAP Newsletter Vol. 3; December, 1960]。

这段时期,一些科学工作者研究出了新的、有效的方向图综合方法以及实用的馈电和波束控制方法,其概况可参见文献 [Davies, 1981, 1983]。在这些工作中,一个非常有用的方法是基于相

① 该研制项目的代号