



国防科技图书出版基金

Radome Theory and
Design Methods

天线罩理论
与设计方法

张强 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

014038562

TN820

11



国防科技图书出版基金

天线罩理论与设计方法

Radome Theory and Design Methods

张 强 著



国防工业出版社

·北京·



北航

C1726499

TN820

11

014038263

图书在版编目(CIP)数据

天线罩理论与设计方法/张强著. —北京:国防工业出版社,2014.1

ISBN 978-7-118-09073-4

I. ①天... II. ①张... III. ①天线罩—设计 IV. ①TN820.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 019847 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 27 字数 499 千字

2014年1月第1版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 128.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟

(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

序 言

近年来,随着国防建设与国民经济建设的发展,对雷达、通信、电子对抗提出了越来越高的要求,特别是在机载雷达平台,包括机载火控雷达及机载预警雷达平台的设计中,天线罩已成为一个重要的环节,不仅要满足一系列电信要求,而且还要满足平台隐身等新要求;为实现雷达成像及综合电子系统,要求天线罩具有很大的工作带宽,这些都对天线罩提出了新的挑战。

本书是一部总结了近 20 年来天线罩技术发展的专著,反映了近 20 年来国内外天线罩技术的发展动态,充分展示了该技术领域的前沿成果。全书理论联系实际,体系清晰,内容阐述严谨、全面,对天线罩电信、结构、仿真设计、测试验证、材料、工艺制造等方面均有论述,对于天线罩设计和工程实践中迫切需要解决的问题具有很强的指导性,目前国内外尚未见类似专著。因此,本书对工程技术人员、高校教师和研究生会提供更大的帮助。

本书作者张强博士参加和主持研制过多项国家重点项目,目前仍在从事多项前沿技术研究。针对工作需要,认真学习,钻研有关天线罩的理论设计与分析技术,取得了重要成果,在国内外重要期刊发表过多篇论文,为本书的写作打下了坚实的理论基础。相信本书的出版会对我国的天线罩技术及有关雷达、通信、电子对抗平台的发展做出重要贡献。

中国工程院院士

张强

2013 年 10 月 28 日

前 言

天线罩诞生于第二次世界大战时期,几十年来历史证明现代高技术武器越来越离不开天线罩技术。最早的天线罩解决了雷达在飞机上工作的问题,有了天线罩,机载雷达便能在飞机上对地面、海上目标进行侦察和定位,提高攻击的命中率;20世纪50年代,天线罩技术开始用于导弹领域,通过天线罩,导弹头部的微波毫米波寻的器能够搜索和跟踪目标,如果没有天线罩,则无法取得精确打击的效果;70年代,大型机载旋罩用于机载预警系统,位于高空的预警雷达有效地克服了地球曲率的影响,极大地提高了反低空突防能力,配以卫星通信设备(含天线罩)与地面雷达的联网,形成国土防空战区指挥中心,改变了战场指挥的格局;进入21世纪以后,宽带机载隐身天线罩与机载有源相控阵配合,降低了天线的散射截面,有效躲避地面和机载预警雷达网的截击,形成快速突防突然打击的威力,宽带隐身天线罩与矢量大推重比发动机并列为第四代战机的核心技术。由于天线罩技术的重要性,该技术一直是国际上的研究热点。美国十分重视天线罩技术,第二次世界大战以后,美国每两年召开一次国际电磁窗会议。自1986年开始为了保密,美国除了“国际电磁窗会议”外,另行举行美国国内的秘密级的国防部(Department of Defense, DoD)电磁窗会议,替代了“国际电磁窗会议”,DoD电磁窗会议不再对外开放,也不公开发表论文,在其他国际会议关于天线罩的论文也大大减少,隐身天线罩技术被列为绝密。天线罩不仅有重要的军事价值,而且具有巨大的经济价值,以机载旋罩为标志的E-3A预警机被称为“美国的财富”。

多年来,我国天线罩技术工作者坚持独立自主、自力更生的方针,刻苦钻研、奋发图强,在大型地面雷达罩、机载雷达罩、舰载雷达罩、导弹天线罩等方面形成了研究开发、生产制造、修理维护的能力。尤其是20世纪90年代以后,我国科技人员历尽艰险,锐意进取,在天线罩技术的基础和前沿研究方面取得了多项重大突破,研制成功一批高技术天线罩产品,我国的天线罩技术开始在国际天线罩领域占有一席之地。

由于天线罩国际前沿技术研究难度迅速加大,天线罩高技术资料十分零散且匮乏,为弥补这一缺陷,迫切需要及时系统地总结提炼近20年来的研究成果,帮助引导年轻学者迅速进入国际技术前沿,促进天线罩领域的学术交流,激励天线罩技术再上新台阶,再作新贡献,加强自主创新能力,提高核心竞争力,为我国

国防事业和国民经济发挥其独特的作用。

作者长期从事天线罩技术研究,在实际工程实践和基础研究中积累了一定的经验,也提出了一些新技术新方法,把多年的研究成果奉献给大家,希望本书的出版能对天线罩技术发展和技术进步起到推动作用。

本书得到了国防出版基金的赞助,承蒙王小谟院士在百忙中仔细审阅了全稿,提出了宝贵意见,对本书帮助很大。中国电子科技集团公司第14研究所副所长胡明春研究员,天线与微波技术国防科技重点实验室主任周志鹏研究员,办公室主任林有才高工十分关心本书的出版,在繁重的工作中多次给予热情的指导和帮助;张光义院士、贲德院士对书稿提出了指导性意见,使作者深受启发和鼓舞。多位学者、同事、学生也为本书提供了宝贵的帮助。对于这些宝贵的支持和帮助,作者在此谨表示深深的敬意和诚挚的感谢。

作者

2013年12月

目 录

第1章 引论	1
1.1 天线罩的基本概念	2
1.2 天线罩的分类	3
1.3 天线罩技术发展简史	4
1.4 天线罩的性能要求	8
1.4.1 基本要求	8
1.4.2 环境适应性要求	9
1.4.3 典型指标	10
1.5 天线罩技术的特点	14
1.6 天线罩技术简介	16
1.6.1 电信设计分析技术	16
1.6.2 电性能测试技术	17
1.6.3 结构设计分析技术	17
1.6.4 材料和制造方法	18
1.7 本书各章节内容简介	18
参考文献	19
第2章 天线罩理论分析基础	21
2.1 天线罩电信分析技术概貌	22
2.2 电磁场和电磁波的基本规律	25
2.2.1 麦克斯韦方程组	26
2.2.2 波动方程和电磁波	27
2.2.3 亥姆霍兹方程和口径积分	30
2.2.4 斯特拉顿-朱兰成公式和表面积分	33
2.3 平面波在无限多层介质中的传输和反射	37
2.3.1 平面波的反射与折射	37
2.3.2 单层介质平板的传输和反射	42
2.3.3 多层介质平板的传输和反射	44
2.4 几何光学方法	51
2.4.1 射线跟踪方法	51

2.4.2	计算过程	51
2.4.3	分析实例	56
2.5	物理光学方法	60
2.5.1	物理光学原理	60
2.5.2	口径积分-表面积分方法	60
2.5.3	虚拟源曲面口径积分方法	62
2.5.4	平面波谱-表面积分方法	66
2.5.5	光学方法的适用范围	68
2.6	矩量法	70
2.6.1	矩量法的基本原理	70
2.6.2	快速多极子技术	72
2.6.3	介质壳体的 RCS 的矩量法分析	74
2.7	感应电流率及其计算方法	78
2.7.1	感应电流率定义	78
2.7.2	感应电流率的矩量法分析	79
2.7.3	感应电流率的虚拟源法分析	82
2.8	复射线方法	88
	参考文献	89
第3章	地面雷达天线罩	92
3.1	概述	92
3.2	空间骨架天线罩对天线性能的影响	94
3.3	空间骨架天线罩设计技术	98
3.3.1	球面分块技术	98
3.3.2	板块连接技术	103
3.3.3	连接调谐技术	109
3.3.4	其他	120
3.4	设计举例	120
3.4.1	空间介质骨架天线罩设计	120
3.4.2	空间金属骨架天线罩设计	132
3.4.3	刚性壳体天线罩设计	138
	参考文献	139
第4章	机载火控雷达天线罩	141
4.1	概述	142
4.2	特点分析	143
4.2.1	雷达系统要求	143
4.2.2	雷达天线罩外形要求	144

4.2.3	雷达天线罩的空速管	148
4.3	罩壁设计	148
4.3.1	机载火控雷达天线罩设计中的特殊问题	148
4.3.2	罩壁结构选择	148
4.4	变厚度设计举例	150
4.5	空速管影响分析	159
4.5.1	概述	159
4.5.2	MoM 和 PO 混合分析模型	160
4.5.3	带空速管的天线罩的 MoM/PO 分析	171
4.5.4	MoM/PO 分析与 PO 分析的比较	179
4.6	雷电防护	180
4.6.1	雷电基本知识	180
4.6.2	雷电分流条	181
4.6.3	分流条的布置	182
4.6.4	分流条对天线罩电性能的影响分析	182
	参考文献	183
第 5 章	机载预警雷达天线罩	185
5.1	概述	185
5.2	天线罩对面阵天线影响分析	187
5.2.1	AI-SI 方法的收敛性	187
5.2.2	仿真与实验结果比较	189
5.2.3	反射瓣与直射瓣的矢量叠加	192
5.3	天线罩对线阵影响分析	193
5.3.1	偏平椭球雷达天线罩对罩内单元的影响	194
5.3.2	偏平椭球雷达天线罩对罩内 SSR 线阵的影响	196
5.3.3	天线极化改变后偏平椭球雷达天线罩对 罩内 SSR 线阵的影响	197
5.4	维修孔对低副瓣阵列影响分析	199
5.5	变厚度夹层设计	204
5.6	设计举例	208
5.6.1	口径天线偏平椭球雷达天线罩设计	208
5.6.2	全辐射口径偏平椭球雷达天线罩设计	211
	参考文献	212
第 6 章	宽带天线罩	214
6.1	概述	214
6.2	宽带夹层设计	215

6.3	宽带天线罩的仿真	218
6.3.1	AI-SI-AG 分析方法	218
6.3.2	算法收敛性	220
6.3.3	仿真与试验结果的比较	222
	参考文献	224
第7章	采用频率选择表面的隐身天线罩	225
7.1	引言	226
7.1.1	隐身的意义	226
7.1.2	天线罩的隐身作用	226
7.2	FSS 隐身天线罩的评估	228
7.2.1	雷达散射截面	228
7.2.2	金属天线罩的 RCS	228
7.3	无限周期阵列 FSS 基本概念	231
7.3.1	Floquet 定理和 Floquet 模	232
7.3.2	FSS 的栅瓣和布喇格瓣	237
7.3.3	FSS 的分析方法	239
7.4	模式匹配法	240
7.4.1	基于脉冲基函数的模式匹配法	241
7.4.2	基于波导模的模式匹配法	248
7.4.3	基于边界积分-谐振模展开法	269
7.5	广义散射矩阵	286
7.6	互导纳法	289
7.6.1	二维无限大周期结构单元上的散射场	289
7.6.2	二维无限大周期结构单元的自阻抗	292
7.6.3	二维无限大周期结构的传输系数和反射系数	294
7.6.4	FSS 单元缝与振子单元的对偶关系	295
7.6.5	计算实例	296
7.6.6	几个重要的结论	299
7.7	谱域矩量法	300
7.8	等效电路法	302
7.8.1	单方环 FSS 等效电路法分析	302
7.8.2	双方环 FSS 等效电路法分析	305
7.9	FSS 天线罩设计基础	307
7.9.1	不同单元 FSS 的性能	307
7.9.2	不同夹层 FSS 的性能	313
7.9.3	FSS 天线罩电性能分析方法	319

7.10	FSS 天线罩的 RCS	319
7.10.1	天线罩 RCS 概述	319
7.10.2	频选天线罩 RCS 的特性	320
7.10.3	天线罩内置天线时的 RCS	321
7.10.4	天线罩与机身连接时的 RCS	323
	参考文献	326
第 8 章	吸收及可控频率选择表面	328
8.1	概述	328
8.2	电阻贴片型吸收体	329
8.2.1	Salisbury 屏	329
8.2.2	贴片型 FSS 吸收表面	331
8.3	电控频率选择吸收表面	333
8.3.1	电控 FSS 吸收表面原理	333
8.3.2	由电阻加载的振子构成的电控频率吸收表面	333
8.3.3	由电阻加载的方环构成的电控频率吸收表面	334
8.4	透过型电控频率选择表面	339
8.4.1	单层电控频率选择表面	339
8.4.2	双层电控频率选择表面	345
	参考文献	353
第 9 章	天线罩测试技术	355
9.1	等效平板测试	355
9.1.1	存在空间驻波时的真值求解方法	355
9.1.2	背景对消技术	358
9.2	材料介电参数测试	359
9.2.1	谐振腔法	360
9.2.2	波导法和自由空间法	361
9.2.3	开腔法	363
9.3	电厚度测试	367
9.3.1	基于布儒斯特角的双喇叭测试法	368
9.3.2	单喇叭反射法	369
9.4	天线罩厚度测试	373
9.5	感应电流率测试	374
9.6	天线罩性能测试	377
9.6.1	远场测试方法	377
9.6.2	近场测试方法	379
9.6.3	压缩场测试方法	381

9.7	天线罩测试专用转台和扫描架	382
9.7.1	转台	382
9.7.2	扫描架	383
9.8	天线罩性能测试误差分析	384
9.8.1	概述	384
9.8.2	近场测量误差	384
9.8.3	天线罩传输效率测试误差	385
9.8.4	天线罩瞄准误差的精确测试	385
	参考文献	386
第10章	天线罩力学和材料工艺基础	388
10.1	天线罩力学性能	388
10.1.1	天线罩力学性能分析、设计和试验	388
10.1.2	材料力学基础	389
10.2	聚合物复合材料及工艺	391
10.2.1	复合材料的介电常数	392
10.2.2	增强纤维	392
10.2.3	树脂基体	395
10.2.4	夹芯材料	396
10.2.5	成形工艺	397
10.3	陶瓷基复合材料及工艺	401
10.3.1	陶瓷基复合材料	401
10.3.2	陶瓷基增强材料	401
10.4	钢膜结构材料	402
10.5	表面防护涂层	404
10.5.1	防雨蚀涂层	404
10.5.2	抗静电涂层	406
	参考文献	407
	缩略语	408

Contents

1 Introduction	1
1.1 The Fundamental Conceptions of Radome	2
1.2 Classification of Radome	3
1.3 Historical Development of Radome Techniques	4
1.4 Performance Requirement of Radome	7
1.4.1 Basic Requirements	9
1.4.2 Environment Adaptability Requirement	9
1.4.3 Typic Specifications	10
1.5 Feature of Radome Techniques	14
1.6 Brief Introduction of Radome Techniques	16
1.6.1 Electrical Design Techniques	16
1.6.2 Electrical Measurement Techniques	17
1.6.3 Structure Design and Analysis Techniques	17
1.6.4 Materials and Technology of Fabrication	18
1.7 A Brief Introduction to Contents of Chapters in This Book	18
Reference	19
2 Fundamentals of Theoretical Analysis of Radome	21
2.1 A Survey of Radome Analysis Techniques	22
2.2 Basic Laws of Electromagnetic Field and Electromagnetic Wave	25
2.2.1 Maxwell Equations	26
2.2.2 Wave Equation and Electromagnetic Wave	27
2.2.3 Helmholtz Equations and Aperture Integration	30
2.2.4 Stratton – Chulan Cheng Formula and Surface Integration	33
2.3 Transmission and Reflection of Electromagnetic Wave through Infinite Planar Multiple – layer Dielectrics	37
2.3.1 Reflection and Refraction of Plane Waves	37
2.3.2 Transmission and Reflection of Single layer Dielectrics	42

2.3.3	Equivalent Two – ports Network for Multiple – layer Dielectrics	44
2.4	Geometry Optics Analysis Method	51
2.4.1	Ray Tracing Method	51
2.4.2	Calculation Procedure	51
2.4.3	Example of Analysis	56
2.5	Physical Optics Analysis Method	60
2.5.1	Physical Optics Principle	60
2.5.2	Aperture Integration and Surface Integration Formulation	60
2.5.3	Virtual Source Surface – Aperture – Integration Method	62
2.5.4	Planar Wave Spectrum and Surface Integration Formulation	66
2.5.5	Application Scope of Optics Method	68
2.6	Method of Moment (MoM) Analysis	70
2.6.1	MoM Foundation	70
2.6.2	Fast Mutipole Method	72
2.6.3	MoM Analysis for RCS of Dielectric Shell	74
2.7	Induced Current Ratio and Its Computation Method	78
2.7.1	Induced Current Ratio Defintion	78
2.7.2	MoM Analysis for Induced Current Ratio	79
2.7.3	Auxiliary Source Analysis for Induced Current Ratio	82
2.8	Complex Ray Method	88
	Reference	89
3	Ground Based Radome	92
3.1	A Brief Introduction	92
3.2	Effects of A Space – Frame Radome on Antenna Performance	94
3.3	Design Techniques of Space – Frame Radome	98
3.3.1	Partition of Sphere Surface	98
3.3.2	Conjunction of Panels	103
3.3.3	Tuning of Conjunction	109
3.3.4	Associated Problems	120
3.4	Design Examples	120
3.4.1	Design of Dielectric Space – Frame Radome	120
3.4.2	Design of Metal Space – Frame Radome	132
3.4.3	Design of Rigid Shell Radome	138
	Reference	139