

相控阵雷达技术丛书

相控阵雷达天线

Phased Array Radar Antennas



束咸荣 何炳发 高铁 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

相控阵雷达技术丛书

相控阵雷达天线

PHASED ARRAY RADAR ANTENNAS

束咸荣 何炳发 高铁 著



国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

相控阵雷达天线 / 束咸荣, 何炳发, 高铁著. —北京:
国防工业出版社, 2007. 7

(相控阵雷达技术丛书)

ISBN 978-7-118-04858-2

I. 相... II. ①束...②何...③高... III. 相控阵
雷达:相控阵天线 IV. ①TN821②TN958. 92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 134755 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 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 24½ 字数 447 千字

2007 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 76.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

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

IV

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 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王峰 张涵信 程洪彬

秘书长 程洪彬

副秘书长 彭华良 蔡镛

委员 (按姓氏笔画排序)

于景元 王小谟 甘茂治 刘世参 李德毅

杨星豪 吴有生 何新贵 佟玉民 宋家树

张立同 张鸿元 陈冀胜 周一宇 赵凤起

侯正明 常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

本书主审委员 王小谟

《相控阵雷达技术丛书》编委会

名誉主任	张直中				
主任	左群声	罗 群			
副主任	张光义	贵 德	徐文官	邵智民	
	周万幸				
委 员	华海根	王德纯	黄为倬	许建峰	
	马 林	倪嘉骊	陈国海	朱炳元	
	金 林	刘 岱	邢文革	林幼权	
	于文震	胡明春	郑 新	赵玉洁	

丛书序

雷达是重要的信息获取装备,是各种先进作战平台和指挥控制系统的耳目,在国防建设、经济建设、科学研究中应用广泛并获得了持续发展。相控阵雷达具有快速改变天线波束指向和波束形状、可用多部发射机在空间进行功率合成、易于形成多个发射与接收波束、可使相控阵天线与雷达平台共形等特点,在观测高速运动目标、实现多种雷达功能和多目标跟踪、推远雷达作用距离等方面都具有特别的优势,因此成为当今雷达发展的主流。

随着雷达观测目标种类的增多,要求雷达测量的目标参数不断增加并提高雷达电子对抗能力及目标识别的能力,有源相控阵雷达、宽带相控阵雷达、数字相控阵雷达、多波段综合一体化相控阵雷达成了当今相控阵雷达发展的重要方向。相控阵雷达的工作频段也在不断扩展,除了常用的微波波段外,向下已扩展至短波波段,例如天波、地波超视距雷达;向上已扩展至毫米波波段;现正开始研究光波波段的相控阵雷达。

相控阵雷达及其技术的高度发展,受到国内外各方面的高度重视。国内从事雷达研究、生产、教学与使用的部门与有关人员深入了解相控阵雷达及其技术的兴趣与需求持续提高。这是促使南京电子技术研究所组织撰写《相控阵雷达技术丛书》的一个重要原因。

南京电子技术研究所从20世纪60年代初即开始了相控阵雷达及其有关技术的研究,先后在我国首次成功地研制成多种战略、战术应用相控阵雷达,并成功地解决了相关的理论和技术难题。在这些相控阵雷达研制过程中积累的知识和经验是本丛书各位作者写作的基础,因此可以说,

本丛书的出版在一定程度上也反映了南京电子技术研究所许多科技工作者的智慧和成果。参加本丛书撰写的作者均是多年从事相控阵雷达研制工作并获得过多项国家及部委级科技成果奖的专家,因此,本丛书具有内容创新、重点突出、理论联系实际、易于理解等特点。

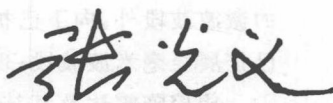
《相控阵雷达技术丛书》共包括七个分册,内容涵盖相控阵雷达天线、相控阵雷达馈线、相控阵雷达接收系统、有源相控阵雷达及其关键部件收发组件、相控阵雷达数据处理、宽带相控阵雷达及相控阵雷达原理。

这套丛书受到南京电子技术研究所领导的高度重视,前任所长左群声研究员,现任所长罗群研究员,副所长倪嘉骊研究员等均给予了大力支持、有力组织,指导丛书的写作全过程,并安排了所里科技部门、技术情报部门做好各项配合工作,使丛书的各位作者能顺利完成写作工作。

在丛书撰写过程中,得到了张直中院士、贡德院士、黄为倬、华海根、邵智民、周冠杰、董树人、董士嘉、孙茂友、杜耀惟等研究员以及副所长周万幸、马林、陈国海研究员的支持与鼓励,与他们的技术讨论对完成本丛书的写作是非常有益的。我所科技部及技术基础部情报研究部门的王震、赵玉洁、叶渭川、陈玲、王炳如等同志对丛书的撰写做了大量的组织、协调、编辑、校对工作;王园、谷静、张素军、张权、张文勇、张坚、石凯军、孙惠媛等同志帮助作者做了大量文字输入、排版和编辑工作,在此一并表示衷心感谢!

《相控阵雷达技术丛书》的出版,特别要感谢国防科技图书出版基金评审委员会的大力支持,感谢王小谟院士和各位评审专家及国防工业出版社王晓光编审的认真、细致和辛勤的工作!

由于水平有限,不足之处与错误在所难免,诚请并衷心感谢读者赐正!



2006年7月1日

前言

相控阵雷达是20世纪60年代问世的一种新体制电扫描雷达。相控阵雷达能在设定的空域,根据战术需要,灵活地改变波束形状及指向,对多达数百批目标实施无惯性搜索、跟踪、编码、识别和分类的多任务功能。在雷达发展史中,相控阵雷达完成了从早期雷达仅能对单个目标的距离、角域等标量参数进行粗略测量而感知目标,到瞬间同时对众多目标的距离、角域、速度、加速度和极化等标量和矢量参数精确实时测定而认知目标的飞跃。

军事斗争的迫切需求产生了雷达,并强有力地牵引雷达理论和技术的发展。当今世界科学突飞猛进,经济蓬勃增长,特别是半导体器件、微电子技术、高速电子数字计算机及相应智能应用软件迅速发展创造的外部环境,给相控阵雷达事业的腾飞注入了新的活力。

多功能固态有源相控阵雷达天线应运而生、横空出世,具有里程碑和划时代意义。它在国土防空和导弹防御系统及舰载、机载和星载火控和预警系统等军事领域,乃至在射电天文、卫星通信、气象水文、空中交通管制、地球勘探和生物医学等国民经济各部门的广泛应用,日益备受世人的关注和重视。

鲜明的形象和特殊的使命使天线成为雷达不可或缺的重要分系统已是不容置疑的事实。相控阵天线有专门的理论、独有的设计、特殊的结构和新颖的评估手段。相控阵天线的研制是对数学、电磁场理论、微波技术等相关基础知识要求全面、实践性又极强的系统工程。现代相控阵天线的设计与其他天线一样,早已摒弃初期查曲线、找图表的工作模式,唯有依托数学、物理理论,凭借电子信息技术,采用专用软件仿真并结合严谨

的实验手段才能圆满完成。

本书作者们长期工作在研制相控阵雷达天线的第一线。在参加了相控阵天线的多种国防重点型号产品的开发和预研课题研究的全过程后,奉献工作中取得和积累的一般教科书难以寻觅的理论研究成果和工程实践经验,以期同国内外同行相互切磋交流,促进无线电定位事业和相控阵天线理论与技术的发展,是出版本书的初衷。

我们由衷地期望本书的出版能对今后在投入巨额人力、财力和物力建造相控阵天线时,对实施科学的论证、优异的系统设计所需的分析技术、综合技术和评估技术有所裨益,并产生相应的军事效益和社会效益。

由于篇幅所限,本书没有面面俱到和完备地介绍相控阵天线不同层面的各个细节,但为叙述完整、便于理解和应用,书中仍给出了常用的基本概念、经典理论和公式图表。本书共分 13 章,内容涉及相控阵天线研制中的方案论证、分析计算和调试检测等重要环节。其中束咸荣和何炳发合写了第 1 章,束咸荣还撰写了第 2 章、第 11 章,杜耀惟和高铁合写了第 3 章、第 4 章(其中 3.3.7 节中的 1)为孙茂友所写),郑学誉撰写了第 5 章、第 6 章,卫健、杨宁合写了第 7 章,朱瑞平和何炳发合写了第 8 章,孙茂友撰写了第 9 章,杜小辉撰写了第 10 章,李建新撰写了第 12 章,于向军撰写了第 13 章。全书由束咸荣修改和统稿。本书的诞生得到中国工程院院士张光义,天线与微波技术国防科技重点实验室主任、南京电子技术研究所副总工程师胡明春研究员的悉心关怀和热情支持。本书由南京电子技术研究所相正平研究员和南京邮电大学曹伟教授审核。他们的建设性意见和建议有益于本书的质量提高,对此我们致以诚挚的谢意。

我们已作出努力来确保文稿的质量和准确,限于学术水平和工作经验,书中差错、疏漏及不妥之处在所难免,殷切地希望读者批评和指正。

束咸荣

2007 年 2 月于南京

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 相控阵雷达天线的产生	1
1.2 相控阵雷达天线的性能	1
1.3 相控阵雷达天线的组成	3
1.4 相控阵雷达天线的应用	3
1.5 相控阵雷达天线的实例	4
1.5.1 地面相控阵天线	4
1.5.2 舰载相控阵天线	6
1.5.3 机载相控阵天线	7
1.5.4 星载相控阵天线	8
第 2 章 相控阵天线基本理论	10
2.1 引言	10
2.2 线阵	11
2.2.1 方向图	11
2.2.2 波瓣宽度	14
2.2.3 旁瓣	15
2.2.4 栅瓣	16
2.2.5 带宽	17
2.3 面阵	22
2.3.1 阵列坐标系	22
2.3.2 波瓣宽度	24
2.3.3 阵元间距	25
2.4 波控和量化瓣	31

2.4.1	波束跃度	31
2.4.2	相位量化	33
2.4.3	幅度量化	34
2.4.4	时延量化	35
2.4.5	量化瓣抑制	35
2.5	方向性	37
2.5.1	直线相控阵	38
2.5.2	平面相控阵	41
	参考文献	43
第3章	直线阵综合	45
3.1	引言	45
3.2	一般综合法	45
3.2.1	Fourier 法	46
3.2.2	Schelkunoff 法	46
3.2.3	Woodward 法	46
3.3	和方向图综合	47
3.3.1	Dolph-Chebyshev 法	47
3.3.2	Taylor 分布	50
3.3.3	Hamming 分布	60
3.3.4	Villeneuve 分布	62
3.3.5	Elliott 法	64
3.3.6	旁瓣包络衰减更速的方法	68
3.3.7	赋形波束综合	71
3.4	差方向图综合	80
3.4.1	典型方向图	80
3.4.2	Bayliss 法	82
3.4.3	Zolotarev 法	84
3.4.4	Elliott 法	86
3.4.5	旁瓣包络衰减更速的方法	87
3.5	和差分布最佳化的馈电网络	90
3.5.1	串联馈电	90
3.5.2	子阵式馈电	90
	参考文献	91
第4章	平面阵综合	93
4.1	引言	93

4.2	矩形口径综合	94
4.2.1	Chebyshev 阵	94
4.2.2	用阵元实测方向图综合	96
4.3	圆口径和方向图综合	98
4.3.1	Taylor 分布	98
4.3.2	Hansen 分布	101
4.3.3	修正的 Taylor 分布	102
4.3.4	旁瓣包络衰减更速的方法	104
4.3.5	Hamming 分布	105
4.3.6	圆口径和线源波瓣的等效性	106
4.4	圆口径差方向图综合	107
4.4.1	旁瓣包络衰减更速的方法	107
4.4.2	Bayliss 法	109
4.5	非圆口径综合	111
4.5.1	椭圆阵	111
4.5.2	环形阵	112
4.5.3	正六边形阵	116
4.6	阵列优化	116
4.6.1	和口径利用系数	117
4.6.2	差相对斜率	119
4.6.3	方向性	121
	参考文献	124
第5章	阵列单元	125
5.1	引言	125
5.2	对称振子	125
5.2.1	电流分布	125
5.2.2	方向图	128
5.2.3	阻抗	130
5.2.4	互耦	134
5.2.5	馈电	138
5.3	开口波导	140
5.3.1	口径场	140
5.3.2	辐射场	141
5.4	喇叭	146
5.4.1	H 面扇形喇叭	146

5.4.2	E面扇形喇叭	150
5.4.3	角锥喇叭	152
5.4.4	圆锥喇叭	153
5.4.5	相位中心	155
	参考文献	156
第6章	阵元互耦	157
6.1	引言	157
6.2	逐元法	157
6.2.1	激励方式	157
6.2.2	阻抗法	157
6.2.3	散射法	162
6.3	周期结构法	165
6.3.1	倾斜单元室法	166
6.3.2	波导模法	167
6.3.3	大尺寸阵元	171
	参考文献	174
第7章	馈电系统	175
7.1	引言	175
7.2	一般馈电系统形式	175
7.2.1	导波结构	175
7.2.2	微波器件	176
7.2.3	移相器	176
7.2.4	主要指标	176
7.3	强制馈电	177
7.3.1	传输线选择	177
7.3.2	并联馈电	178
7.3.3	串联馈电	183
7.3.4	馈相	186
7.4	空间馈电	189
7.4.1	分类	189
7.4.2	空馈实例	190
7.5	子阵馈电	195
7.5.1	网络结构	195
7.5.2	组成	195
7.6	交连设计	196

7.6.1	理论分析	197
7.6.2	设计步骤	199
7.6.3	仿真及测试	200
7.7	延迟器作用	201
7.7.1	平面相控阵天线波束指向漂移	202
7.7.2	直线相控阵天线波束指向漂移	203
7.7.3	实时延迟器对波束指向漂移的改善	203
7.7.4	延迟器位数与波束指向漂移关系	204
	参考文献	205
第8章	有限扫描技术	206
8.1	引言	206
8.2	工作原理	206
8.2.1	无 FT 系统	207
8.2.2	多波束系统	208
8.2.3	重叠子阵原理	209
8.2.4	口径场与远场变换	211
8.3	混合式反射器系统	214
8.3.1	偏轴抛物面	215
8.3.2	横向馈源	216
8.3.3	偏轴抛物面馈源	219
8.3.4	偏轴特性	221
8.3.5	反射器透镜	223
8.4	透镜阵列系统	226
8.4.1	透镜	226
8.4.2	透镜阵列组合	227
8.5	空馈阵列系统	231
8.5.1	效率	231
8.5.2	非周期环栅阵	234
8.6	波束控制系统	240
8.6.1	相控阵雷达的要求	241
8.6.2	主要功能	241
8.6.3	实现方法	243
8.6.4	工作原理	244
8.6.5	关键技术	246
8.6.6	发展方向	248

参考文献	248
第9章 稀疏阵	251
9.1 引言	251
9.2 满阵	251
9.3 栅瓣	253
9.4 密度加权阵	256
9.4.1 满阵确定	256
9.4.2 有源阵元位置确定	256
9.4.3 密度加权阵栅瓣	260
9.5 环形阵	262
9.6 旋转变形阵	264
9.7 随机排列阵	266
9.7.1 均匀随机排列阵	267
9.7.2 随机排列密度渐稀阵	275
9.8 稀疏阵设计优化	276
9.8.1 初始种群	277
9.8.2 适应度计算	277
9.8.3 遗传操作	278
参考文献	281
第10章 多波束天线	282
10.1 引言	282
10.2 多波束形成	282
10.2.1 通过网络	282
10.2.2 通过透镜	285
10.2.3 二维波束形成网络	286
10.2.4 数字波束形成	288
10.3 多波束正交	289
10.3.1 正交含义	289
10.3.2 非正交影响	290
10.4 多波束天线设计	291
10.4.1 低旁瓣和高相交电平技术	291
10.4.2 优化设计	293
10.5 宽带宽角圆极化多波束天线	294
参考文献	296
第11章 共形阵	297