

相控阵雷达技术丛书

宽带相控阵雷达

Wideband Phased Array Radar



王德纯
著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

相控阵雷达技术丛书

宽带相控阵雷达

WIDEBAND PHASED ARRAY RADAR

王德纯 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

宽带相控阵雷达 / 王德纯著. —北京: 国防工业出版社, 2010. 7

(相控阵雷达技术丛书)

ISBN 978-7-118-06952-5

I. ①宽... II. ①王... III. ①相控阵雷达 IV. ①
TN958. 92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 139033 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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×960 1/16 印张 15¼ 字数 271 千字

2010 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 66.00 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

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 镭

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	
	叶渭川				

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、贲德院士、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,感谢王小漠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

近年来,许多民用和军事应用部门对新一代雷达系统提出了越来越苛刻的要求,诸如同时具备远程、高数据率、多目标探测能力;精密的目标参数和特征跟踪测量能力;精细的角度、距离、多普勒分辨和成像能力;灵敏的目标特征感知和识别能力以及灵活多变的工作模式和抗杂波、抗干扰能力等。要同时满足上述多种功能任务要求,通常意义上的相控阵雷达或宽带雷达显然已经不能适应,而必须采用所谓的宽带相控阵雷达技术,或者称相控阵宽带雷达技术。宽带相控阵雷达已经成为目前雷达技术发展的一个最重要的方向和研究热点之一。

宽带相控阵雷达技术,除了涉及常规的宽带雷达技术和相控阵技术之外,还涉及许多由于相控阵技术与宽带技术结合而产生的新的理论、技术和工程问题。本书试图从雷达系统总体的角度来讨论这些问题。

全书共分8章。第1章引论,对雷达技术、宽带雷达、相控阵雷达、宽带相控阵雷达的特征、应用和发展,按照作者的认识,作出了概括性的描述;第2章宽带相控阵雷达系统分析,从系统总体的角度分析了宽带相控阵雷达系统各环节出现的不同于传统雷达的新的理论、技术问题,并对宽带相控阵雷达系统性能作出了比较系统的分析和综述;第3章则重点讨论几种宽带雷达信号波形特征及其处理技术,包括线性调频、频率步进、相位编码等;第4章宽带相控阵天线系统,分析了宽带相控阵雷达天线在波束扫描时带来的波束空间色散和波形时间色散损失及其解决方案,并导出了具体设计计算公式;第5章研讨了具有挑战性的宽带相控阵雷达自适应数字波束形成技术和方案;第6章系统地讨论了宽带条件下的目标特性及其测量技术;第7章给出了宽带相控阵雷达用于空间目标监视、

弹道导弹预警、导弹防御地基火控的部分设计技术；第8章则讨论宽带相控阵雷达(天基)对地成像观测技术。

对于本书的出版,首先感谢南京电子技术研究所历届领导及科技委的关心和支持;感谢国防工业出版社的领导和王晓光编审的信任。在本书撰写过程中,南京电子技术研究所的李治铭研究员、朱力博士、穆冬博士分别为第6章、第8章和第3章提供了不少很有价值的资料,作者非常感谢;在本书编写与出版等方面,南京电子技术研究所的赵玉洁研究员、陈玲研究员、王炳如和张坚工程师等都做出了很大的贡献;在此一并表示衷心谢意!

宽带相控阵雷达技术正处在发展之中,尚未形成比较完整的理论和技术体系。据作者所知,关于宽带相控阵雷达的专著,这还是第一部,算是“抛砖引玉”,不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者

2010年6月

目 录

第 1 章 引论	1
1.1 雷达技术概述	1
1.1.1 雷达探测技术	1
1.1.2 雷达测量技术	3
1.1.3 雷达目标分辨与成像技术	5
1.1.4 雷达目标识别技术	6
1.2 宽带雷达	8
1.2.1 概述	8
1.2.2 宽带雷达的发展	9
1.2.3 宽带雷达应用	15
1.3 宽带相控阵雷达	17
1.3.1 概述	17
1.3.2 相控阵雷达的发展	18
1.3.3 相控阵雷达的基本特征	19
1.3.4 宽带相控阵雷达的发展	21
1.4 宽带相控阵雷达应用	24
1.4.1 空间目标监视	24
1.4.2 弹道导弹防御	25
1.4.3 空基、天基对地观测	29
1.4.4 海(地)面对空监视	30
参考文献	31
第 2 章 宽带相控阵雷达系统分析	32
2.1 信号与带宽	32

2.1.1	雷达信号	32
2.1.2	信号带宽	32
2.1.3	窄带信号与宽带信号	35
2.2	窄带系统与宽带系统	36
2.2.1	窄带系统特征	36
2.2.2	宽带系统特征	37
2.3	宽带信号条件下的目标散射特性	39
2.3.1	目标有效散射面积	39
2.3.2	窄带目标散射面积	39
2.3.3	宽带目标散射面积	40
2.4	宽带雷达探测性能	40
2.4.1	雷达方程与信号带宽	40
2.4.2	雷达方程与匹配滤波	42
2.4.3	宽带探测性能与宽带匹配滤波	44
2.4.4	杂波条件下的宽带探测性能	46
2.5	宽带雷达的电子对抗性能	48
2.5.1	雷达电子对抗能力描述	48
2.5.2	宽带雷达的低截获性能分析	49
2.5.3	宽带雷达的干扰稳健性分析	50
2.5.4	宽带雷达对抗性能综合	51
	参考文献	51
第3章	宽带雷达信号与处理	52
3.1	引言	52
3.2	线性调频信号与脉冲压缩处理	53
3.2.1	线性调频信号的时域、频域表示	53
3.2.2	线性调频信号的脉冲压缩处理	56
3.2.3	线性调频信号压缩的时间(距离)副瓣及加权处理	58
3.2.4	系统幅相失真与补偿	62
3.2.5	距离多普勒耦合	65
3.2.6	非线性调频信号	65
3.3	频率步进信号与带宽合成处理	67
3.3.1	综述	67
3.3.2	频率步进宽带波形模型 ^[6]	67
3.3.3	频率步进信号的脉冲压缩处理	69
3.4	相位编码脉冲压缩波形	70

3.4.1	相位编码波形	71
3.4.2	巴克码和组合巴克码	71
3.4.3	伪随机码	73
3.4.4	多项码	74
3.5	宽带波形产生与脉冲压缩处理的实现	75
3.5.1	宽带波形产生	75
3.5.2	脉冲压缩处理器的实现	77
	参考文献	81
第4章	宽带相控阵天线系统	82
4.1	相控阵基础	82
4.1.1	相控阵基本原理	82
4.1.2	相控阵天线的基本架构	86
4.1.3	相控阵天线的基本参数	92
4.2	相控阵天线系统的带宽特性	94
4.2.1	波束的空间色散特性	94
4.2.2	波形的时间色散特性	97
4.2.3	相控阵天线宽带特性综合	99
4.3	相控阵天线系统带宽扩展	99
4.3.1	时间延迟技术	99
4.3.2	子阵技术	100
4.3.3	子阵划分	101
4.4	宽带相控阵天线系统设计实例	103
4.4.1	雷达对天线系统的性能要求	103
4.4.2	基于移相器控制的天线系统计算	104
4.4.3	基于子阵延时控制的天线系统子阵划分	105
4.4.4	天线系统宽带性能核算	105
	参考文献	105
第5章	宽带相控阵数字波束形成技术	106
5.1	波束形成概述	106
5.1.1	波束形成概念	106
5.1.2	模拟波束形成与数字波束形成	107
5.1.3	数字波束形成原理	108
5.2	雷达数字波束形成技术	112
5.2.1	雷达数字波束形成的优点	112
5.2.2	单元级数字波束形成	113

5.2.3	大子阵级数字波束形成	114
5.2.4	小子阵级数字波束形成	115
5.2.5	多个同时接收波束形成	116
5.2.6	波瓣置零	116
5.3	自适应数字波束形成技术	118
5.3.1	概述	118
5.3.2	自适应数字波束形成原理	118
5.3.3	自适应方法与准则	120
5.4	宽带相控阵雷达自适应波束形成技术	123
5.4.1	基于单元级 DBF 的宽带自适应波束形成	123
5.4.2	基于小子阵级 DBF 的宽带自适应波束形成技术	123
5.4.3	基于时延子阵与 DBF 子阵一体的线性调频宽带相控阵 ADBF	124
5.4.4	基于时延子阵与 DBF 子阵分层的 LFM 宽带相控阵 ADBF	125
	参考文献	126
第 6 章	宽带雷达目标特性及测量	128
6.1	雷达目标特性及测量基础	128
6.1.1	引论	128
6.1.2	雷达目标特性测量模型	129
6.1.3	目标特性和目标特征	130
6.1.4	测量与分辨	131
6.1.5	回波特性与目标特性	132
6.1.6	目标电磁散射回波特征的表述方法	133
6.2	目标雷达散射面积及测量	137
6.2.1	RCS 定义	137
6.2.2	简单目标 RCS 特性	138
6.2.3	复杂目标及 RCS 起伏特征	142
6.3	目标散射矩阵及测量	144
6.3.1	极化散射矩阵	144
6.3.2	极化散射矩阵的性质	146
6.3.3	极化散射矩阵的测量与校准	149
6.3.4	运动目标极化散射矩阵的瞬时测量	151
6.4	目标雷达距离剖面及测量	152
6.4.1	雷达距离剖面(一维距离像)	152
6.4.2	雷达距离剖面(一维距离像)特征	153

6.4.3	雷达距离剖面起伏分析	154
6.5	雷达目标二维图像特性	154
6.5.1	概述	154
6.5.2	目标二维 RCS(CRCS) 图像产生	155
6.5.3	ISAR 成像误差分析	157
6.6	宽带相控阵目标特性采集雷达举例	158
6.6.1	功能与任务	158
6.6.2	系统组成与工作原理	158
6.6.3	雷达主要性能	161
	参考文献	163
第 7 章	宽带相控阵雷达空间目标探测技术	164
7.1	引言	164
7.2	空间目标监视雷达技术	164
7.2.1	功能和任务	164
7.2.2	空间目标监视相控阵雷达探测距离	165
7.2.3	空间碎片监视技术	166
7.2.4	举例	168
7.3	弹道导弹预警雷达技术	169
7.3.1	功能和任务	169
7.3.2	主要性能和特点	169
7.3.3	资源调度方式	173
7.3.4	举例	175
7.4	弹道导弹防御地基雷达技术	178
7.4.1	功能和任务	178
7.4.2	性能和特点	179
7.4.3	系统组成	180
7.4.4	举例	182
	参考文献	186
第 8 章	宽带相控阵雷达对地观测技术	187
8.1	引言	187
8.1.1	概述	187
8.1.2	天基对地观测任务	187
8.1.3	雷达图像特点	188
8.2	对地观测性能要求	189
8.2.1	空间分辨率和地面分辨率	189

8.2.2	工作频段	191
8.2.3	观测带宽度	193
8.2.4	极化方式	194
8.2.5	入射角	194
8.2.6	卫星载体	195
8.2.7	成像距离	196
8.2.8	图像模糊度	196
8.3	天基合成孔径成像雷达基础	197
8.3.1	天基合成孔径雷达原理	197
8.3.2	合成孔径雷达的成像算法	200
8.3.3	SAR 成像基本模式	203
8.3.4	SAR 成像距离方程	206
8.4	天基雷达新技术	209
8.4.1	概述	209
8.4.2	星载 SAR 数字波束形成技术	209
8.4.3	空时多维波形编码技术	210
8.4.4	双/多基地合成孔径成像技术	211
	参考文献	212
	符号表	214
	缩略语	216