

相控阵雷达收发组件技术

Technology of T/R Module for Phased Array Radar



胡明春 周志鹏 严伟 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

相控阵雷达技术丛书

相控阵雷达收发组件技术

TECHNOLOGY OF T/R MODULE FOR
PHASED ARRAY RADAR

胡明春 周志鹏 严 伟 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

相控阵雷达收发组件技术/胡明春,周志鹏,严伟
著. —北京:国防工业出版社,2010.7

(相控阵雷达技术丛书)

ISBN 978-7-118-06735-4

I. ①相... II. ①胡... ②周... ③严... III.

①相控阵雷达 IV. ①TN958.92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 079328 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 23 字数 420 千字

2010 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 82.00 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出出版。

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!

张光义

2006年7月1日

前 言

自从 20 世纪 60 年代以来,由于对人造卫星、洲际弹道导弹、航天飞机等各种飞行器和其他目标进行监视、跟踪的需要日益增加,并且为了在复杂环境中提取更多的信息,而迫切要求雷达具有多功能、多目标、高数据率、高精度、反杂波、抗干扰的功能。随着获取与处理空间目标信息技术研究的深入,以及电子信息对抗日益尖锐,相控阵雷达系统越来越受到设计者和使用者的重视。

采用有源电子扫描阵(AESA)技术的雷达将会在综合电子战系统(INEWS)方面实现巨大的性能突破。AESA 可以用一部分 T/R 组件完成一种功能,用另外的 T/R 组件完成其他功能;也可用时间分隔的方法交替用同一阵面完成多种功能。如雷达在进行地图测绘(SAR/GMTI)、地物回避、地形跟随、威胁回避的同时,还可实现对空中目标的搜索和跟踪,并对其进行攻击。由于 AESA 是由多个子阵组成,而每个子阵又是由多个 T/R 组件组成,因此,可以通过数字式波束形成(DBF)、自适应波束控制和射频功率管理等技术,使雷达的功能和性能得到极大扩展,可以满足各种条件下作战的需要;并能因此而开发出很多新的雷达功能。同时,采用 AESA 技术可以使整个综合电子战系统作用距离大幅度增长,解决可靠性的瓶颈问题,实现隐身技术等。

目前,以南京电子技术研究所(NRIET)为代表的国内研究部门经过多年的研究和探索,在各个波段 T/R 组件的研究方面已取得长足的进展,已突破了多项相关的关键技术,先后为各类机载雷达、地面雷达、舰载雷达、星载雷达研制了很多微组装电路;在实现雷达小型化、高密度、高可靠方面取得了较好成绩。特别是近年来,结合多种波段 T/R 组件的研

制,开展微组装技术研究,研制出多种小型化、高密度的微组装 T/R 组件。经过引进 T/R 组件生产线等技术改造和所内产品研制经费投入建设,目前已具备了 T/R 组件模板制造、微波单元电路基板制造、微波单元电路模板和 T/R 组件组装焊接、性能调试等 T/R 组件生产调试所需全套工艺、生产设备、测试仪表和 4000m² 净化厂房,具备了各个波段 T/R 组件的批量生产能力。

本书包括:相控阵雷达 T/R 组件简介;T/R 组件的理论基础;T/R 组件中基本的微波元件;T/R 组件设计技术;T/R 组件制造技术;T/R 组件测试技术;T/R 组件计算机辅助设计技术;新一代 T/R 组件中采用的新器件和新技术等 8 章。全书涉及的主要内容的学术水平或技术水平对 T/R 组件有重大开拓使用价值,而且密切结合国防现代化和武器装备现代化的需要,所涉及的设计技术、工艺路线、测量方案都是紧跟国际近年来的发展方向,所列举的应用实例都是国内领先的技术成果,整体技术达国际先进水平。全书内容对开展相控阵雷达与固态 T/R 组件研制工作有十分重大的指导意义,对电子对抗、通信微波系统研究工作有重要参考价值。

本书的作者们都是长期从事 T/R 组件技术研究的技术人员,他们的成果广泛应用于国家重点工程和预研课题中,因此本书具有十分重要的理论和工程指导意义。全书共分 8 章,其中第 1 章由胡明春、周志鹏合写,第 2 章由詹莉华撰写,第 3 章由白义广撰写,第 4 章由顾颖言、杜小辉合写,第 5 章由严伟、房迅雷合写,第 6 章由施鹤年、王世辉合写,第 7 章由汪敏、刘德志合写,第 8 章由郭庆、李孝轩合写;郑清、禹胜林、姜伟卓、刘刚、钟剑锋、熊晓楠、陈善华、谢廉忠、张玮、朱小军、杨维生、赵仁祥参与了部分章节的撰写。全书由胡明春、周志鹏修改和统稿。本书得到中国工程院院士张光义的悉心指导和关心。全书由束咸荣、黄川东研究员负责审校。

本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、罗群研究员,现任所长周万幸研究员,副所长倪嘉骊研究员等均给予了大力支持,有力组织、指导本书的写作,使各位作者能顺利完成写作任务。

在本书撰写过程中,张直中院士、张光义院士、贲德院士、黄为倬、王海根、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马林、陈国海研究员均给予热心关注,与他们的技术讨论对完成本书的写作非常有益。我所科技部及技术基础部情报研究部门的赵玉洁、叶渭川、陈玲、王炳如等同志对本书的撰写做了大量的组织、协调、编辑、校对

工作,王园、谷静、强素军、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!

本书的出版,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,感谢王小漠院士及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!

著者

2009年12月

目 录

第 1 章 相控阵雷达 T/R 组件概述	1
1.1 引言	1
1.2 相控阵雷达	1
1.2.1 无源相控阵雷达	5
1.2.2 有源相控阵雷达	6
1.3 相控阵雷达 T/R 组件	9
1.3.1 典型框图	10
1.3.2 工作原理	10
1.3.3 主要部件的作用	13
1.4 一维相扫雷达 T/R 组件	16
1.4.1 天线阵面典型框图	16
1.4.2 T/R 组件技术特点	16
1.5 二维相扫雷达 T/R 组件	18
1.5.1 天线阵面典型框图	18
1.5.2 T/R 组件技术特点	18
1.6 实用 T/R 组件举例	20
1.6.1 基本工作原理	21
1.6.2 主要技术指标	21
1.6.3 结构与工艺	22
1.7 相控阵雷达 T/R 组件新进展	24
1.7.1 数字 T/R 组件	26
1.7.2 多极化组件	27
参考文献	30

第2章 T/R 组件的理论基础	31
2.1 引言	31
2.2 微波技术基础	31
2.2.1 均匀传输线方程及其稳态解	31
2.2.2 输入阻抗、反射系数和电压驻波比	33
2.2.3 史密斯圆图及传输线的阻抗匹配	36
2.3 常用传输线	39
2.3.1 集肤效应和损耗	39
2.3.2 微带线	41
2.3.3 其他传输线	44
2.4 半导体器件物理基础	45
2.4.1 本征和非本征半导体	45
2.4.2 半导体的基本方程	45
2.4.3 PN 结器件	47
2.4.4 金属—半导体接触器件	55
参考文献	67
第3章 T/R 组件中基本的微波元件	68
3.1 引言	68
3.2 无源器件	69
3.2.1 耦合器	69
3.2.2 电桥	72
3.2.3 混合接头	73
3.2.4 功率分配器	74
3.2.5 滤波器	75
3.2.6 均衡器	76
3.3 微波开关	78
3.3.1 PIN 二极管开关	78
3.3.2 肖特基二极管开关	83
3.3.3 场效应管开关	83
3.3.4 MEMS 开关	84
3.4 微波限幅器	85
3.4.1 有源限幅器	85
3.4.2 无源限幅器	86
3.4.3 混合式限幅器	86
3.5 微波数控衰减器	86

3.5.1 PIN 二极管微波数控衰减器	87
3.5.2 GaAs MESFET 管微波数控衰减器	90
3.6 微波数控移相器	91
3.6.1 一般介绍	91
3.6.2 开关线移相器	92
3.6.3 加载线移相器	93
3.6.4 反射式移相器	95
3.6.5 高低通式移相器	97
3.7 微波低噪声放大器	99
3.7.1 单端微波低噪声放大器	99
3.7.2 平衡式微波低噪声放大器	103
3.8 微波功率放大器	104
3.8.1 硅晶体管微波功率放大器	104
3.8.2 场效应管微波功率放大器	105
3.9 微波环行器、隔离器	106
参考文献	108
第 4 章 T/R 组件设计技术	110
4.1 引言	110
4.2 T/R 组件的组成和工作原理	110
4.2.1 组成框图	110
4.2.2 工作原理	111
4.3 T/R 组件的主要功能和技术要求	112
4.3.1 T/R 组件的主要功能	112
4.3.2 T/R 组件的主要技术要求	114
4.3.3 T/R 组件的主要技术指标	117
4.4 T/R 组件设计	124
4.4.1 T/R 组件电信设计	124
4.4.2 T/R 组件结构设计	149
4.4.3 T/R 组件电磁兼容设计	154
4.4.4 T/R 组件可靠性设计	156
4.5 实用 T/R 组件举例	160
4.6 T/R 组合的基本组成和工作原理	164
4.6.1 组成框图	164
4.6.2 工作原理	164
4.7 T/R 组合的主要技术要求	165

4.8 T/R 组合的设计	165
4.8.1 T/R 组合系统噪声的计算	166
4.8.2 子阵组件的设计	167
4.8.3 实时延迟器的设计	168
4.8.4 子阵电源的设计	171
4.9 实用 T/R 组合举例	178
参考文献	179
第 5 章 T/R 组件制造技术	181
5.1 引言	181
5.2 T/R 组件微波电路基板制造技术	181
5.2.1 微波复合介质电路基板制造技术	182
5.2.2 微波低温共烧陶瓷多层电路基板制造技术	187
5.2.3 微波薄膜多层电路基板制造技术	192
5.3 T/R 组件壳体加工技术	200
5.3.1 精密数控加工技术	200
5.3.2 超塑成型技术	202
5.3.3 精密压铸技术	205
5.3.4 精密拼装技术	207
5.4 T/R 组件组装技术	208
5.4.1 以元器件级为主的 T/R 组件组装技术	208
5.4.2 含裸芯片的 T/R 组件微组装技术	217
5.5 T/R 组件密封技术	226
5.5.1 概述	226
5.5.2 胶粘剂密封	227
5.5.3 衬垫密封	228
5.5.4 软钎焊密封	228
5.5.5 玻璃金属封接	231
5.5.6 平行缝焊	232
5.5.7 脉冲激光熔焊密封	234
5.5.8 其他熔焊密封	236
5.6 应用举例	236
5.6.1 S 频段 T/R 组件	236
5.6.2 L 频段 T/R 组件	238
5.6.3 以裸芯片为主的 T/R 组件应用实例	239
参考文献	241

第 6 章 T/R 组件测试技术	243
6.1 引言	243
6.2 T/R 组件发射测试技术	244
6.2.1 发射幅度和相位测试	246
6.2.2 线性相位偏离和群时延特性测试	250
6.2.3 输出功率测试	252
6.2.4 输出信号波形上升沿、下降沿、顶降测试	256
6.2.5 输出信号频谱测试	257
6.2.6 输出信号相位噪声测试	259
6.2.7 输出负载牵引测试	261
6.3 T/R 组件接收测试技术	263
6.3.1 接收幅度和相位测试	263
6.3.2 噪声系数测试	264
6.3.3 非线性特性测试(1dB 压缩和三阶截获点)	267
6.3.4 低噪声放大器和限幅器恢复时间测试	268
6.4 T/R 组件其他指标测试	270
6.4.1 收发转换时间测试	270
6.4.2 移相置位时间测试	271
6.4.3 功耗和效率测试	271
6.4.4 振荡趋势测试	273
6.5 T/R 组件自动测试系统	273
6.5.1 T/R 组件自动测试系统概述	273
6.5.2 T/R 组件自动测试系统实例	277
6.6 阵面 T/R 组件微波监测和校准	280
6.6.1 阵面内监测、校准	280
6.6.2 阵面外监测、校准	281
6.6.3 监测、校准实例	282
6.6.4 测量误差控制	283
参考文献	284
第 7 章 T/R 组件计算机辅助设计技术	287
7.1 引言	287
7.2 电磁场计算机辅助设计	288
7.2.1 有限元法	288
7.2.2 矩量法	289
7.2.3 时域差分法	290