

相控阵雷达技术丛书

相控阵雷达馈线技术

Phased Array Radar Feedline Technology



殷连生 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

TN958.92/2

2007

相控阵雷达技术丛书

相控阵雷达馈线技术

PHASED ARRAY RADAR
FEED LINE TECHNOLOGY

殷连生 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

相控阵雷达馈线技术/殷连生著. —北京:国防工业出版社, 2007. 12

(相控阵雷达技术丛书)

ISBN 978-7-118-05371-5

I. 相... II. 殷... III. 相控阵雷达—馈电设备 IV. TN958.92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 146112 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×960 1/16 印张 27 字数 500 千字

2007 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 85.00 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。

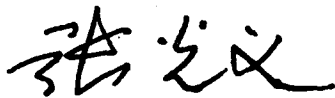
《相控阵雷达技术丛书》共包括七个分册,内容涵盖相控阵雷达天线、相控阵雷达馈线、相控阵雷达接收系统、有源相控阵雷达及其关键部件收发组件、相控阵雷达数据处理、宽带相控阵雷达及相控阵雷达原理。

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

自 20 世纪 60 年代相控阵雷达问世以来,突出的优越性使它获得了迅速的发展。如今相控阵雷达不仅在军用陆、海、空、航天等领域获得广泛应用,而且正在从军用扩展到民用;尤其在固态有源阵和瞬时大带宽与数字技术等方面的进展,使相控阵雷达展现了非常美好的前景。馈线在相控阵雷达中占有特别重要的位置,不仅复杂,而且现有相控阵雷达的许多特有功能如电扫描、多波束、波束赋形和副瓣电平控制等都由馈线来实现。作者从开始工作至今 40 余年来一直从事相控阵雷达馈线的研制与开发工作,根据所学基础理论和技术的应用,结合参与研制和开发工作的经验与体会,完成本书的写作。希望它能为从事雷达馈线研制和使用的人员提供有益的参考。

本书作为《相控阵雷达技术丛书》的一个分册,不同于一般的微波技术和微波电路以及其他微波专著,除专业性和实用性较强外,在对相控阵馈线技术的描述中强调基本概念清楚、设计目标明确,以及先进性和工程实用性的结合,特别注重基础理论与工程实践的结合,基础理论对工程实践的指导作用和在实践中总结出的经验、理论与方法。

全书共分 12 章,以相控阵雷达馈线为主线分章开展论述。第 1 章介绍相控阵雷达馈线的主要特征、技术要求和主要技术,概要论述相控阵雷达馈电的方式和组成。第 2 章~第 5 章结合前人和作者多年工作的经验与体会,主要论述相控阵雷达馈线中常用的基础理论、传输线和基本的微波无源元件。第 6 章重点论述有代表性的和新型的微波旋转接头的工作原理、特点与设计方法。第 7 章~第 9 章重点论述微波移相器和控制电路、T/R 组件和 TR 组合单元以及微波晶体管放大器与功率控制等。第

10 章主要论述相控阵雷达馈线系统的设计技术。随着计算机、数值计算和优化理论的发展,微波计算机辅助设计技术已成为微波设计师不可缺少的手段。第 11 章概要论述微波计算机辅助设计技术和它在相控阵馈线设计中的应用。相控阵雷达馈线的幅相要求非常严格,第 12 章重点论述相控阵雷达馈线的幅相测量、监测和校正技术,以及低副瓣电平的保证等。

雷达馈线特别是相控阵雷达馈线采用了许多基础技术和新技术,本书不可能一一介绍,只能通过一些典型实例来阐明相控阵雷达馈线所需的基础理论和技术,特需元件和组件的原理与设计,系统幅相保证的理论基础和实现方法以及新技术的应用和发展趋势等。

能完成本书的写作,首先要感谢作者工作单位——南京电子技术研究所的领导和张光义院士、贲德院士、林守远、黄为倬、华海根、王德纯、刘岱、金林、胡明春、林幼权、郑新、余文震、赵玉洁等专家及与作者长期共同工作的同事们。他们的指导与支持,使作者在工作中得以进步与提高。在本书写作过程中,作者曾与许多同志进行过有益的讨论,特别是杨乃恒研究员、东南大学杨铨让博导和国防工业出版社王晓光编审等,谨此对他们表示深切的感谢,对书中引用文献资料的原作者致以深切的谢意。再次感谢陈玲主任、王炳如、谷静、张权、强素军、王园、张文勇等同志对编辑、校对和大量文字处理工作给予的支持和帮助。

由于作者水平所限,书中错误和缺点在所难免,恳请读者批评指正。

殷连生

2007 年 6 月

内 容 简 介

馈线是雷达中不可缺少的最为重要的分系统之一,在相控阵雷达中占有特别重要的位置,除系统复杂外,现有相控阵雷达的许多特有功能,如电扫描、多波束、波束赋形和副瓣电平控制等都由馈线来实现。本书着重介绍相控阵雷达馈线系统、馈电网络、移相器与控制电路、T/R 组件等众多关键部位的特点、功能、性能指标、工作原理和设计方法,并给出相控阵馈线的一些幅相测试方法,有源相控阵天馈线系统的幅相监测与校正的原理和应用。书中对相控阵馈线的理论与技术基础以及发展趋势和新技术的应用等也作了较详细的介绍。

本书的设计性和实用性对从事雷达馈线系统技术研究和制造的工程技术人员是一本很有价值的工具书,也是从事雷达装备使用与维护的雷达部队官兵系统学习相控阵馈线知识的参考书,并可作为高等学校相关专业高年级学生和硕士研究生的教材和参考书。

Feedline is one of the most important and indispensable radar subsystems. Besides that the feedline subsystem is very complicated, many special functions of current PHA (Phased Array) radars, such as electronic scan, multi-beam, beam shaping and sidelobe level control, etc, are all performed by the feedline. In this book, features, functions, performance specifications, operating principles and design methods of many key parts, like PHA radar feedline subsystem, feed network, phase shifter, control circuit and T/R modules, are introduced in detail and several phase-amplitude test methods for PHA feedline are also given. Principle and application of phase-amplitude monitoring and correction for active phased array feedline system, PHA feedline theories, supporting technologies, development trends and application of new technologies are also discussed detailedly.

This book with perfect design and great practicability is very valuable for technical personnel employed in technical research and manufacture regarding radar feedline system, serves as a reference book that is helpful to military officials and soldiers engaged in radar operation and maintenance for systematically learning PHA feedline, also can be used as a teaching material and a reference book for senior students and masters with related specialties in colleges and universities.

目 录

第 1 章 相控阵雷达馈线	1
1.1 引言	1
1.2 移相器与相控阵雷达天线的电扫描	4
1.3 相控阵雷达的馈电方式	6
1.3.1 空间馈电	6
1.3.2 强迫馈电	8
1.4 多波束	9
1.4.1 中频多波束形成	10
1.4.2 数字多波束形成	12
1.4.3 高频多波束形成	14
1.4.4 Butler 多波束矩阵	16
1.4.5 宽带波束形成器	20
1.4.6 低成本波束形成器	21
1.5 频扫阵的慢波线	23
1.6 有源相控阵雷达馈线	24
参考文献	27
第 2 章 雷达馈线系统的理论基础	31
2.1 均匀传输线	31
2.2 均匀传输线方程及其正弦稳态解	33
2.3 输入阻抗、反射系数和电压驻波比	38
2.4 均匀传输线的工作状态	41
2.4.1 均匀无耗传输线的工作状态	41

2.4.2 均匀有耗传输线的工作状态	47
2.5 TEM 波传输线的常用公式	49
2.6 史密斯圆图的构成及其应用	50
2.7 传输线的阻抗匹配	54
参考文献	58
第 3 章 雷达馈线常用的传输线	59
3.1 引言	59
3.2 矩形波导	61
3.3 脊波导	70
3.4 圆波导	76
3.5 同轴线	84
3.6 带状线	89
3.7 微带线	92
3.8 其他形式的微波传输线	96
参考文献	102
第 4 章 并馈网络的设计基础	105
4.1 引言	105
4.2 $1/4$ 波长阶梯阻抗变换器	105
4.3 简单的功率分配器	111
4.4 二路隔离式功率分配器	113
4.5 N 路隔离式功率分配器	114
4.6 径向辐射型功率分配器	116
4.7 宽带功率分配器	119
4.8 波导功率分配/合成器	124
4.9 波导魔 T	126
4.10 同轴线魔 T	132
4.11 3dB 混合环	134
4.12 微带魔 T	137
参考文献	138
第 5 章 串馈网络的设计基础	141
5.1 引言	141
5.2 单节耦合传输线定向耦合器	144
5.3 微带线定向耦合器与它的方向性	148
5.4 宽带弱耦合同轴线定向耦合器	153
5.5 微带线 3dB 电桥	155

5.5.1 交指线 3dB 电桥	155
5.5.2 立式 3dB 电桥	157
5.5.3 定向耦合器的级联	159
5.6 重耦合 3dB 电桥	160
5.7 高功率宽边耦合带状线 3dB 电桥	162
5.8 孔隙耦合定向耦合器	165
5.9 波导窄壁耦合裂缝电桥	169
5.10 波导宽壁耦合裂缝电桥	171
5.11 矩形波导 TE_{10} 、TEM 模电桥	173
5.12 微带线和槽线组合构成的定向耦合器	175
5.13 串馈功率分配器	176
参考文献	177
第 6 章 机—相扫雷达馈线中的微波旋转接头	180
6.1 引言	180
6.2 圆波导旋转接头	181
6.3 0dB 波导旋转接头	182
6.4 探针式波导旋转接头	185
6.5 门钮式波导旋转接头	190
6.6 重入式同轴线谐振腔旋转接头	193
6.7 低通滤波器型同轴线宽带旋转接头	194
6.8 同轴线扼流式宽带旋转接头	196
6.9 双路同轴线旋转接头的隔离度分析	198
6.10 旋转接头的扼流结构和轴承的位置	199
参考文献	202
第 7 章 移相器和微波控制电路	204
7.1 引言	204
7.2 PIN 二极管及其等效电路	204
7.3 PIN 二极管的功率容量	207
7.4 PIN 二极管的开关时间	211
7.5 单路 PIN 二极管开关	212
7.5.1 单管单路开关——基本的开关单元	212
7.5.2 多管单路开关	213
7.5.3 谐振式开关	217
7.5.4 宽带单路开关	218
7.6 PIN 二极管电控衰减器	220

7.7	微波限幅器	224
7.8	PIN 二极管移相器	230
7.8.1	一般介绍	230
7.8.2	加载线式移相器	231
7.8.3	反射式移相器	231
7.8.4	开关选通式移相器	235
7.9	变容二极管移相器	239
7.10	铁氧体移相器	242
	参考文献	246
第 8 章	T/R 组件与 TR 组合单元	249
8.1	有源相控阵与 T/R 组件	249
8.2	T/R 组件的组成和工作原理	250
8.3	T/R 组件的主要技术要求	251
8.4	实用 T/R 组件举例	252
8.5	T/R 组件的设计	255
8.5.1	T/R 组件一体化设计考虑	255
8.5.2	T/R 组件具体的设计要求	256
8.5.3	高功率、高性能收/发组件设计举例	258
8.6	T/R 组件与微电子技术	260
8.7	微电子机械系统技术在微波集成电路和相控阵中的应用	262
8.8	T/R 组件的发展趋势	268
8.9	TR 组合单元的基本组成和工作原理	269
8.10	TR 组合单元的主要技术要求	270
8.11	TR 组合单元的设计	271
8.12	功率放大器的幅度均衡和均衡器	273
	参考文献	279
第 9 章	微波晶体管放大器的设计	282
9.1	引言	282
9.2	微波晶体管低噪声放大器设计	282
9.2.1	晶体管的选择及其工作稳定性的判别	282
9.2.2	低噪声放大器输入、输出匹配网络的设计	283
9.3	平衡式低噪声放大器	289
9.4	微波晶体管功率放大器设计	290
9.4.1	微波晶体管功率放大器设计的一般考虑	290
9.4.2	用大信号阻抗设计功率放大器	292

9.4.3	功率放大器的热设计	295
9.5	微波晶体管功率放大模块	297
9.5.1	功率放大模块设计的一般考虑	297
9.5.2	功率合成技术	298
9.5.3	功率合成器	303
9.6	微波晶体管功率放大器输出功率的控制	306
9.7	器件的发展促进功率放大组件和固态发射机的进步	308
	参考文献	309
第 10 章	相控阵雷达馈线系统的设计	311
10.1	引言	311
10.2	波束最小跃度与移相器虚位技术	311
10.3	馈线系统中的失配引起的驻波副瓣	313
10.4	馈电网络设计	317
10.4.1	串馈网络	317
10.4.2	双频圆极化网络	318
10.4.3	传输监测信号的馈电网络	319
10.4.4	并馈网络	320
10.4.5	传输校正信号的馈电网络	320
10.5	低副瓣有源相控阵面天线和馈线系统的一体化设计	323
10.6	T/R 组件与馈电网络的统一设计	327
10.7	高可靠性的有源相控阵面的构成	329
	参考文献	330
第 11 章	计算机辅助设计	332
11.1	引言	332
11.2	微波电路的计算机辅助分析	334
11.2.1	待定导纳矩阵分析	335
11.2.2	双口网络转移矩阵分析	337
11.2.3	双口网络散射矩阵分析	340
11.2.4	多口网络的互联与简化	341
11.3	电磁场的计算机辅助分析	344
11.3.1	有限差分法	344
11.3.2	有限单元法	349
11.3.3	矩量法	354
11.4	微波电路的最优化设计	358
11.4.1	最优化设计的基本原理	358