

相控阵雷达技术丛书

# 相控阵雷达原理

*Principles of Phased Array Radar*



张光义 著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

相控阵雷达技术丛书

# 相控阵雷达原理

PRINCIPLES OF PHASED ARRAY RADAR

张光义 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

相控阵雷达原理 / 张光义著. —北京: 国防工业出版社, 2009. 12

(相控阵雷达技术丛书)

ISBN 978-7-118-06571-8

I. ①相… II. ①张… III. ①相控阵雷达—理论  
IV. ①TN958.92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 182378 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 787×1092 1/16 印张 34 字数 627 千字

2009 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 109.00 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。

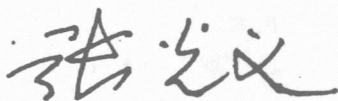
《相控阵雷达技术丛书》共包括七个分册,内容涵盖相控阵雷达天线、相控阵雷达馈线、相控阵雷达接收系统、有源相控阵雷达及其关键部件收发组件、相控阵雷达数据处理、宽带相控阵雷达及相控阵雷达原理。

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、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

---

---

相控阵雷达技术的发展受到国内外普遍的重视。目前,相控阵雷达技术已广泛应用于几乎所有类型的军用雷达,包括各种地基、舰载、机载、星载雷达;在军民两用及民用雷达中,例如,空中交通管制雷达、气象雷达、空间载气象探测雷达等,也已开始采用相控阵雷达技术。

由于相控阵雷达的应用日益广泛,从事相控阵雷达研制生产、使用的相关单位及科技工作者逐渐增多,深入了解相控阵雷达及其技术的需求日益增长。作者曾在近几年为南京电子技术研究所的科技人员及研究生讲述“相控阵雷达原理”课程,这在很大程度上促进了作者克服困难完成了本书的写作。本书将与另外6本由长期从事相控阵雷达研制工作的研究员所著的著作一起,作为《相控阵雷达技术丛书》出版,奉献给从事雷达,特别是相控阵雷达研制、生产、使用和教学的有关人员参考。

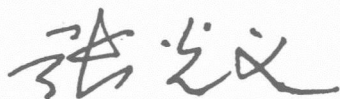
本书共分11章。第1章为相控阵雷达概述;第2章介绍相控阵天线原理;第3章讨论相控阵雷达天线的馈线网络;第4章介绍相控阵雷达天线波束指向与形状的捷变能力及其实现;第5章对相控阵雷达主要指标与工作方式进行分析与计算,这对深入理解相控阵雷达原理有重要帮助;第6章讨论多波束相控阵雷达,包括发射天线和接收天线的多波束数字形成方法与算法;第7章讨论有源相控阵雷达,对其中的关键,即发射/接收组件作了较详细的介绍;第8章着重讨论相控阵雷达信号检测,包括空一时自适应信号处理的原理;第9章介绍相控阵雷达的角度测量;第10章讨论相控阵雷达的距离测量和速度测量方法;第11章讨论相控阵雷达的目标特征测量及有关宽带相控阵雷达技术问题。

本书的写作是在作者所在单位——南京电子技术研究所的前任所长

严敦善、左群声和现任所长罗群及其他所领导的鼓励和大力支持下进行的,在写作过程中得到张直中院士、贲德院士、周万幸、马林、倪嘉骝、陈国海、黄为倬、华海根、王德纯、金林、吴迺、徐振来、周冠杰、董树人、董士嘉、殷连生、郭崇贤、赵玉洁、叶渭川、陈玲等专家的帮助和支持。特别要感谢王炳如、王园、谷静、张文勇、张坚、石凯军、徐芳华等同志为本书所作的大量文字处理工作,使作者能有更多的时间专心从事写作。

参考文献中增加了扩展阅读的材料,与该章总体内容相映。

由于作者水平所限,书中难免有错误和缺点,恳请读者批评指正。



2009年6月

# 目 录

---

---

第 1 章 概论	1
1.1 雷达任务与相控阵雷达发展	1
1.1.1 雷达发展简况	1
1.1.2 雷达观测任务	2
1.1.3 对雷达发展的新需求	7
1.2 现代雷达系统概念与相控阵技术	9
1.2.1 单部雷达系统	9
1.2.2 多部雷达及其他传感器构成的雷达系统	11
1.3 相控阵雷达概述	13
1.3.1 相控阵天线简介	13
1.3.2 相控阵雷达组成	13
1.3.3 相控阵雷达技术	14
1.4 相控阵雷达的特点	15
1.4.1 相控阵天线的主要技术特点	15
1.4.2 相控阵雷达的主要工作特点	18
1.5 相控阵雷达的发展	21
1.5.1 初期发展阶段的主要需求与推动力	22
1.5.2 相控阵技术在战术雷达中的应用	23
参考文献	24
第 2 章 相控阵雷达天线	25
2.1 相控阵雷达天线的类型	25
2.2 线性相控阵天线	27
2.2.1 线性相控阵天线原理	27



2.2.2	线性相控阵天线波束的特性 .....	30
2.2.3	相控阵天线波束栅瓣的形成与抑制 .....	31
2.2.4	时间延迟器对抑制栅瓣的作用 .....	34
2.2.5	宽波束一维相扫雷达中方位与仰角的耦合 .....	36
2.3	平面相控阵天线 .....	37
2.3.1	平面相控阵天线原理 .....	37
2.3.2	平面相控阵天线方向图的分解 .....	40
2.3.3	平面相控阵天线波束栅瓣形成条件 .....	42
2.3.4	天线单元按三角形排列的平面相控阵天线 .....	44
2.3.5	平面相控阵天线的波束宽度与增益 .....	46
2.4	共形相控阵天线 .....	47
2.4.1	共形相控阵天线的的作用 .....	48
2.4.2	共形相控阵天线原理 .....	50
2.4.3	圆形相控阵天线原理 .....	53
2.4.4	共形相控阵天线的的应用 .....	57
2.5	实现低副瓣相控阵天线的方法 .....	60
2.5.1	幅度加权法的系统考虑 .....	60
2.5.2	密度加权相控阵天线 .....	65
2.5.3	相位加权 .....	72
2.6	多极化相控阵天线原理 .....	74
2.6.1	多极化相控阵天线单元与不同极化波的形成 .....	75
2.6.2	椭圆极化波参数与椭圆极化波的合成与分解 .....	81
2.7	相控阵雷达的极化工作状态与多极化相控阵天线的构成 .....	87
2.7.1	相控阵雷达的极化工作状态 .....	87
2.7.2	圆极化相控阵天线的极化不匹配损失 .....	92
2.7.3	多极化相控阵天线的构成 .....	96
	参考文献 .....	99
<b>第3章</b>	<b>相控阵雷达天线的馈线网络</b> .....	<b>101</b>
3.1	馈线网络的主要馈电方式 .....	102
3.1.1	强制馈电 .....	102
3.1.2	空间馈电 .....	105
3.1.3	空间馈电与强制馈电结合的混合馈电方式 .....	107
3.2	相控阵天线的馈相原理 .....	108
3.2.1	天线波束扫描的相位控制、时间控制及移相器的选择 .....	108
3.2.2	实现信号相移的基本原理 .....	108



3.2.3	移相器实现相移的工作频率	110
3.2.4	MEMS 移相器与时间延迟线	111
3.3	串行馈电网络	113
3.3.1	串行馈电与馈相	113
3.3.2	频率扫描天线的馈线网络	115
3.3.3	采用串联移相器的相控阵列天线	120
3.4	子天线阵划分与馈线网络	121
3.4.1	按“馈相矩阵”的子阵划分方法	121
3.4.2	按小面阵方式实现的馈线网络	123
3.4.3	平面相控阵天线的子阵划分与“块移相器”的原理与应用	124
3.5	馈相方式与随机馈相原理	126
3.5.1	数字式移相器的位数与天线波束的波束跃度	127
3.5.2	数字式移相器的虚位技术	129
3.5.3	随机馈相原理	131
3.6	馈线网络中信号幅度与相位一致性要求与幅度、相位误差的 测量、调整	134
3.6.1	相控阵天线信号幅度、相位误差的影响	135
3.6.2	馈线网络中节点反射对通道间幅度相位一致性的影响	138
3.6.3	馈线网络在放大器输出端的驻波系数计算	144
3.6.4	馈线网络的幅度与相位监测方法	147
	参考文献	149
<b>第 4 章</b>	<b>相控阵雷达天线波束的捷变能力</b>	<b>151</b>
4.1	相控阵天线波束指向捷变的实现	151
4.1.1	相控阵天线波束指向与波束控制数码的对应关系	152
4.1.2	一维相扫雷达波束指向及其对应的波控数码	155
4.1.3	天线单元不规则排列相控阵天线的波控数码计算	158
4.2	不同工作状态下波控数码的计算	161
4.2.1	跟踪状态时波控数码的计算	161
4.2.2	跟踪状态对最小波束跃度的要求	164
4.2.3	频率捷变时天线波束指向与波控数码的对应关系	167
4.3	波控系统的响应时间与天线波束的转换时间	168
4.3.1	搜索状态时波控系统的响应时间与天线波束转换时间	169
4.3.2	跟踪状态时的波控系统响应时间与波束转换时间	170
4.3.3	降低波束系统响应时间的措施	170
4.4	波束控制系统的组成	172

4.4.1	波束控制系统的结构	172
4.4.2	波束控制系统的组成对波束捷变的影响	173
4.5	相控阵雷达天线波束形状的捷变能力	175
4.5.1	相控阵天线波束形状与口径照射函数的关系	175
4.5.2	相控阵天线的副瓣抑制	177
4.5.3	用相位加权实现天线波束形状的改变	182
4.5.4	天线波束展宽的实现	183
	参考文献	184
<b>第5章</b>	<b>相控阵雷达的多工作方式</b>	<b>185</b>
5.1	相控阵雷达的主要性能	185
5.1.1	相控阵雷达的主要战术指标	185
5.1.2	影响相控阵雷达系统性能的主要技术指标	194
5.2	相控阵雷达的搜索方式及其控制参数	195
5.2.1	相控阵雷达搜索方式的控制参数	196
5.2.2	相控阵雷达搜索数据率计算	196
5.2.3	常用搜索方式	198
5.3	相控阵雷达的跟踪工作方式	201
5.3.1	从搜索到跟踪的过渡过程	201
5.3.2	跟踪数据率与目标跟踪状态的划分	203
5.3.3	边跟踪边搜索(TWS)与跟踪加搜索(TAS)工作方式	204
5.3.4	跟踪时间的计算	206
5.3.5	跟踪目标数目的计算	207
5.4	搜索与跟踪工作方式下雷达作用距离计算	208
5.4.1	脉冲雷达作用距离的形式	209
5.4.2	搜索工作模式的作用距离计算	210
5.4.3	跟踪工作模式的作用距离计算	212
5.5	相控阵雷达工作方式的能量管理	214
5.5.1	信号能量管理的调节项目与调节措施	215
5.5.2	按目标远近及其目标反射面积大小进行信号能量管理	216
5.5.3	搜索与跟踪状态之间的信号能量分配	216
5.5.4	波束驻留数的选择与信号能量管理	217
	参考文献	219
<b>第6章</b>	<b>多波束相控阵雷达</b>	<b>220</b>
6.1	多波束相控阵天线的应用	220
6.1.1	多波束单脉冲测角	220

6.1.2 接收多波束对提高雷达抗干扰能力和生存能力的作用 ..... 221

6.1.3 多波束与雷达数据率 ..... 225

6.2 相控阵发射天线阵多个波束的形成方法 ..... 225

6.2.1 利用时间分割原理形成多个发射波束 ..... 226

6.2.2 并行发射多波束的形成 ..... 227

6.3 Blass 多波束形成 ..... 229

6.3.1 Blass 多波束形成原理 ..... 229

6.3.2 Blass 多波束形成的应用 ..... 230

6.4 Butler 多波束矩阵 ..... 231

6.4.1 Butler 多波束矩阵原理 ..... 231

6.4.2 Butler 多波束方向图的计算与特性 ..... 233

6.5 接收多波束形成方法 ..... 236

6.5.1 在高频形成多个接收波束的方法 ..... 236

6.5.2 在中频形成多个接收波束的方法 ..... 238

6.5.3 在视频与光频上形成多个接收波束 ..... 239

6.6 数字多波束形成方法 ..... 241

6.6.1 接收波束数字形成原理 ..... 242

6.6.2 数字接收多波束形成算法 ..... 244

6.6.3 采用数字波束形成时的幅相误差的补偿 ..... 247

6.6.4 数字接收多波束形成技术的应用 ..... 248

6.7 发射多波束的数字形成 ..... 249

6.7.1 在子天线阵级别上实现发射波束的数字形成方法 ..... 250

6.7.2 在天线单元级别上实现发射波束的数字形式 ..... 253

6.7.3 同时多发射波束的数字形成方法 ..... 254

参考文献 ..... 254

**第7章 有源相控阵雷达** ..... 256

7.1 有源相控阵天线 ..... 256

7.1.1 有源相控阵天线的应用与发展 ..... 256

7.1.2 有源相控阵天线的技术特点 ..... 258

7.2 发射/接收组件的功能与要求 ..... 260

7.2.1 T/R 组件的构成与主要功能 ..... 260

7.2.2 对 T/R 组件的主要要求 ..... 263

7.3 发射接收组件的类型及其应用 ..... 264

7.3.1 射频 T/R 组件 ..... 264

7.3.2 中频 T/R 组件及其应用 ..... 265

7.4	数字 T/R 组件	267
7.4.1	接收数字 T/R 组件	268
7.4.2	数字 T/R 组件及其工作原理	268
7.4.3	数字 T/R 组件的工作特点	269
7.4.4	采用数字 T/R 组件的有源相控阵雷达的工作特点	270
7.5	数字式有源相控阵天线的应用与性能	272
7.5.1	在子天线阵级别上的数字式有源相控阵天线	272
7.5.2	VHF 波段有源相控阵雷达	273
7.6	有源相控阵发射天线低副瓣性能的实现	274
7.6.1	有源相控阵天线密度加权方法	274
7.6.2	有源相控阵天线的相位加权方法	275
7.6.3	增加发射功率放大器品种的意义	275
7.6.4	按作用距离远近分段进行密度加权	276
7.6.5	混合馈电结构的有源相控阵天线	276
7.7	有源相控阵雷达的功率指标	277
7.7.1	有源相控阵天线发射机输出总功率计算	277
7.7.2	有源相控阵发射天线初级电源计算	279
7.7.3	有源相控阵天线的总效率	279
7.7.4	有源相控阵天线阵面散热量的计算	280
7.8	有源相控阵接收天线噪声系数计算	281
7.8.1	无源相控阵接收通道噪声系数的计算	281
7.8.2	有源相控阵接收天线的噪声系数	285
7.9	相控阵雷达接收系统动态范围计算	287
7.9.1	相控阵雷达接收机动态范围	287
7.9.2	相控阵雷达接收系统中各级放大器动态范围	290
7.10	采用宽禁带技术的有源相控阵雷达	292
7.10.1	对固态 T/R 组件的一些新要求与宽禁带器件特点	292
7.10.2	宽禁带半导体材料在有源相控阵雷达中的应用	295
	参考文献	299
<b>第 8 章</b>	<b>相控阵雷达信号检测</b>	<b>301</b>
8.1	相控阵雷达信号检测的特点	301
8.1.1	信号检测问题与相控阵雷达信号检测的灵活性	301
8.1.2	相控阵雷达信号检测特点详介	303
8.2	大时宽带宽积信号在相控阵雷达中的应用	308
8.2.1	相控阵雷达搜索信号波形考虑	308