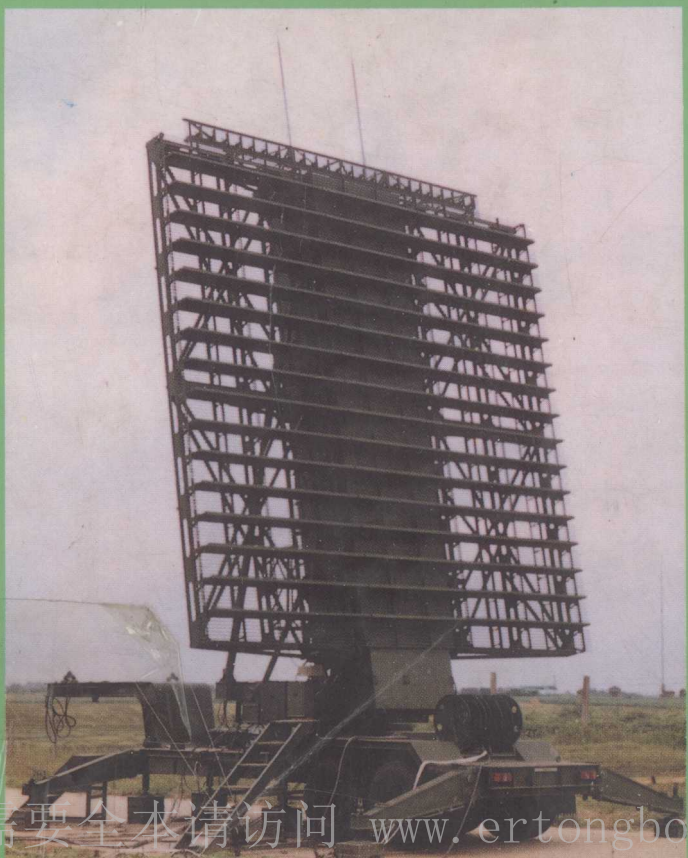
张光义 著

相控阵雷达系统

XIANGKONGZHEN LEIDA XITONG

GUOFANG GONGYE CHUBANSHE



需要全本请访问 www.ertongbook.com

TN958.92
1003-3

相控阵雷达系统

张光义 著





国防工业出版社
·北京·

200204672

图书在版编目(CIP)数据

相控阵雷达系统/张光义著 .—北京:国防工业出版社,1994(2001.9 重印)
ISBN 7-118-01239-4

Ⅰ.相...
Ⅱ.张...
Ⅲ.相控阵雷达
Ⅳ.TN958.92

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 850×1168 1/32 印张 12¼ 316 千字
1994 年 8 月第 1 版 2001 年 9 月北京第 4 次印刷
印数:3001－5000 册 定价:18.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

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，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. 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，对国防科技发展具有较大推动作用的专著；密切结合科技现代化和国防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，密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作，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用。在改革开放的新形势下，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工业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

需要全本请访问 www.ertongbook.com

国防科技图书出版基金
第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄　宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	
	曾　铎			
秘书长	刘琯德			
委　　员	尤子平	朱森元	朵英贤	
（按姓氏笔划为序）	刘　仁	何庆芝	何国伟	
	何新贵	宋家树	张汝果	
	范学虹	胡万忱	柯有安	
	侯　迁	侯正明	莫梧生	
	崔尔杰			

序

相控阵雷达在60年代末开始问世，当时的目的是为了实现对洲际弹道导弹的预警，因为远程导弹的预警这一战略任务，除了用天线波束能灵活扫描或跳变的相控阵体制外，没有其他体制可有效地完成。70年代，由于火热的军备竞赛，美国推出了多种战略和战术相控阵雷达，欧洲国家也推出了少量战术相控阵雷达。中国在70年代末，也研制成一台二维相扫的战略相控阵雷达，用它看到了别国发射的远程导弹和正在外空游转的许多卫星，1980年，正确地预报了美国天空实验室坠落的时间和地点。但是，当时由于相控阵雷达的成本很高，战术性雷达还是以其他体制作为装备更经济合算，所以，当时国际上也只是以掌握相控阵体制和有关技术为主要目的，而真正采用相控阵雷达作部队装备的极少。到80年代，由于电子计算机、超大规模集成电路、G/H(老C)波段以下的固态功率器件、各种波段的移相器等等的日趋成熟和成本的大幅度降低，以及数字波束的形成、自适应理论和技术、低副瓣技术以及智能化理论和技术的不断发展，使一维和二维相控阵雷达在性能价格比，——特别是雷达的全生命周期的性能价格比方面更具有吸引力，故80年代是国际上相控阵雷达大发展的年代，先进国家研制了多种不同用途的战术相控阵雷达，中国也不例外。到1993年，相控阵雷达不仅在军用陆、海、空、航天中已经被广泛采用，并且正从军用扩展到民用。加之相控阵体制在固态阵和瞬时大带宽两方面的进展，可以预期，相控阵雷达的未来将具有前途无量的前景。

本书作者从1964年起即开始二维相扫战略相控阵总体方案的研究，他是完成中国第一台超远程战略相控阵雷达的负责人之一。80年代以来，作者指导与参加本所多种固态相控阵雷达的研

究工作。

30年来，作者对多种相控阵雷达的系统总体、天馈线、信号和数据处理等的一系列理论分析、研究试验、测试，以及在雷达使用中对飞机、导弹、卫星等多目标的边搜索边跟踪的能力和精度，通过理论和实践的螺旋上升和追踪国际新理论新技术，不断加以总结并得到提高。本书是作者多年科研成果的总结。作者在中国科学院中国科技大学讲学以及后来为本所大学毕业生和研究生讲学编写的教材的基础上，对已发表的多篇论文加以整理和充实，形成了本书的完整体系。

全书共分9章，以相控阵雷达系统为主轴分章展开论述。首先撰明雷达系统的组成，主要的战术特征和技术指标，以及相控阵体制的优点和广阔的应用前景。相控阵体制之所以优于其他体制，在于其天线波束的灵活性和自适应性，因此，全书用了较多篇幅，论述不同的天线形式、天线的波束控制、馈电方式、多波束的形成方法以及天线的系统性能，书中论述了大量有关的理论和具体实践中的问题。当然，要完成上列功能，不能离开馈线系统和电子计算机的控制。书中还从系统总体的角度，论述了相控阵雷达的发射系统、接收系统和各种信号处理方式，使读者对相控阵雷达的体制和系统有一个多方面全景的了解。

近10年来，有关相控阵体制和技术的专题论文虽很多，但国内尚无一本集其大成地系统论述的书籍，国外也极少见。因此，本书的推出，弥补了这一缺陷。全书深入浅出，对理论研究者、雷达设计者和使用者都很有参考价值，对大学教育和研究生亦有参考价值。我认为本书是一本值得向广大读者推荐的好书。

张直中

1993年3月

前　言

雷达在国防建设及国民经济建设中都有重要作用。随着作为雷达观测对象的各种飞行器性能的提高、雷达工作环境的恶化及雷达应完成的任务的增多，相控阵雷达的应用日益广泛，从事相控阵雷达研制的人员也逐渐增多。作者根据参加相控阵雷达研制工作的经验，在给研究生及新参加工作的大学生讲授《雷达系统》的基础上，将有关相控阵雷达总体的部分加以充实，完成了本书的写作，希望它能为从事雷达研制特别是相控阵雷达研制工作的有关人员提供有益的参考。

相控阵雷达中采用了许多新的技术，本书不可能都有所涉及。本书的重点是讨论相控阵雷达的总体问题。

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张直中、王福如、薛国纬、林守远、黄为倬等许多老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，他们辛勤工作的成果，为作者提供了重要的写作基础。在本书写作过程中，南京电子技术研究所的领导与同事们曾给予很大的支持，作者曾与许多同志进行过有益的讨论。《现代雷达》编辑部的丁燮华同志为本书的文字修定等做了大量工作。谨此对他们表示深切的感谢！

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。

张光义

目　录

第一章　相控阵雷达系统概述 …… 1
1.1　现代雷达的主要要求及相控阵技术在现代雷达中的应用 …… 2
1.1.1　C³I 系统中三坐标雷达的主要要求及相控阵技术在其中的应用 …… 3
1.1.2　超远程雷达的主要要求及相控阵技术在其中的应用 …… 5
1.1.3　相控阵技术在多目标、多功能雷达中的应用 …… 9
1.2　相控阵雷达系统的组成及主要指标 …… 10
1.2.1　相控阵雷达系统的组成 …… 10
1.2.2　相控阵雷达的主要指标 …… 13
1.3　雷达方程和相控阵雷达的优点与潜力 …… 19
1.3.1　常用的雷达方程形式 …… 19
1.3.2　搜索状态下的雷达方程 …… 20
1.3.3　跟踪状态下的雷达方程 …… 22
1.4　相控阵雷达的工作方式 …… 23
1.4.1　相控阵雷达的数据率 …… 23
1.4.2　相控阵雷达的搜索方式 …… 26
1.4.3　相控阵雷达的跟踪方式 …… 29
第二章　相控阵天线原理 …… 36
2.1　线阵的基本特性 …… 36
2.1.1　线阵天线的方向图函数 …… 36
2.1.2　线阵天线的基本特性 …… 40
2.2　端射线阵 …… 45
2.3　串馈线阵与频率扫描天线 …… 46
2.4　平面相控阵天线 …… 52
2.4.1　平面相控阵天线的扫描方向图 …… 53
2.4.2　平面相控阵天线的栅瓣位置 …… 56
2.4.3　阵列单元按三角形排列的相控阵天线特性 …… 57
2.5　共形阵列天线 …… 59
2.5.1　共形阵列天线的方向图计算 …… 60

2.5.2 圆形阵列的波束形成与扫描 …… 63
2.6 阵列天线中天线单元之间的互耦及其影响 …… 67
第三章 相控阵天线的馈电方式 …… 72
3.1 平面相控阵天线的馈相方式和子阵划分 …… 72
3.2 相控阵天线的馈电方式 …… 77
3.2.1 强制馈电 …… 78
3.2.2 空间馈电 …… 79
3.3 波束跃度与移相器的虚位技术 …… 82
3.3.1 移相器简介 …… 82
3.3.2 波束跃度 …… 83
3.3.3 移相器的虚位技术 …… 85
3.4 随机馈相 …… 89
3.5 有限扫描阵列天线及其馈电方式 …… 93
3.5.1 有限扫描阵列天线的形式 …… 93
3.5.2 不规则子阵排列的有限扫描阵列方向图的计算 …… 96
第四章 相控阵天线的波束控制 …… 98
4.1 平面相控阵天线波束控制器的基本功能 …… 98
4.2 波控系统的其他功能 …… 102
4.2.1 随机馈相对波控系统的要求 …… 102
4.2.2 天馈线相位误差的补偿 …… 103
4.2.3 频率捷变后天线波束指向的修正 …… 104
4.2.4 对移相器工作相位的监测 …… 106
4.3 天线波束形状的变化对波控系统的要求 …… 106
4.4 天线近场测试对波控系统的要求 …… 108
4.5 波控系统的响应时间 …… 110
4.6 波控系统的组成及减少设备量的措施 …… 113
4.7 波控电流的计算 …… 116
4.7.1 波控电流最大值的计算 …… 117
4.7.2 波控电流起伏的计算 …… 120
4.7.3 阵面相位参考点的选择对波控电流起伏的影响 …… 122
4.8 相控阵雷达天线的最小波束跃度 …… 125
4.8.1 波束跃度与波控数码的计算位数 …… 125
4.8.2 最小波束跃度 …… 128
4.8.3 其他情况下的波束跃度计算 …… 133

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第五章　相控阵天线多波束的形成 …… 134
5.1　相控阵天线多波束形成的意义 …… 134
5.2　发射天线多波束的形成方法 …… 137
5.3　两种在高频形成接收多波束的方法 …… 139
5.3.1　放大器后形成多波束的方法 …… 139
5.3.2　Blass 多波束形成法 …… 141
5.4　Butler 多波束矩阵 …… 142
5.4.1　Butler 多波束形成原理 …… 142
5.4.2　Butler 多波束的方向图 …… 147
5.4.3　Butler 多波束在相控阵雷达系统中的应用 …… 150
5.5　中频接收多波束的形成 …… 154
5.6　采用光纤的接收多波束形成网络 …… 158
5.7　子天线阵级别上接收多波束的形成 …… 160
5.8　相控阵雷达接收波束的数字形成方法 …… 163
5.8.1　数字波束形成(DBF)原理 …… 164
5.8.2　数字配相多波束形成 …… 165
5.8.3　用 FFT 形成数字多波束 …… 168
第六章　相控阵雷达的发射系统 …… 171
6.1　高功率发射信号的功率合成方式 …… 171
6.2　发射机功率放大器件的选择 …… 180
6.2.1　选择雷达发射机功率放大器件的一般考虑 …… 180
6.2.2　固态发射机的优点及其应用 …… 183
6.2.3　电真空发射机在相控阵雷达中的应用 …… 186
6.3　有源固态相控阵雷达的收发组件 …… 188
6.3.1　收发组件的组成 …… 188
6.3.2　收发组件在系统中的应用 …… 191
6.3.3　双阵面固态有源相控阵天线中的收发组件 …… 197
6.4　分布式子阵发射机之间的幅度与相位不一致性的影响 …… 199
6.5　发射机输出端馈线系统驻波的计算 …… 202
6.5.1　简单馈线系统输入端驻波的计算方法 …… 203
6.5.2　多路并联馈线系统输入端驻波的计算方法 …… 206
第七章　相控阵雷达的接收系统 …… 209
7.1　相控阵雷达接收系统的组成方式 …… 209
7.1.1　组合馈电接收系统 …… 210

7.1.2 空间馈电接收系统 …… 214
7.2 相控阵雷达接收系统噪声系数的计算 …… 217
7.2.1 基本定义与公式 …… 218
7.2.2 由阵列接收系统至普通雷达接收系统的变换 …… 219
7.2.3 有一层相加网络的阵列接收系统的噪声温度计算 …… 222
7.2.4 有两层相加网络的阵列接收系统的噪声温度的计算 …… 225
7.2.5 接收系统中功率分配网络对噪声温度的贡献 …… 226
7.2.6 空间馈电接收系统的噪声温度计算 …… 227
7.3 相控阵雷达接收系统的动态范围 …… 229
7.3.1 接收信号动态范围的计算 …… 230
7.3.2 相控阵接收系统中各级放大器的动态范围 …… 234
7.4 相控阵雷达的单脉冲测角方法 …… 236
7.4.1 比幅法测角在相控阵雷达中的应用 …… 237
7.4.2 相位比较法测角及相位和差单脉冲测角 …… 239
7.4.3 幅度比较单脉冲测角在空馈阵列天线中的应用 …… 243
7.5 相位和差单脉冲接收波束的形成 …… 248
7.6 相控阵单脉冲测角的精度 …… 253
7.6.1 比幅法测角精度 …… 253
7.6.2 比相法测角精度 …… 258
7.6.3 相位和差单脉冲测角的噪声误差 …… 259
7.6.4 幅度比较单脉冲测角的精度 …… 260
7.6.5 相位和差单脉冲测角的网络误差 …… 268
第八章 相控阵天线的系统性能 …… 272
8.1 雷达系统对相控阵天线副瓣的要求 …… 272
8.2 相控阵天线低副瓣性能的实现方法 …… 276
8.3 幅度加权的实现方法 …… 277
8.3.1 发射天线阵的幅度加权 …… 277
8.3.2 接收天线阵的幅度加权 …… 282
8.4 密度加权相控阵天线 …… 283
8.4.1 密度加权天线阵的应用 …… 284
8.4.2 密度加权天线阵的性能 …… 285
8.5 相位加权的实现方法 …… 292
8.6 阵列单元随机幅度与相位误差的影响 …… 294
8.6.1 阵列单元幅相误差的统计特性 …… 295
8.6.2 阵列天线波瓣的统计特性 …… 298

8.6.3 天线主瓣区域场强的概率密度函数 …… 300
8.6.4 天线副瓣区域场强的概率密度函数 …… 301
8.6.5 单元随机误差对大型阵列天线副瓣的影响 …… 302
8.6.6 单元随机误差对天线增益与波束指向的影响 …… 306
8.6.7 数字移相器量化误差的影响 …… 307
8.7 馈线驻波对幅相一致性的影响 …… 308
8.7.1 反射波强度的计算 …… 309
8.7.2 反射波对幅相一致性的影响 …… 311
8.8 天线单元幅相误差的测量与调整 …… 315
8.8.1 幅度与相位的监测方法 …… 317
8.8.2 监测系统本身幅相一致性的测试与调整 …… 322
8.9 相控阵天线的带宽问题 …… 323
8.9.1 相控阵天线对雷达信号瞬时带宽的限制 …… 323
8.9.2 实时延迟线在宽带相控阵雷达中的应用 …… 330
第九章 相控阵雷达信号处理 …… 334
9.1 短脉冲序列的信号检测 …… 334
9.2 序列检测在相控阵雷达中的应用 …… 341
9.3 大时宽带宽信号在相控阵雷达中的应用 …… 343
9.3.1 线性调频信号的模糊函数 …… 344
9.3.2 相位编码信号在相控阵雷达中的应用 …… 350
9.4 脉冲多普勒信号在相控阵雷达中的应用 …… 360
9.5 相控阵雷达的多通道信号处理 …… 363
9.5.1 空间滤波与时—空二维信号处理 …… 363
9.5.2 自适应阵列信号处理 …… 370
参考文献 …… 372

第一章　相控阵雷达系统概述

雷达问世已50多年了，它在国防建设和国民经济方面得到了广泛的应用。在雷达的发展过程中，各种与军事有关的需求一直起着重大的推动作用。第二次世界大战期间，飞机是交战双方的主要作战工具之一，探测敌方飞机的入侵，引导己方飞机去战斗，成了迫切需要解决的问题。作为探测飞机主要手段的雷达应运而生，并获得了极大的发展。那时雷达的主要任务是测量目标的坐标位置，即目标的距离、方位和仰角(或高度)。这种雷达基本上都是天线作机械扫描的雷达。

50年代末期，人造地球卫星的上天，洲际导弹的出现提出了监视外空目标的迫切需求。监视外空目标的雷达作用距离与看飞机的雷达作用距离相比，将成数量级地提高，例如，监视外空目标的雷达作用距离需达3000km以上。观测卫星和导弹的需要，对相控阵雷达的发展起了很大的推动作用。

相控阵雷达天线波束的扫描由计算机控制，具有很大的灵活性。天线波束在空间的扫描几乎是无惯性的，这给相控阵雷达带来了许多新的功能。例如，相控阵雷达具有边扫描边跟踪能力，可以利用时间分割技术实时跟踪多个目标。

目前，相控阵技术已逐渐应用于各种战术雷达，例如搜索、引导、火控及制导雷达。一些民用雷达，例如空中交通管制系统中的微波着陆雷达，甚至气象雷达等，也已开始采用相控阵技术。

近年来，半导体技术，包括各类功率晶体管、集成电路、信号处理、数据处理和计算机技术等突飞猛进的发展，极大地推动了雷达的发展，并降低了相控阵雷达的造价。采用大量混合微波集成电路(HMIC)和单片微波集成电路(MMIC)的固态有源收发组件的相控

阵雷达，已成为当今雷达研制领域中的一个重要方向。

雷达作为“通信、指挥、控制情报收集(C^3I)系统”中的重要探测手段，在现代战争中遇到了一系列与之对抗的措施。强杂波背景、有源电子干扰、反辐射导弹(ARM，即 ANTI-RADIATION MISSILE)、隐身技术、低空入侵和对雷达的轰炸等，是现代雷达设计中所不能回避的问题。为了适应这些复杂的工作环境，相控阵技术往往成了不得不采用的措施。

雷达观测的目标早已不限于飞机、舰船和车辆，要求雷达提供的也不仅仅是目标的坐标数据，而希望从雷达回波中提取更多的信息。相控阵技术为实现雷达的多功能提供了条件。

一部雷达的研制工作是否成功与是否严格按系统工程观点开展工作有关。认真地作了需求分析和确定工程项目目标之后，在制定方案过程中，要对各种现实条件进行深入细致的调查研究。每一种可行的方案都必须在性能指标、时间进度、生产成本等各个方面进行折中。因此，从系统角度和从雷达总体上对相控阵雷达有更多的了解，必将有利于在不同需求和各种条件下，制定出切实可行并接近于最佳的相控阵雷达方案。

相控阵雷达与机械扫描雷达有许多共同之处，但天线波束的形成和扫描方式的控制却大有差别，从而在雷达工作方式和信号处理方面，相控阵雷达也有自身的明显特点。因此，在讨论相控阵雷达系统时，用较多的篇幅来分析其特点是有必要的。

1.1 现代雷达的主要要求及相控阵技术在现代雷达中的应用

雷达与它观测的目标是矛盾的两个对立面，雷达的发展与目标的发展紧密相关。随着作为雷达观察对象的各种飞行器性能的提高，对雷达的战术性能提出了越来越高的要求。例如，对一些高性能雷达，要测量的目标参数已不只是方位(φ)、仰角(θ)和距离(R)这三个参数，还需测量目标的速度、加速度、目标回波起伏特性和极化特性等。有的精密测量雷达，还要能提供某些目标的自旋

频率，要能测量出目标本体分离事件（如“空—空”导弹从载机上发射、各类诱饵从飞机或舰船上发射和卫星从运载火箭上脱离等）。对雷达目标进行分类、识别，是先进的现代雷达所面临的难题，对目标进行微波成像，特别是多目标微波成像，也是现代雷达的一个重要要求。

雷达工作环境的恶化是现代雷达系统面临的严峻挑战。多数雷达都要求具有从强杂波中检测目标和提取目标参数的能力。对于存在多个方向的空间干扰情况，雷达必须具有自适应抑制干扰、频率捷变和极化捷变的能力。想对付反辐射导弹对雷达的攻击，除了要求雷达发射天线具有低的天线副瓣外，雷达还应配有相参透饵和具备低截获率（LPI，LOW PROBABILITY OF INTERCEPTION）性能，即雷达辐射信号被敌方 ARM 截获的概率很低的性能。在反隐身和抗 ARM 的措施中，双/多基地雷达系统的作用特别受人重视，这使雷达系统的构成发生了深刻的变化，也促进了雷达数据处理和通信技术的发展。

对雷达性能要求的提高和雷达工作环境的恶化所导致的直接结果是：雷达系统的构成越来越复杂，研制周期变长，研制费用和生产成本上升，技术风险加大。相控阵技术是同时满足高性能、高生存能力雷达所必需的，也是降低现代高性能雷达研制和生产成本的重要途径，因为相控阵雷达可以采用大规模生产手段来降低成本。在讨论一部新研制的雷达是否要采用相控阵技术时，常常会有人说成本太高，但在将其与实现这一新雷达要求的其他方法反复进行论证之后，便会确信，只有采用相控阵技术才是最经济的。

为了进一步说明现代雷达对相控阵技术的需求，下面结合一些军用雷达来进行讨论。

1.1.1 C^3I 系统中三坐标雷达的主要要求及相控阵技术在其中的应用

三坐标雷达是防空系统及各类战术 C^3I 系统中的主要雷达品种，对它的要求包括了对其他两坐标雷达（如两坐标空中监视雷达、低空补盲雷达和测高雷达等）的各种要求。

需要全本请访问 www.ertongbook.com