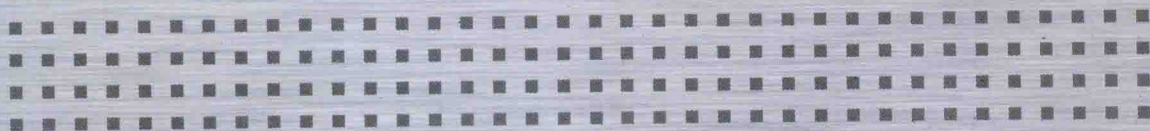


信息技术重点图书·雷达



*Antenna Structure Design
of Active Phased Array Radar*

有源相控阵雷达天线 结构设计



中国电子科技集团公司第十四研究所 著
唐宝富 钟剑锋 顾叶青



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

信息技术重点图书·雷达

有源相控阵雷达天线 结构设计

中国电子科技集团公司第十四研究所

唐宝富 钟剑锋 顾叶青 著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

有源相控阵雷达天线是复杂的电子装备,是典型的机、电、热等多学科交叉技术的结晶。本书立足于工程实践,详尽阐述了有源相控阵雷达天线结构的总体设计、造型设计、冷却设计和折叠拼装设计的流程与方法,同时叙述了有源相控阵天线的核心部件——有源子阵的设计,并介绍了力学仿真和数字样机先进设计技术的应用。本书还介绍了天线智能结构新技术的应用前景以及特种材料与工艺在工程中的应用情况。本书比较全面地反映了有源相控阵雷达天线结构设计的各个方面,列举了大量的设计实例,实用性较强,具有一定的前瞻性。

本书可供雷达系统、天线及相关电子设备研究和设计的工程技术人员学习、参考,也可作为高等院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

有源相控阵雷达天线结构技术/中国电子科技集团公司第十四研究所著. —西安:
西安电子科技大学出版社, 2016. 6
ISBN 978 - 7 - 5606 - 4079 - 2

I. ① 有… II. ① 中… III. ① 有源相控阵-相控雷达-天线-研究
IV. ① TN957. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 115879 号

策 划 李惠萍

责任编辑 王 斌 李惠萍

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷

开 本 毫米×毫米 1/16 印张 22.5

字 数 532 千字

印 数 1-2000 册

定 价 48.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4079 - 2/TN

XDUP 4371001 - 1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

序

随着科学技术的飞速发展和信息化战争的需要，对雷达提出了新的要求，如探测精度高、作用距离远、反应速度快、跟踪目标多等。

有源相控阵雷达是一种复杂的电子设备，天线是其核心部分之一。有源相控阵雷达天线是一个机电结合的系统，主要包括电磁与机械结构两大部分。机械结构不仅是电性能实现的载体和保障，且往往制约着电性能的实现。而且，随着雷达向高频段、高增益，高密度、小型化，快响应、高指向精度方向发展的趋势，这种制约作用愈发明显。为适应这一新的发展趋势，传统的雷达体系架构和设计方法相应地得到了发展和补充，其结构上呈现出功能多元化、布局集成化、口径大型化以及外形轻薄化等多种特点。为满足天线结构日益发展的需求，设计方法上出现了模型数字化、实验虚拟化、学科交叉化等特点。

雷达服役环境与装载平台对结构提出了许多特殊需求，如车载高机动雷达面临体积空间、重量和快速架撤的严格限制，而舰载、机载及弹载雷达则受到舰船、载机和弹体资源的严苛约束等。为满足这些需求，雷达结构设计理念、模型、方法及手段都发生了明显的变化。

中国电子科技集团公司第十四研究所是我国雷达工业的发源地，研制过诸多新型、高端雷达装备。本书作者及其团队在各型雷达的研制中，主持过多型雷达天线的研制工作，积累了丰富的经验。本书就是他们科研工作的体会与总结。相信该书的出版，将有益于促进我国微波天线，特别是有源相控阵雷达天线的设计、制造与服役保障工作，为我国雷达尤其是有源相控阵雷达技术的发展贡献力量。

此书可供从事雷达设计、制造及保障的工程技术人员及高等学校相关专业的师生参考。

中国工程院院士
西安电子科技大学原校长
2016年1月20日

段宝岩

前 言

20世纪30年代雷达问世以来,技术发展迅速,已从当初的机械扫描雷达发展到当今的有源相控阵雷达。20世纪60年代,美国和前苏联相继研制和装备了多部相控阵雷达,多用于弹道导弹防御系统。20世纪80年代,多功能相控阵雷达广泛应用于远程防空导弹武器系统中,大大提高了防空导弹武器系统的作战性能。到了21世纪,随着科技的不断发展和现代信息战争的需求,有源相控阵体制已成为雷达产品的主流。

普通雷达的波束扫描是靠雷达天线转动来实现的,又称为机械扫描雷达。而相控阵雷达是用电的方式控制雷达波束的指向变化来进行扫描的,这种方式被称为电扫描。

相控阵雷达强大的生命力表现在它独特的功能特点上:能对付多目标;功能多,机动性强;反应时间短,跟踪空中高速机动目标的能力高;方便的信号处理和灵活的控制;低功率固态组件的应用使雷达工作可靠性高;平均功率高,功率孔径积大(作用距离远)等。

相控阵雷达有两种形式:无源相控阵和有源相控阵。两者的主要区别在阵列天线。前者集中式发射机输出的能量通过馈电网络分配至各个移相器,经适当相移后由阵列单元辐射出去。后者每一阵列单元接有一发射机或者接收机前端(T/R组件),最重要的特点是天线能直接向空中辐射和接收射频能量。

有源相控阵天线是有源相控阵雷达的核心组成部分。由于有源组件直接与阵列单元相连,收、发位置前置(降低了系统的损耗),成千上万个发射源合成的总功率可达十几兆瓦至几十兆瓦。多个独立的T/R(收/发)组件和阵列单元形成独立的系统,只有当20%以上的收发组件失效后才会严重影响雷达性能,因此提高了信噪比和辐射功率,也提高了系统的可靠性(或称为冗余度)。可在射频上形成自适应波束,提高了抗干扰能力。有源相控阵天线在陆基、海基、空基直至天基雷达上均已得到广泛应用。

不同于以机械结构为主的反射面天线,有源相控阵天线由辐射单元、T/R组件、电源模块、控制模块、射频网络模块、供电网络、液冷管网以及作为结构支撑的阵面骨架等组成,是复杂的电子装备。其结构设计有电子设备结构的鲜明特征,又有独特的个性,涉及机械、电子、材料、微电子、工业设计等多门学科,是典型的机、电、热等多学科交叉的技术成果。

本书从工程设计的角度,详尽地介绍了有源相控阵天线结构设计的流程和主要组成部件的设计方法,以及相关的重要技术。第1章概述了有源相控阵天线的基本原理、结构设计特点,并简述了典型的有源相控阵天线;第2章讲述了总体设计过程和不同平台的有源相控阵天线布局构型方法;第3章介绍了有源相控阵天线核心部件——有源子阵的设计;第4、5、6章分别介绍了有源相控阵天线的造型设计、冷却设计和折叠拼装设计;第7、8章分别介绍了力学仿真和数字样机技术在有源相控阵天线设计中的应用;第9章介绍了天

线智能结构新技术；第10章介绍了特种材料与工艺应用。本书取材于工程实践，内容反映了有源相控阵雷达天线结构技术近十多年来的研究成果，列举了大量的设计实例，具有较强的实用性。本书根据结构设计的特点，插入大量图片，力求图文并茂，方便读者阅读理解。

本书由唐宝富设计策划，并对各章进行了审读与修改。其中，第1章由唐宝富、姚晔编写，第2章由唐宝富、张继成、钱宣、吴鸿超、陈敏编写，第3章由唐宝富、姚晔编写，第4章由姚晔、毛桷浠、钟剑锋编写，第5章由钟剑锋、江守利、张轶群编写，第6章由王金伟编写，第7章由顾叶青、孙为民编写，第8章由钟剑锋、刘加增编写，第9章由唐宝富、王超、张轶群编写，第10章由顾叶青、江守利、钟剑锋、崔凯编写。西安电子科技大学原校长，中国工程院院士段宝岩教授为本书作序。在此笔者对以上提及的各位同志表示由衷的感谢。

我们已努力确保书稿的质量和准确性，希望为读者提供一本好书，但限于水平和工作经验，书中难免有疏漏及不妥之处，敬请广大读者批评指正。

唐宝富

2016.1.20

目 录

第 1 章 概述	1	2.5.2 平衡木形式	47
1.1 雷达系统	1	2.5.3 机身共形形式	48
1.1.1 雷达基本原理	1	2.6 车载有源相控阵天线结构	50
1.1.2 相控阵雷达	2	2.6.1 单车单块天线阵面	52
1.1.3 相控阵雷达的类别	4	2.6.2 单车多块天线阵面	54
1.2 有源相控阵天线	5	2.6.3 多车多块天线阵面	55
1.2.1 有源相控阵天线的组成	6	2.7 舰载有源相控阵天线结构	56
1.2.2 结构设计要点	9	2.7.1 低频段天线阵面结构	56
1.2.3 结构设计相关专业基础	13	2.7.2 高频段天线阵面结构	57
1.3 典型有源相控阵天线简介	14	2.8 星载有源相控阵天线结构	57
1.3.1 大型有源相控阵天线	14	2.8.1 折叠阵面	58
1.3.2 机载有源相控阵天线	17	2.8.2 柔性阵面	59
1.3.3 机动雷达有源相控阵天线	19	2.9 弹载有源相控阵天线结构	62
1.3.4 舰载有源相控阵天线	22	第 3 章 有源子阵结构设计	65
1.3.5 卫星 SAR 有源相控阵天线	23	3.1 有源子阵	65
1.3.6 雷达导引头有源相控阵天线	25	3.1.1 有源子阵的基本构架	66
第 2 章 总体设计	26	3.1.2 结构设计流程及要点	67
2.1 阵面电讯特性	26	3.2 有源子阵架构设计	68
2.1.1 主要电讯指标	26	3.2.1 有源子阵的典型结构形式	68
2.1.2 天线阵列设计	27	3.2.2 子阵规模和结构形式的选择	71
2.2 基本结构类型	34	3.3 子阵内主要模块	72
2.2.1 外形	34	3.3.1 T/R 组件	72
2.2.2 内部结构	34	3.3.2 子阵内综合网络	77
2.2.3 维修方式	37	3.3.3 子阵驱动模块	78
2.3 地基远程预警相控阵天线结构	38	3.3.4 二次电源模块	79
2.3.1 分块设计	38	3.3.5 延迟器	80
2.3.2 内部结构	41	3.4 子阵互连设计	81
2.4 机载火控有源相控阵天线结构	41	3.4.1 连接器的选用	82
2.4.1 刀片式子阵结构	42	3.4.2 典型互连结构设计	84
2.4.2 一体式结构	43	3.4.3 供液互连设计	92
2.4.3 片式叠层结构	44	3.4.4 多品种混合电连接设计	94
2.5 机载预警有源相控阵天线结构	45	3.5 电磁屏蔽设计	94
2.5.1 圆盘形式	45	3.6 子阵骨架设计	96

3.7 有源子阵的发展趋势	96	第6章 阵面自动折叠与快速拼装	168
3.7.1 微系统技术	97	6.1 阵面折叠	168
3.7.2 有源子阵微系统结构设计	99	6.1.1 折叠机构的理论基础	169
3.7.3 有源子阵微系统热设计	102	6.1.2 折叠方式	172
3.7.4 有源子阵微系统集成工艺	103	6.1.3 驱动机构	175
第4章 造型设计	106	6.1.4 锁紧机构	181
4.1 天线阵面造型概念	106	6.1.5 线缆折叠	184
4.1.1 天线阵面造型特点	107	6.1.6 冷却管路折叠	186
4.1.2 天线阵面形象设计	109	6.2 阵面拼装	187
4.2 造型基础	111	6.2.1 快速连接机构	187
4.2.1 形态构成要素	111	6.2.2 快速捕捉机构	191
4.2.2 造型基本原则	115	6.2.3 冷却管路快速连接	192
4.3 阵面造型设计实例	120	6.2.4 快速电连接	193
4.3.1 外部造型设计	121	6.2.5 组合式机电同步连接	194
4.3.2 内部造型设计	128	6.3 误差分析	196
第5章 冷却设计	131	6.3.1 折叠、拼装误差分析	196
5.1 冷却技术简介	131	6.3.2 折叠、拼装误差计算	199
5.1.1 冷却设计理论基础	131	第7章 力学仿真	202
5.1.2 常见冷却方式比较	133	7.1 有限元法	202
5.1.3 温度降额	134	7.1.1 有限元的基本理论	202
5.2 常用冷却方式	135	7.1.2 常用有限元软件介绍	203
5.2.1 自然冷却天线	136	7.2 仿真计算	205
5.2.2 开式风冷天线	138	7.2.1 结构模型化要点	205
5.2.3 闭式风冷天线	139	7.2.2 边界条件模拟	211
5.2.4 液冷型天线	140	7.2.3 载荷处理	212
5.3 高频箱密封隔热	143	7.2.4 动力学分析	213
5.3.1 隔热设计	143	7.2.5 计算结果以及诊断	215
5.3.2 密封设计	146	7.3 有限元模型修正技术	217
5.4 T/R 组件热设计	150	7.3.1 基本修正理论及方法	218
5.4.1 热扩展设计	150	7.3.2 模型修正实例	223
5.4.2 低界面热阻技术	155	7.4 结构优化设计	231
5.4.3 冷板设计	157	7.4.1 结构优化的数学模型	231
5.5 相变冷却技术	158	7.4.2 结构优化的基本类型	232
5.5.1 相变热管热控技术	158	7.4.3 结构优化方法	232
5.5.2 喷雾冷却技术	163	7.4.4 结构尺寸优化实例	236
5.6 热设计仿真技术	165	第8章 数字样机技术	239
5.6.1 热仿真基础	165	8.1 数字样机技术简介	239
5.6.2 仿真流程	166	8.1.1 数字样机功能	239
		8.1.2 数字样机技术应用	242

8.2 数字样机平台	242	9.4 控制技术	297
8.2.1 总体架构	243	9.4.1 模态阻尼控制	299
8.2.2 逻辑架构	243	9.4.2 最优控制	299
8.3 数字样机建模技术	246	9.4.3 鲁棒控制	299
8.3.1 三维建模	246	9.4.4 智能控制	300
8.3.2 三维布线	250	9.4.5 阵面控制集成	301
8.3.3 模型简化	253	第 10 章 特种材料与工艺应用	307
8.4 数字样机应用	256	10.1 特种材料	307
8.4.1 精度分配仿真	256	10.1.1 复合材料	307
8.4.2 虚拟布局	260	10.1.2 涂层	319
8.4.3 虚拟装配	264	10.2 特种工艺	323
8.4.4 虚拟维修	269	10.2.1 焊接工艺	323
第 9 章 智能结构	274	10.2.2 深孔加工	330
9.1 智能结构技术	275	10.2.3 精密铸造	330
9.2 传感技术	276	10.2.4 真空压力浸渗	331
9.2.1 智能传感器的种类与特性	276	10.2.5 喷射成型	332
9.2.2 传感器布置优化技术	279	10.2.6 3D 打印	332
9.2.3 天线阵面变形测量	282	10.2.7 微细加工	335
9.2.4 传感器与天线阵面集成技术	288	10.3 3D 封装	339
9.3 执行技术	291	10.3.1 新封装技术	340
9.3.1 执行元件的种类与特性	291	10.3.2 3D 封装关键技术	342
9.3.2 执行机构应变作动机理	293	10.3.3 3D 封装技术的应用	343
9.3.3 执行元件与阵面集成	294	参考文献	346
9.3.4 执行机构的位置优化	296		

第1章 概述

1.1 雷达系统

众所周知,雷达探测目标是模仿蝙蝠夜间飞行捕食过程,其原理是通过天线发出无线电波,无线电波遇到障碍物反射回来,反射波经处理后显示在显示屏上,从而指示出目标。当前,雷达技术已广泛应用于导航、海洋、气象、环境、农业、森林、资源勘测等领域。在军事侦察中,雷达更是将利用电磁波对目标检测、定位、跟踪、成像、识别的功能发挥得淋漓尽致。

雷达的基本概念形成于20世纪初,但直到第二次世界大战前后,雷达才得到迅速发展。1922年,意大利马可尼发表了无线电波可能检测物体的论文。同年,美国海军实验室利用双基地连续波雷达检测到在其间通过的木船。1925年,美国开始研制能测距的脉冲调制雷达,并首先用它来测量电离层的高度。1936年,美国研制出作用距离达40 km、分辨率为457 m的探测飞机的脉冲雷达。1938年,英国已在邻近法国的本土海岸线上布设了一条观测敌方飞机的早期报警雷达链(Chain Home, CH)。

早在20世纪30年代后期,相控阵技术就已经出现。1937年,美国首先开始这项研究工作,于20世纪50年代中期研制出两部实用型舰载相控阵雷达。20世纪60年代,美国和前苏联相继研制和装备了多部相控阵雷达,多用于弹道导弹防御系统,如美国的AN/FPS-46、AN/FPS-85、MAR、MSR,前苏联的“鸡笼”和“狗窝”等。这些都属于固定式大型相控阵雷达,其共同点是:采用固定式平面阵天线,天线体积大、辐射功率高、作用距离远,其中以美国的AN/FPS-85和前苏联的“狗窝”最为典型。20世纪70年代,相控阵雷达得到了迅速发展,除美国和前苏联两国外,又有很多国家研制和装备了相控阵雷达,如英、法、日、意、德、瑞典等。其中最为典型的有:美国的AN/TPQ-25、AN/TPQ-37和GE-592,英国的AR-3D,法国的AN/TPN-25,日本的NPM-510和J/NPQ-P7,意大利的RAT-31S,德国的KR-75等。这一时期的相控阵雷达具有机动性高、天线小型化、天线扫描体制多样化、应用范围广等特点。20世纪80年代,相控阵雷达由于具有很多独特的优点,得到了更进一步的应用,在已装备和正在研制的新一代中/远程防空导弹武器系统中多采用多功能相控阵雷达,它已成为第三代中/远程防空导弹武器系统的一个重要标志,从而大大提高了防空导弹武器系统的作战性能。21世纪,随着科技的不断发展和现代战争兵器的新特点,相控阵雷达的制造和研究将会更上一层楼。

1.1.1 雷达基本原理

雷达(Radar)一词是Radio Detection and Ranging英文单词的简称,完整的意思为无线电探测与测距。雷达的基本原理是通过发射电磁信号,接收来自其威力范围内目标的回波,

并从回波信号中提取出位置和其他信息，以用于目标探测、目标定位和目标识别。

雷达的基本原理可以用脉冲雷达简化框图来说明，如图 1.1 所示。雷达发射机产生足够的电磁能量，经过双工器或收发转换开关传送给天线。天线将这些电磁能量辐射至空间中，集中在某一个很窄的方向上形成波束，向前传播。当电磁波遇到波束内的目标后，将沿着各个方向产生反射，其中的一部分电磁能量反射回雷达的方向，被雷达天线获取。天线接收的能量经过双工器或收发转换开关送到接收机，形成雷达回波信号。由于在传播过程中电磁波会随着传播距离而衰减，雷达回波信号往往非常微弱，甚至几乎被噪声所淹没。接收机放大微弱的回波信号，经过信号处理机处理，提取出包含在回波中的信息，送到监视器，显示出目标的距离、方向、速度等信息。

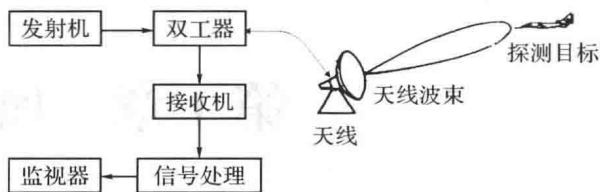


图 1.1 脉冲雷达简化框图

雷达的种类很多，分类方法也很复杂，其基本分类如图 1.2 所示。

1.1.2 相控阵雷达

普通雷达的波束扫描是靠雷达天线转动来实现的，又称为机械扫描雷达，而相控阵雷达是用电的方式控制雷达波束的指向变化来进行扫描的，这种方式被称为电扫描。相控阵雷达虽然不能像其他雷达那样依靠旋转天线来使雷达波束转动，但它有自己的“绝招”，那就是使用“移相器”来实现雷达波束转动。相控阵雷达天线是由大量的辐射器（小天线）组成的阵列（如正方形、三角形等），辐射器少则几百，多则数千，甚至上万，每个辐射器的后面都接有一个可控移相器，每个移相器都由电子计算机控制。单个辐射器称为阵列单元

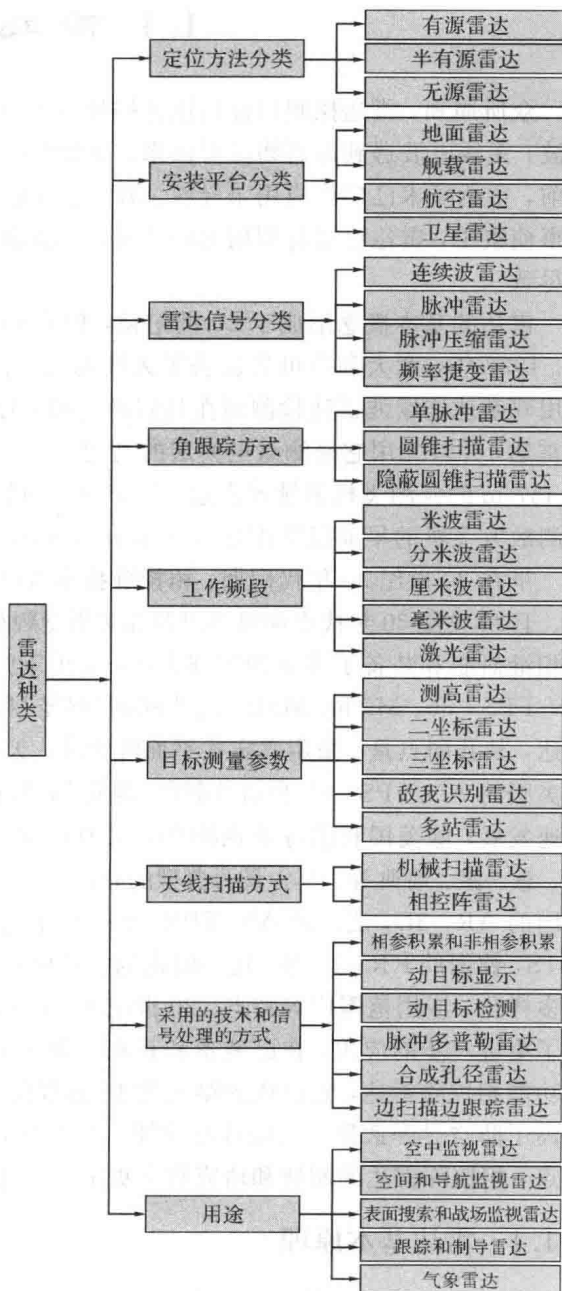


图 1.2 雷达的基本分类

(或辐射单元), 简称阵元。雷达工作就是利用电子计算机控制移相器改变天线孔径上的相位分布来实现波束在空间的扫描, 从而完成对空搜索的使命。当相控阵雷达搜索远距离目标时, 虽然看不到天线转动, 但上万个辐射器通过电子计算机控制集中向一个方向发射、偏转, 即使是几万千米以外的洲际导弹和卫星, 也逃不过它的“眼睛”。如果是对付较近的目标, 这些辐射器又可以分工负责, 产生多个波束, 有的搜索, 有的跟踪, 有的引导。正是由于这种雷达摒弃了一般雷达天线的工作原理, 人们给它起了个与众不同的名字——相控阵雷达, 表示“相位可以控制的天线阵”的含义。相控阵雷达的原理框图如图 1.3 所示。

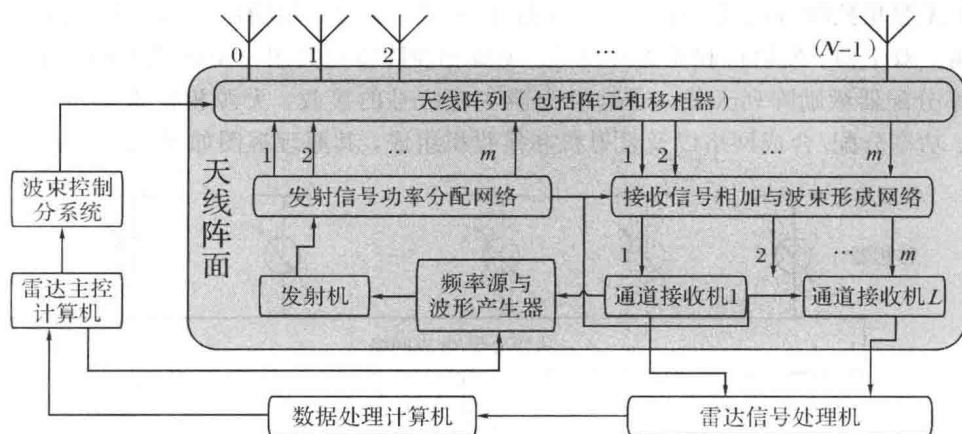


图 1.3 相控阵雷达的原理框图

正如前文所述, 相控阵雷达即电子扫描阵列雷达(AESA), 是指一类通过改变天线表面阵列所发出波束的合成方式, 来改变波束扫描方向的雷达。这种设计有别于机械扫描的雷达天线, 可以减少或完全避免使用机械马达驱动雷达天线便可达到涵盖较大侦测范围的目的。目前使用的电子扫描方式包括改变频率或者是改变相位的方式, 将合成波束的发射方向加以变化。电子扫描的优点有: 扫描速率高, 改变波束方向的速率快, 对于目标信号测量的精确度高于机械扫描雷达, 同时免去机械扫描雷达天线驱动装置可能发生的故障。相控阵雷达天线个别部件发生故障时, 仍保持较高的可靠性, 平均无故障时间为 10 万小时, 而机械扫描雷达天线的平均无故障时间小于 1000 小时。

相控阵雷达强大的生命力, 表现在它独特的功能特点上:

(1) 能处理多目标。相控阵雷达容易实现数字波束形成, 与电子计算机相配合, 能同时搜索、跟踪不同方向、不同高度的多批目标, 并能同时制导多枚导弹进行攻击。大型相控阵雷达一般能同时搜索 1000 个以上目标或同时跟踪 200 个以上目标。

(2) 功能多, 机动性强。相控阵雷达的天线阵列可同时形成多波束, 各个波束又具有不同的功率、波束宽度、驻留时间、重复频率等, 并且这些波束可以分别控制和统一控制。这样, 其中有些波束可用做一般搜索, 有的做重点搜索, 有些波束可用来跟踪目标等。

(3) 反应时间短, 跟踪空中高速机动目标的能力高。相控阵雷达因波束扫描不受机械惯量的限制, 波束移动很快, 具有较高的数据率, 使相控阵雷达具有短的目标搜索、跟踪准备时间, 因而可提高跟踪空中高速机动目标的能力。

(4) 方便的信号处理和灵活的波束控制。相控阵雷达的脉冲重复频率和宽度、一定范围内的工作频率和调制方式都可以改变, 这种方便的信号处理和灵活的波束控制, 便于综

合运用抗干扰技术。

(5) 低功率固态组件的应用使雷达工作可靠性高。因为大功率器件是雷达可靠性的薄弱环节，现在改为数千个小功率的固态组件，故障率低，所以有极高的可靠性。

(6) 大的平均功率，功率孔径积大(作用距离远)。

1.1.3 相控阵雷达的类别

相控阵雷达有两种形式：无源相控阵雷达和有源相控阵雷达。

(1) 无源相控阵雷达系统中包含有数据/信号处理系统、激励器、接收机、波控计算机、低压电源、双工器、发射机和无源阵面等。无源相控阵雷达共用一个或几个高功率发射机，通过功率分配器激励阵列天线，通过组合器实现信号的接收。无源相控阵雷达由辐射单元、移相器、功率分配/合成网络以及发射机和接收机组成，其原理框图如图 1.4 所示。

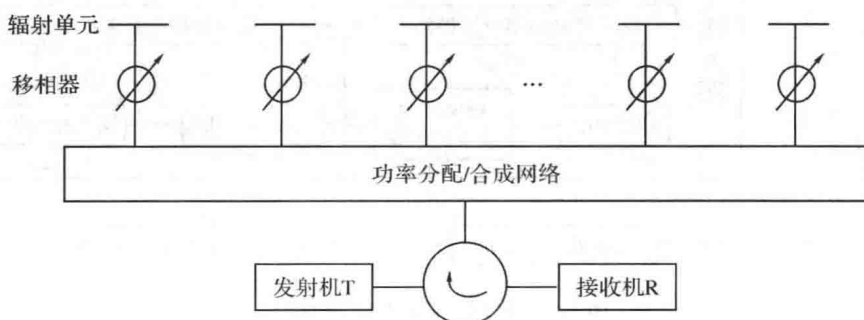


图 1.4 无源相控阵雷达原理框图

(2) 有源相控阵雷达系统中包含有数据/信号处理系统、激励器、接收机、波控计算机、低压电源和有源阵面。有源相控阵雷达射频功率通过阵列结构中的组件放大到辐射所需的电平，而且通常由阵列或子阵列中的某种功率“模块”来实现。有源相控阵雷达由阵列单元、T/R 组件、子阵功分网络、收发开关、发射功分网络、功率相加与多波束形成网络等组成，其原理框图如图 1.5 所示。

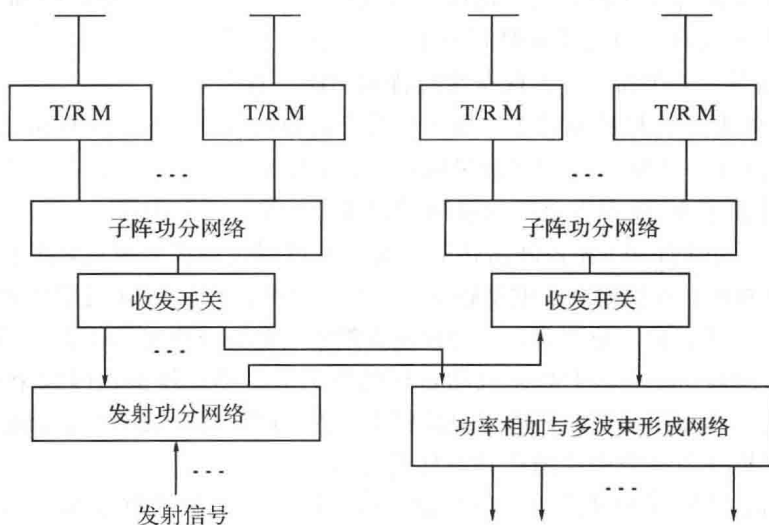


图 1.5 有源相控阵雷达原理框图

无源相控阵雷达与有源相控阵雷达相比较, 主要区别在阵列天线。无源相控阵雷达采用一个集中发射机, 这与机械扫描雷达区别不大, 仅是在每一个阵列单元上接了一个移相器。集中式发射机输出的能量通过馈电网络分配至各个移相器, 经适当相移后由阵列单元辐射出去。回波信号经阵列单元接收, 通过移相器移相、馈电网络合成后进入集中式接收机进行检测和处理。由于这种相控阵雷达的天线一般由无源器件构成, 因此, 称为无源相控阵天线。有源相控阵通常是指每一阵列单元接有一发射机或者接收机前端, 即 T/R 组件, 由于其天线阵面包含了大量的有源部件, 所以称为有源相控阵天线。有源相控阵天线最重要的特点是天线能直接向空中辐射和接收射频能量。

两种相控阵雷达中数据/信号处理系统常常是由一台通用计算机(称为中心计算机)组成的, 对其进行编程以控制雷达, 进行数据处理, 对关心的目标进行相关处理, 并响应用户的请求。

从今后雷达的发展趋势来看, 有源相控阵雷达将是一种优先的选择。它有许多显著的优点, 如天线不需要高功率分配网络, 尺寸可做得很大, 因而提高了雷达威力, 增大了雷达探测距离; 辐射功率大, 通常情况下, 成千上万个发射源合成的总功率可达十几兆瓦至几十兆瓦, 加之大尺寸的天线, 使得相控阵雷达能较方便地把探测导弹头的作用距离提高到 100 千米以上。有源相控阵雷达天线由多个独立的 T/R 组件和阵列单元组成, 只有当 20% 以上的收发组件失效后才会严重影响雷达性能, 比无源相控阵雷达的任务可靠性有较大提高。

相控阵天线亦称为天线阵面或阵面, 本书所提及天线阵面或阵面皆指有源阵面, 即有源相控阵天线。

1.2 有源相控阵天线

有源相控阵天线是有源相控阵雷达的核心组成部分, 由有源组件(又称为收/发组件)与天线阵列中的每一个阵列单元(或子阵)通道直接连接而组成, 这些有源组件与其相对应的阵列单元构成了阵列的一个模块, 它具有只接收、只发射或收/发的功能。

有源相控阵天线除具有无源相控阵天线的功能之外, 还有一些其他重要的特点。由于有源组件直接与阵列单元相连, 收/发位置前置(降低了系统的损耗)且阵面有源模块间形成独立的系统, 从而提高了有源相控阵雷达的信噪比和辐射功率, 也提高了系统的可靠性(或称为冗余度)。另外通过控制每个有源模块的幅相, 可在射频上形成自适应波束, 提高有源相控阵雷达系统的抗干扰能力。由于有源组件的制造成本较高、系统较无源相控阵天线复杂, 使得有源相控阵天线在实际应用中受到一定的限制, 但随着单片微波集成电路(MMIC)技术的不断发展与成熟, 它必将逐步取代现有的无源相控阵天线。目前有源相控阵天线已越来越多应用于陆基、海基、空基、天基雷达。有源相控阵天线所用的有源组件均采用了固态器件, 因此也被称为固态有源相控阵天线。

有源相控阵天线也用于通信、电子对抗、气象等领域, 本书所提及有源相控阵天线指雷达天线。

1.2.1 有源相控阵天线的组成

典型的有源相控阵天线中除阵列单元和 T/R 组件外,还包括电源模块、控制模块、射频网络、电源分配网络、液冷管网以及作为结构支撑基础的阵面骨架等。典型有源相控阵天线的组成如图 1.6 所示。

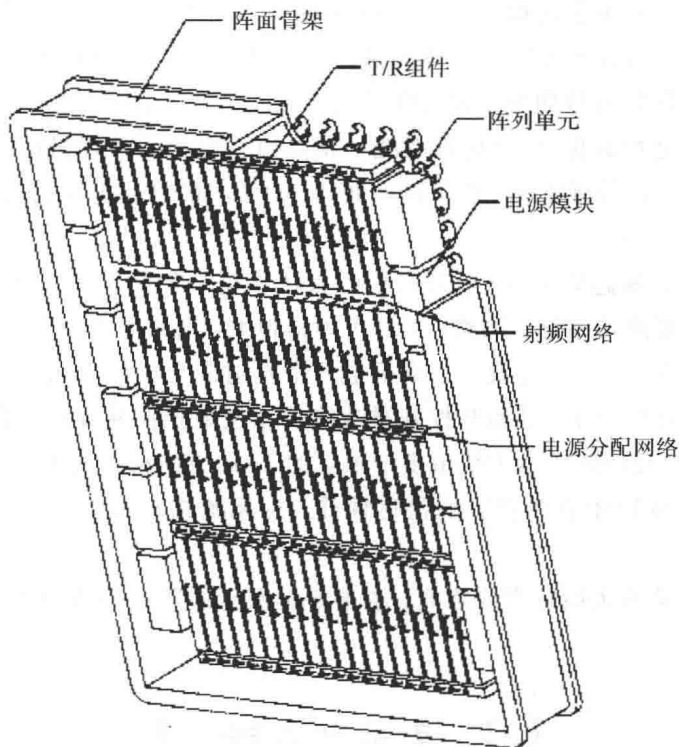


图 1.6 典型有源相控阵天线的组成

阵列单元的作用是将 T/R 组件产生的导波场转换成空间辐射场,并接收目标反射的空间回波,将回波的能量转换为导波场,馈送到 T/R 组件。阵列单元电讯设计需从阻抗匹配、栅瓣抑制、极化控制和功率容量等诸方面分析,阵列单元结构设计应由工作环境、性能造价、重量、体积等因素决定。阵列单元的几何形式主要有偶极形载流线源和孔径形面元。前者多用于不超过 1 GHz 频段的场合,后者常为高于 1 GHz 频率的阵列采纳。阵元沿曲线排列的天线简称线阵,最简单的线阵是直线阵。当然,阵元可沿空间曲线排列而成为一般曲线阵。单元沿曲面设置的天线简称面阵,最简单也是最常用的面阵是平面阵。同样,单元也可以在柱面、球面以及载体表面上设置而形成曲面阵或共形阵。常用的阵列单元(如图 1.7 所示)有以下几种。

1. 渐变开槽式天线

渐变开槽式天线,或称为 Vivaldi 天线,是一种典型的超宽带天线。该天线既可以作为单天线使用,也可以作为阵列天线的单元使用。Vivaldi 天线最早是由 P. J. Gibson 设计用于视频接收。该天线的工作频率为 8 GHz~40 GHz。

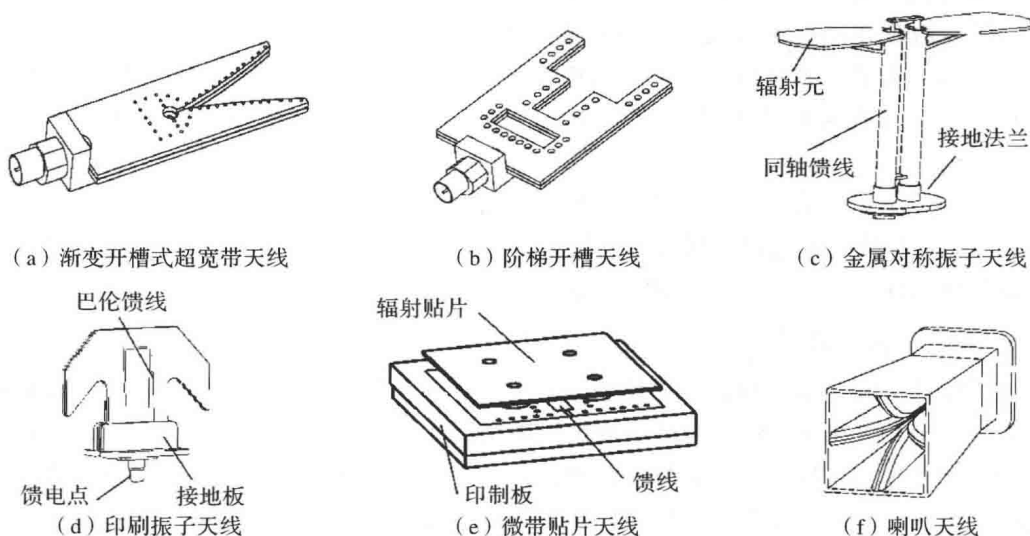


图 1.7 常用的阵列单元

阵元采用多层层压 PCB 工艺制作, 天线单元共包括三层铺铜层, 其中最上和最下两层为地平面。在金属地平面上, 通过腐蚀或切割, 形成槽线结构, 作为天线的辐射口径。中间金属层为馈电微带, 与上下两层金属地平面合成为带状线结构, 为天线单元的槽线馈电。在最上和最下两层金属地平面之间, 开有若干金属化过孔, 将上下金属层短接在一起, 以防止在这两层之间存在不希望的平行板模式的电磁波。

2. 阶梯开槽天线

阶梯开槽天线是渐变开槽天线的一种变形, 天线中每一节不同宽度的槽线都具有不同的特性阻抗, 而多节不同特性阻抗的传输线依次连接在一起, 可以实现宽带阻抗匹配。根据滤波器理论, 阶梯形式的多支节阻抗变换线, 可以在很宽的带宽内实现非常好的匹配特性 ($VSWR < 1.2$)。在整个扫描空域内 (E 面、H 面均扫描 60°), 绝大多数频点的驻波都小于 2。阶梯开槽天线的阵元结构形式和制作工艺与渐变开槽式天线基本相同。

3. 金属对称振子天线

对称振子天线由于结构简单、效率高、易于实现等优点, 广泛地应用于相控阵天线阵面的设计中。对称振子是振子类辐射元的最基本形式, 由它衍生的有伞形振子、微带振子、折叠振子和单极振子等。金属对称振子耐高功率, 一般用于 P、L 波段以下尺寸较大的单元。振子包括对称的振子辐射元和馈电部分, 馈电一般采用同轴线传输形式。

在结构上对称振子采用焊接的形式焊接在用于馈电的同轴线顶端, 并用短路板将顶端的两路同轴线内导体互连。由于振子为悬臂结构, 需要考虑其刚强度设计, 保证其使用中的稳定性。

4. 印刷振子天线

印刷振子的阵列单元发展较成熟, 是一种优良的单元形式。印刷偶极子天线单元具有重量轻、体积小、成本低、便于排阵等优点, 在有源相控阵雷达领域得到了广泛应用。印制板振子单元还可以设计为双极化天线, 能发射或接收两个正交极化的电磁波, 因此

在同一带宽内,天线可以发射两种信号,这有利于频率复用或者收发同时工作。到目前为止,虽然微带印刷振子天线的带宽已经达到了30%,但是它们仍然不能满足许多未来系统的要求。为了得到较好的带宽,用积分巴伦进行耦合馈电的形式得到了很大的关注。最近的研究者也在带宽的改进方面得到了一定的成果。目前通常使用在S波段以上的较高频段天线。

印刷振子单元在结构上由振子印制板、接地板、馈电头组成。印制板采用多层印制板层压的工艺,和接地板之间采用可以螺接或者焊接的方式安装,馈电头和印制板之间采用内导体焊接和压接的方式,进行馈电传输。

5. 微带贴片天线

微带贴片天线由带接地板的介质基片上贴加导体薄片形成。通常使用微带线或同轴线一类馈线馈电,是在导体贴片与接地板之间激励其射频电磁场,并通过贴片四周与接地板间的缝隙向外辐射。其基片厚度与波长相比一般很小,因而实现了一维小型化,满足阵面“轻薄化”要求。与普通微带天线相比,微带贴片天线具有剖面薄、体积小、重量轻的特点,其平面结构可以与载体表面形成共形结构。可多个单元集成在一块印制板上,并可集成馈电网络,适合使用印刷电路技术大批量生产。微带贴片天线便于获得圆极化,容易实现双频段、双极化等多功能工作。但是,贴片天线频带窄,导体和介质损耗较大,并且会激励表面波,导致辐射效率降低。微带贴片天线功率容量小,一般用于中、小功率场合,其性能受基片材料影响大。

贴片天线由金属底板、印制板、空气层、贴片、介质支架等组成,整个天线单元厚度不超过10 mm。在结构上采用非金属材料将贴片支撑于印制板表面,保证绝缘安装。多层印制板采用层压工艺,保证性能指标。

6. 开口波导天线

开口波导为相控阵的一个非常实用的单元,一般使用X、C及其以上的频段的阵列天线,常采用工作于主模的开口矩形波导、圆波导及矩形波导裂缝作为阵列单元。矩形波导阵列单元相对于圆波导阵列单元极化纯度高、极化面稳定,因此通常阵面采用矩形波导辐射器作为阵列单元。这种阵列单元具有增益高的特点,适用大间距、扫描角小的超宽带天线阵面。

波导开口形式可以是均匀波导,也可以是喇叭。喇叭式波导是一段截面逐渐增大的波导,逐渐增大的目的方面是为了改善其辐射的方向性,同时又是为了保证得到所需的场分布,使之达到最好的阻抗匹配。开口波导单元在结构设计上通常需要关注两个方面:一是波导辐射元的布局和维护形式。由于采用波导喇叭形式,阵元之间的间距排列紧凑,给前向单元维护带来很大的困难,需要合理布局单元的安装点,便于前向安装和调试。二是由于阵元结构相对复杂,加工工艺性要求高,通常在结构设计上采用整理拼焊或者整体铸造而成,保证精度一致性要求。

T/R组件一般包括移相器、衰减器、收发开关、发射高功率放大器、接收低噪声放大器和波控器等部分,具有发射功率放大、接收信号放大、收发转换、阵面幅度修正和波束扫描等功能。其原理如图1.8所示。在电源开启、激励信号输入后,T/R组件的工作状态由控制板接入的雷达指令和时序脉冲来控制 and 同步,在使用过程中,T/R组件分别工作在发