

空间射频信息获取新技术丛书
“十二五”国家重点图书出版规划项目

雷达微波新技术

胡明春 周志鹏 高 铁 著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

空间射频信息获取新技术丛书
“十二五”国家重点图书出版规划项目

雷达微波新技术

胡明春 周志鹏 高 铁 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书以高性能雷达系统为应用对象,详尽阐述了微波新技术在雷达天线及阵列、高功率固态发射机、新型收发组件、高集成信号传输网络和雷达射频隐身等方面的应用。本书还结合工程实践经验介绍了微波部件工艺集成和微波分析与测量技术。此外,本书还介绍了电磁超材料在高性能雷达系统中的应用前景。本书较全面地反映了雷达微波技术领域近十多年来的最新进展,介绍了很多国内外雷达领域的设计实例,使得本书的内容兼具前瞻性和实用性。

本书的主要读者对象为从事雷达系统研究、制造、维护、应用等方向的科技和工程人员及雷达部队官兵,同时也可作为高等院校相关专业学生的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

雷达微波新技术 / 胡明春, 周志鹏, 高铁著. —北京: 电子工业出版社, 2013. 8

(空间射频信息获取新技术丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-121-21012-9

I. ①雷… II. ①胡… ②周… ③高… III. ①微波技术—应用—雷达系统—研究 IV. ①TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 162049 号

策划编辑: 刘宪兰

责任编辑: 谭丽莎

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 20.75 字数: 502 千字

印 次: 2013 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 56.00 元



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

“空间射频信息获取新技术丛书”编委会

主 任：左群声

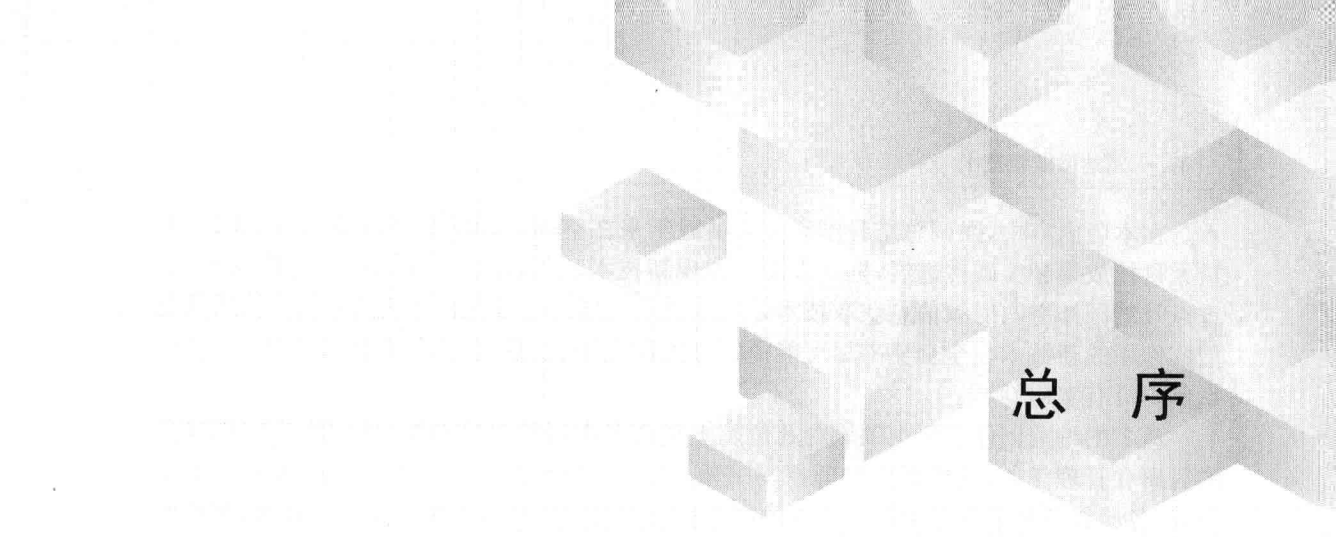
副 主 任：周万幸 敖 然

委 员：（以下按姓氏音序排列）

保 铮	贲 德	陈 涛	范义晨	郭 庆	韩宗杰
胡明春	黄培康	金 林	李 斌	李大圣	刘炳奇
刘宏伟	刘华军	刘明罡	罗 敏	马 林	潘宇虎
孙 俊	汪文英	王建民	王小谟	吴鸣亚	夏琛海
余振坤	张光义	张金平	张荣涛	赵玉洁	周志鹏

编委会秘书长：刘宪兰 陈 玲

主 编：王小谟 张光义



总 序

我国的雷达事业,经过数十年几代人的努力,从无到有,从小到大,从弱到强,在许多领域已经进入了国际先进行列。为了总结这些经验,给今后的雷达发展打好基础,前些年,我们在众多雷达专家、学者的支持和参与下,在总结长期雷达科研、生产、教学、使用经验的基础上,聚集体智慧,组织了“雷达技术丛书”的编写工作。该套丛书一经电子工业出版社隆重推出,便受到业内同行的热烈欢迎,也成为我国雷达界的一项重要科研成果。

转眼,距“雷达技术丛书”的出版已近十年,在我国国防建设与经济建设需求的推动下,在电子信息技术高速发展的基础上,雷达及雷达相关技术又有了新的进步。近年来,我国在相控阵天线及其发射接收组件技术方面取得了很大进步,并推广应用于各种对空目标监视雷达及各类机载雷达;开展了高分辨率多维雷达信息获取前沿技术研究,实现了机载与星载高分辨率合成孔径雷达(SAR)成像和超宽带雷达成像,这些都在国防建设和各个民用领域发挥着重要作用。在天线、微波、信号处理、数据处理等雷达基础技术快速发展的同时,与通信、网络技术的快速发展相同步,我国在雷达组网、雷达数据融合等雷达系统技术方面也取得骄人的进步,使得雷达成为空间射频信息获取的重要工具。特别值得一提的是,为适应航空、航天和空间应用的需要,我国在用于空间目标探测、跟踪和精密测量的大型单脉冲雷达与相控阵雷达技术方面获得了新的进展,其中相当部分拥有发明专利与自主知识产权。与此同时,在推动我国雷达技术进步的队伍中也涌现出不少优秀的年轻专家。在总结近几年雷达及雷达系统技术快速发展的基础上,为满足雷达信息获取的新要求,包括地基雷达对高速、高机动飞行目标及机载与星载雷达对地面、海面乃至地下目标获取信息的要求,我们再次组织编写了“空间射频信息获取新技术丛书”(以下简称丛书)。该套丛书的正式出版和推广,将有利于正确把握雷达技术发展方向,促进我国雷达事业的创新发展。

为使丛书较系统地总结和反映我国在空间射频信息获取与应用方面所取得的创新技术与理论成果,同时吸纳国外在该领域的相关前沿基础科研成果,为该领域技术发展提供借鉴作用,本套丛书除包括本版内容之外,还充实了国外引进版内容。全套丛书的内容定位主要突出空间射频信息获取技术的工程设计性,反映空间射频信息获取的新技

术。在本版内容中,强调总结我国科技人员近年来在空间射频信息获取技术领域取得的重大科技成果和突破性进展,框架设想上体现新技术和创新发展;在国外引进版内容上,重点吸纳国外空间射频信息获取技术领域的前沿基础科学研究和对该领域技术发展具有借鉴作用的新技术。全套丛书尽可能提供有关研究图表、数据、曲线和计算公式,使设计举例更具有实用性。

丛书的编写创作主要由领域内几位院士和众多中青年专家担纲,他们既要完成繁重的科研和管理任务,又要抓紧时间撰写书稿,工作十分辛苦,在此,我们谨代表丛书编委会,向各册作者和审稿专家表示深深的敬意!我们希望本套丛书所展示的新技术、新成果和新理论等能对从事该技术领域科研、设计、教学、管理工作的人员,部队干部、战士,以及高等学校相关专业的学生、研究生有所帮助,从而促进我国空间射频信息获取技术的发展,为国家信息化建设和国民经济建设作出贡献。

本套丛书的出版,得到了中国电子科技集团公司、中国电子科学研究院、南京电子技术研究所、西安电子科技大学等各参与单位的大力支持,得到了电子工业出版社领导和刘宪兰首席策划编辑的积极推动,得到了参与丛书工作全体同志的热情帮助,在此一并表示衷心的感谢!

丛书主编、中国工程院院士

王小谟 张光义

2013年5月

前言

雷达技术自 20 世纪 30 年代问世以来,在世界各国的国防与经济建设中发挥着重要作用。随着雷达新理论、新技术、新材料及新工艺等水平的高速发展,人们不仅希望雷达系统能在多目标、强杂波与有源干扰背景中探测目标特征,还要求具备对付敌方高速、高机动、隐身目标及在复杂电磁环境等中应用的能力,这样就提出了更高的要求。为了应对诸如此类的发展需求,雷达系统的性能需要随之不断提升。因此,很多新技术被应用到雷达系统中,其中最典型的是微波技术。微波技术经过几十年的发展,已经有众多的创新技术成果在海、陆、空、天及各种武器平台的雷达系统中得到了广泛应用。现今,快速发展的微波新技术几乎渗透到雷达的各个分系统。可以说,微波技术的发展是现代雷达系统具备高性能的必要条件。相应地,雷达系统的发展需求与牵引也是促进微波技术向前发展的重要推动力。

为了全面展现高性能雷达系统的研制过程,本书较详尽地阐述了雷达微波新技术在天线及阵列、高功率固态发射机、新型收发组件、高集成信号传输网络和雷达成射频隐身等方面的应用。本书还结合工程实践经验介绍了微波部件工艺技术和天线微波分析与测量技术。此外,本书还介绍了电磁超材料技术在高性能雷达系统中的潜在应用及前景。书中内容以雷达系统组成为主线进行章节设置,通篇具有较强的逻辑性,以便读者能够深入浅出地阅读理解本书。

本书取材以工程实践为基础,相关内容反映了微波技术在雷达技术领域近十多年来的最新研究成果,使得本书较好地契合了书名《雷达微波新技术》中的“新”一词,以确保书中内容的前瞻性。本书介绍了很多国内外雷达领域的设计实例,并点出了微波新技术在其中的应用关键,这使得本书的内容具有较强的实用性。

胡明春、周志鹏、高铁对全书进行了审读与修改,其中第 1 章由胡明春、李斌编写,第 2 章由胡明春、刘明罡、王侃、于大群编写,第 3 章由商坚刚、余振坤编写,第 4 章由周志鹏、戴扬编写,第 5 章由周志鹏、李斌编写,第 6 章由高铁、潘宇虎、张强编写,第 7 章由宗敬群、韩宗杰、郝新锋、纪乐编写,第 8 章由高铁、夏琛海编写,第 9 章由胡明春、李斌、李锐编写。在此本人对以上提及的各位同志表示由衷的感谢。同时,本书在编写

过程中,得到了南京电子技术研究所各研究部领导的大力支持,对此也致以诚挚的谢意。

我们已做出努力来确保文稿的质量和准确,限于学术水平和工作经验,书中的差错、疏漏及不妥之处在所难免,殷切地希望读者给予批评和指正。

胡明春

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，本社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市海淀区万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 现代雷达系统	2
1.1.1 雷达的基本原理	2
1.1.2 雷达体制与分类	4
1.2 新型雷达的发展趋势	6
1.2.1 超宽带雷达	6
1.2.2 数字阵列雷达	7
1.2.3 隐身与反隐身雷达	8
1.2.4 多功能雷达	10
1.3 基于雷达应用的微波技术	10
1.3.1 微波技术在雷达系统中的应用	10
1.3.2 雷达微波新技术的发展概况	11
1.3.3 雷达微波新技术的发展特点	13
参考文献	13
第 2 章 天线与阵列设计	15
2.1 雷达天线特性	16
2.1.1 功能	16
2.1.2 基本参数	16
2.2 新型天线	19
2.2.1 超宽带天线	19
2.2.2 波导缝隙天线	22
2.2.3 薄膜天线	29
2.2.4 共形天线	32
2.3 阵列天线设计	38
2.3.1 宽带宽角度扫描阵列设计	38

2.3.2 阵列波束赋形	45
参考文献	50
第3章 高功率固态发射技术	55
3.1 相控阵雷达对高功率发射机的需求	56
3.2 高功率发射技术的发展趋势	58
3.3 高功率发射机的关键技术	59
3.3.1 新型半导体功率器件在雷达发射机中的应用	59
3.3.2 宽带发射技术	66
3.3.3 线性发射技术	70
3.3.4 毫米波固态发射技术	77
3.3.5 固态发射机监控技术	84
3.4 高功率固态发射机技术的实现	90
3.4.1 发射机系统的设计方法	90
3.4.2 微波功率放大器的设计	96
参考文献	104
第4章 新型收发组件技术	105
4.1 T/R 组件概述	106
4.1.1 典型框图	106
4.1.2 工作原理	106
4.2 T/R 组件技术的发展	108
4.3 有源子阵的概念与构架	112
4.4 有源子阵的关键技术	114
4.5 有源子阵的设计	116
4.5.1 有源子阵的设计流程	116
4.5.2 有源子阵设计实例	118
4.6 有源子阵的自动化测试	122
参考文献	129
第5章 高集成信号传输网络	131
5.1 高集成信号传输网络在相控阵雷达中的重要作用	132
5.1.1 相控阵雷达对高集成信号传输网络的需求	132
5.1.2 高集成信号传输网络的系统组成	133
5.1.3 高集成信号传输网络在相控阵中的应用	135
5.2 高集成信号传输网络的关键技术分析	137
5.2.1 复杂信号综合电路设计技术	137
5.2.2 三维微波集成电路设计技术	146
5.2.3 微波多层板设计和制造技术	149
5.3 高集成信号传输网络的设计方法	154

5.3.1 微波馈电网络层的设计	155
5.3.2 波束控制网络层的设计	161
5.3.3 电源分配网络层的设计	166
5.4 高集成信号传输网络的发展趋势	171
参考文献	171
第 6 章 雷达射频隐身技术	173
6.1 射频隐身的定义	174
6.1.1 隐身技术概述	174
6.1.2 RCS 的概念	175
6.1.3 散射源分类	177
6.1.4 RCS 估算方法	178
6.1.5 实现射频隐身的关键	178
6.2 天线的隐身设计	180
6.2.1 天线散射的基础	180
6.2.2 阵列天线的 RCS 仿真计算	184
6.2.3 阵列天线 RCS 缩减的基本考虑	184
6.2.4 天线的模式项 RCS 缩减	185
6.2.5 天线的结构项 RCS 缩减	187
6.2.6 低 RCS 的天线单元	189
6.2.7 天线的 RCS 测试	190
6.3 天线罩的隐身设计	192
6.3.1 FSS 天线罩	192
6.3.2 几种基本的 FSS 阵列特性	196
6.3.3 天线罩的外形处理	199
6.3.4 天线罩与平台结构的连接处理	200
6.3.5 天线一天线罩的一体化设计	200
6.4 雷达射频隐身的发展趋势	202
参考文献	203
第 7 章 微波部件工艺集成	205
7.1 新型雷达微波部件的工艺集成需求	206
7.2 微波多层基板集成工艺	206
7.2.1 陶瓷基微波多层基板集成工艺	207
7.2.2 聚合物基微波多层基板集成工艺	213
7.3 微波部件壳体加工工艺	217
7.3.1 钛合金材料及其加工工艺	219
7.3.2 SiC/Al 复合材料及其加工工艺	221
7.3.3 Si/Al 合金及其加工工艺	223
7.4 微波部件封装工艺	226

7.4.1 封装的基本工艺流程及方法	226
7.4.2 倒装芯片焊接工艺	236
7.4.3 立体封装工艺	240
参考文献	243
第8章 微波分析与测量技术	249
8.1 电磁场与微波电路分析技术	251
8.1.1 电磁分析及应用	252
8.1.2 电磁场和微波电路测量概述	259
8.2 收发组件的自动化测量	267
8.2.1 收发组件的测试需求	268
8.2.2 收发组件的新测试方法	269
8.3 阵面测量与校准技术	273
8.3.1 多任务快速测量	273
8.3.2 数字雷达阵面的测量	279
8.3.3 雷达天线的监测	281
参考文献	288
第9章 超材料在雷达系统中的应用	291
9.1 超材料简介	292
9.1.1 超材料的范畴	292
9.1.2 超材料发展简况	293
9.1.3 超材料在雷达系统中的应用前景	293
9.2 左手材料	294
9.2.1 左手材料简介	294
9.2.2 左手材料的特性	295
9.2.3 左手材料的实现	296
9.2.4 左手材料在雷达系统中的应用	299
9.3 光子晶体	303
9.3.1 光子晶体简介	303
9.3.2 光子晶体的特性	303
9.3.3 光子晶体在雷达系统中的应用	304
9.4 缺陷地结构	306
9.4.1 缺陷地简介	306
9.4.2 缺陷地的特性	307
9.4.3 缺陷地结构在雷达系统中的应用	307
参考文献	312
索引	315

第1章

概 述

- ◆ 现代雷达系统
- ◆ 新型雷达的发展趋势
- ◆ 基于雷达应用的微波技术

雷达是通过发射电磁信号,接收来自波束覆盖范围内探测目标的回波,并从回波信号中提取位置、速度及其他信息,用于目标探测、目标定位和目标识别的电子装备。自 20 世纪 30 年代问世以来,雷达技术在国防建设与经济建设中发挥着十分重要的作用。随着观测目标的日益复杂和工作电磁环境的不断恶化,现代雷达系统除了能在多目标、强杂波与有源干扰背景中检测目标和测量目标的参数与特征外,还要求具备对付敌方飞机及反辐射导弹等攻击的能力。为了应对不断增加的观测任务,雷达系统的性能必须也要随之不断提升。

雷达技术是一门交叉学科,相关学科上的创新与进步通常都能很快地被应用到雷达系统的设计与制造中,其中最典型的是微波技术。微波技术最早被应用到机械扫描雷达中,随着相控阵雷达技术的发展,微波新技术在天线及阵列、高功率固态发射机、新型收发组件、高集成信号传输网络、雷达射频隐身等方面得到了广泛的应用。因此,可以说微波技术的发展是实现现代雷达系统具备高性能的必要条件。相应地,观测任务对雷达性能需求的提高,在很大程度上也是促进微波技术向前发展的重要推动力。

本章将首先回顾现代雷达系统的基本原理与体制、分类,接着介绍新型雷达(如超宽带雷达、数字阵列雷达和多功能雷达等)的发展趋势,最后介绍可应用于先进雷达系统的微波新技术的发展特点和发展概况。

1.1 现代雷达系统

现代雷达经过了 80 多年的发展历程,已经在国防建设和经济建设中得到了广泛的应用。在这个过程中,雷达的种类越来越多,按观测任务或功能可分为警戒雷达、引导雷达、测高雷达、制导雷达、机载火控雷达、预警雷达、地形跟随和回避雷达、气象雷达等若干种^[1]。

1.1.1 雷达的基本原理

雷达(Radar)一词是 Radio Detection and Ranging 的缩写,意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。

1. 雷达系统的原理框图

雷达的基本原理可以用脉冲雷达的组成来说明,如图 1.1 所示。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,集中在某一个方向上形成波束,向前传播。当波束遇到目标后,将沿着各个方向反射,其中一部分电磁能量反射回雷达的方向,被天线获取。天线接收的能量经过双工器或收发转换开关送到接收机,形成回波信号。在传播过程中,电磁波会随着距离衰减,因此雷达回波信号往往非常微弱,甚至几乎被噪声淹没。接收机放大微弱的回波信号,经过信号处理机,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。

一般情况下,雷达通常只需测定目标的方位、仰角和距离,但需要指出的是,回波信号也包含目标特性等方面的信息,这也可用于目标识别。图 1.1 中所示的监视器可以显示接收机的输出,根据监视器的显示可判断目标的存在与否。不过这种判断方法在现代雷达系统中已经退化为辅助手段。当前,使用最多的是利用自动检测和跟踪设备对接收机的输出进行处理,以便实时判断目标的存在与否,并根据发现目标后一段时间内的检测,建立目标航迹。使用自动检测和跟踪设备时,雷达操纵员需要掌握处理后的目标航迹,而不是原始雷达检测信号,这显著提升了雷达系统的自动化程度,大幅减少了操纵人员配备。

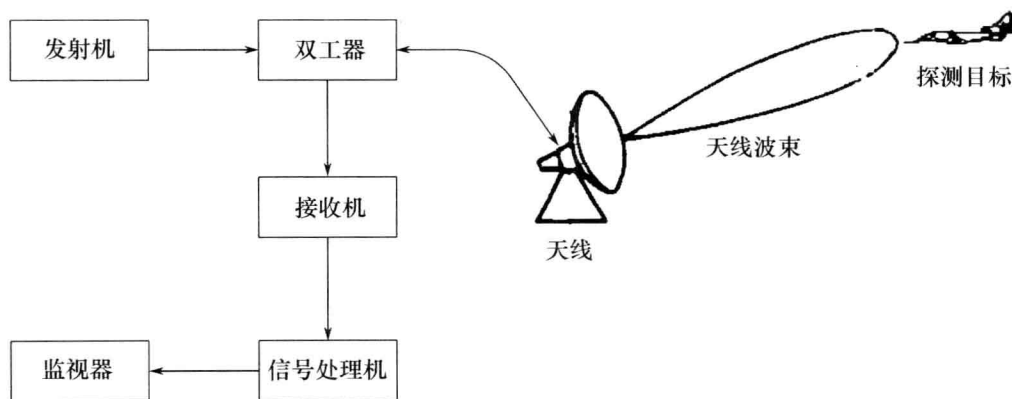


图 1.1 典型脉冲雷达的组成

2. 雷达的测量原理

雷达的测量原理是基于对回波信号特征的提取,从中获得目标的位置、速度及其他信息。通过测量回波信号的时间延迟可得到目标的距离,而目标的方位可通过方向性天线测量回波信号的到达角来确定。如果是动目标,雷达还可利用多普勒效应测得目标的移动速率,并且推导出目标的运动轨迹。

1) 目标距离的测量

为了测定目标到雷达的距离,需要准确测量电磁波从发射、目标反射到接收整个过程的时间延迟 Δt 。 Δt 也就是电磁波在雷达与目标之间往返所花费的时间。测得 Δt 后,通过简单计算可获得雷达到达目标的距离 R :

$$R = \frac{1}{2} c \Delta t \quad (1.1)$$

式中, c 为真空中电磁波的速度 3×10^8 m/s; 因子 $1/2$ 是考虑电磁波往返的时间延迟。

2) 目标角位置的测量

目标角位置的测量是利用天线的方向性来实现的。雷达利用波束内的目标与天线主轴的角度偏移生成一个误差信号。角度偏移一般从天线的主轴开始测量,因此得到的误差信号可表征目标偏离波束主轴的程度。实际测量时,通过波束扫描标定出雷达波束与

目标垂直时的零误差信号,即可计算出目标的角位置。需要指出的是,两坐标雷达只能测定目标的方位角,三坐标雷达则可以测定方位角和俯仰角。此外,目标的角位置还可以通过测量两个分离接收天线收到的信号的相位差来获得。

3) 目标速度的测量

雷达基于多普勒频移可获取目标的径向运动速度,以及分辨杂波、静止物体和运动物体。多普勒现象可以描述为:当目标和雷达之间存在相对运动时,目标回波的频率会发生改变。该频率的改变量称为多普勒频移,其数值取决于目标的径向速度 v_r ,即

$$f_d = 2 \frac{v_r}{\lambda} \quad (1.2)$$

当目标面对雷达飞行时,多普勒频移为正;当目标背向雷达飞行时,多普勒频移为负。从式(1.2)可看出,只需测得多普勒频移 f_d ,即可计算得到目标的径向运动速度 v_r 。

4) 目标尺寸和形状

当雷达具有足够高的分辨率时,能识别目标尺寸和形状的某些特性。因此,雷达除了用于目标探测和定位外,还可用于目标识别。雷达分辨率包括距离分辨率、角度分辨率和横向距离分辨率。距离分辨率要求雷达具有大的瞬时带宽,角度分辨率取决于天线波束在方位与俯仰角上的半功率点宽度。在横向尺度上,雷达获得的分辨率通常不如其在距离上获得的分辨率高。但是当目标的各个部分与雷达间存在相对运动时,可运用多普勒频移固有的分辨率来分辨目标的横向尺寸^[2]。

3. 雷达方程与作用距离

作用距离是雷达的一个主要战术指标,该指标的计算按雷达方程进行。雷达方程除了用于计算作用距离外,还可用来表征雷达各分系统指标对雷达系统性能的影响。雷达方程在很大程度上反映了雷达战术指标与雷达技术指标之间的联系。

雷达方程将作用距离和发射、接收、天线和环境等因素联系了起来。根据雷达方程,雷达能探测的最远距离 $R_{\max}$ 为

$$R_{\max}^4 = \frac{P_t G_t \sigma A_r}{(4\pi)^2 L_s S_{\min}} \quad (1.3)$$

式中, P_t 为发射机的峰值功率; G_t 为发射天线增益; σ 为目标的雷达截面积; A_r 为接收天线的有效面积; L_s 为雷达系统的损耗; $S_{\min}$ 为最小可探测信号。

此外,雷达方程还有其他几种表现形式,具体可参考雷达手册^[3]。需要指出的是,雷达方程可以正确反映雷达各参数对作用距离影响的程度,但不能充分反映实际雷达的性能,因为许多影响作用距离的环境和实际因素在雷达方程中并没有体现。

1.1.2 雷达体制与分类

雷达按照所处平台的不同可以分为陆基、舰载、机载和星载等雷达系统,也可以按照具体特征或功能用途分成多种类别,如按照雷达的用途分为预警雷达、搜索警戒雷达、无线电测高雷达、气象雷达、航管雷达、引导雷达、炮瞄雷达、战场监视雷达、机载截击雷达、