

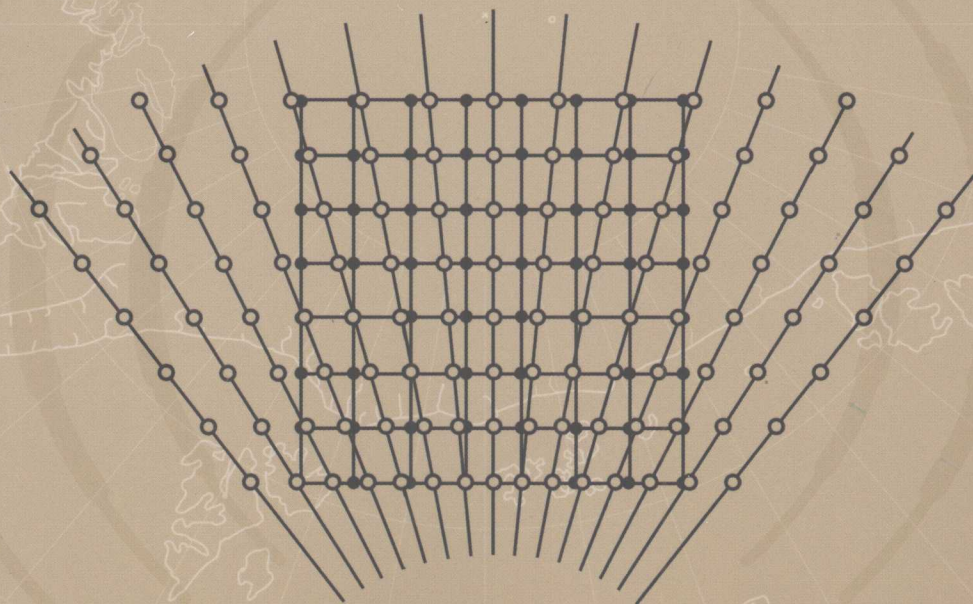
国防电子信息技术丛书

Radar Foundations for Imaging and Advanced Concepts

成像与先进雷达 技术基础

[美] Roger J. Sullivan 著

微波成像技术国家重点实验室 译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

国防电子信息技术丛书

成像与先进雷达技术基础

Radar Foundations for Imaging and Advanced Concepts

[美] Roger J. Sullivan 著

微波成像技术国家重点实验室 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要由四大部分组成。第一部分为雷达基础,包括雷达简介、雷达系统、雷达与外部环境的相互作用、雷达信号处理基础、角度测量等;第二部分为成像雷达,包括成像雷达简介、合成孔径雷达、SAR/ISAR 成像处理及应用、SAR/ISAR 图像目标识别等;第三部分为脉冲多普勒和 MTI 雷达,重点研究脉冲多普勒雷达及机载运动目标检测雷达;第四部分为雷达技术专题,涵盖了空-时自适应处理、双站和低截获概率雷达、气象雷达和地面穿透雷达等先进雷达体制和信号处理技术。最后提供了一个详细的雷达术语表。

本书弥补了现有雷达系统或雷达原理类书籍缺乏先进雷达体制和技术内容的不足,同时也为后续专门研究先进雷达技术专题提供了雷达系统、理论基础甚至工程实现等方面的理论和技术准备。通过本书能够在成像雷达等先进雷达体制和信号处理技术方面有快速提高,适合作为研究生教材和相关技术人员的参考书。

Radar Foundations for Imaging and Advanced Concepts by Roger J. Sullivan.

Original English language edition Copyright © 2004 by SciTech Publishing, Inc.

The Chinese translation edition Copyright © 2009 by Publishing House of Electronics Industry.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission in writing from the Proprietor.

本书中文专有翻译出版权由 SciTech Publishing, Inc. 授予电子工业出版社,未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2007-3441

图书在版编目 (CIP) 数据

成像与先进雷达技术基础 / (美) 沙利文 (Sullivan, R. J.) 著; 微波成像技术国家重点实验室译.

北京: 电子工业出版社, 2009.1

(国防电子信息丛书)

书名原文: Radar Foundations for Imaging and Advanced Concepts

ISBN 978-7-121-07784-5

I. 成… II. ①沙… ②微… III. 雷达信号-图像处理 IV. TN957.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 178174 号

策划编辑: 马 岚

责任编辑: 秦淑灵

印 刷: 北京东光印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

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 × 1092 1/16 印张: 20.25 字数: 518 千字

印 次: 2009 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 49.50 元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题, 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 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

译者序

作为一种主动的航天、航空遥感手段,微波成像技术具有全天时、全天候工作的特点,在环境保护、灾害监测、海洋观测、资源勘查、精细农业、地质测绘和政府公共决策等方面有着广泛的应用,目前已成为高分辨率对地观测和全球资源管理的最重要手段之一。以其中的典型代表合成孔径雷达(SAR)技术为例,经过三十余年的研究和发展,我国在系统研制、数据获取、信息处理及遥感应用等方面取得了一系列重大的技术突破和丰硕的科研成果。

微波成像技术国家重点实验室主要从事以合成孔径雷达技术为代表的微波成像新概念、新体制和新方法的研究。实验室为持续跟踪国际最先进微波成像技术的发展动态而组织开展了外文著作系列翻译工作,涉及SAR先进系统、成像算法、图像理解和应用等内容。作为上述专题的基础,实验室专门挑选本书作为译著系列的基础文献和入门教材。本书作者依据自己长期从事SAR概念研究和系统研制管理的研究经历和经验,重点针对雷达系统和信号处理基础、成像雷达及其主要工作模式、脉冲多普勒雷达以及运动目标指示雷达等内容进行了全面阐述,并在此基础上就空时自适应处理、双站和低截获概率雷达、气象雷达和地面穿透雷达等先进雷达体制和信号处理技术展开了专门论述。与现有的雷达系统或雷达原理参考书籍或教材相比,本书特点在于其对先进雷达体制和技术内容的全面、专门的描述,并为后续专门研究先进雷达系统和技术专题提供了雷达系统、理论基础甚至工程实现等方面的理论和技术准备。此外,本书还根据各章节的内容设计了相关问题供读者思考,并在最后提供了一个详细的雷达术语表。本书可帮助读者在成像雷达等先进雷达体制和信号处理技术等方面有着快速全面的提高,可望成为一本优秀的电子工程专业研究生教材和相关技术人员参考书目。还需指出的是,本书中译本完成了原版的勘误修订,并使用作者提供的电子版图表以保证印刷的质量。

实验室译著系列由吴一戎、洪文负责选书和翻译的组织工作。北京航空航天大学的孙进平、王俊、李侃、王文菁、高飞、白霞、成功、刘书君等完成了本书的翻译工作。洪文、孙进平完成了本书的校译工作,并由吴一戎对全书进行了终稿审定。本书的翻译还得到了中国科学院电子学研究所、北京航空航天大学多位专家学者的指导和帮助。需要说明的是,本中译版的首要原则是精确地传达原著的学术观点。鉴于译者的经验和时间约束,翻译过程中难免存在未尽和疏漏之处,敬请广大读者批评指正。

微波成像技术国家重点实验室

序 言

在美国国防部 (DoD) 工作的 38 年里, 我有幸参与了很多空对地智能、监视、侦察和攻击雷达系统的开发, 包括 Pave Mover 地面运动目标指示 (GMTI) / 合成孔径雷达 (SAR) 系统, Tacit Blue 隐形飞机的雷达系统, 直升机载的远程目标获取系统 (SOTAS) GMTI, 正在使用的由 Pave Mover 发展而来的 E-8C 的联合监视目标攻击雷达系统 (Joint STARS), U-2 的先进 SAR 系统 (ASARS) 及其最新改型, 高空长航时全球鹰和暗星无人机 (UAV) 上的雷达传感器, 以及其他一些机密系统。许多人在系统分析、电子及天线硬件设计、数字信号处理和数据分析等方面所做出的杰出贡献, 使得雷达技术和系统能力得到了飞速发展, 我本人对此也感触良多。

很少人能像 Roger Sullivan 博士一样, 有天赋来讲解和教授建成这些复杂雷达系统所需要的数学、物理和工程方面的知识。在最后一份工作, 也就是作为国防机载侦察局 (DARO) 技术代表时, 我委托 Sullivan 博士向 DARO 和国家侦察局 (NRO) 里感兴趣的人员讲授关于先进雷达的课程, 显然他在以一种清晰且易理解的方式教授知识方面有自己独特的方法。他的课程内容既有介绍性材料, 也有现代微波雷达关键技术方面的系统、定量的描述, 其中包括对 SAR 和逆 SAR 成像的详细处理、空中运动目标指示 (AMTI), GMTI 以及其他相关雷达系统。我鼓励他把材料整理成一本教材, 提供给初学者和立志成为资深雷达工程师的新手, 对此我十分自豪。我相信此书将对本专业的发展起到很好的推动作用。

在 1997 年至 1998 年间, 我邀请美国国防分析研究所 (IDA) 的 Sullivan 博士, 以及来自空军、美国国防部高级研究计划署 (DARPA)、国防部长办公室 (OSD)、麻省理工学院 (MIT) 林肯实验室、MITRE 公司和工业界的许多顶尖雷达专家, 辅助实施称为“先进雷达研究”的计划, 在副国防部长办公室 (获取及技术) 和美国国会的要求下, 我被授权领导实施这一计划。我们回顾了保密和非保密的先进雷达技术并得出结论: 我们正站在雷达新技术获得重大突破的边沿, 这一突破甚至比我们过去 25 年所见到的更具革命性。未来雷达的重大突破基于有源电扫描阵列天线 (AESA) 微波雷达和先进信号处理的最新进展, 而这已经通过国防部和业界的投资项目 [如 F-22、F/A-18E/F、联合攻击战斗机 (JSF)、陆基雷达 (GBR) 和星载雷达项目] 体现出来了。这些进展已经使经济的、模块化的 / 可缩减的新一代多功能雷达成为可能。AESA 雷达可以提供同时 / 交替的脉冲到脉冲的 AMTI, GMTI, SAR 成像以及目标识别波形的捷变波束功能。雷达以高效率和低损耗提供非常高的辐射功率, 同时达到制造经济、可靠和生命周期长的性能。

主要技术贡献如下:

- 低成本、高效率的微波单片集成电路 (MMIC) 发射 / 接收 (T/R) 模块
- 可以提供分布式直流功率、数字控制和 RF 信号的平面多层管线结构
- 为每个辐射单元提供高可靠性的极化转换和数字时间延迟模块的微电机 (MEM) 开关

- 较大带宽和动态范围的跳频/线性调频发射机/接收机
- 能提供 50~100 G 次/秒/立方英尺 (1 立方英尺 = 0.0283 立方米) 运算速度的低价嵌入式商用数字信号处理器, 并且随着高速内存和互联结构的发展, 在未来 5 年内其速度可以发展到每立方英尺内每秒万亿次运算
- 用于消除地面杂波和自适应地消除空间干扰的空时自适应处理 (STAP)
- 具有较高的更新率和精度、针对大量 (上千) 运动目标的自动目标跟踪算法
- 使用高分辨率距离像和 SAR/逆 SAR 成像的地面与空中运动目标自动识别算法

看到将对空地战场信息产生革命性变化的潜在突破是非常令人激动的。今天的 MTI 雷达, 以移动点代表目标, 并且更新缓慢。提供高精度和更新速率的 MTI 信息可以使其识别在大范围内被跟踪的目标, 并提供革命性的、连续的、实时的地面车辆种类和运动信息。例如:

- 一个区域内的自动车辆统计, 以方向、车辆的起点/终点检测、对车辆的识别和车辆运动的跟踪历史来分类
- 比现有战场系统的分辨率高 2~3 倍的超高分辨率 SAR 定点图像
- 交替或同时的 GMTI, SAR 和目标识别模式, 在这些模式下允许使用高分辨率的定点图像而非难以分析的低分辨率大范围图像

Sullivan 博士的 *Radar Foundations for Imaging and Advanced Concepts* 一书, 在理解未来雷达革命性进展的原理上, 对从事雷达相关职业的人员和学生做出了出色的贡献。

John N. Entzminger, Jr.

前 言

本书实现了我长久以来的一个愿望,那就是写一本能使读者迅速了解雷达基本概念,以便有准备地学习现代雷达成像及先进概念的教材。今天的毕业生和见习工程师们需要快速接触任务的核心,而不是充斥于诸多雷达基础书中的不必要的细节和历史,即使是在仔细研读过这些书后,很多读者仍不能适应市场上那些讲述先进技术的专业书籍。我认为理想的教材应该能填补基础知识和先进雷达主题,特别是雷达成像之间的鸿沟。

大约在1980年,我初次学会拼写雷达(Radar)(正序倒序相同)一词并立即投入到成像雷达的研究领域当中。我的专业是物理,所以想找一本讲述雷达基础物理概念的书,能简洁而定量地总结所有关键问题(硬件、目标和处理等),接着可以系统地学习大量雷达成像的相关知识,以及其他一些更深的主题,如空时自适应处理(STAP)。不过我没有找到这样的书,因此只能使用经典教材,并经常希望“我心中理想的书”能够出现。

在1995年,应美国国防分析研究所(IDA)同事们的要求,我为他们准备了一堂雷达方面的课程。我以自认为能最好地讲解雷达这一主题的形式组织了这次课程。我在IDA和美国政府机关前后讲了4次课,得到很多积极的评价,以及很多希望能将此课程写成一本书的建议,因此,我决定扩展课程内容,使其成为一本我早年未曾找到的书,也就是这本书。

本书是为在物理、电气工程或数学上有本科或同等学历,并希望以系统的、定量的方式学习现代雷达知识的学生、见习工程师、数学家们所预备的。本书从雷达基础开始,接着讨论成像雷达,包括合成孔径雷达(SAR)的一些技术细节,并且覆盖了其他重要主题[比如STAP、空-空雷达、双站和低可截获概率(LPI)雷达]以及一些产品[如气象雷达和探地雷达(GPR)]。贯穿全书的每个论题均与前面内容在逻辑上保持联系,每个结果均经导出或引用。最后是一个术语表,它定义了所有本书引入的重要雷达术语并标明了第一次出现时的章节。

本书分为四部分。

- 第一部分: 雷达基础
- 第二部分: 成像雷达
- 第三部分: 脉冲多普勒及MTI雷达
- 第四部分: 雷达专题

第一部分介绍频率和波长的基本定义,以及基础雷达距离方程。对雷达一无所知的工程师可以先阅读第1章,然后根据兴趣读任一章。本部分还讨论了雷达天线和电子设备(第2章);目标的雷达散射截面和雷达波在空气、雾和雨中的传播(第3章);噪声和杂波中目标的检测,雷达的模糊度函数和脉冲压缩(第4章);雷达测量的精确度和单脉冲(第5章)。

第二部分将这些原理应用于旋转目标,或由运动雷达观测固定场景(合成孔径雷达SAR)的场合,以引出成像雷达的概念。雷达固定、目标运动的情况通常称为逆SAR(ISAR)。不过

此术语有误导性，因为其中并没有数学上的逆关系，并且 ISAR 实际上是一个比 SAR 更为基础的物理概念。因此关于成像的讨论从 ISAR 开始（第 6 章），然后是更加复杂的 SAR（第 7 章）。本部分同样覆盖了数字 SAR 图像的一些重要方面，包括超分辨率、旁瓣抑制（第 8 章）和雷达图像的目标识别（第 9 章）。

第三部分的讨论转移到脉冲多普勒雷达（第 10 章），它是用来探测和分析运动目标的。这一章讨论了相位噪声，并使用多种脉冲重复频率（PRF）以及中国余数定理对距离和速度解模糊进行了讨论。第 11 章讨论了运动目标指示（MTI）：使用机载雷达对地面或空中的运动目标进行检测。

第四部分覆盖了现代雷达分析中几个特别而有意义的论题：STAP（第 12 章）、双站和 LPI 雷达（第 13 章）、气象雷达和探地雷达（第 14 章）。

我认为，不做课后练习就不可能学好一门技术课程，因此本书每章都有一些习题，如果读者能尝试解出它们，毫无疑问将取得更好的学习效果。

同样，在阅读一本技术书籍时，我通常不能很快地回忆起一个重要技术术语的定义，因此希望能快速查找到。为帮助读者，我总结了一份详细的雷达术语表，每个术语都与其第一次出现的章节前后对照。这样，如果读者跳到了后面的章节并遇到一个前面定义的术语，他就可以立即找到相关定义及其重要性的简短评论。

对现代雷达的研究是连续的和不断发展的，读完本书，读者将对雷达文献——期刊、会议和书籍上的各种标题更加熟悉。本书可作为入门参考书和复习资料，特别对设计人员、系统经理及见习工程师的个人学习和培训有帮助。

欢迎读者对下一版本提出意见和建议。来信请寄

Institute for Defense Analyses

4850 Mark Center Drive

Alexandria, Virginia 22311

最后感谢 SciTech 对本书的信任及提供的校稿。

Roger J. Sullivan

Alexandria, Virginia

August 2003

致 谢

在本书的准备阶段,很多人提供了有价值且必要的贡献,没有他们,本书是不可能完成的。首先,我要深深地感谢美国国防分析研究所(IDA),感谢同事们一直以来的鼓励和支持,这不仅体现在本书的写作方面,同时也体现在我的开发工作以及作为本书基础的雷达教学方面。

特别要感谢以下5位卓越而广泛的支持:Mary Smith和Joanne Aponick,在课程和书的准备阶段给予了行政支持;Gary Franklin,准备了所有的原始图例;Mike Tuley,审阅了整个文稿并给出了很多必要的改进意见;John Entzminger,感谢他的鼓励并为本书做的序。

感谢Gene Goldstein(Raytheon公司),Troy Schilling(IDA)和Steve Wilson(弗吉尼亚大学)细心审阅了本书的部分章节。也要感谢对于本书及以前课程做出重要贡献的人——我在IDA和其他单位的同事:Parney Albright, Dale Ausherman(Veridian ERIM International—Veridian EI), Liz Ayers, Gerald Benitz(MIT林肯实验室-MITLL), Tom Blair, Norman Butman, Bryant Centofanti(Northrop-Grumman公司,NGC), Libba Colby, Pat Coleman(MRI公司), Amy Cranford, Shirley Crowell, Amnon Dalcher, Paulette Davis(Whitman, Requardt and Associates), Stuart DeGraaf(NGC), Dennis Deriggi, Anthea DeVaughan, Ben Edwards, Chuck Everett, Jim Fienup(Veridian EI), John Frasier, Barry Fridling(Joint Theater Air and Missile Defense Organization), Ron Goodman(Veridian EI), Ruth Greenstein, Dianna Gregory, Don Grissom, Bob Guarino(NGC), David Hart, Kent Haspert, Jim Heagy, Art House, Bill Jeffrey(DARPA), Ken Koester(NGC), Dick Legault, Pat Lequar, Les Novak(MITLL), Ron Majewski(Veridian EI), Phil Major, Keith Meador, Tom Milani, Jeff Nicoll, Sam Park, Richard Perry(Mitre), David Potasznik, Giovanna Prestigiacomo, Jim Ralston, Ken Ratkiewicz, Mike Rigdon, Deanna Saunders, Dan Sheen(Lockheed-Martin公司), Jim Silk, Maile Smith, Larry Stucki, Mark Stuff(Veridian EI), Dorothy Taylor(MRI公司), Susan Taylor, Jim Ward(MITLL), Lynn Welch,以及参加了IDA雷达课程的其他人。我也要感谢Ron Easley和Andy Schultheis等Sytem Planning公司的同事,以及Jack Walker等Veridian ERIM-International的同事,我从他们那里学到了很多知识。衷心感谢以上各位及所有帮助和鼓励我的人,尤其是我贤淑的妻子Susan。

目 录

第一部分 雷达基础

第1章 雷达概论	2
1.1 雷达定义	2
1.2 雷达简史	2
1.3 电磁波	2
1.4 脉冲	5
1.5 分贝	6
1.6 天线	6
1.7 雷达散射截面 (RCS)	8
1.8 对散射能量的接收	9
1.9 噪声	10
1.10 信噪比	10
1.11 雷达方程	10
1.12 最大不模糊距离	11
1.13 相参雷达	13
1.14 多普勒效应	13
1.15 雷达测量到的多普勒频移	14
1.16 最大不模糊多普勒速度	14
1.17 高、中、低 PRF	15
1.18 距离门	15
1.19 雷达杂录	16
参考文献	17
习题	18
第2章 雷达系统	19
2.1 傅里叶变换	19
2.2 雷达硬件	20
2.3 孔径天线	27
2.4 相控阵天线	34
参考文献	37
习题	38
第3章 雷达系统与外部环境的相互作用	41
3.1 雷达散射截面	41

3.2 传播与杂波	50
3.3 外部噪声	58
参考文献	61
习题	61
第 4 章 雷达信号处理基础	64
4.1 噪声和杂波中的雷达信号检测	64
4.2 雷达波形	70
4.3 雷达测量的精确度	82
参考文献	86
习题	87
第 5 章 角度测量	89
5.1 历史及术语	89
5.2 单脉冲	90
5.3 干涉仪雷达	95
5.4 闪烁	98
参考文献	99
习题	99

第二部分 成像雷达

第 6 章 成像雷达介绍	102
6.1 距离-速度压缩	102
6.2 转动目标: 逆合成孔径雷达	102
6.3 扩展目标的 ISAR	105
6.4 点扩展函数	106
6.5 标准二维 ISAR: 小角度情况	107
6.6 二维 ISAR: 大角度情况	110
6.7 三维 ISAR	110
6.8 波数空间和极坐标格式算法	111
6.9 对 ISAR 的评注	113
6.10 其他情况下的 ISAR	113
6.11 近场 ISAR	117
6.12 平动/转动未知时的目标	117
参考文献	120
习题	121
第 7 章 合成孔径雷达	122
7.1 SAR 简介	122
7.2 SAR 波形与处理	128

7.3 SAR 图像质量因数	133
7.4 SAR 关键参数小结	138
7.5 SAR 特殊应用	140
参考文献	151
习题	153
第 8 章 SAR/ISAR 数字图像	155
8.1 数字图像的生成 (信号处理)	155
8.2 数字图像增强 (图像处理)	162
参考文献	169
习题	170
第 9 章 SAR/ISAR 图像中的目标识别	171
9.1 恒虚警率	171
9.2 自适应匹配滤波器	171
9.3 SAR 图像中的自运动目标识别	174
9.4 半自动图像智能处理	179
9.5 其他目标识别算法	180
参考文献	181
习题	182
第三部分 脉冲多普勒及 MTI 雷达	
第 10 章 脉冲多普勒雷达	184
10.1 脉冲串的多普勒频谱	184
10.2 相位噪声	187
10.3 距离和速度模糊	189
10.4 脉冲标记	192
10.5 PRF 切换	192
10.6 中国余数定理	196
10.7 PRF 选择技术	197
参考文献	197
习题	198
第 11 章 机载雷达对运动目标的观测	199
11.1 低、中、高 PRF	199
11.2 高 PRF 杂波模型	201
11.3 空-空雷达	204
11.4 空对地雷达	207
参考文献	218
习题	219

第四部分 雷达专题

第 12 章 空时自适应处理	222
12.1 初始假定	222
12.2 噪声、目标、干扰和杂波的表示方法	223
12.3 STAP 算法	228
12.4 全自适应 STAP 小结	229
12.5 全自适应 STAP 举例	230
12.6 STAP 性能指标	231
12.7 部分自适应 STAP	235
12.8 其他 STAP 结果	236
参考文献	238
习题	239
第 13 章 双站雷达和低截获概率雷达	240
13.1 双站雷达	240
13.2 低截获概率雷达	246
参考文献	248
习题	249
第 14 章 气象雷达和探地雷达	251
14.1 气象雷达	251
14.2 探地雷达	255
参考文献	259
习题	260
术语表	261
中英文术语对照表	301

第一部分 雷达基础

第1章 雷达概论

第2章 雷达系统

第3章 雷达系统与外部环境的相互作用

第4章 雷达信号处理基础

第5章 角度测量

$$\epsilon_0 = \text{自由空间介电常数} = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ kg} \cdot \text{m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{s}^4 \cdot \text{C}^2$$

$$\mu_0 = \text{自由空间磁导率} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{C}^2$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

第1章 雷达概论

1.1 雷达定义

雷达是指“一个能发射电磁信号并接收来自其覆盖区域内感兴趣目标回波的装置^[1]”。早期的雷达 (Radar) 术语是无线电探测和测距 (radio detection and ranging) 的缩写。

上述定义也适用于现有的许多使用声波而非电磁波的实用系统, 这类系统一般称为声呐 (某些情况下使用的是超声波)。根据这一定义, 蝙蝠在飞行时利用的是声呐, 而非雷达。虽然声呐在原理上与雷达很相似, 但已超出了本书的讨论范围。

除非特别声明, 本书所说的雷达一般都指单基站雷达, 在这种系统中, 电磁能量的发射和外部目标 (一个或多个) 回波的接收由相同位置的同一部雷达和天线完成。此外, 我们也会偶尔提到收发分置的双基站雷达以及存在多个发射机和接收机的多基站雷达。有关雷达的书籍非常多^[2-16]。

1.2 雷达简史

雷达的历史, 尤其是雷达的早期历史, 是一个令人感兴趣的课题, Budieri [17], Burns [18] 和 Swords [19] 等人对此进行了极好的描述。雷达的历史简述如下。1886年, Heinrich Hertz 证实了无线电波的传播现象。1904年, 第一部雷达由德国 Dusseldorf 地区的 Huelsmeyer 申请了专利。Huelsmeyer 是这样描述他的装置的: “一个通过发射和接收赫兹波形, 并对可能位于其传播直线上的金属物体 (如轮船、火车等) 进行指示或报警的设备”^[18, 20]。1922年, Taylor 和 Young 在华盛顿特区的海军研究实验室 (Naval Research Laboratory) 里系统地研究了船只的探测。1930年, Hyland 首次实现了对飞机的探测。1941年, 一部美国军用雷达发现了正在逼近珍珠港的日军飞机, 但却被当时值班的监视人员当成了虚假信号。在第二次世界大战中, 凭借 Chain Home 雷达系统的飞速发展, 英国成功地抵抗住了德军的空袭。战后, 雷达技术蓬勃发展, 产生了许多种今天仍在使用的雷达^[14]。

1.3 电磁波

正如 James Clerk Maxwell 在 1865 年所指出的, 电磁学基本方程 (麦克斯韦方程) 预言了电磁波的存在, 电磁波包含的电场和磁场是变化的, 其传播速度可由自由空间中的基本电磁特性计算得到:

$$\begin{aligned}\epsilon_0 &= \text{自由空间介电系数} = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^{-3} \text{ s}^2 \text{ coul}^2 \\ \mu_0 &= \text{自由空间磁导率} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ kg m coul}^{-2} \\ c &= \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}\end{aligned}\tag{1.1}$$

由于计算出的电磁波速度与观测到的光速相符,因而光也是一种电磁波。赫兹证明了不可见电磁波(也称为无线电波)的存在。今天我们知道,电磁波构成了一个连续的频带,包括无线电波、红外线、可见光、紫外线、X射线和伽马射线。通常,雷达是指一个使用无线电波的系统。

本节对电磁波的介绍非常简要。关于电磁波的详细解释请参见其他教材,例如Jackson [21]和Stratton [22]。电磁理论可以使用不同的计量系统来等价地表示,本书则采用比较合理的米-千克-秒(MKS)系统^[22, p. 16-23]。

图 1.1(a)示意了在某一瞬时观测到的真空中的一个简单电磁波形。电场(\mathbf{E})和磁场(\mathbf{H})在空间中均以正弦规律变化(黑体字表示矢量)。电场和磁场的相位相同,方向互相垂直且均与传播方向正交。每秒经过一个指定点的波峰数即为频率 f ,以每秒钟的周期数来度量。在雷达中,频率通常称为载波频率。相邻波峰间的距离为波长 $\lambda = c/f$ 。传播方向由矢量 \mathbf{k} 来表征, \mathbf{k} 又称为波数, $|\mathbf{k}| = 2\pi/\lambda = 2\pi f/c$, $\hat{\mathbf{k}} = \hat{\mathbf{E}} \times \hat{\mathbf{H}}$ ($\hat{\mathbf{}}$ 表示单位矢量)。瞬时传输的通量密度由 $|\mathbf{S}| = \mathbf{E} \times \mathbf{H} = c\epsilon_0 E^2 = c\mu_0 H^2$ 给出,见文献[22]。 \mathbf{S} 称为坡印亭矢量。

E 由伏特/米来度量, S 由瓦特/平方米来度量;因此,常数 $c\epsilon_0$ 的单位为1/ohms,即西门子。

$$c\epsilon_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} = \frac{1}{377 \Omega} \quad (1.2)$$

有时,也将 $c\epsilon_0$ 的倒数称为自由空间中的阻抗。

在图 1.1(a)的例子中, \mathbf{E} 的方向(由 $\hat{\mathbf{E}}$ 表示)在时域内是个常数(±号的改变除外)。 $\hat{\mathbf{E}}$ 决定了波的极化,如果它是常数,则称此时的波为线极化波。如果存在重力场,并且波的传播方向与其大体垂直,则线极化波又可分为水平极化和垂直极化。更一般地,在自由空间中, \mathbf{E} (或者 \mathbf{H})可以指向任何一个与传播方向 $\hat{\mathbf{k}}$ 相垂直的方向。并由其与 $\hat{\mathbf{k}}$ 垂直的两个正交方向上的分量来描述。电磁波不一定是线性极化的,一般而言,矢量 \mathbf{E} 可以描述为一个以传播方向为轴的椭圆状螺旋线,它形成了一个椭圆(在特殊情况下是圆)极化波,如图 1.1(b)和图 1.1(c)所示。

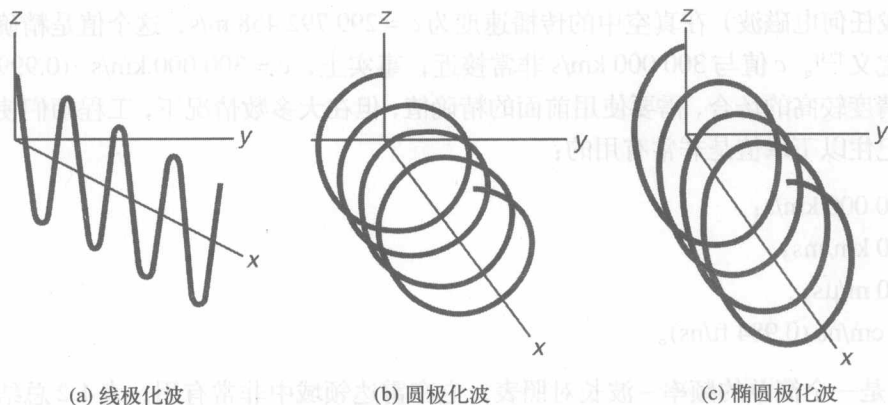


图 1.1 电磁波

线极化平面波(即 \mathbf{E} 在一个与 \mathbf{k} 垂直的平面内为常数)可以表示为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \phi_0) \quad (1.3)$$

其中, \mathbf{r} 是三维空间坐标; ω 是角频率, 单位为弧度/秒 ($\omega = 2\pi f$); t 是时间; ϕ_0 是相位偏移 (一般设为 0)。那么 $k = \omega/c$, $c = \lambda f = \omega/k$ 。波的周期为 $T_p = 1/f = 2\pi/\omega$ 。

因为正弦函数平方的平均值为其幅度的一半, 所以平面波的平均通量密度 (瓦特/平方米) 为

$$|S|_{\text{avg}} = \frac{c\epsilon_0}{2} E_0^2 \quad (1.4)$$

将余弦函数作为复数的实部可以很好地体现它的时间相关性。此时, $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ 变为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \text{Re}[\mathbf{E}_0 e^{j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \phi_0)}] \quad (1.5)$$

$\mathbf{r} = 0$ 时的幅度为 $E(0, t) = E_0 \text{Re}[\exp j(\omega t + \phi_0)] = E_0 \cos(\omega t + \phi_0)$, 此处, j 代表 -1 的平方根。可以将 $E_0 \cos \phi$ 视为复平面内旋转矢量的实部, 如图 1.2 所示, 该图又称为阿尔干 (Argand) 图。余弦函数的幅角就是相位, ω 则是相位变化率:

$$\omega = d\phi/dt \quad (1.6)$$

具有相同相位的点的集合称为波前, 其法线称为射线。

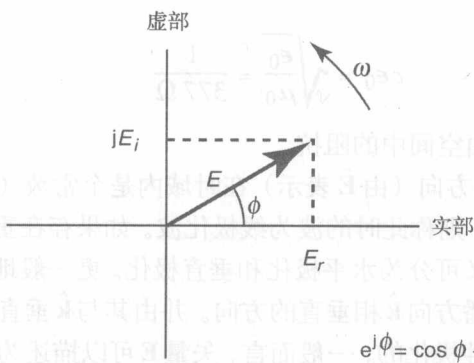


图 1.2 Argand 图

光 (或任何电磁波) 在真空中的传播速度为 $c = 299\,792\,458$ m/s, 这个值是精确的而且构成了米的定义^[23]。 c 值与 $300\,000$ km/s 非常接近; 事实上, $c = 300\,000$ km/s $\cdot (0.999\,308)$ 。尽管在某些精度较高的场合, 需要使用前面的精确值, 但在大多数情况下, 工程师们使用的都是近似值。记住以下取值是非常有用的:

$$\begin{aligned} c &= 300\,000 \text{ km/s}; \\ &= 300 \text{ km/ms}; \\ &= 300 \text{ m}/\mu\text{s}; \\ &= 30 \text{ cm/ns} (0.984 \text{ ft/ns}). \end{aligned}$$

表 1.1 是一个简单的频率 - 波长对照表, 它在雷达领域中非常有用。表 1.2 总结了一些用于描述不同雷达波段的专业术语。除高频 (HF)、超高频 (VHF) 和甚高频 (UHF) 的缩写外, 其余字母的含义都被有意掩盖了, 在二次世界大战中被选作对频段进行保密之用。