



国防电子信息技术丛书

Pulse Doppler Radar: Principles, Technology, Applications

脉冲多普勒雷达

——原理、技术与应用

[英] Clive Alabaster 著

张伟 刘洪亮 等译



中国工信出版集团



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

脉冲多普勒雷达

——原理、技术与应用

Pulse Doppler Radar
Principles, Technology, Applications

[英] Clive Alabaster 著

张 伟 刘洪亮 刘 朋 卢俊道 王永海 译

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是关于脉冲多普勒雷达的全方位手册,涵盖雷达基础知识、信号处理、硬件问题、系统设计和关于典型系统的案例研究。本书汇集了作者多年的研究成果,披露了关于脉冲多普勒雷达的众多技术细节。全书深入浅出地系统阐述了脉冲多普勒雷达的原理、技术与应用,重点论述了如何能够设计出令脉冲多普勒雷达在各方面表现出最佳整体性能的脉冲重复频率组。

本书可供雷达及雷达电子战领域的(硬件、软件和系统)工程师、大学教师、研究生、科研人员以及相关军事人员学习参考。

Pulse Doppler Radar: Principles, Technology, Applications by Clive Alabaster.

Original English language edition Copyright © 2012 by SciTech Publishing, Inc.

The Chinese translation edition Copyright © 2016 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: 01-2014-2682

图书在版编目(CIP)数据

脉冲多普勒雷达:原理、技术与应用/(英)阿拉巴斯特(Alabaster, C.)著;张伟等译.

北京:电子工业出版社,2016.3

(国防电子信息技术丛书)

书名原文:Pulse Doppler Radar: Principles, Technology, Applications

ISBN 978-7-121-27923-2

I. ①脉… II. ①阿… ②张… III. ①脉冲多普勒雷达 IV. ①TN958.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 308509 号

策划编辑:张小乐

责任编辑:张小乐

印 刷:北京京师印务有限公司

装 订:北京京师印务有限公司

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:22.75 字数:600 千字 彩插:2

版 次:2016 年 3 月第 1 版

印 次:2016 年 3 月第 1 次印刷

定 价:79.00 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 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

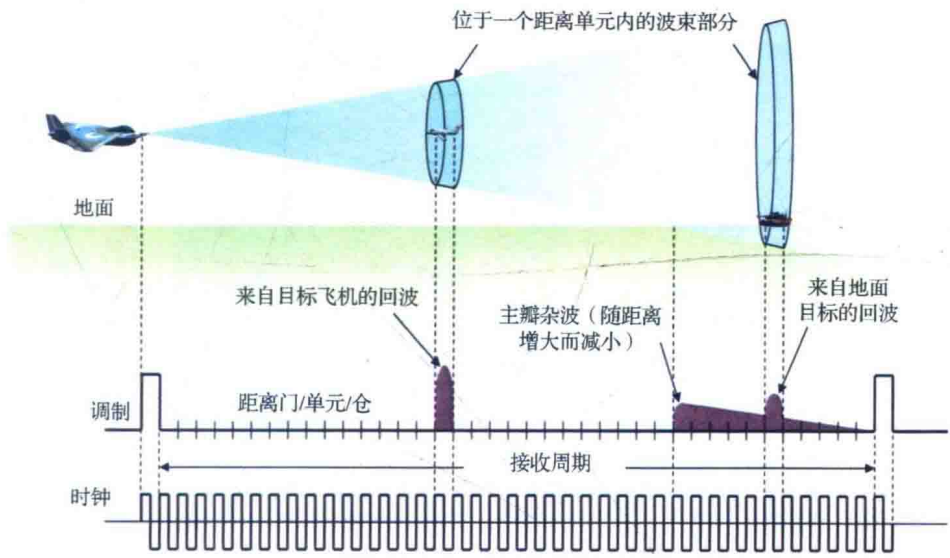


图 3-5 距离选通

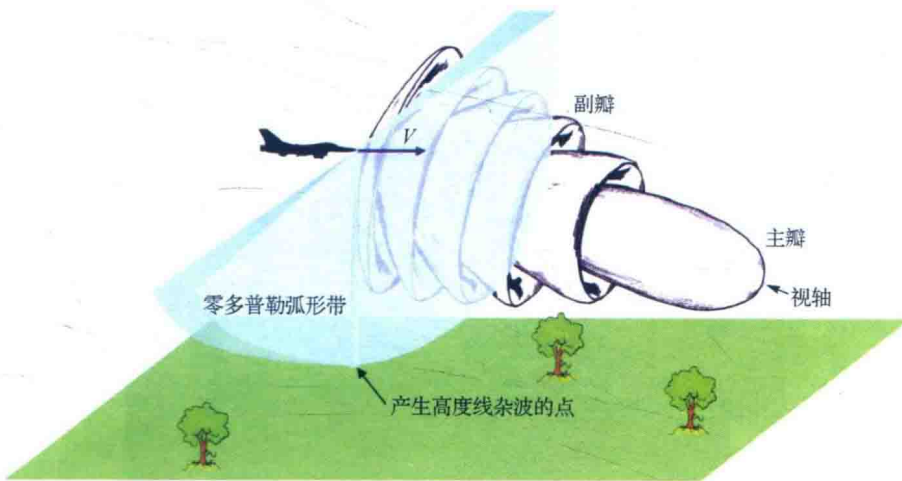


图 6-14 俯视中的机载雷达示意图

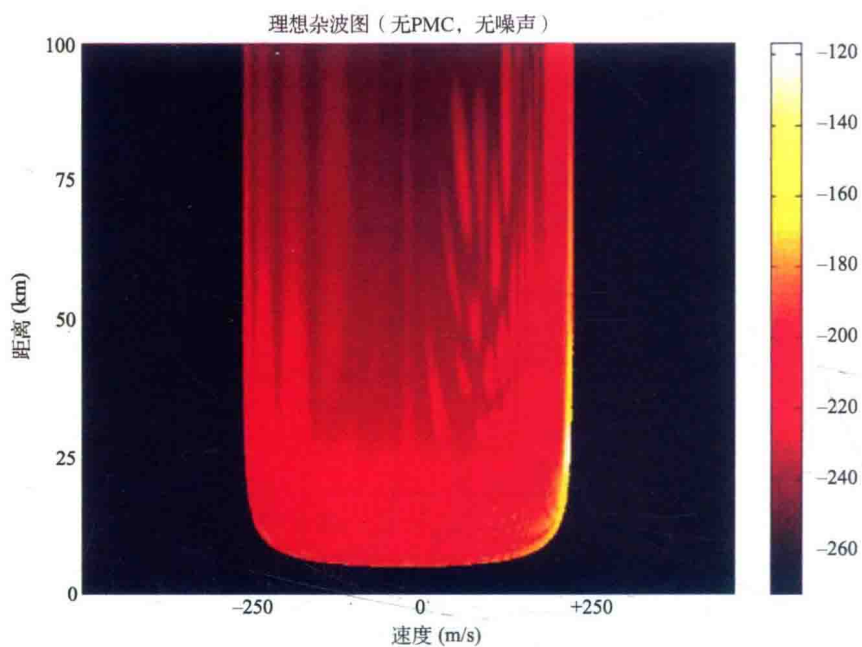


图 6-17 理想杂波图

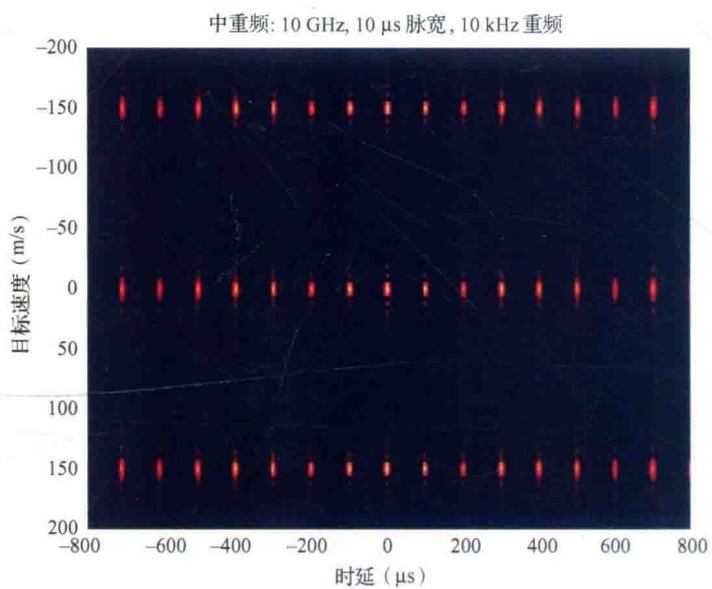


图 11-3 中重频的模糊图

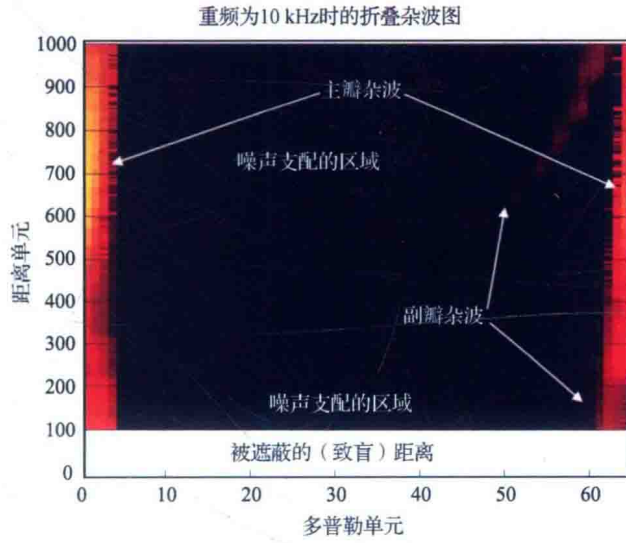


图 11-13 一般中重频机载火控雷达的折叠杂波图

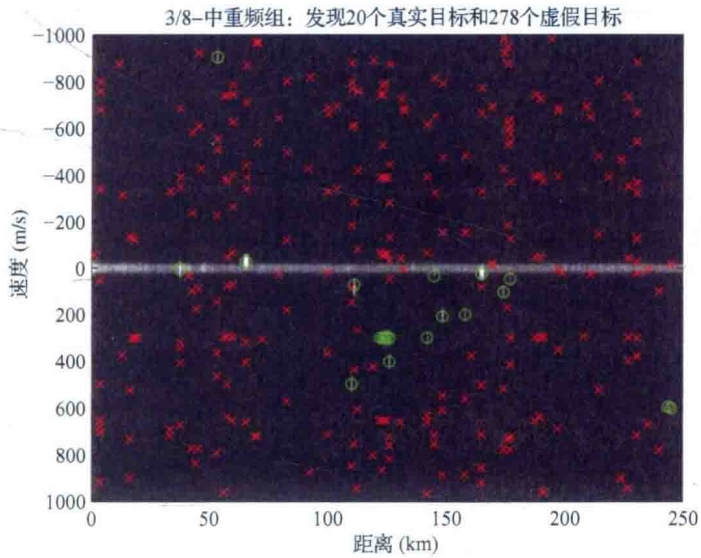


图 12-25 真实和虚影目标检测的仿真

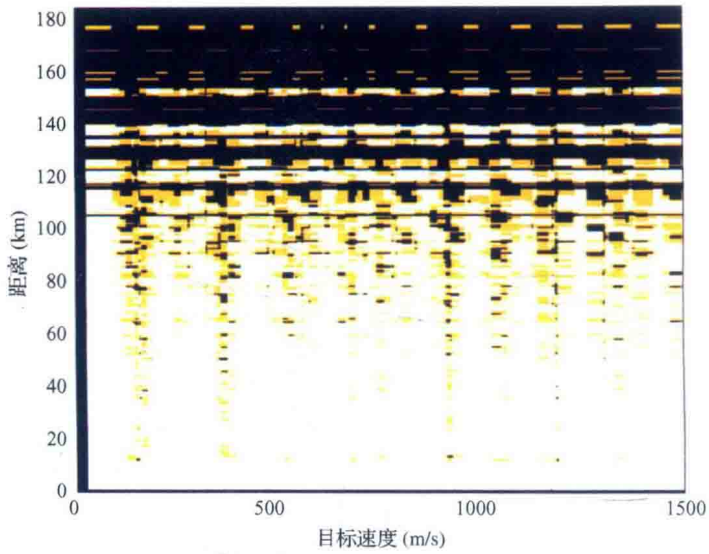


图 13-4 最优 2/8 重频组的盲区图(存在杂波)(黑色 = 在少于 2 个脉冲重复频率下可见, 灰色 = 正好在 2 个脉冲重复频率下可见, 白色 = 在多于 2 个脉冲重复频率下可见)

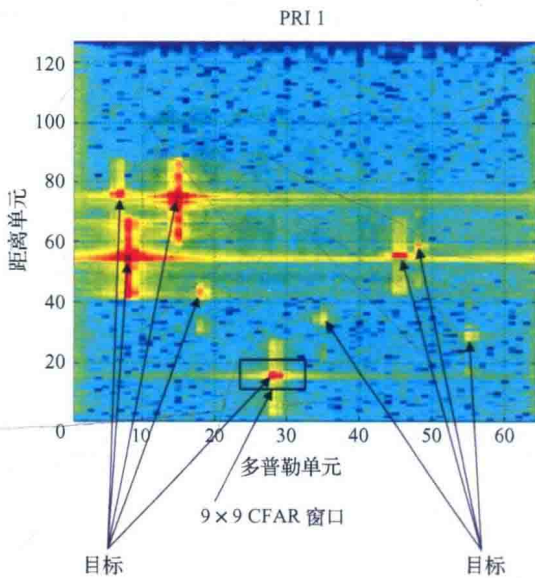


图 14-5 在中重频下的恒虚警检测

译 者 序

脉冲多普勒雷达是一种利用多普勒效应并以频谱分离技术抑制各类背景杂波的全相参体制脉冲雷达。脉冲多普勒雷达出现于20世纪50年代后期,在60年代人们就研制了适用于机载的样机并开始批量装备飞机。自70年代以来,随着大规模集成电路和数字处理技术的发展,脉冲多普勒雷达广泛应用于机载预警、导航、导弹制导、卫星跟踪、战场监视、靶场测量、武器火控和气象探测等方面,成为重要的军事装备。

尽管脉冲多普勒雷达已被广泛使用,但是公开出版的关于脉冲多普勒技术细节方面的学术专著和论文却较为匮乏。鉴于此,本书作者克莱夫·阿拉巴斯特无私地将多年的研究成果呈现给大家,披露了关于脉冲多普勒雷达的众多技术细节。全书深入浅出地系统阐述了脉冲多普勒雷达的原理、技术与应用,而如何能够设计出令脉冲多普勒雷达在各方面表现出最佳整体性能的脉冲重复频率组则是本书最重要的主题。作者还就设计脉冲多普勒雷达需要考虑的有关遮蔽、盲区、杂波、虚影和目标可见度等众多问题进行了深入论述,并给出了工程实践性很强的解决方案。

本书在关于脉冲重复频率的问题上不吝笔墨,原著共著述了约200页,这令其成为名副其实的关于脉冲多普勒雷达的专著。涉及脉冲多普勒技术的其他图书还有G. W. Stimson的《机载雷达导论》、G. V. Morris的《机载脉冲多普勒雷达》、M. Schetzen的《机载多普勒雷达》、毛士艺的《脉冲多普勒雷达》、M. I. Skolnik的《雷达系统导论》、D. K. Barton的《雷达系统分析与建模》和R. J. Sullivan的《雷达成像基础与高级概念》等,然而就关于脉冲重复频率问题的论述而言,本书的信息量是较为丰富的。本书还将所讨论的原理、技术与军事应用结合起来,给出了作者精心筛选的四个研究案例。这样,读者便可结合案例深化对书中所提出概念和理论的理解。

本书的译者均已在雷达领域工作多年,在紧张的工作之余,完成了对英文原著的翻译。全书除前言和结束语外,共19章和1个附录。其中,第12章至第16章和第7章由张伟翻译,第9章至第11章和第17章由刘洪亮翻译,第2、5和19章由刘朋翻译,第1章、第6章和第18章由卢俊道翻译,第3章和第4章由王永海翻译,第8章由刘洪亮和张伟合译。张伟完成了全书的统稿工作,刘洪亮对全书进行了审阅。此外,郭杰、李玉胜、梁良、刘国彬和汪良会在百忙之中抽出时间对全书进行了校对,在此深表感谢!

在翻译的过程中,我们秉持“忠实、通顺”的翻译原则,力求“化”去译文的翻译腔。在对专业术语的处理上,我们尽量采用已有的主流译法,但是对于作者新提出的术语,则根据其指实质,按照中文的表述习惯,以“顾名思义”为原则进行翻译,如有必要再辅以注释或定义性说明。在翻译的道路上,精益求精是永无止境的。我们无法奢求臻于完美,但求尽己所能。谬误之处,恭请斧正!

我的电子邮箱是392803183@qq.com,请不吝赐教!

张 伟

2015年9月

前 言^①

“那么，在脉冲多普勒雷达使用中重频^②时，您实际上是如何准确选择所使用的脉冲重复频率的？”——这是有人曾在我的一位同事做完讲座后所提的问题。所提问题看似简单，但至今却无人能够给出确切的答案。这个问题使我和我的同事 Evan Hughes 在几年之前就开始了关于这方面的一系列调查研究。正是这个重要问题激发了我们在脉冲多普勒雷达方面的研究兴趣。多年之后，我们对这一问题给出了自己的答案。在此过程中，该问题也已引起我们对有关脉冲多普勒雷达各个方面的兴趣。我们自身的研究、咨询工作、行业项目、对学生课题的指导、亲身经历以及他人在脉冲多普勒雷达领域做出的贡献最终使本书得以呈现在各位面前。因而，以此问开篇看来是比较合适的。本书探讨了如何选择脉冲重复频率和许多其他类似的问题。

事实上，我曾以一名微波工程师的身份从事过长达七年的机载脉冲多普勒雷达设计与开发，那段经历已使我对脉冲多普勒雷达产生了兴趣。后来当我成为给军方讲授雷达技术的讲师时，我发现脉冲多普勒雷达还用于防空、导弹导引头、舰载系统、机载预警系统和其他大量的军用系统。其实，脉冲多普勒雷达的应用在当时是很广泛的，并且范围一直在不断扩大。十四年前，我加入了克兰菲尔德大学(Cranfield University)，成为一名在如今英国国防学院(defence academy of the United Kingdom)所在的什里弗纳姆(Shrivenham)校区讲授雷达系统的讲师。因此，当脉冲重复频率选择的问题被提及后，它重新激发了我对所有有关脉冲多普勒研究的兴趣。

考虑到执行各种任务的脉冲多普勒雷达数量众多，而在公开文献中几乎找不到有关此类型雷达的具体细节，这一点着实令人颇感意外。已出版的资料虽已提供了关于脉冲多普勒雷达的大量信息，但是仍然未对许多问题进行回答。与其他学者、政府科学家和行业工程师的讨论使我确认了脉冲多普勒雷达的重要性，但是仍有一些重要问题尚待解决。与此同时，尽管各种脉冲多普勒技术的关联性不断增强，但是近些年来出现在公开文献中的相关论文却呈现出发表速度慢且数量少的局面。两种相矛盾的看法貌似比较流行：一种认为脉冲多普勒雷达已经完全成熟，所有技术细节均已被掌握；另一种认为脉冲多普勒雷达的某些特定方面有一点像魔法，让人感到神秘莫测。对脉冲多普勒雷达的研究越多，我发现自己越排斥这两种看法，它们均是错误的见解。近期的相关研究成果已促进脉冲多普勒雷达的发展，而完善的工程学原理也已用来同这些问题建立联系而使它们不再显得神秘。在我个人看来，未来脉冲多普勒雷达的发展还有广阔的空间。

本书试图从脉冲多普勒雷达的基本原理开始，一直讲解到最近的有关研究。著述本书的目的是为了吸引工程师、大学教师、研究人员、用户、涉及规范和采办之技术方面的人员以及大学(研究)生。本书在讨论已被普遍接受的技术和当前发展水平时，大部分采用讲授的方式；但是在涉及未必在当前系统上得以实现却可能影响未来系统设计的最新研究时，偶尔会

① 本书部分字符、正斜体及图示与英文原版保持一致。

② “重频”，即“重复脉冲频率”，英文是 pulse repetition frequency，简称“PRF”。

采用评论的方式。这样，书中的内容既为读者提供了非常新的观点，又可使读者能够一瞥不远将来的发展。本书吸收了克兰菲尔德大学所完成的研究成果，从我们的亲身经历中获得的诸多经验教训，以及为行业所做的咨询工作和调查研究。本书的内容还参考了多种优秀的教科书、在该领域有重大影响的早期论文和最近发表的研究论文。

本书分为三个部分，后一部分建立在前一部分的基础之上。第一部分(第1章至第8章)涵盖了本书后续部分所需的基本原理。这一部分重点讲解经典处理技术(尤其是快速傅里叶变换)以及微波工程问题、天线和硬件。第二部分讨论脉冲多普勒雷达特有的理论和技术。该部分进一步划分为上下两篇，上篇(第9章至第10章)讨论高重频脉冲多普勒雷达，下篇(第11章至第15章)讨论中重频脉冲多普勒雷达。本书的一个重要主题是脉冲重复频率的选择与优化，其他还有波形设计问题和虚影问题。高重频和中重频的脉冲多普勒技术在令我们自然而然地联想到机载火控雷达的同时，还广泛应用在其他机载雷达和地(海)基雷达上。毫无疑问，第二部分的确强调了机载雷达的情况，但是也并没有忽略地(海)基雷达。最后，第三部分(第16章至第19章)给出了一系列案例研究，共四个。每一个案例研究均应用了第二部分的内容，同时突出了应用本身所特有的其他雷达技术(以及在某些情况下，甚或与雷达无关的探讨)。今天，脉冲多普勒雷达的使用是如此广泛，以使本来可以考虑写进书中的案例数量轻轻松松就达到了两位数。

本书对脉冲多普勒雷达的讲解是逐章展开的，因而最好是从头至尾地进行阅读。尽管如此，我们很少有人像这样使用这种类型的教科书，而是倾向于查阅特定的专题。因此，我希望将来展现书中内容的方式能够满足喜欢随意翻阅各种不同专题内容的读者的需求，同时将任何阅读上的重复减至最小。

最后，我将很高兴能够收到您的来信，尤其是如果您有任何意见、问题或者发现书中有任何需要更正之处。

Clive Alabaster

英国 什里弗纳姆

2012年4月

关于作者

Clive Alabaster 是英国克兰菲尔德大学信息科学与系统工程系的一名高级讲师(相当于北美的副教授)。他于 2004 年在克兰菲尔德大学获得物理学博士学位。Alabaster 在获理学士学位后于 1985 年加入了 GEC-马可尼公司机载雷达部的微波设计团队。他当时作为一名负责设计与开发的工程师,从事机载截击雷达微波合成器和前端接收机的设计工作,该型雷达安装于高速攻击机上。1992 年,Alabaster 进入 Serco 公司工作,在位于英国 Arborfield 军事驻地的电气与航空工程学院任讲师,给皇家机电工程兵部队的技术员讲授雷达和微波工程。在 1998 年,他成为一名克兰菲尔德大学的教研人员。Alabaster 在 2001 年制定了关于中重频脉冲多普勒波形的研究计划,这已令他与行业组织和国防机构签订了多项应用研究合同。

作者致谢

首先，我要感谢 Evan Hughes 的重要贡献。他是我的朋友，也是我在克兰菲尔德大学的同事，我和他一同致力于脉冲多普勒雷达的研究已有多年。近几年来，Evan 在脉冲多普勒雷达领域的贡献是巨大的，在此致以特别感谢。此外，在我们一起工作期间，他一直支持我撰写此书，还不断提供建议，并时常给予我鼓励。

我还要感谢近些年来 Evan 和我指导的连续几届硕士研究生所做出的贡献。我们很幸运地遇到了一些极具才华且乐于钻研的“魔法师的学徒”，他们做了大量推动脉冲多普勒雷达科学发展的工作。

我也很感谢我的家人，尤其是我的妻子 Lindsay，对于我将自己长时间关在书房里进行著述，他们宽容了我这样的行为。我的家人经常冲咖啡给我喝，并在书稿的校对上花费了大量时间，在此我非常感谢。

我还要感谢克兰菲尔德大学(什里弗纳姆校区)给予了我致力于著述本书的时间和空间。

我还要感谢以各种方式对本书的主题，即脉冲多普勒雷达，做出了贡献的人——从本书所参考的论文和书籍的作者、书稿的审阅人员和克兰菲尔德大学的同事到与我在有关脉冲多普勒雷达的各种研究和咨询项目上共事过的人以及这些项目的提供者。

最后，我在此向在 SciTech Publishing 出版社参与此书出版事宜的工作人员表示感谢，感谢他们的耐心、鼓励、友好的帮助及建议。Dudley Kay 作为总编辑在本书的提议和形成阶段给予了鼓励和支持。Robert Lawless 作为制作人发挥了十分重要的作用，他在使我能够按照出书时间表推进进度的同时，为了内容的准确性和一致性还对书中的细节做了妥善处理。最后，营销主任 Brent Beckley 设计了炫酷的图书封面，他在一开始就看好本书，并表达了对本书的浓厚兴趣。对一名作者而言，能够和这些既团结紧密又响应积极的出版社专业人士合作是一件令人欣慰的快事。

目 录

第一部分 基本概念

| | | |
|-------|----------------------|----|
| 第 1 章 | 脉冲多普勒雷达出现的历史原因 | 2 |
| 第 2 章 | 雷达的探测性能 | 5 |
| 2.1 | 在噪声条件下的雷达方程 | 5 |
| 2.1.1 | 基本雷达方程的推导 | 5 |
| 2.1.2 | 损耗 | 6 |
| 2.2 | 在噪声条件下的检测 | 7 |
| 2.2.1 | 门限检测 | 7 |
| 2.2.2 | 累积检测概率 | 10 |
| 2.3 | 最小可检测信号, S_{min} | 10 |
| 2.3.1 | 热噪声 | 10 |
| 2.3.2 | 噪声系数 | 11 |
| 2.3.3 | 最小输入信号 | 12 |
| 2.4 | 脉冲积累带来的处理增益 | 12 |
| 2.4.1 | 早期雷达的积累 | 12 |
| 2.4.2 | 相参积累和非相参积累 | 12 |
| 2.4.3 | 积累增益的量化分析 | 13 |
| 2.4.4 | 雷达方程中的积累改善 | 15 |
| 2.5 | 雷达截面积 | 16 |
| 2.5.1 | 定义 | 16 |
| 2.5.2 | 决定 RCS 的因素 | 17 |
| 2.5.3 | 闪烁效应 | 17 |
| 2.5.4 | 雷达截面积起伏的 Swerling 模型 | 18 |
| 2.5.5 | 目标起伏下需要的信噪比 | 19 |
| 第 3 章 | 脉冲雷达 | 21 |
| 3.1 | 脉冲参数简介 | 21 |
| 3.1.1 | 脉冲重复频率 | 21 |
| 3.2 | 峰值功率和平均功率 | 21 |
| 3.3 | 脉冲时延测距 | 22 |
| 3.3.1 | 距离是对时延的测量 | 22 |
| 3.3.2 | 最小作用距离 | 22 |
| 3.3.3 | 遮蔽效应 | 23 |

| | | |
|------------|----------------|-----------|
| 3.3.4 | 距离选通 | 23 |
| 3.4 | 低重频雷达 | 24 |
| 3.4.1 | 距离模糊 | 24 |
| 3.4.2 | 低重频的界定 | 25 |
| 3.5 | 脉冲雷达的频谱 | 25 |
| 3.5.1 | 脉冲调制载波的频谱 | 25 |
| 3.5.2 | 频谱控制 | 26 |
| 3.5.3 | 相位谱和相位相参性 | 26 |
| 3.6 | 匹配接收 | 26 |
| 3.6.1 | 匹配接收理论 | 27 |
| 3.6.2 | 理想匹配滤波与实际匹配滤波 | 28 |
| 3.7 | 距离分辨率 | 30 |
| 3.7.1 | 距离分辨率恶化的因素 | 30 |
| 3.7.2 | 术语 | 31 |
| 3.8 | 测距精度 | 31 |
| 3.8.1 | 目标回波跨越距离单元 | 31 |
| 3.8.2 | 测距精度与信噪比 | 32 |
| 3.8.3 | 精度和分辨率 | 32 |
| 3.9 | 脉冲压缩 | 32 |
| 3.9.1 | 脉冲压缩的概念 | 32 |
| 3.9.2 | 脉冲压缩波形 | 32 |
| 3.9.3 | 脉冲压缩理论 | 33 |
| 3.9.4 | 脉冲压缩的实现 | 34 |
| 3.9.5 | 压缩比 | 34 |
| 3.9.6 | 距离副瓣 | 35 |
| 3.9.7 | 遮蔽效应对脉冲压缩的影响 | 35 |
| 3.9.8 | 多普勒频移的破坏作用 | 36 |
| 第4章 | 多普勒测量雷达 | 37 |
| 4.1 | 多普勒效应 | 37 |
| 4.1.1 | 多普勒频移 | 37 |
| 4.1.2 | 连续波雷达的多普勒频移 | 37 |
| 4.1.3 | 脉冲雷达的多普勒频移 | 37 |
| 4.1.4 | 相参处理周期 | 38 |
| 4.1.5 | 多普勒频移与发射频率的比例 | 39 |
| 4.2 | 多普勒分辨力 | 39 |
| 4.3 | 平台运动补偿 | 40 |
| 4.3.1 | 机载雷达的地面回波多普勒频移 | 40 |
| 4.3.2 | 以地面为参考的速度 | 40 |
| 4.4 | 多普勒盲区 | 41 |

| | | |
|-------|------------------|----|
| 4.4.1 | 空对空情况下的盲区 | 41 |
| 4.4.2 | 地对空情况下在过零点处的盲区 | 41 |
| 4.5 | 连续波雷达 | 42 |
| 4.5.1 | 测量多普勒频移的连续波系统 | 42 |
| 4.5.2 | 多普勒/速度分辨率 | 43 |
| 4.5.3 | 多普勒/速度选通 | 43 |
| 4.5.4 | 连续波雷达的限制 | 44 |
| 4.6 | 脉冲雷达的应用 | 45 |
| 4.6.1 | 基带波形 | 45 |
| 4.6.2 | 多普勒模糊 | 45 |
| 第5章 | 模糊函数 | 46 |
| 5.1 | 模糊图 | 46 |
| 5.1.1 | 常规脉冲信号的模糊图 | 47 |
| 5.1.2 | 线性调频脉冲信号的模糊图 | 47 |
| 5.1.3 | 13位二相巴克码脉冲信号的模糊图 | 48 |
| 5.1.4 | 低重频脉冲串的模糊图 | 50 |
| 5.2 | 峰值副瓣电平和积分副瓣电平 | 50 |
| 第6章 | 杂波 | 51 |
| 6.1 | 杂波的概念 | 51 |
| 6.2 | 后向散射系数 | 51 |
| 6.2.1 | 地形的后向散射 | 51 |
| 6.2.2 | 地表粗糙度 | 52 |
| 6.2.3 | 海面的后向散射 | 53 |
| 6.2.4 | 随入射余角变化的地面后向散射 | 53 |
| 6.2.5 | 随入射余角变化的海面后向散射 | 54 |
| 6.3 | 杂波的统计模型 | 56 |
| 6.3.1 | 高斯(瑞利)杂波 | 56 |
| 6.3.2 | 莱斯杂波 | 56 |
| 6.3.3 | 对数正态杂波 | 59 |
| 6.3.4 | 韦布尔杂波 | 60 |
| 6.3.5 | K 分布杂波模型 | 61 |
| 6.3.6 | 累积概率密度函数 | 61 |
| 6.4 | 机载雷达的杂波 | 62 |
| 6.4.1 | 机载情景下的杂波 | 62 |
| 6.4.2 | 杂波在距离域和速度域上的扩展 | 63 |
| 6.4.3 | 理想杂波图 | 64 |
| 6.4.4 | 主瓣杂波的频谱扩展 | 65 |
| 6.5 | 杂波去相关 | 67 |
| 6.5.1 | 杂波的时域去相关 | 67 |

| | | |
|------------|-------------------|-----------|
| 6.5.2 | 使用频率捷变实现杂波去相关 | 68 |
| 6.6 | 低重频雷达对杂波的响应 | 68 |
| 6.6.1 | 低重频雷达在距离域对杂波的响应 | 68 |
| 6.6.2 | 低重频雷达在速度域对杂波的响应 | 69 |
| 6.6.3 | 动目标显示雷达的杂波抑制 | 70 |
| 6.7 | 在杂波条件下的探测距离 | 70 |
| 6.7.1 | 受距离分辨率影响的情况 | 70 |
| 6.7.2 | 受波束宽度影响的情况 | 71 |
| 6.8 | 地(海)基雷达的杂波 | 72 |
| 6.9 | 空域杂波 | 73 |
| 第7章 | 脉冲多普勒处理 | 75 |
| 7.1 | 处理链路 | 75 |
| 7.2 | MTI 对主瓣杂波的抑制 | 75 |
| 7.2.1 | 基带信号 | 76 |
| 7.2.2 | 单延迟线对消器 | 77 |
| 7.2.3 | 双延迟线对消器 | 81 |
| 7.2.4 | 多延迟线对消器 | 82 |
| 7.2.5 | 三脉冲对消器 | 83 |
| 7.2.6 | 横向滤波器 | 83 |
| 7.2.7 | 数字 MTI 对消 | 85 |
| 7.2.8 | MTI 性能的量化分析 | 86 |
| 7.3 | FFT 处理 | 88 |
| 7.3.1 | DFT 的直观性分析 | 89 |
| 7.3.2 | DFT 的解析性分析 | 91 |
| 7.3.3 | 快速傅里叶变换 | 93 |
| 7.3.4 | 加窗的离散傅里叶变换 | 98 |
| 7.3.5 | FFT 处理损失 | 99 |
| 7.3.6 | 补零与 DFT 点数 | 100 |
| 7.4 | 恒虚警率检测 | 100 |
| 7.4.1 | 固定门限检测的局限 | 100 |
| 7.4.2 | 恒虚警率的概念 | 101 |
| 7.4.3 | CFAR 的处理损失 | 102 |
| 7.4.4 | 单元平均 CFAR(CACFAR) | 102 |
| 7.4.5 | 最大值 CFAR | 106 |
| 7.4.6 | 两参数 CFAR | 106 |
| 7.4.7 | 排序统计恒虚警处理(OSCFAR) | 107 |
| 7.4.8 | 杂波图 | 107 |
| 7.4.9 | 二进制积累器 | 109 |
| 7.4.10 | 混合方法 | 110 |

| | |
|---------------------------|-----|
| 第8章 雷达的硬件 | 111 |
| 8.1 引言 | 111 |
| 8.2 雷达的发射机 | 111 |
| 8.2.1 信号相参的必要性 | 112 |
| 8.2.2 近载频噪声 | 113 |
| 8.2.3 磁控管 | 121 |
| 8.2.4 速调管 | 125 |
| 8.2.5 行波管 | 127 |
| 8.2.6 大功率真空管的比较 | 129 |
| 8.2.7 固态振荡器 | 129 |
| 8.2.8 硅双极晶体管 | 129 |
| 8.2.9 砷化镓场效应晶体管 | 129 |
| 8.2.10 异质结双极晶体管(HBT) | 130 |
| 8.2.11 高电子迁移率场效应晶体管(HEMT) | 130 |
| 8.2.12 碰撞电离雪崩渡越时间二极管 | 130 |
| 8.2.13 耿氏二极管 | 131 |
| 8.2.14 小结 | 131 |
| 8.3 频率合成器 | 131 |
| 8.3.1 直接数字频率合成器 | 132 |
| 8.3.2 直接模拟频率合成器 | 133 |
| 8.3.3 间接频率合成器(锁相环) | 134 |
| 8.4 雷达接收机 | 137 |
| 8.4.1 超外差式接收机 | 137 |
| 8.4.2 接收机的噪声系数 | 145 |
| 8.5 雷达的孔径天线和阵列天线 | 151 |
| 8.5.1 基本概念 | 151 |
| 8.5.2 雷达孔径天线 | 155 |
| 8.5.3 阵列天线 | 157 |
| 8.5.4 有源电子扫描阵列天线 | 160 |
| 参考文献 | 165 |

第二部分 上篇：高重频脉冲多普勒雷达

| | |
|--------------------|-----|
| 第9章 高重频脉冲多普勒雷达 | 168 |
| 9.1 简介 | 168 |
| 9.1.1 关于低重频问题的回顾 | 168 |
| 9.1.2 高重频脉冲多普勒系统概述 | 169 |
| 9.2 脉冲重复频率的选择 | 169 |
| 9.2.1 多普勒频带 | 169 |