

国防电子信息技术丛书

Mc
Graw
Hill

Fundamentals of Radar Signal Processing

雷达信号处理基础

[美] Mark A. Richards 著
邢孟道 王彤 李真芳 等译

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

内容简介

国防电子信息技术丛书

TN957.52
LCZ

本书是作者多年从事雷达信号处理工作的经验总结，主要内容包括：雷达信号处理的基本概念、雷达信号处理的基本原理、雷达信号处理的基本方法、雷达信号处理的基本应用等。本书可作为从事雷达信号处理工作的工程技术人员和高等院校相关专业师生的参考书。

雷达信号处理基础

Fundamentals of Radar Signal Processing

[美] Mark A. Richards 著

邢孟道 王彤 李真芳 等译



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

责任编辑：吕...
封面设计：余...
印刷：北京...
发行：电子工业出版社
地址：北京市...
电话：(010) 88252888

凡欲订购者，请向本社发行部联系。地址：北京... 电话：(010) 88252888

内 容 简 介

本书译自国际著名雷达信号处理专家 Mark A. Richards 教授编写的教科书。该书介绍了雷达系统与信号处理的基本理论和方法, 主要内容包括: 雷达系统导论、雷达信号模型、脉冲雷达信号的采样和量化、雷达波形、多普勒处理、检测基础原理、恒虚警率检测、合成孔径雷达成像技术、波束形成和空-时二维自适应处理导论。书中包含了大量反映雷达信号处理最新研究成果和当前研究热点的补充内容, 提供了大量有助于读者深入的示例。该书对基础理论和方法进行了详尽的介绍与深入严谨的论述, 是一本雷达信号处理领域中高水平的教科书。

本书适合于从事雷达成像、检测、数据处理及相关信号处理的研究生作为教材使用, 也是相关专业研究人员不可多得的一本参考书。

Mark A. Richards: Fundamentals of Radar Signal Processing

ISBN: 0-07-144474-2

Copyright©2005 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and Publishing House of Electronics Industry. Copyright ©2008.

本书中文简体字翻译版由美国麦格劳-希尔教育出版(亚洲)公司授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司激光防伪标签, 无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2006-5543

图书在版编目(CIP)数据

雷达信号处理基础 / (美) 理查兹 (Richards.M.A.) 著; 邢孟道等译. —北京: 电子工业出版社, 2008.6
(国防电子信息技术丛书)

书名原文: Fundamentals of Radar Signal Processing

ISBN 978-7-121-06896-6

I. 雷… II. ①理…②邢… III. 雷达信号—数据处理—教材 IV. TN957.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 085162 号

策划编辑: 马 岚

责任编辑: 余 义

印 刷: 北京牛山世兴印刷厂

装 订:

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: 24.25 字数: 620 千字

印 次: 2008 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 55.00 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 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

本书作者 Mark A. Richards 现在是佐治亚理工学院的首席研发工程师和兼职教授，他是专门从事雷达信号处理的知名学者，同时有着丰富的教学经验和科研经历，长期从事关于雷达信号处理、雷达图像处理和相关学科的研究生教学和专业课程教学。他曾被聘为美国国防高级研究计划署项目经理，IEEE 2001 年雷达会议的总主席，以及 IEEE 图像处理和 IEEE 信号处理期刊的副编辑。

本书从数字信号处理的角度出发，对雷达信号处理这一基本的课题进行了深入的探讨。不仅对雷达信号处理的基础技术进行了详尽的介绍，而且结合当前雷达信号处理的发展，对一些更先进的课题进行了论述。本书在国外高校作为研究生教材已使用多年，国内现在引入本书，使众多对雷达信号处理这一课题进行学习的研究生和从事这一领域工作或者相关专业的研究人员，可以更深入地了解国际雷达发展动态和更多的技术成果。

全书共分为 9 章，内容安排如下：

第 1 章对雷达的历史和应用进行了简要介绍，并介绍了关于雷达信号处理中的基本概念，引出了雷达成像、检测和后处理的应用。

第 2 章介绍了在雷达信号处理中如何对信号进行模型建立，包括从各种不同性能需求出发建立的几种雷达信号模型。

第 3 章介绍了脉冲雷达信号在不同域的采样，主要是快慢时间域的采样及多普率频谱采样，同时介绍了脉冲雷达信号的量化及补偿问题。

第 4 章在雷达发射信号模型的基础上介绍了有关雷达波形的问题，包括匹配滤波、模糊函数、脉冲压缩和距离旁瓣控制等问题。

第 5 章则是对雷达信号的多普勒处理，包括各种形式的多普勒谱、运动目标识别、脉冲多普勒处理、脉冲对处理及其他多普勒处理、杂波图和运动目标检测器，以及自适应偏移相位中心天线（DPCA）处理。

第 6 章介绍了雷达检测的基础原理，包括假设检验检测、门限检测、二元积分和有用的数值近似等。

第 7 章介绍了目标检测中的恒虚警率检测（CFAR），重点对单元平均 CFAR 检测进行了介绍，分析了这种方法的性能和局限，并提出了改进方法，同时简要介绍了其它多种 CFAR 检测。

第 8 章对合成孔径雷达（SAR）这一热门研究课题进行详尽介绍，包括合成孔径雷达基础知识、条带式 SAR 数据的特性及成像算法、聚束式 SAR 的数据特性及成像算法，以及干涉 SAR 技术等。

第 9 章讲解了波束形成和空-时二维自适应处理（STAP），包括空域滤波、空-时信号环境及建模、空-时信号处理、STAP 计算问题、降维 STAP、高级 STAP 算法和分析，以及 STAP 限制等。

在整个翻译至出版的过程中，作者给予了很多关注和支持。希望该书在中国的翻译出版，对该领域的广大研究者是一本有用的读物。

本书的第1章和第2章由王彤翻译，第3章和第4章的翻译工作由白雪茹和周峰完成，第5章和第9章由李真芳翻译，第6章由刘玲翻译，第7章和第8章由丁金闪翻译。全书由邢孟道统一审校。本书的翻译得到了西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室的多位专家的帮助。需要说明的是，中译本的首要原则是尽可能准确地表达原著的基本知识。由于译者的时间和经验约束，翻译中难免会出现未尽和疏漏之处，敬请广大同行读者批评指正。同时，向所有为本书出版提供帮助的人们表示诚挚的感谢！

西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室
邢孟道 李真芳 白雪茹 周峰 刘玲 丁金闪 王彤

本书在翻译过程中，得到了西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室的多位专家的帮助。需要说明的是，中译本的首要原则是尽可能准确地表达原著的基本知识。由于译者的时间和经验约束，翻译中难免会出现未尽和疏漏之处，敬请广大同行读者批评指正。同时，向所有为本书出版提供帮助的人们表示诚挚的感谢！

本书在翻译过程中，得到了西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室的多位专家的帮助。需要说明的是，中译本的首要原则是尽可能准确地表达原著的基本知识。由于译者的时间和经验约束，翻译中难免会出现未尽和疏漏之处，敬请广大同行读者批评指正。同时，向所有为本书出版提供帮助的人们表示诚挚的感谢！

本书在翻译过程中，得到了西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室的多位专家的帮助。需要说明的是，中译本的首要原则是尽可能准确地表达原著的基本知识。由于译者的时间和经验约束，翻译中难免会出现未尽和疏漏之处，敬请广大同行读者批评指正。同时，向所有为本书出版提供帮助的人们表示诚挚的感谢！

本书在翻译过程中，得到了西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室的多位专家的帮助。需要说明的是，中译本的首要原则是尽可能准确地表达原著的基本知识。由于译者的时间和经验约束，翻译中难免会出现未尽和疏漏之处，敬请广大同行读者批评指正。同时，向所有为本书出版提供帮助的人们表示诚挚的感谢！

本书在翻译过程中，得到了西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室的多位专家的帮助。需要说明的是，中译本的首要原则是尽可能准确地表达原著的基本知识。由于译者的时间和经验约束，翻译中难免会出现未尽和疏漏之处，敬请广大同行读者批评指正。同时，向所有为本书出版提供帮助的人们表示诚挚的感谢！

本书在翻译过程中，得到了西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室的多位专家的帮助。需要说明的是，中译本的首要原则是尽可能准确地表达原著的基本知识。由于译者的时间和经验约束，翻译中难免会出现未尽和疏漏之处，敬请广大同行读者批评指正。同时，向所有为本书出版提供帮助的人们表示诚挚的感谢！

本书在翻译过程中，得到了西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室的多位专家的帮助。需要说明的是，中译本的首要原则是尽可能准确地表达原著的基本知识。由于译者的时间和经验约束，翻译中难免会出现未尽和疏漏之处，敬请广大同行读者批评指正。同时，向所有为本书出版提供帮助的人们表示诚挚的感谢！

本书在翻译过程中，得到了西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室的多位专家的帮助。需要说明的是，中译本的首要原则是尽可能准确地表达原著的基本知识。由于译者的时间和经验约束，翻译中难免会出现未尽和疏漏之处，敬请广大同行读者批评指正。同时，向所有为本书出版提供帮助的人们表示诚挚的感谢！

前 言

本书的目的是从数字信号处理的角度出发，对雷达信号处理的基本课题进行深入研究。线性系统、滤波、采样技术、傅里叶分析技术及其解释贯穿全书，以提供一种现代的、统一的教学方法。本书内容完全涵盖了所有雷达系统所依赖的信号处理基础技术，包括目标和干扰模型、匹配滤波、波形设计、多普勒处理、门限检测及恒虚警率等课题。此外，该书同时介绍了合成孔径雷达成像与空-时自适应阵列信号处理这两个先进课题。

该书是为了填补雷达技术文献中的空白而写的。现有文献中存在大量关于雷达系统的优秀书籍。最近的书籍包括 Edde 和 Skolnik 的著作。这些著作从总体上对雷达系统进行了出色的定量和定性的介绍。我建议对该课题有兴趣的人可以把这些著作作为首选的阅读文献。Peebles 的著作对雷达系统基础和信号处理的某些问题进行了更深入的量化分析。但该书的目标是为了在雷达信号处理方面进行更深入的钻研。近年来，出现了大量关于雷达信号处理高级领域的高质量的著作，尤其是在合成孔径雷达成像和空-时自适应信号处理方面。合成孔径雷达成像的文献包括 Jakowatz 等人、Carrara 等人、Soumekh，以及 Cumming 和 Wong 的著作；而空-时自适应信号处理的文献包括 Klemm 和 Guerci 的著作；Sullivan 的著作则同时涉及了这两个方面。但是，在这些定性的系统书籍与高级信号处理书籍之间存在着很大的空白。特别地，我认为目前雷达界缺少一本准确、统一、先进的，可提供雷达信号处理基础技术的书籍。这些基础技术包括信号模型、匹配滤波、脉冲压缩、多普勒处理和门限检测等，它们是更高级信号处理方法的基础。通过本书填补这一空白正是我写作的初衷。

作为佐治亚理工学院两门课程的参考用书，本书已被发展并使用了多年。该书最初是作为 ECE 6272 的产品而写的。刚开始作为一年级研究生“雷达信号处理基础”一学期课程的辅助教材使用，最近又成为这门课程的公共教材。同时，这本书某些章节的简缩版也在为时一周的同名职业教育课程中使用，该课程每年由佐治亚理工学院远程学习和职业教育部门讲授。

实际上，一学期的雷达信号处理课程可以覆盖该书的全部内容。这门课程为检测理论、自适应阵列信号处理、合成孔径雷达成像，以及更高级的诸如被动与双基系统等雷达概念提供了坚实的理论基础。四分之一的课程长度可以完全涵盖第 1 章到第 7 章的内容，也可以跳过第 2 章和第 3 章后面的某些小节以节省时间。不管采用哪种方式，建议学习之前应具有关于连续信号处理和离散信号处理的背景基础，同时要对随机信号处理至少有一个大概的了解。

可以从以下网站获得跟本书相关的附加支持信息，包括勘误表和软件工具等。网址为：
<http://users.ece.gatech.edu/~mrichard/FundradarSigProc.htm>

致 谢

我非常感谢我的众多同事和学生，他们在我对本书进行材料收集、写作和校对的过程中给予了很多帮助。在我毕业之后，Edward Reedy 博士为我提供了第一份工作，将我从乔治亚州技术研究院（GTRI）的一名语音信号处理人员转变为一名雷达信号处理人员。作为我的第一个导师及雷达基础方面的第一位老师，Jim Echard 博士实际上目睹了这一转变的全过程，但该过程并不轻松。在其后几年，我们一起开设并讲授了最终成为 ECE 6272 的课程，而这本书也由此产生。在此过程中，GTRI 的众多同事给予了我帮助，但对其中有些人我要特别提出以示谢意。Byron Keel 博士与我分享了他在波形和恒虚警概率（CFAR）方面的专业知识，Christopher Barnes 博士（现在在佐治亚理工学院的 Savannah 校区）和 Gregory Showman 博士使我对合成孔径雷达（SAR）有了更深刻的理解，William Melvin 为我介绍了空-时自适应信号处理（STAP）的知识。我对他们每一位的学识和友谊都深表感谢。同时，我也要感谢我的众多学生，他们对本书各章内容的写作尽职尽责，而该书则成为 ECE 6272 的一部分。非常感谢他们修正了书中的错误并改进了某些语句的陈述。特别感谢 Brian Milesosky 和 Anders Roos，他们非常仔细地阅读了全书并提出了很多有价值的修正和澄清意见。书中剩余的任何错误都完全是我自己的责任。

Mark A. Richards

<http://www.ecs.gatech.edu/~mrichard/>

目 录

第 1 章 雷达系统导论	1
1.1 雷达的历史和应用	1
1.2 雷达的基本功能	2
1.3 脉冲体制雷达的各个部分	4
1.3.1 发射机和波形发生器	5
1.3.2 天线	7
1.3.3 接收机	12
1.4 一些信号处理概念和运算	15
1.4.1 分辨率	16
1.4.2 空间频率	17
1.4.3 傅里叶变换	18
1.4.4 采样理论和谱周期化	20
1.4.5 信号的矢量表示	24
1.4.6 数据积累	24
1.4.7 相关	26
1.5 基本雷达信号处理的预览	28
1.5.1 雷达的时间尺度	29
1.5.2 现象学	30
1.5.3 信号调节和干扰抑制	31
1.5.4 成像	33
1.5.5 检测	35
1.5.6 后处理	36
1.6 雷达文献	37
1.6.1 雷达系统和组成	37
1.6.2 雷达信号处理	37
1.6.3 先进雷达信号处理	37
1.6.4 当前的雷达研究	38
参考文献	38
第 2 章 信号模型	40
2.1 雷达信号的组成	40
2.2 幅度模型	41
2.2.1 简单点目标的雷达距离方程	41
2.2.2 分布目标形式的距离方程	43
2.2.3 雷达截面积	48

2.2.4	气象目标的雷达截面积	50
2.2.5	雷达截面积的统计描述	51
2.2.6	Swerling 模型	59
2.3	杂波	62
2.3.1	σ^0 的特性	62
2.3.2	信号杂波比	63
2.3.3	杂波的时间和空间相关性	63
2.3.4	雷达截面积的混合模型	64
2.4	噪声模型和信号噪声比	66
2.5	干扰	69
2.6	频率模型: 多普勒移动	69
2.6.1	多普勒移动	69
2.6.2	多普勒移动的简化分析方法	71
2.6.3	"停一跳" 假设和空间多普勒	73
2.7	空间模型	75
2.7.1	随角度和横距的变化	77
2.7.2	随距离的变化	80
2.7.3	投影	81
2.7.4	多径	81
2.8	谱模型	82
2.9	总结	83
	参考文献	84
第 3 章	脉冲雷达信号的采样与量化	86
3.1	雷达信号采样的域和标准	86
3.1.1	时间和频率采样	88
3.1.2	空间采样	88
3.1.3	采样准则	88
3.2	快时间维采样	90
3.3	慢时间维采样: 脉冲重复间隔的选择	91
3.4	多普勒频谱采样	95
3.4.1	多普勒中的奈奎斯特速率	95
3.4.2	跨骑损失	97
3.5	空间和角度维采样	101
3.5.1	固定相位单元间距	101
3.5.2	天线波束间隔	102
3.6	量化	103
3.7	I/Q 通道不均衡及数字 I/Q	107
3.7.1	I/Q 通道不均衡及其补偿	108
3.7.2	I/Q 通道误差校正	110

171	3.7.3 数字 IQ	112
173	参考文献	116
173	第 4 章 雷达波形	117
173	4.1 简介	117
182	4.2 波形匹配滤波器	118
187	4.2.1 匹配滤波器	118
188	4.2.2 单频脉冲匹配滤波	120
191	4.2.3 全距离匹配滤波器	122
193	4.2.4 匹配滤波器的距离分辨率	122
192	4.3 动目标的匹配滤波	123
200	4.4 模糊函数	125
201	4.4.1 模糊函数的定义和性质	125
202	4.4.2 简单脉冲的模糊函数	128
207	4.5 脉冲串波形	130
207	4.5.1 脉冲串波形的匹配滤波器	130
207	4.5.2 逐个脉冲处理	132
207	4.5.3 距离模糊	133
211	4.5.4 脉冲串波形的多普勒响应	134
211	4.5.5 脉冲串波形的模糊函数	135
212	4.5.6 慢时间频谱和模糊函数的关系	139
213	4.6 调频脉冲压缩波形	139
213	4.6.1 线性调频波形	139
212	4.6.2 驻相原理	142
218	4.6.3 LFM 波形的模糊函数	143
220	4.6.4 距离-多普勒耦合	146
220	4.6.5 拉伸处理	147
222	4.7 FM 波形的距离旁瓣控制	149
222	4.7.1 匹配滤波器频率响应整形	150
229	4.7.2 波形频谱整形	151
230	4.8 步进频率波形	154
232	4.9 相位调制脉冲压缩波形	157
237	4.9.1 二相编码	157
239	4.9.2 多相编码	161
242	4.10 Costas 频率编码	163
242	参考文献	164
242	第 5 章 多普勒处理	165
242	5.1 其他形式的多普勒谱	166
248	5.2 运动目标指示	167
252	5.2.1 脉冲对消器	169

5.2.2	匹配滤波器的矢量表示	171
5.2.3	杂波抑制的匹配滤波器	173
5.2.4	盲速和参差 PRF	176
5.2.5	质量图	179
5.2.6	MTI 性能限制	185
5.3	脉冲多普勒处理	187
5.3.1	运动目标的离散时间傅里叶变换	188
5.3.2	DTFT 采样: 离散傅里叶变换	191
5.3.3	基于 DFT 的脉冲多普勒处理的匹配滤波器和滤波器组解释	193
5.3.4	精细多普勒估计	195
5.3.5	脉冲多普勒处理的现代谱估计	200
5.3.6	驻留间参差	201
5.4	脉冲对处理	202
5.5	其他多普勒处理问题	207
5.5.1	MTI 和脉冲多普勒级联处理	207
5.5.2	暂态影响	207
5.5.3	PRF 体制和模糊解决	207
5.6	杂波图和运动目标检测器	211
5.6.1	杂波图	211
5.6.2	运动目标检测器	212
5.7	运动平台的 MTI: 自适应偏移相位中心天线处理	213
5.7.1	DPCA 概念	213
5.7.2	自适应 DPCA	215
	参考文献	218
第 6 章 检测基础原理		220
6.1	雷达假设检验检测	220
6.1.1	奈曼-皮尔逊准则	221
6.1.2	似然比检验	222
6.2	相干系统中的门限检测	229
6.2.1	相干接收器的高斯情况	230
6.2.2	未知参数和门限检测	232
6.2.3	线性检测算子和平方律检测算子	237
6.2.4	其他未知参数	239
6.3	雷达信号的门限检测	240
6.3.1	相干、非相干和二元积累	240
6.3.2	非起伏目标	242
6.3.3	Albersheim 方程	245
6.3.4	起伏目标	248
6.3.5	Shnidman 方程	252

6.4	二元积累	253
6.5	有用的数值近似	256
6.5.1	误差方程近似	256
6.5.2	幅度函数近似	257
	参考文献	258
第 7 章	恒虚警率检测	260
7.1	未知干扰对虚警概率的影响	260
7.2	单元平均 CFAR	261
7.2.1	P_{FA} 变化所产生的影响	261
7.2.2	单元平均 CFAR 的概念	262
7.2.3	CFAR 参考窗	264
7.3	单元平均 CFAR 分析	264
7.3.1	单元平均 CFAR 门限的推导	265
7.3.2	单元平均 CFAR 的性能	265
7.3.3	恒虚警损失	268
7.4	单元平均 CFAR 的局限	269
7.4.1	目标遮蔽效应	269
7.4.2	杂波边缘效应	271
7.5	单元平均 CFAR 的改进方法	272
7.6	有序统计 CFAR	277
7.7	CFAR 有关其他主题	280
7.7.1	自适应 CFAR	280
7.7.2	两参数 CFAR	281
7.7.3	杂波图 CFAR	282
7.7.4	非参量 CFAR	283
7.7.5	虚警概率的系统级控制	285
	参考文献	286
第 8 章	合成孔径成像技术	288
8.1	合成孔径雷达基础	290
8.1.1	雷达横向分辨力	290
8.1.2	合成孔径的观点	292
8.1.3	多普勒的观点	297
8.1.4	SAR 的场景覆盖和采样	299
8.2	条带式 SAR 的数据特性	300
8.2.1	条带式 SAR 的成像几何	301
8.2.2	条带式 SAR 的回波数据特性	303
8.3	条带 SAR 的成像算法	305
8.3.1	多普勒波束锐化	306
8.3.2	二次相位误差的影响	308

8.3.3	距离-多普勒算法	311
8.3.4	聚焦深度	316
8.4	聚束 SAR 的数据特性	316
8.5	聚束 SAR 的极坐标格式成像算法	320
8.6	干涉 SAR 技术	322
8.6.1	地面高程在 SAR 图像中的表现	322
8.6.2	IFSAR 处理步骤	325
8.7	其他考虑	328
8.7.1	SAR 运动补偿和自聚焦	328
8.7.2	自聚焦	331
8.7.3	相干斑抑制	335
	参考文献	338
第 9 章 波束形成和空-时二维自适应处理导论		340
	引言	340
9.1	空域滤波	340
9.1.1	常规波束形成	340
9.1.2	自适应波束形成	343
9.1.3	预处理后的自适应波束形成	345
9.2	空-时信号环境	347
9.3	空-时信号建模	349
9.4	空-时信号处理	353
9.4.1	最优匹配滤波	353
9.4.2	STAP 性能测度	354
9.4.3	STAP 与 DPCA (偏移相位中心天线处理) 之间的关系	357
9.4.4	自适应匹配滤波	360
9.5	STAP 计算问题	362
9.5.1	功率域解	363
9.5.2	功率域解的运算量	364
9.5.3	电压域解及运算量	365
9.5.4	运算速率	366
9.6	降维 STAP	367
9.7	高级 STAP 算法和分析	369
9.8	STAP 限制	370
	参考文献	371
附录 A 缩略词语表		373

第1章 雷达系统导论

1.1 雷达的历史和应用

英文中的“radar”（雷达）一词原本是一个缩略语（RADAR），表示“radio detection and ranging”（无线电检测与测距）。而今天，由于它已经成为一项非常广泛实用的技术，“radar”一词也就变成了一个标准的英文名词。很多人对它的直接体验是它可以用来测量棒球或者汽车的速度。

雷达的历史可以追溯到现代电磁理论发展的早期（Swords, 1986; Skolnik, 2001）。1886年，Hertz 证明了无线电波具有反射的特性，并且 1900 年 Tesla 在一次访谈中描述了电磁检测和速度测量的概念。1903 年和 1904 年，德国工程师 Hülsmeyer 利用电磁波的反射进行了舰船检测的实验。1922 年 Marconi 又对这一概念进行了广泛宣传，同年，美国海军实验室的 Taylor 和 Young 用实验证实雷达可以对舰船进行检测，1930 年该实验室的 Hyland 首次用雷达检测到了飞机，虽然这是一个偶然的发现，但它引起了科技人员更深入的研究，最终，于 1934 年诞生了一项现在称为连续波雷达的美国专利。

雷达技术的快速发展和扩散是在 20 世纪 30 年代的中后期。在此期间，美国、英国、法国、德国、俄国、意大利和日本都独立开展研究，取得了重大进展。在美国，海军实验室的 R. M. Page 于 1934 年开始研发脉冲雷达，1936 年首次验证实验成功。1936 年美国军用信号公司也积极开展雷达研究工作，并于 1938 年研制出第一部实用的雷达系统——SCR—268 对空火控雷达，1939 年研制出 SCR—270 预警雷达，遗憾的是，其在珍珠港的检测结果被忽视了。由于受到战争威胁的激励，英国的 Watson-Watt 于 1935 年积极开展雷达的研究，同年完成了脉冲雷达的验证。1938 年英国建成了著名的 Chain Home 监视雷达网络，该网络一直工作到二战结束。在 1939 年，英国还研制了第一台机载截获雷达。1940 年，美国和英国开始在雷达研究方面交换情报。截止到此，绝大多数雷达都工作在高频（HF）和甚高频（VHF）频段。但是，英国研究人员揭示了临界腔体微波功率磁控管的奥秘，而美国在麻省理工学院建立了辐射实验室，这二者奠定了微波频段雷达成功发展的基础，此后微波雷达成为主流。

在二战中，上面提到的国家都对连续波雷达进行了实验，并且研制了能够实际应用的雷达系统。德军的占领中断了法国和俄国的研究。而另一方面，日本通过在菲律宾缴获的美制雷达和采用的德国技术帮助了其雷达的发展。德国也部署了各种各样的地基雷达、舰载雷达和机载雷达。在二战结束时，各国的研究人员都充分认识到了雷达的价值，以及微波频段和脉冲波形的优点。

雷达的早期发展离不开军事用途的驱动。到今天，军队仍然是雷达的主要用户和雷达技术的主要研究者。雷达的军事用途包括陆海空的监视、导航和武器制导。军用雷达的范围非常广，大到弹道导弹防御系统的雷达，小到只有拳头大小的战术导弹导引头雷达。

目前, 雷达的用途也越来越多。最常见的一种雷达是警用的交通雷达, 该雷达用于检测车辆是否超速行使 (也用于测量垒球和网球的发球速度)。另一种是“彩色天气雷达”, 我们在电视新闻中常常能看到它的观测结果, 它是气象雷达的一种。更复杂的气象雷达被用于对大范围地区的天气进行监视和预测, 以及对大气进行研究。再有一种对人们有帮助的雷达系统是空中交通管制雷达, 它用于对途中的和机场附近的商用飞机进行引导。雷达也可以帮助飞机测量高度、规避恶劣天气, 在不远的将来还能在恶劣气象条件下对跑道进行成像。在船舶的航行中, 雷达被广泛地用于防撞和浮标检测, 而现在在汽车工业中, 雷达也开始发挥同样的作用。最后, 值得一提的是天基 (包括星载和航天飞机载) 和机载雷达已经成为地球地理测绘和环境特性研究的一种重要工具, 比如, 雷达可以对水面、冰面、森林覆盖、土地应用和污染进行观测。雷达的应用远不止于此, 这里的列举并不能涵盖雷达这一重要技术的应用范围。

本书力图对雷达的信号处理技术给出一个全面的、易懂的、连贯的描述, 注重于绝大多数雷达的基本功能。虽然很多概念对于脉冲雷达和连续波雷达是通用的, 但我们这里更强调脉冲雷达。同样, 对于发射与接收天线合置的单基雷达 (实际上, 通常发射接收共用一个天线) 和发射与接收天线分离较远的双基雷达, 虽然有很多结果是通用的, 但我们更强调单基雷达。其中的原因是绝大多数雷达是按照单基、脉冲体制进行设计的。最后需要说明的是本书的描述尽可能采用数字信号处理的观点来进行, 这是因为绝大多数新雷达的设计非常依赖数字信号处理, 而且采用数字信号处理的描述方法更有利于概念和结果的统一。

1.2 雷达的基本功能

雷达的大多数用途可以分为检测、跟踪和成像。在本书中, 我们着重讨论检测和成像。由于信号获取和干扰抑制也是实现检测和成像的必要技术, 所以我们也对它们进行重点讨论。

雷达最为基本的问题是对一种物体或者现象进行检测。这就需要确定在某一给定时刻接收机的输出究竟是一个反射体的回波, 还是只有噪声。我们通常会接收机输出的幅度 $A(t)$ (t 表示时间) 与一个门限 $T(t)$ 进行比较来进行检测判决。这个门限可以在雷达设计时根据系统情况预先确定, 也可以根据雷达回波数据通过自适应计算得到。在第 6 章, 我们将解释这种检测技术的合理性。当一个脉冲传播到距离 R 处并且返回, 其总的传播路径长度为 $2R$, 所需要的时间就是 $2R/c$ 。这样, 如果在脉冲发射后的某一时间 t_0 时 $y(t) > T(t)$, 我们就认为在距离 R 处存在一个目标, 该目标的距离为

$$R = \frac{ct_0}{2} \quad (1.1)$$

其中, c 为光速^①。

一旦雷达检测到了一个目标, 我们希望还能够对它的位置和速度进行跟踪。单基雷达的特点决定了其位置测量是在一个球坐标系中完成的, 而这个球坐标系的原点就是雷达天线的相位中心, 如图 1.1 所示。在这个坐标系中, 天线的指向方向 (有时也称视线方向) 就是 x 轴正方向。我们将 θ 角称为方位角, ϕ 角称为俯仰角。如上面所述, 距离 R 可以根据脉冲

^① 在真空中, $c = 2.997\ 924\ 58 \times 10^8$ m/s。除非需要非常高的精度, 通常我们采用近似值 $c = 3 \times 10^8$ m/s —— 作者注。

发射到检测的时延直接计算得出。俯仰角 ϕ 和方位角 θ 以天线指向为参考方向进行确定，这是因为通常目标只有出现在天线的主瓣中才能被检测。速度的估计是通过测量目标回波的多普勒偏移来进行的。从目标回波的多普勒偏移只能计算出目标的径向速度，但是通过对目标位置和径向速度的连续测量可以推断目标在三维空间中的运动情况。

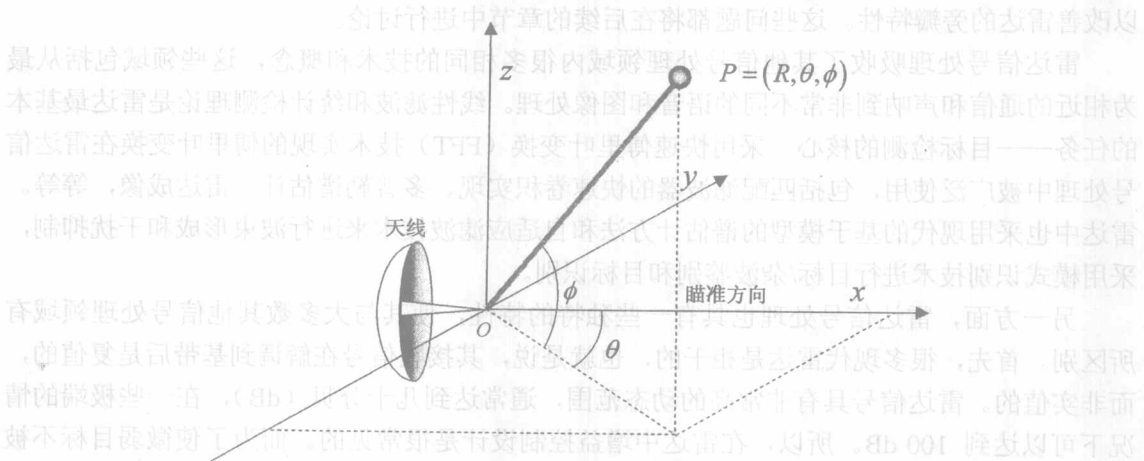


图 1.1 雷达测量的球坐标系

由于大多数人对雷达的了解只是雷达屏幕上光点移动的情景，所以检测和跟踪自然是人们最容易想到的雷达功能。然而，雷达正越来越多地应用于对区域的二维成像。分析这种图像，人们可以获得情报和监视信息，可以获得地面的高程图或地理图，可以获得地球资源的信息，比如，资源地图、土地的使用情况、冰盖情况、森林破坏情况，等等。通过将雷达得到的图像和存储的图像进行对比，雷达也可以用于“地形跟随”的导航。虽然雷达目前还无法获得和光学图像一样高的分辨率，但雷达采用的微波频段电磁波的极低衰减特性使雷达可以很好地“看穿”云、雾和降水，这是雷达的一个重要优点。所以，在光学设备根本无法使用的情况下，雷达往往还能获得有用的图像。

考虑到雷达系统的不同功能，其特性可以用不同的指标进行描述。在分析雷达的检测性能时，基本的参数是检测概率 P_D 和虚警概率 P_{FA} 。在其他系统参数不变的情况下，增大检测概率 P_D 总是以同时增大虚警概率 P_{FA} 为代价的。我们获得的检测概率 P_D 和虚警概率 P_{FA} 的组合是由信号和干扰的统计特性决定的，特别是信号干扰比 (SIR)。但在雷达的观测范围内同时存在多个目标时，对检测性能进行估计还需要考虑雷达的分辨率和旁瓣特性。举例来说，如果雷达不能分辨视野中的两个目标，就会将它们当做一个目标进行登记。当雷达的旁瓣较高时，强反射目标的回波就可能遮蔽附近的弱目标的回波，所以当两个目标同时出现时，雷达又会把它们当做一个目标。在距离域，雷达的分辨率和旁瓣特性决定于雷达的波性，而在角度域，它们取决于雷达的天线方向图特性。

在跟踪功能中，基本的指标是距离、角度、速度估计的精度。虽然分辨率可以作为跟踪精度的一个粗略的上界，但通过适当的信号处理后，雷达可获得的精度最终取决于 SIR。

在成像中，最基本的指标是空间分辨率和动态范围。空间分辨率决定在最终的 SAR 图像中多大尺寸的物体可以被辨识出来，也决定该雷达图像的应用范围。例如，分辨率 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的图像可以用于陆地使用情况的研究，却不能用于对机场和导弹阵地的军事监

视。动态范围决定图像的对比度，也决定了从一幅图像中可提取的信息量。雷达信号处理的目的是提高这些指标。通过脉冲积累可以提高雷达信号的 SIR。通过脉冲压缩和其他波形设计技术（如频率捷变）可以同时改善雷达的分辨率和 SIR。增大 SIR 和采用“滤波器分裂”插值技术可以提高测量的精度。信号处理中广泛使用的加窗技术可以改善雷达的旁瓣特性。这些问题都将在后续的章节中进行讨论。

雷达信号处理吸收了其他信号处理领域内很多相同的技术和概念，这些领域包括从最为相近的通信和声呐到非常不同的语音和图像处理。线性滤波和统计检测理论是雷达最基本的任务——目标检测的核心。采用快速傅里叶变换（FFT）技术实现的傅里叶变换在雷达信号处理中被广泛使用，包括匹配滤波器的快速卷积实现、多普勒谱估计、雷达成像，等等。雷达中也采用现代的基于模型的谱估计方法和自适应滤波技术来进行波束形成和干扰抑制，采用模式识别技术进行目标/杂波鉴别和目标识别。

另一方面，雷达信号处理也具有一些独特的特性，使其与大多数其他信号处理领域有所区别。首先，很多现代雷达是相干的，也就是说，其接收信号在解调到基带后是复值的，而非实值的。雷达信号具有非常高的动态范围，通常达到几十分贝（dB），在一些极端的情况下可以达到 100 dB。所以，在雷达中增益控制设计是很常见的。而为了使微弱目标不被强目标遮蔽，旁瓣控制技术往往也是非常关键的技术。雷达中的信号干扰比（SIR）往往是非常低的，举例来说，在检测点目标的 SIR 也许只有 10~20 dB，而在信号处理前一个单个的接收脉冲其 SIR 往往是小于 0 dB 的。

特别重要的是，相对于其他的 DSP 应用来说，雷达信号带宽是比较宽的。雷达单个脉冲的瞬时带宽往往是几兆赫兹的数量级，在某些高分辨雷达中可以达到几百兆赫兹，甚至 1 吉赫兹。对于数字信号处理，处理这种宽带宽的信号有很多困难。例如，需要非常高速的模拟数字（A/D）转换器。在历史上，设计高性能的兆赫兹数量级速率的转换器的困难，曾减缓了雷达信号处理应用数字技术的进程。即使是在数字技术普遍应用的现在，大带宽雷达系统的字长通常较短，为 8~12 位，而不是其他领域普遍采用的 16 位。在历史上，高的数据率意味着为了实现数字处理，必须定制专用的硬件，以获得足够的吞吐率。相对于其他信号处理技术（比如，声呐的信号处理），数据吞吐率的问题也使雷达只能采用相对简单的信号处理算法。只有到了 20 世纪 90 年代的后半期，Moore 定律^①才为我们提供了足够强大的运算能力，使雷达信号处理的算法可以采用很多商用硬件系统来实现。同样，硬件的发展也使雷达信号处理能够应用更新的、更复杂的算法，使雷达的检测、跟踪、成像能力大大提高。

1.3 脉冲体制雷达的各个部分

图 1.2 是一种简单的脉冲单基雷达的框图。波形发生器产生我们需要的脉冲波形。发射机将这个波形调制到我们要求的射频（RF）上，并将其放大到我们需要的功率水平。发射机的输出与天线之间依靠一个双工器来连接，双工器也称为环行器或收发转换开关（用于发射和接收切换）。天线接收到的回波信号也是通过双工器进入雷达接收机。接收机通常采用

^① Gordon Moore 在 1965 年的著名预言指出，集成电路上的晶体管的数目将每 18 个月到 24 个月翻一番，这个预言在近 40 年的时间内保持了令世人瞩目的正确性，并带来了 20 世纪 80 年代的计算机和网络革命——作者注。