

Mc
Graw
Hill
Education



国防电子信息技术丛书

Fundamentals of Radar Signal Processing, Second Edition

雷达信号处理基础

(第二版)

[美] Mark A. Richards 著
邢孟道 王彤 李真芳 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>

内容简介

国防电子信息技术丛书

雷达信号处理基础

(第二版)

Fundamentals of Radar Signal Processing

Second Edition

[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

内 容 简 介

本书作者为国际著名雷达信号处理专家。该书介绍了雷达系统与信号处理的基本理论和方法,包括雷达系统与信号处理概述、雷达信号模型、脉冲雷达数据采集、雷达波形、多普勒处理、检测基础原理、测量与跟踪、合成孔径雷达成像技术及干涉合成孔径雷达、波束形成和空-时处理的介绍。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探究的示例。该书对基础理论和方法进行了详尽介绍与深入严谨的论述。

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, Second Edition

9780071798327

Copyright © 2014 by McGraw-Hill Education.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2017 by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry.

版权所有。未经出版人事先书面许可,对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播,包括但不限于复印、录制、录音,或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和电子工业出版社合作出版。此版本经授权仅限在中国大陆销售。

版权 © 2017 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与电子工业出版社所有。

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

版权贸易合同登记号 图字: 01-2014-6332

图书在版编目(CIP)数据

雷达信号处理基础:第2版/(美)理查兹(Richards, M. A.)著;邢孟道等译.一北京:电子工业出版社,2017.3
(国防电子信息技术丛书)

书名原文: Fundamentals of Radar Signal Processing, Second Edition

ISBN 978-7-121-27811-2

I. ①雷… II. ①理… ②邢… III. ①雷达信号处理—研究 IV. ①TN957.51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 299915 号

策划编辑: 马 岚

责任编辑: 马 岚 特约编辑: 姚 旭

印 刷: 三河市良远印务有限公司

装 订: 三河市良远印务有限公司

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: 30.75 字数: 787 千字

版 次: 2008 年 6 月第 1 版

2017 年 3 月第 2 版

印 次: 2017 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 79.00 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, 88258888。

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。

本书咨询联系方式: classic-series-info@phei.com.cn。

译者序

本书作者 Mark A. Richards 现在是佐治亚理工学院电子和计算工程系的首席研发工程师、副教授，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部高级研究计划署的项目经理，IEEE 2001 年雷达会议的总主席，以及 IEEE 图像和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，包括匹配滤波、脉冲压缩、多普勒处理和阈值检测等进行了详尽的介绍，同时结合当前雷达信号处理的发展，对一些更先进的课题包括合成孔径雷达成像和空-时自适应阵列信号处理等进行了论述。本书在国外高校被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 章及附录，内容安排罗列如下。

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、检测和后处理等应用。

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，包括了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以及多普勒频谱采样，同时介绍脉冲雷达信号的量化以及补偿问题。

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、距离旁瓣控制等。

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、动目标识别、脉冲多普勒处理、脉冲对处理以及其他多普勒处理问题，如杂波图和运动目标检测器、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、阈值检测、二元积分和有用的数值近似等。本章还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，同时简要介绍了其他多种 CFAR 检测。

第 7 章介绍了测量与跟踪，包括估计量、克拉美罗下界、距离、多普勒、角度估计量、跟踪理论、 α - β 滤波器。

第 8 章则对合成孔径雷达 (SAR) 这一热门研究课题做了详尽介绍，包括了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，干涉 SAR 技术等。

第 9 章则讲解了波束形成和空-时二维自适应处理 (STAP)，包括了空域滤波、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，原作者给予了很多关注和支持，希望该书在中国的翻译出版，能为该领域的广大研究者提供有用的参考。

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章在刘玲和丁金闪翻译的第一版的基础上，邢孟道做了修改和完善，第7章由戴奉周翻译，第8章在丁金闪翻译的第一版基础上，邢孟道做了修订和完善，附录由邢孟道翻译。全书由邢孟道统稿并审阅。

本书的翻译工作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，而李学仕、陈澍来、左绍山、邵鹏、张升、高悦欣、曾乐天、符吉祥、景国彬、刘会涛等博士生对本书的第二版翻译工作也提出了诸多建议。值得一提的是，翻译过程中对原书的一些细节错误进行了更正，并在译著付印前根据作者在网站公布的最新勘误文件再次修改译文，以呈现尽可能完善的中译本。另外，译者忠实遵从原著对多普勒频率(frequency)和多普勒频移(shift)的用法，未加变动；遵从原著对横向(cross-range)的用法，需要说明的是，一般对于正侧视 SAR 来说，横向和方位向表述的内容是一致的，但是对于斜视 SAR 来说，横向正交于距离向但与方位向存在斜视角度的偏差；原著中对于 Point Scatterer Response 和 Point Spread Response 缩略词使用不当，译者做出如下统一：PSR Point Scatterer Response(点散射响应)代表的是在脉压之前由点目标生成点目标回波时的响应函数，而 Point Spread Response(点散布响应，PSR)代表的是进行脉压时的响应函数。

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限制，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，对所有为本书出版提供帮助的人们表示诚挚的感谢！

前 言

本书这一版与前版的目的相同，即以数字信号处理的角度深入全面地阐述雷达信号处理中的基本概念。本书全文贯彻了对线性系统、滤波、采样和傅里叶分析等技术的应用技巧与诠释，提供了一种流行的、规范的辅导方法。本书的主要内容涵盖了所有雷达系统都依赖的一系列信号处理的基础技术，包括：目标和干扰模型、匹配滤波、波形设计、多普勒处理、阈值检测以及检测精度等。此外，书中还介绍了跟踪滤波技术、合成孔径雷达成像以及空-时自适应阵列信号处理这三种新提出来的技术，以方便读者深入研究相关方向。

2005年，本书出版发行了第一版，填补了雷达科技类文献中的一些空白。同时，还有一些优秀的关于雷达系统的图书(如 Skolnik、Edde 的著作)，提供了对雷达系统整体的一个较好的定量分析介绍。建议对该课题有兴趣的读者，可以把这些著作作为入门级的阅读文献。最早，当我接受与雷达相关的工作时，曾阅读了 Skolnik 著的 *Introduction to Radar Systems*，希望能避免在新岗位上表现出愚昧无知，尽管在这之前，我已经在研究生阶段注意语言增强，但还是事与愿违，当然，这错不在 Skolnik。一些雷达教科书(如 Peebles、Mahafza 的著作)，对雷达系统和信号处理的问题进行了更具深度的量化分析。同时，还有大量关于雷达信号处理、合成孔径雷达成像(Jakowatz 等人、Carrara 等人以及 Soumekh 的著作)和空-时自适应信号处理(Klemm、Guerci 的著作)等当下比较热门技术的高质量教科书。然而，我个人认为，当前著作存在的问题是大量的关于雷达系统的图书和先进的雷达信号处理技术类图书之间缺少衔接；更具体地，就是雷达界缺少一本简明、统一、先进的，可以提供雷达信号处理基础技术的教科书。希望该书能填补这一空白。

从本书第一版的读者反馈来看，结果令人高兴。我收到了很多善意的令人鼓舞的建议，并且本书被很多大学和公司采用。我相信本书基本完成了当初的创作目标。然而，也正是该书的成功促使了可以从很多方面改进其内容。

新书不断呈现，尤其是优秀的 *Principles of Modern Radar* 系列图书。但某种程度仍令我感到惊讶的是，直到今天，关于雷达的图书仍然存在衔接空缺的问题，大部分的雷达教科书手册一般要么介绍完整的雷达系统，要么介绍非常专业的处理技术，但却几乎不介绍构成先进信号处理技术最基础的、每一部雷达都使用的基本的信号处理概念。因此，本书第二版仍然致力于填补该空缺。第二版除了致力于加强内容覆盖，稍微拓宽研究方向，并纠正和提高语言表述外，还提供了其他内容，以增强本书作为教科书或者专业参考书的可用性。

该书作为美国佐治亚理工学院两门课程的教学参考书已经使用了多年，最初是电子和计算工程系的教材，用于研究生第一年一学期课程。同时，这本书的缩简版也在佐治亚理工职业教育部周期性开设的为时一周的同名职业教育课程中使用。自本书第一版出版以来，我一直使用其作为以上两门课程的教材。通过实践和经验的积累，我学会了更多，不仅局限于本书的研究内容，还包括如何表述这些内容，因此也尝试将这些都融入到本书的新版内容中。

除了一些小的改变以外，第二版相对第一版的最主要改变是增加了新版的第 7 章“测量

与跟踪”。这一章介绍的是第一版中遗漏了的一个重要的基础性研究方向——测量精度。主要介绍了克拉美罗下界和最大似然估计，并说明了在使用常见技术，如带峰值检测的匹配滤波、上升沿脉冲检测、离散傅里叶变换和单脉冲测角等，对时延、频率、相位和角度进行测量时，如何应用克拉美罗下界和最大似然估计。此外，本章还包含对基本跟踪滤波器包括 α - β 滤波器和卡尔曼滤波器的概述。这些内容本应该包含在第一版中，现在包括进来正好可以弥补之前的缺失。

第二版其他部分内容的变化不大，主要变化罗列如下。

之前在第 1 章介绍的数字信号处理的基础概念被安排到了附录 B 中，并且内容进行了少量扩充。增加了全新的附录 A，介绍阅读本书所需要了解的随机变量和随机信号的相关的基本信息，具体包括雷达中常见的概率密度函数，估计量与克拉美罗下界，以及随机信号在线性移不变系统中的响应。

第 2 章改进了目标起伏模型的阐述。当前传统的 Swerling 模型在很多情况下不再适用，这不仅因为高分辨率的雷达需要新的概率密度函数，还因为“扫描间”和“脉冲间”不适用于基于相干处理间隔(CPI)的处理。然而，分析的策略却仍然有效，因此，我极大程度地保留了基于奈曼-泊松准则检测器设计和分析策略的阐述，而减少了在“扫描间”和“脉冲间”模式下讨论非相干积累的问题，但是还会用这两种模式理解文献资料，并将它们应用于现代系统。第 2 章的另一处改动是适当增加了对杂波反射的阐述。

第 3 章则极大地保留了原内容，但重新命名为“脉冲雷达数据采集”。为了使本章内容更加清晰，对关于一个 CPI 内获取的数据块的阐述顺序做了稍许调整。类似地，第 4 章雷达波形的内容做了一些扩展，增加了线性调频信号旁瓣的时域控制和步进频波形的入门知识，以及二相编码信号滤波器的失配和连续波雷达。

第 5 章多普勒处理扩充了很多内容，包括：关于存在距离和多普勒模糊时，脉冲多普勒谱的行为的更多解释；简单地提及了低、中、高脉冲重复频率体制的优缺点；增加了关于模糊分辨率的内容和盲区的讨论；以脉冲重复间隔的形式，对动目标检测的参差脉冲重复频率重新进行了讨论。

原第 6 章检测基础原理和第 7 章恒虚警率检测经过一些小的改动在新版中合并为新第 6 章。同样，第 8 章合成孔径成像技术也做了一些修正和提炼，并且增加了干涉合成孔径雷达的内容。第 9 章自适应波束形成和空-时自适应滤波也做了修正和提炼。唯一重要的区别是第二版中去除了关于空-时自适应处理(STAP)计算问题的大部分内容(或许以后在第三版中将会有新的一章，阐述所有雷达信号处理技术的计算问题)。虽然合成孔径雷达和自适应干扰抑制在现代雷达中非常重要，但本书的目的是介绍基本原理和为学生深入研究这些问题做准备。

纵观全书，我希望我的工作能够更好地发现并揭示雷达信号处理中一再出现的普遍的主题，包括相位历程、相干积累、匹配滤波、积累增益和最大似然估计。

一学期的雷达信号处理课程可以覆盖本书的第 1 章至第 7 章，或许也可以跳过第 2 章和第 3 章中后几节的部分内容以节省时间。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被动双基系统提供了坚实的理论基础。四分之一学期的课程应该可以涵盖第 1 章至第 5 章以及除去恒虚警检测部分的第 6 章。同时，学习之前必须有关于连续信号处理和离散信号处理的坚实的理论基础，同时要对随机信号处理至少有大概了解。在

第二版中，为了增加本书作为大学教材的实用性，我在每章后面增加了练习题，使用本书作为教材的教师可以向出版社索要练习题的答案。

自第一版出版至今，我集中维护了一个由读者反馈和我自己发现的完整错误报告列表，并将之公布于本书的配套网站<http://www.radarsp.com>。该网站还提供其他的支撑信息，比如：与本书相关的临时性的专业术语备忘录，以及我在课堂上使用的一些简单的 MATLAB 软件演示和研究课题工程。在第二版中，我试图消除所有已知的错误，而不引入新问题。然而，完全没有错误出现是不可能的，但是我真心希望能够尽可能做到(由于新增加的第 7 章及附录 A 存在错误的风险较高)。我希望读者能够将发现的所有问题发送到邮箱 mrichards@gatech.edu。一如往常，我将在网站上设立一个专门记录本书错误的文档。

Mark A. Richards 博士

缩 略 词

1D One-Dimensional 一维	CRLB Cramèr-Rao Lower Bound 克拉美
2D Two-Dimensional 二维	罗下界
AC Alternating Current 交变电流	CRP Central Reference Point 中心参考点
ACF Autocorrelation Function 自相关函数	CRT Chinese Remainder Theorem 中国剩
A/D Analog-to-Digital 模数转换	余定理
AF Ambiguity Function 模糊函数	CPI Coherent Processing Interval 相干处
AGC Automatic Gain Control 自动增益控制	理间隔
AMF Adaptive Matched Filter 自适应匹配	CUT Cell under Test 检测单元
滤波器	CW Continuous Wave 连续波
AMTI Airborne Moving Target Indication	D/A Digital-to-Analog 数模转换
机载动目标显示	dB Decibel 分贝
AOA Angle of Arrival 到达角	dBsm Decibels relative to 1 square meter
AR Autoregressive 自回归	相对于 1 平方米的分贝数
ASR Airport Surveillance Radar 机场监视	DBS Doppler Beam Sharpening 多普勒波
雷达	束锐化
AWGN Additive White Gaussian Noise 加	DC Direct Current 直流
性高斯白噪声	DCT Discrete Cosine Transform 离散余弦
BPF Bandpass Filter 带通滤波器	变换
BSQ Beam Sharpening Ratio 波束锐化比	DF CFAR Distribution-Free Constant False
BT Time-Bandwidth Product 时宽带宽积	Alarm Rate 自由分布恒虚警率
CA Clutter Attenuation 杂波消减	DFT Discrete Fourier Transform 离散傅里
CA-CFAR Cell-Averaging Constant False	叶变换
Alarm Rate 单元平均恒虚警率	DOF Degrees of Freedom 自由度
CAT Computerized Axial Tomography 计	DPCA Displaced Phase Center Antenna 相
算机化轴向断层检查	位中心偏置天线
CCD Coherent Change Detection 相干变	DSP Digital Signal Processing 数字信号处理
化检测	DTED Digital Terrain Elevation Data 数字
CDF Cumulative Distribution Function 累	地形高程数据
积分布函数	DTFT Discrete Time Fourier Transform 离
CF Characteristic Function 特征函数	散时间傅里叶变换
CFAR Constant False Alarm Rate 恒虚警率	EA Electronic Attack 电子攻击
CMT Covariance Matrix Taper 协方差矩	ECM Electronic Countermeasures 电子干扰
阵锥形	EKF Extended Kalman Filter 扩展卡尔曼滤
CNR Clutter-to-Noise Ratio 杂波-噪声比	波器

- EM Electromagnetic 电磁
- EMI Electromagnetic Interference 电磁干扰
- ENOB Effective Number of Bits 有效位数
- ERIM Environmental Research Institute of Michigan (美)密歇根州环境研究所
- FFT Fast Fourier Transform 快速傅里叶变换
- FIR Finite Impulse Response 有限冲激响应
- FM Frequency Modulation 调频
- FMCW Frequency Modulated Continuous Wave 调频连续波
- FSK Frequency Shift Keying 频移键控
- GLRT Generalized Likelihood Ratio Test 广义似然比检测
- GMTI Ground Moving Target Indication 地面动目标显示
- GOCA CFRA Greatest-of Cell-Averaging Constant False Alarm Rate 单元平均选大恒虚警率
- GPS Global Positioning System 全球定位系统
- GTRI Georgia Tech Research Institute (美)佐治亚理工学院
- HF High Frequency 高频
- HPRF High Pulse Repetition Frequency 高脉冲重复频率
- I In-Phase 同相
- ICM Internal Clutter Motion; Intrinsic Clutter Motion 内杂波运动
- IDFT Inverse Discrete Fourier Transform 逆离散傅里叶变换
- IF Intermediate Frequency 中频
- IFFT Inverse Fast Fourier Transform 逆快速傅里叶变换
- i.i.d. Independent, Identically Distributed 独立同分布
- IFSAR Interferometric Synthetic Aperture Radar 干涉合成孔径雷达
- IIR Infinite Impulse Response 无限冲激响应
- IMM Interacting Multiple Models 交互多模型
- IMU Inertial Measurement Unit 惯性测量单元
- INS Inertial Navigation System 惯性导航系统
- IPD Interferometric Phase Difference 干涉相位差
- ISAR Interferometric Synthetic Aperture Radar 逆合成孔径雷达
- ISL Integrated Sidelobe Level, Interference Subspace Leakage 干扰子空间泄漏
- JNR Jammer-to-Noise Ratio 干扰噪声比
- KA Knowledge-Aided 知识辅助
- KF Kalman Filter 卡尔曼滤波器
- LCM Least Common Multiple 最小公倍数
- LEO Low Earth Orbit 地球低轨道
- LFM Linear Frequency Modulation 线性调频
- LNA Low Noise Amplifier 低噪声放大器
- LO Local Oscillator 本振
- LPF Lowpass Filter 低通滤波器
- LPG Loss in Processing Gain 处理增益损失
- LPRF Low Pulse Repetition Frequency 低脉冲重复频率
- LRT Likelihood Ratio Test 似然比检测
- LSB Least Significant Bit 最低有效位
- LSE Least Squares Estimate 最小平方估计
- LSI Linear Shift-Invariant 线性移不变
- LTI Linear Time-Invariant 线性时不变
- MLE Maximum Likelihood Estimate (Estimator or Estimation) 最大似然估计(或估计器)
- MMSE Minimum Mean-Squared Error, Minimum Means-Squared Estimate 最小均方误差, 最小均方估计
- MDD Minimum Detectable Doppler 最小可检测多普勒
- MDV Minimum Detectable Velocity 最小可检测速度
- MMW Millimeter Wave 毫米波

- MPRF Medium Pulse Repetition Frequency 中脉冲重复频率
- MSB Most Significant Bit 最有效位
- MSE Mean-Squared Error 均方误差
- MTD Moving Target Detector 动目标检测器
- MTI Moving Target Indication 动目标显示
- MVU Minimum Variance Unbiased 最小方差无偏
- NASA National Aeronautics and Space Agency (美)国家航空航天局
- NEXRAD Next Generation Radar 下一代雷达
- NLFM Nonlinear Frequency Modulation 非线性调频
- NRL Naval Research Laboratory (美)海军研究实验室
- OS CFAR Order Statistic Constant False Alarm Rate 有序统计量恒虚警率
- PAF Periodic Ambiguity Function 周期模糊函数
- PC Principal Components 主分量
- PDF Probability Density Function 概率密度函数
- PFA Polar Format Algorithm 极坐标格式算法
- PGA Phase Gradient Algorithm 相位梯度算法
- PL Processing Loss 处理损失
- PPP Pulse Pair Processing 脉冲对处理
- PRF Pulse Repetition Frequency 脉冲重复频率
- PRI Pulse Repetition Interval 脉冲重复间隔
- PSD Power Spectrum (or Spectral) Density 功率谱密度
- PSL Peak Sidelobe Level 峰值旁瓣电平
- PSM Polarization Scattering Matrix 极化散射矩阵
- PSP Principle of Stationary Phase 驻相原理
- PSR Point Spread Response 点散布响应
- Q Quadrature 正交
- RCS Radar Cross Section 雷达截面积
- RCSR Radar Cross Section Reduction 雷达截面积消减
- RD Range-Doppler 距离-多普勒
- RF Radar Frequency 雷达频率
- RMB Reed-Mallett-Brennan Reed-Mallett-Brennan 准则
- ROI Region of Interest 关注区域
- RSS Root Sum Square 平方和的平方根
- RV Random Variable 随机变量
- RVP Residual Video Phase 残余视频相位
- SAR Synthetic Aperture Radar 合成孔径雷达
- SB Sampling Bound 采样界
- SQNR Signal-to-Quantization Noise Ratio 信号-量化噪声比
- S-CFAR Switching Constant False Alarm Rate 开关恒虚警率
- SCR Signal-to-Clutter Ratio 信号杂波比
- SIR Signal-to-Interference Ratio; Shuttle Imaging Radar 信号干扰比(信干比); 航天飞机成像雷达
- SMI Sample Matrix Inverse 采样矩阵求逆
- SMTI Surface Moving Target Indication 地表动目标显示
- SNR Signal-to-Noise Ratio 信号噪声比
- SOCA CFAR Smallest-of Cell-Averaging Constant False Alarm Rate 单元平均选小恒虚警率
- STALO Stable Local Oscillator 稳定本振
- STAP Space-Time Adaptive Processing 空-时自适应处理
- T/R Transmit/Receive 发射/接收
- UDSF Usable Doppler Space Fraction 可用多普勒空间比
- UHF Ultra-High Frequency 超高频
- UMP Uniformly Most Powerful 均匀最大功效的
- VHF Very High Frequency 甚高频
- ZZB Ziv-Zakai Bound Ziv-Zakai 界

目 录

第 1 章 雷达系统与信号处理概述	1	2.2.5 雷达截面积的统计描述	44
1.1 雷达的历史和应用	1	2.2.6 目标起伏模型	54
1.2 雷达的基本功能	2	2.2.7 Swerling 模型	57
1.3 脉冲体制雷达的基本组成	4	2.2.8 目标起伏对多普勒谱的影响	58
1.3.1 发射机和波形产生器	5	2.3 杂波	59
1.3.2 天线	7	2.3.1 σ^0 的性质	59
1.3.3 接收机	11	2.3.2 信杂比	61
1.4 雷达信号处理的共同主线	14	2.3.3 杂波的时间和空间相关性	61
1.4.1 信干比与积累	15	2.3.4 雷达截面积的混合模型	63
1.4.2 分辨率	16	2.4 噪声模型和信噪比	64
1.4.3 数据积累与相位历程建模	18	2.5 干扰	67
1.4.4 带宽扩展	20	2.6 频率模型: 多普勒频移	67
1.5 基本雷达信号处理概述	21	2.6.1 多普勒频移	67
1.5.1 雷达的时间尺度	22	2.6.2 停-跳近似和相位历程	71
1.5.2 现象学	22	2.6.3 多普勒频移的测量: 空间多普勒 频移	72
1.5.3 信号调节和干扰抑制	23	2.7 空间模型	73
1.5.4 成像	25	2.7.1 相干散射	74
1.5.5 检测	27	2.7.2 随角度的变化	75
1.5.6 测量与跟踪滤波器	28	2.7.3 随距离的变化	77
1.6 雷达文献	29	2.7.4 非相干积累	78
1.6.1 雷达系统和组成	29	2.7.5 投影	79
1.6.2 基本雷达信号处理	29	2.7.6 多径	79
1.6.3 高级雷达信号处理	29	2.8 谱模型	80
1.6.4 雷达的应用	30	2.9 总结	81
1.6.5 当前的雷达研究	30	参考文献	82
参考文献	30	习题	83
习题	32		
第 2 章 信号模型	34	第 3 章 脉冲雷达数据采集	87
2.1 雷达信号的组成	34	3.1 脉冲雷达数据的获取与存储 结构	87
2.2 幅度模型	35	3.1.1 单脉冲: 快时间	87
2.2.1 简单点目标的雷达距离方程	35	3.1.2 多脉冲: 慢时间和相参处理 时间	89
2.2.2 分布式目标的距离方程	37	3.1.3 多普勒和距离模糊	91
2.2.3 雷达截面积	42		
2.2.4 气象目标的雷达截面积	43		

3.1.4	多通道:数据立方	94	4.6.5	展宽处理	143
3.1.5	驻留时间	95	4.7	FM波形的距离旁瓣控制	147
3.2	多普勒频谱采样	96	4.7.1	匹配滤波器频率响应整形	147
3.2.1	多普勒频谱内的奈奎斯特速率	96	4.7.2	匹配滤波器脉冲响应整形	149
3.2.2	跨越损失	98	4.7.3	波形频谱整形	149
3.3	空间和角度维采样	101	4.8	步进频率波形	151
3.3.1	空间阵列采样	101	4.9	步进线性调频波形	155
3.3.2	角度采样	102	4.10	相位调制脉冲压缩信号	155
3.4	I/Q通道不平衡以及数字I/Q	104	4.10.1	二相编码	156
3.4.1	I/Q通道不平衡及其补偿	104	4.10.2	多相编码	160
3.4.2	I/Q通道误差校正	106	4.10.3	失配相位编码滤波器	163
3.4.3	数字I/Q	108	4.11	Costas频率编码	164
参考文献		111	4.12	连续波雷达	165
习题		112	参考文献		165
第4章	雷达波形	114	习题		166
4.1	简介	114	第5章	多普勒处理	170
4.2	波形匹配滤波器	115	5.1	运动平台对多普勒谱的影响	171
4.2.1	匹配滤波器	115	5.2	运动目标指示	174
4.2.2	简单脉冲匹配滤波器	117	5.2.1	脉冲对消器	175
4.2.3	全距离匹配滤波器	118	5.2.2	匹配滤波器的矢量表示	177
4.2.4	跨越损失	119	5.2.3	杂波抑制的匹配滤波器	178
4.2.5	匹配滤波器的距离分辨率	119	5.2.4	盲速和参差脉冲重复频率	181
4.3	动目标的匹配滤波	120	5.2.5	质量图	186
4.4	模糊函数	122	5.2.6	MTI性能限制	190
4.4.1	模糊函数的定义和性质	122	5.3	脉冲多普勒处理	192
4.4.2	简单脉冲的模糊函数	124	5.3.1	运动目标的离散时间傅里叶变换	193
4.5	脉冲串波形	126	5.3.2	DTFT采样:离散傅里叶变换	196
4.5.1	脉冲串波形的匹配滤波器	126	5.3.3	噪声的离散傅里叶变换	197
4.5.2	逐个脉冲处理	127	5.3.4	脉冲多普勒处理增益	198
4.5.3	距离模糊	129	5.3.5	基于DFT的脉冲多普勒处理的匹配滤波器和滤波器组解释	198
4.5.4	脉冲串波形的多普勒响应	131	5.3.6	精细多普勒估计	200
4.5.5	脉冲串波形的模糊函数	132	5.3.7	脉冲多普勒处理的现代谱估计	204
4.5.6	慢时间频谱和模糊函数的关系	135	5.3.8	相干处理间隔间参差和盲区图	205
4.6	调频脉冲压缩波形	136	5.4	脉冲对处理	208
4.6.1	线性调频脉冲压缩波形	137			
4.6.2	驻相原理	139			
4.6.3	LFM波形的模糊函数	140			
4.6.4	距离-多普勒耦合	142			

5.5 其他多普勒处理问题	213	6.6 虚警概率的系统级控制	290
5.5.1 MTI 和脉冲多普勒级联处理	213	参考文献	290
5.5.2 暂态影响	213	习题	292
5.5.3 脉冲重复频率体制	214	第 7 章 测量与跟踪	295
5.5.4 模糊解决	218	7.1 估计量	296
5.6 杂波图和动目标检测器	220	7.1.1 估计量的性质	296
5.6.1 杂波图	220	7.1.2 克拉美罗下界	298
5.6.2 动目标检测器	222	7.1.3 CRLB 和信噪比	299
5.7 运动平台的 MTI: 自适应偏移		7.1.4 最大似然估计量	300
相位中心天线处理	222	7.2 距离、多普勒、角度估计量	301
5.7.1 偏移相位中心天线概念	222	7.2.1 距离估计量	301
5.7.2 自适应 DPCA	224	7.2.2 多普勒信号估计	311
参考文献	228	7.2.3 角度估计	317
习题	229	7.3 跟踪导论	329
第 6 章 检测基础原理	233	7.3.1 序贯最小二乘估计	329
6.1 雷达假设检验检测	233	7.3.2 α - β 滤波器	333
6.1.1 奈曼-皮尔逊检测准则	234	7.3.3 卡尔曼滤波	336
6.1.2 似然比检验	235	7.3.4 跟踪周期	341
6.2 相干系统中的阈值检测	241	参考文献	345
6.2.1 相干接收机的高斯情况	242	习题	346
6.2.2 未知参数和阈值检测	244	第 8 章 合成孔径成像技术	350
6.2.3 线性检测算子和平方律检测 算子	249	8.1 合成孔径雷达基础	353
6.2.4 其他未知参数	249	8.1.1 雷达横向分辨率	353
6.3 雷达信号的阈值检测	251	8.1.2 合成孔径的观点	354
6.3.1 相干、非相干和二元积累	252	8.1.3 多普勒的观点	360
6.3.2 非起伏目标	253	8.1.4 SAR 的场景覆盖和采样	361
6.3.3 Albersheim 方程	256	8.2 条带式 SAR 的数据特性	364
6.3.4 起伏目标	259	8.2.1 条带式 SAR 的成像几何	364
6.3.5 Shnidman 方程	262	8.2.2 条带式 SAR 的回波数据特性	367
6.4 二元积累	263	8.3 条带式 SAR 的成像算法	369
6.5 恒虚警概率检测	266	8.3.1 多普勒波束锐化	369
6.5.1 未知干扰对虚警概率的影响	266	8.3.2 二次相位误差的影响	372
6.5.2 单元平均 CFAR	268	8.3.3 距离-多普勒算法	375
6.5.3 单元平均 CFAR 分析	270	8.3.4 聚焦深度	379
6.5.4 单元平均 CFAR 的局限	274	8.4 聚束式 SAR 的数据特性	380
6.5.5 单元平均 CFAR 的改进方法	278	8.5 聚束式 SAR 的极坐标格式成像 算法	384
6.5.6 有序统计 CFAR	282	8.6 干涉 SAR 技术	386
6.5.7 有关 CFAR 的其他问题	284		

8.6.1	地面高程在 SAR 图像中的表现	386	9.3	空-时信号建模	418
8.6.2	IFSAR 处理步骤	389	9.4	空-时信号处理	422
8.7	其他考虑	393	9.4.1	最优匹配滤波	422
8.7.1	SAR 运动补偿和自聚焦	393	9.4.2	STAP 性能测度	422
8.7.2	自聚焦	396	9.4.3	STAP 与偏移相位中心天线处理之间的关系	426
8.7.3	相干斑抑制	401	9.4.4	自适应匹配滤波	428
	参考文献	402	9.5	降维 STAP	430
	习题	404	9.6	高级 STAP 算法和分析	431
第 9 章	波束形成和空-时二维自适应处理导论	407	9.7	STAP 限制	433
9.1	空域滤波	407		参考文献	434
9.1.1	常规波束形成	407		习题	435
9.1.2	自适应波束形成	410	附录 A	有关概率论和随机过程的课题	437
9.1.3	预处理后的自适应波束形成	414	附录 B	有关数字信号处理的几个课题	459
9.2	空-时信号环境	416			

第1章 雷达系统与信号处理概述

1.1 雷达的历史和应用

英文中的“radar(雷达)”原本是一个缩略语,表示“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(雷达)”一词也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, 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 用实验证实了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传播是在20世纪30年代的中后期。在此期间,美国、英国、法国、德国、俄国、意大利和日本都开展了独立研究,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,遗憾的是该雷达在珍珠港的检测结果被忽视了。受到战争威胁的刺激,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。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。截至此时,绝大多数雷达都工作在高频和甚高频波段。后来,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,这二者奠定了微波波段雷达成功发展的基础,此后微波雷达成为主流。

二战中,上述各国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,由于在菲律宾缴获了美制雷达,并解密了德国技术,日本的雷达发展得到了促进。德国自己也装备了各种各样的地基雷达、舰载雷达和机载雷达。到二战结束时,各国的研究人员都充分认识到了雷达的价值,也认识到了微波波段和脉冲波形的优点。

雷达的早期发展离不开军事需要的驱动,直到今天,军队仍然是雷达的主要用户和雷达技术的主要开发者。雷达的军事用途包括了陆海空的监视、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。最常见的有一种警用交通雷达,该雷达用于判断车辆是否超速(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”,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。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。再有一种是空中交通管制雷达,它用于对航线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。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,它们可以对水面、冰面、森林覆盖、土地应用和污染情况进行观测。雷达的应用远不止于此,上述列举并不能涵盖雷达这一重要技术的全部应用范围。

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,但这里着重介绍脉冲雷达。同样,对于发射、接收天线合置的单基雷达(实际上通常是发射接收共用一个天线)以及发射、接收天线分离较远的双基雷达,虽然有很多结果是相同的,但这里更着重介绍单基雷达。这主要是因为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,本书的描述尽可能从数字信号处理的观点出发,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

雷达的主要用途可以大致分为检测、跟踪和成像。本书着重讨论这三种用途。由于信号获取和干扰抑制也是实现这些功能的必要技术,所以,也会对其进行重点讨论。

雷达最为基本的用途是对一类物体或者物理现象进行检测。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。通常会将接收机输出的幅度 $A(t)$ (t 表示时间) 与一个阈值 $T(t)$ 进行比较,以检测判决。这个阈值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自适应计算得到,第 6 章将会解释这种检测技术的合理性。当一个脉冲传播到距离 R 处后返回,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刻 t_0 , $A(t) > T(t)$,则可以认为在距离 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,则希望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 $+x$ 轴方向,角 θ 为方位角,角 ϕ 为俯仰角。如上所述,距离 R 可以根据脉冲发射到检测的耗时直接计算得出。俯仰角 ϕ 和方位角 θ 以天线指向为参考方向进行确定,这是因为通常只有目标出现在天线的主瓣中才能被检测到。速度通过测量目标回波的多普勒频移进行估计。从目标回波的多普勒频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出目标的三维运动情况。

^① 在真空中 $c = 2.99\ 792\ 458 \times 10^8$ m/s。除非需要非常高的精度,通常采用 $c = 3 \times 10^8$ m/s 的近似值。