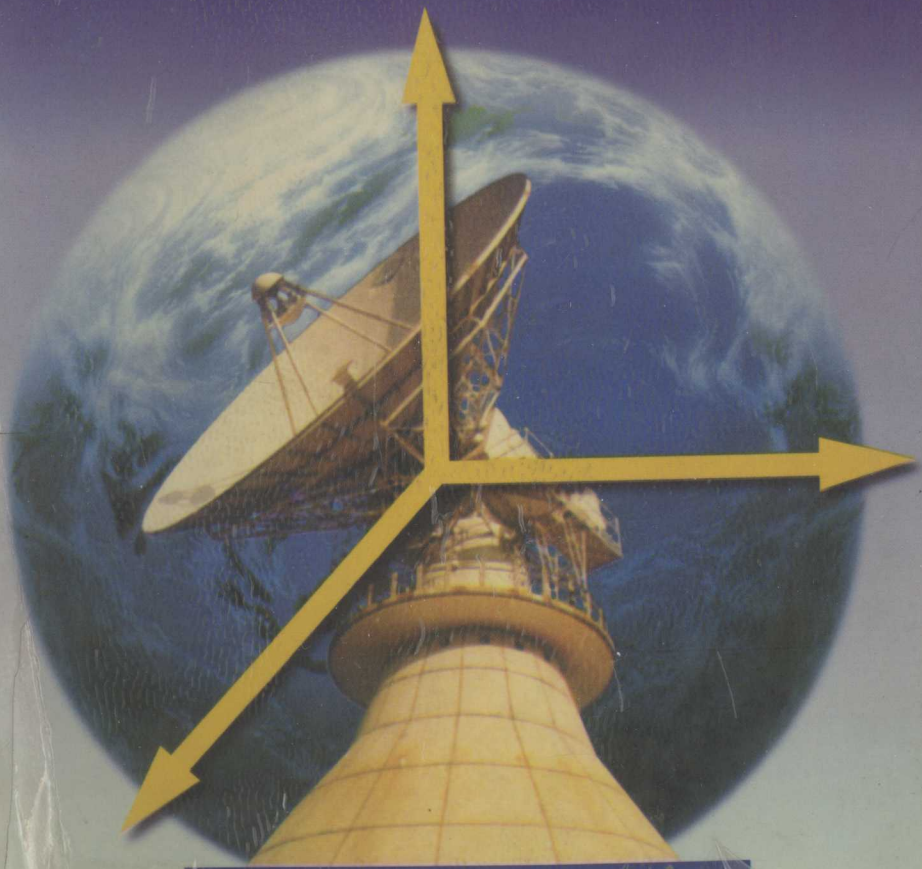
# 雷达极化信息处理及其应用

## Radar Polarization Information Processing And Application

庄钊文 肖顺平 王雪松 著



需要全本请访问 www.ertongbook.com

TN95
1021-3

# 雷达极化信息处理及其应用

# Radar Polarization Information Processing And Application

庄钊文　肖顺平　王雪松　著




一九九九年十月十三日




国防工业出版社
·北京·

792510

**图书在版编目(CIP)数据**

雷达极化信息处理及其应用/庄钊文等著. —北京:国防工业出版社,1999.1

ISBN 7-118-01938-0

Ⅰ.雷… Ⅱ.庄… Ⅲ.雷达-极化(电子学) Ⅳ.TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 15041 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 15¼ 396 千字

1999 年 1 月第 1 版 1999 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:26.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

# 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，国防科工委于1988年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是：

1. 学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖，内容具体、实用，对国防科技发展具有较大推动作用的专著；密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作，负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下，国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

国防科技图书出版基金
评审委员会

需要全本请访问 www.ertongbook.com

# 国防科技图书出版基金
# 第三届评审委员会组成人员

| | |
|---|---|
| 名誉主任委员 | 怀国模 |
| 主任委员 | 黄 宁 |
| 副主任委员 | 殷鹤龄　高景德　陈芳允　曾 铎 |
| 秘书长 | 崔士义 |
| 委员<br>（以姓氏笔划为序） | 于景元　王小谟　尤子平　冯允成<br>刘 仁　朱森元　朵英贤　宋家树<br>杨星豪　吴有生　何庆芝　何国伟<br>何新贵　张立同　张汝果　张均武<br>张涵信　陈火旺　范学虹　柯有安<br>侯正明　莫梧生　崔尔杰 |

# 前　言

雷达目标散射信号中的极化信息在目标检测、增强及识别研究中有着广泛的应用前景，但这一极为重要的信息资源至今尚未得到充分的开发利用。虽然早在雷达技术发展之初，人们就已认识到一般目标具有改变探测信号极化方式的特性，并在实验中发现了目标有效散射截面对于探测信号极化方式的依赖，但之后很长的一段时期内，由于雷达目标极化散射机理难以揭示，以及极化测量将大大增加雷达系统的复杂性、技术实现十分困难且造价昂贵，这些因素严重阻碍了雷达极化信息处理理论与技术的发展。

该领域的研究经过国内外相关研究领域科技工作者几十年的不懈努力，在已完善了的电磁波极化表征基础上，针对窄带雷达体制，已在诸如改善信号杂波功率比、电磁逆散射、增强目标检测和鉴别能力方面取得了一批极富学术价值的研究成果。这些成果零星地报道于各专业期刊上，即使出现在电磁学著作的部分章节中也属少见，雷达极化信息处理本身尚未形成系统的理论与应用成果以专著形式出版。

近十几年来，随着雷达极化测量基础理论、技术及宽带技术的逐步成熟并投入实用，开展宽带极化雷达体制下目标检测、增强及识别方面的研究工作已有现实基础，雷达极化信息处理正日益引起当今国内外学术界的浓厚兴趣和高度重视。作者近年来结合“八·五”、“九·五”国防预研工作，在雷达极化测量误差理论修正、目标宽带极化散射特性分析、极化滤波、极化特征机理与目标识别研究等方面取得了一批富有学术意义的研究成果，以此为主要基础，加之结合国内外相关方面的工作，以及作者多年来为博士生和硕士生相关课程的讲授心得，设想撰写一本有关雷达极化信

息处理理论与应用方面的专著，试图对该领域所涉及的主要问题进行理论概括和技术总结，供相关领域的科技工作者阅读参考。

全书共分七章。第一章着重归纳和评述了雷达极化信息在电磁信号滤波、目标增强、杂波抑制、目标检测及目标识别等方面的理论与应用成果；第二章整理了电磁波及其各种表征，给出了各种极化表示法及相应极化图之间的关系；第三章为雷达极化学基础理论，重点论述了反映目标极化特性信息的目标变极化效应及其描述、极化散射矩阵变换、极化不变量以及目标最优极化等基本概念和问题；第四章着重讨论了极化测量及其误差产生的物理成因、误差修正方法及其性能评估等内容；第五章详细论述了复杂电磁环境中抑制干扰、改善信号接收质量以及目标极化滤波增强的理论和技术；第六章阐明了极化频率稳定度、极化状态距离(PSD)的概念，深入论述了目标宽带动态极化结构特征识别的理论技术和实现方法；第七章深入探讨了变极化雷达目标识别问题，给出了作为极化域能量谱和极化谱概念基础的局部最优极化问题的详细数学推导，讨论了基于极化域能量谱和极化谱的目标识别技术和实现方法；书末附有二百余篇有关雷达极化信息处理方面的文献资料，这对于那些希望从事该领域研究的科技工作者无疑是有益的。本书由庄钊文教授、肖顺平副教授和王雪松博士执笔。庄钊文教授拟定全书内容并审校全稿。

在本书的撰写过程中，郭修煌研究员、郁文贤教授、何松华副教授、陈曾平副教授提供了多方面的支持和帮助，同时还得到了鲜明、黎湘、李盾、付耀文等博士生以及曾勇虎硕士、鹿小莺、涂智明、黄知涛、徐振海等硕士生的帮助。

本书的研究内容系国家教委跨世纪优秀人才基金项目的资助内容，书中的研究内容得到了郭桂蓉院士的直接指导，在评审鉴定过程中还得到国内著名电子学专家柯有安教授、毛士艺教授、梁甸农教授等人的指导和关怀，本书的出版得到国防科技出版基金的资助及基金办的大力支持，还有郑廷编辑的关心、支持和努力，在

此一并表示衷心感谢。

由于时间仓促，水平有限，书中不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

作　者

# 目　录


**第一章　绪论** …… 1

1.1　引言 …… 1

1.2　目标雷达特性及其描述 …… 2

1.3　极化检测、增强、滤波处理技术 …… 10

1.4　极化目标识别技术 …… 13

**第二章　电磁波的极化及其表征** …… 29

2.1　引言 …… 29

2.2　基本场方程 …… 30

2.3　电磁波极化状态的表征 …… 33

2.3.1　一般表征 …… 33

2.3.2　极化椭圆 …… 36

2.3.3　Jones 矢量 …… 41

2.3.4　极化比 …… 43

2.3.5　Stokes 矢量及 Poincare 极化球 …… 50

2.3.6　各种极化表示法之间的关系 …… 60

2.3.7　极化状态的平面图示法 …… 65

2.3.8　部分极化波的表征 …… 76

2.4　极化电波接收与天线的极化匹配 …… 93

**第三章　雷达极化学基础** …… 110

3.1　引言 …… 110

3.2　目标的变极化效应及其描述 …… 111

3.2.1　Sinclair 散射矩阵 …… 111

3.2.2　散射坐标系和极化基问题 …… 113

3.2.3　Mueller 矩阵和 Kennaugh 矩阵 …… 123

3.3 极化散射矩阵变换与极化不变量 …… 142
3.3.1 极化基变换 …… 142
3.3.2 散射矩阵的变基公式 …… 150
3.3.3 Mueller 矩阵与 Kennaugh 矩阵的变基公式 …… 158
3.3.4 极化不变量 …… 163
3.4 目标最佳极化 …… 178
3.4.1 相干情况下的目标最佳极化 …… 178
3.4.2 部分极化情况下目标的最佳极化 …… 216
3.5 极化轨道与局部最优极化 …… 236
3.5.1 极化轨道的数学描述与物理涵义 …… 236
3.5.2 极化轨道约束下的目标局部最优极化 …… 242
**第四章 极化的产生、测量及误差修正** …… 254
4.1 引言 …… 254
4.2 一般极化的产生 …… 255
4.3 极化测量及其误差产生的物理基础 …… 259
4.4 目标互易性的 Cameron 平均修正法 …… 266
4.5 散射矩阵的误差矩阵最小范数修正法 …… 271
4.6 小变质极化散射矩阵的幅相平均修正法 …… 281
4.7 修正法的性能评估 …… 283
**第五章 复杂电磁环境中的极化滤波处理** …… 291
5.1 引言 …… 291
5.2 目标和干扰环境的极化特性 …… 293
5.3 复杂电磁环境中极化信号的优化接收 …… 299
5.3.1 单信号源-干扰源情况下的极化优化处理 …… 300
5.3.2 复杂电磁环境下极化信号的极化优化接收 …… 318
5.3.3 多信号源-干扰源情况下的极化优化处理 …… 329
5.3.4 部分极化情况下极化信号的极化优化处理 …… 344
5.4 利用非相干变极化接收技术估算散射源参数 …… 352
5.5 杂波环境中目标的极化滤波增强 …… 359
**第六章 目标动态极化结构特征识别** …… 378
6.1 引言 …… 378

需要全本请访问 www.ertongbook.com

6.2 目标宽频带极化结构与描述 …… 379
6.3 极化平面图的目标识别技术 …… 383
6.4 极化状态距离(PSD)的目标识别技术…… 393
6.5 伪本征极化的目标识别技术 …… 406
6.6 零极化目标识别技术…… 420
**第七章 极化域谱特征目标识别** …… 428
7.1 引言…… 428
7.2 极化轨道约束的物理意义和数学基础 …… 430
7.3 圆环极化轨道上目标散射能量最优化 …… 433
7.4 大圆极化轨道上的局部最优极化 …… 436
7.5 目标极化散射特性的谱描述与识别…… 442
7.5.1 Van Zyl 极化谱简介 …… 442
7.5.2 极化域能量谱描述及特征提取与识别…… 443
7.5.3 极化谱描述及特征提取与识别…… 448
参考文献 …… 457

# Contents

**Chapter 1 Introduction** ..... 1
1.1 Introduction ..... 1
1.2 Target's radar characteristics and its description ..... 2
1.3 Polarization detection、enhancement、filtering processing techniques ..... 10
1.4 Polarization target recognition techniques ..... 13
**Chapter 2 Polarization of Electromagnetic Waves and its Description** ..... 29
2.1 Introduction ..... 29
2.2 Foundamental field equations ..... 30
2.3 Description of EM wave's polarization states ..... 33
2.3.1 General description ..... 33
2.3.2 Polarization ellipse ..... 36
2.3.3 Jones vector ..... 41
2.3.4 Polarization ratio ..... 43
2.3.5 Stokes vector and Poincare polarization sphere ..... 50
2.3.6 Relationship among various polarization description methods ..... 60
2.3.7 Representation of polarization state on maps ..... 65
2.3.8 Representation of partially polarized waves ..... 76
2.4 Polarized EM waves' reception and polarization match with antennas ..... 93
**Chapter 3 Foundations of Radar Polarimetry** ..... 110
3.1 Introduction ..... 110

3.2 Target's depolarization effect and its description ··· 111
3.2.1 Sinclair scattering matrix ··· 111
3.2.2 Problems on scattering coordinate system and polarization basis ··· 113
3.2.3 Mueller matrix and Kennaugh matrix ··· 123
3.3 Polarization scattering matrix transformation and polarization invariants ··· 142
3.3.1 Polarization basis transformation ··· 142
3.3.2 Transformation formulae of scattering matrix ··· 150
3.3.3 Transformation formulae of Mueller matrix and Kennaugh matrix ··· 158
3.3.4 Polarization invariants ··· 163
3.4 Target's optimal polarizations ··· 178
3.4.1 Target's optimal polarizations in the coherent case ··· 178
3.4.2 Target's optimal polarizations in the partially polarized case ··· 216
3.5 Polarization tracks and local optimal polarizations ··· 236
3.5.1 Mathmetical description and physics of polarization tracks ··· 236
3.5.2 Target's local optimal polarizations with the constraint of polarization tracks ··· 242
**Chapter 4 Polarization Generation、Measurement and Error Correction** ··· 254
4.1 Introduction ··· 254
4.2 Generation of general polarization ··· 255
4.3 Polarimetry and physics of errors ··· 259
4.4 Cameron mean modification method on target's reciprocity ··· 266
4.5 Least norm of error scattering matrix modification method ··· 271

4.6 Amplitude-phase mean modification method for little polluted polarization scattering matrix ····· 281
4.7 Evalution on modification methods' performances ····· 283
**Chapter 5 Polarization Filtering Processing in Complicate EM Enviroments** ····· 291
5.1 Introduction ····· 291
5.2 Polarization characteristic of target and interference enviroments ····· 293
5.3 Optimal reception of polarized signals in complicate EM enviroments ····· 299
5.3.1 Polarization optimization processing in the single-signal-interference case ····· 300
5.3.2 Optimal reception of polarized signals in complicate EM enviroments ····· 318
5.3.3 Polarization optimization processing in the multiple-signal-interference case ····· 329
5.3.4 Optimal Processing of Polarized Signals in the partially polarized case ····· 344
5.4 Evalution of scatterers' parameters using noncoherent reception technique ····· 352
5.5 Target polarization filtering and enhancement in clutter enviroments ····· 359
**Chapter 6 Target Recognition Based on Dynamic Polarization Structure Characteristics** ····· 378
6.1 Introduction ····· 378
6.2 Target's wide-band polarization structure and its description ····· 379
6.3 Target recognition technique using polarization maps ····· 383
6.4 Target recognition technique based on

polarization states' distance ····· 393
6.5 Target recognition technique using pseudo-eigen polarizations ····· 406
6.6 Target recognition technique using copolarization nulls ····· 420
**Chapter 7 Target Recognition Based on Spectrum Characteristics in the Polarization Domain** ····· 428
7.1 Introduction ····· 428
7.2 Physics and mathmetical foundation of polarization track constraints ····· 430
7.3 Optimization of target's scattering energy with the constraint of circlet polarization track ····· 433
7.4 Local optimal polarizations on the greatcircle polarization tracks ····· 436
7.5 Spectrum description of target's polarization scattering characteristics and recognition ····· 442
7.5.1 Brief introduction of Van Zyl's polarization spectrum ····· 442
7.5.2 Description and feature extracting on polarization-domain energy spectrums and recognition ····· 443
7.5.3 Description and feature extracting on polarization spectrum and recognition ····· 448
**Reference** ····· 457

# 第一章 绪 论

本章简要评述国内外学术界在雷达极化信息处理研究领域，具体包括检测、最优化/信号增强、杂波抑制及目标识别等方面所做的工作。

## 1.1 引 言

自雷达问世以来，尤其是在过去的30多年里，雷达测量系统的应用范围迅速扩大，同时其结构和性能也发生了巨大而深刻的变化。早期雷达系统，其目的主要用来检测目标是否存在，这在二次世界大战期间因为防空的需要尤显突出。而现代雷达，为了满足现代战争所提出的更高要求以及适应航天和遥感科技发展的需要，其结构上的复杂程度较早期雷达大为增加，同时其性能也更为优良，它不但比早期雷达能检测到更远距离的目标，而且具有精确测定诸如目标速度及位置等重要信息的能力。正在大力开发研究的下一代雷达测量系统，不但在参数测量性能上优于现代的雷达，同时还将具有认知目标，即对目标进行可靠分类/识别的能力，标志着雷达系统将由传统的参数测量向特征(非参数)测量的更高阶段迈进。尽管如此，有关目标散射波中信息的利用，到目前为止，还主要限于其幅度、相位、频移和波形，很少涉及极化信息的利用。

雷达目标散射信号中的极化信息在目标检测、增强、滤波及识别中有着巨大的应用潜力，但对这一信息资源的研究开发深度和广度还远不能与其重要性相称，主要是由于雷达目标极化散射机理难以揭示，以及极化测量将大大增加雷达系统的复杂性、技术实现十分困难且造价昂贵，这些因素严重阻碍了雷达极化信息处理

需要全本请访问 www.ertongbook.com