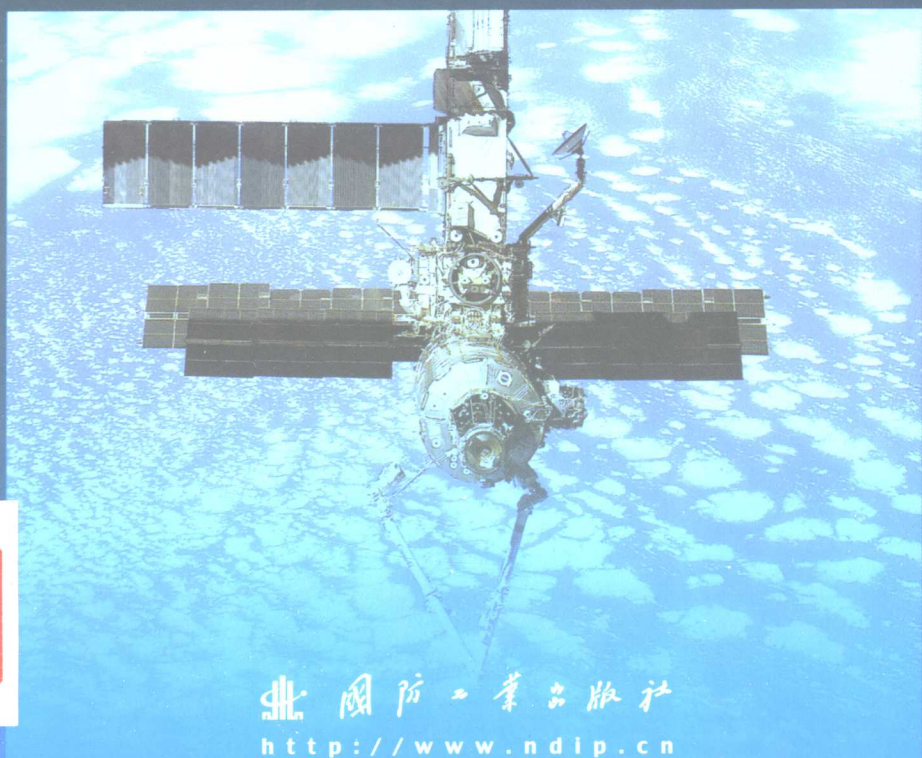


# 瞬态极化的 统计特性及处理

Statistical Characteristics and Processing  
of Instantaneous Polarization

—— 庄钊文 等著 ——



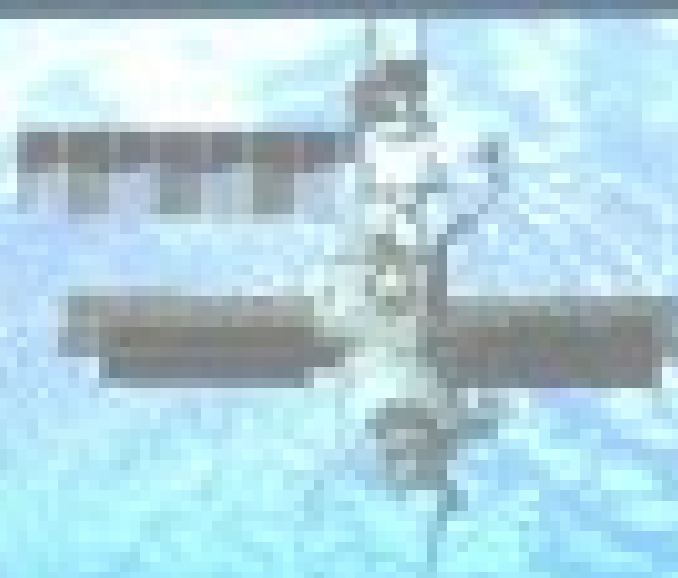
国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

# 瞬态极化的 统计特性及处理

Statistical Characteristics and Processing  
of Transient Polarization

—— 张明 著 ——



国防科技大学出版社

（长沙·岳麓山）

# 瞬态极化的统计特性及处理

## Statistical characteristics and Processing of Instantaneous Polarization

庄钊文 李永祯 肖顺平 著  
王雪松 代大海 邓 泳

国防工业出版社

·北京·

**图书在版编目(CIP)数据**

瞬态极化的统计特性及处理 / 庄钊文等著. —北京:  
国防工业出版社, 2005.3

ISBN 7-118-03863-6

I. 瞬... II. 庄... III. 信号处理-统计  
IV. TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 022821 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)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 10% 273 千字

2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月北京第 1 次印刷

印数 1—2000 册 定价 35.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购 (010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务 (010)68472764

## 前 言

随着现代战场电磁环境的日趋复杂恶劣,用动态的、统计的观点研究电磁波的极化现象,揭示波极化变化的内在规律,挖掘蕴含其间的物理本质,探究雷达目标与环境极化散射的特征机理,建立雷达目标极化散射统计特性的有效表征方法,最大限度地发掘和利用雷达传感系统所获得的电磁信息,使之能够适应复杂多变的战场环境、具备智能化的探测识别能力,已经成为雷达极化信息处理技术领域所面临的基础课题和一项紧迫任务。

雷达极化信息的充分挖掘为现代雷达系统探测、跟踪和识别能力的提高提供了广阔的空间。近十几年来,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,积累了一批基础性研究成果并逐渐迈入实用阶段,在电磁波极化表征、改善信号杂波功率比、增强目标检测和识别能力方面取得了一批极富学术价值的研究成果。作者近年来结合“九五”、“十五”国防预研、973 国家安全重大基础研究计划项目等工作,在电磁波和雷达目标电磁散射的时变极化特性、极化雷达的弱目标检测、真假目标鉴别及目标识别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,再结合国内外相关方面的工作,着手撰写一本有关瞬态极化统计特性及处理方面的专著,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。

全书共分五章。第一章着重归纳和评述了雷达极化信息在极化基础理论、极化信号处理和极化雷达系统及其目标的极化特性等方面的理论与应用成果以及亟需解决的前沿问题。第二章整理了电磁波的各种表征方法,侧重以动态的、统计的观点讨论了时变电磁波的瞬态极化特性,研究了电磁波瞬态极化的统计特性。第三

章从确定性和统计性两个角度分别研究了雷达目标电磁散射瞬态极化特性的表征问题,提出并深入研究了雷达目标的瞬态极化 Wigner - Ville 时频分布及瞬态极化一般类时频分布,并讨论了起伏目标瞬态极化散射矩阵的统计描述方法。第二章和第三章是本书的理论基础,揭示了时变电磁波和雷达目标极化散射的统计规律,为时变电磁波极化表征以及雷达目标极化散射特性的刻画、极化特性分析和特征提取等研究提供了理论依据和有用工具,对于目标检测、抗电子干扰和自动识别等工程应用无疑具有重要的实际意义。第四章着重讨论了窄带雷达目标的瞬态极化检测技术,给出了基于瞬态极化投影序列、瞬态极化 Stokes 子矢量序列、极化起伏度和目标散射信号估计等多种目标检测算法。第五章详细论述了有源真假目标的极化鉴别和弹头类目标的特征提取与识别问题,针对窄带全极化/窄带分时极化/宽带分时极化测量等不同雷达体制,提出了相应的有源假目标极化鉴别器,结合典型弹头类目标测量数据,深入论述了导弹目标的特征提取与识别的理论和实现方法。第四章和第五章是本书的应用研究部分,以弹道导弹防御为背景,对极化雷达的目标检测、真假目标鉴别及目标识别等应用问题进行了系统深入的探讨。书末附有近 200 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、李永祯博士、肖顺平教授、王雪松教授和博士生代大海、邓泳执笔。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,王国玉研究员、蒋兴才教授、曾勇虎博士后提供了多方面的支持和帮助,同时还得到了王涛、施龙飞、罗佳等博士生以及李金梁、吴晓芳、张伟华等硕士生的帮助。

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

2005 年 3 月

# 目 录

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 第一章 绪论 .....                     | 1  |
| 1.1 引言 .....                     | 1  |
| 1.2 雷达极化的基础理论 .....              | 3  |
| 1.2.1 电磁波极化的基础理论 .....           | 3  |
| 1.2.2 雷达目标极化散射的基础理论 .....        | 6  |
| 1.3 雷达极化信号处理 .....               | 8  |
| 1.3.1 极化滤波 .....                 | 9  |
| 1.3.2 极化检测 .....                 | 10 |
| 1.3.3 极化识别 .....                 | 12 |
| 1.4 极化雷达与目标的极化特性 .....           | 17 |
| 1.4.1 极化雷达系统 .....               | 17 |
| 1.4.2 雷达目标的极化特性 .....            | 19 |
| 第二章 电磁波瞬态极化的统计特性 .....           | 21 |
| 2.1 引言 .....                     | 21 |
| 2.2 电磁波极化的表征及物理内涵 .....          | 23 |
| 2.2.1 电磁波极化的传统表征方法 .....         | 23 |
| 2.2.2 电磁波的瞬态极化表征 .....           | 25 |
| 2.2.3 时域瞬态 Stokes 矢量的物理内涵 .....  | 36 |
| 2.3 随机极化波幅相的统计特性 .....           | 38 |
| 2.3.1 随机极化波幅度的概率分布 .....         | 39 |
| 2.3.2 随机极化波功率的概率分布 .....         | 43 |
| 2.3.3 幅度比和相位差的概率分布 .....         | 44 |
| 2.4 瞬态 Stokes 矢量的统计特性 .....      | 49 |
| 2.4.1 瞬态 Stokes 矢量各分量的概率分布 ..... | 50 |

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| 2.4.2 瞬态 Stokes 子矢量的概率分布 .....                    | 59  |
| 2.4.3 $(g_{HV0}, g_{HV1}, g_{HV2})$ 的联合概率分布 ..... | 64  |
| 2.5 瞬态极化投影矢量(IPPV)的统计特性 .....                     | 66  |
| 2.5.1 IPPV 各分量的概率密度函数 .....                       | 66  |
| 2.5.2 IPPV 各分量的联合概率分布 .....                       | 74  |
| 2.5.3 IPPV 的数字特征 .....                            | 77  |
| 2.6 非零均值电磁波瞬态极化的统计特性 .....                        | 85  |
| 2.6.1 电磁波幅度、相位的概率分布 .....                         | 85  |
| 2.6.2 瞬态 Stokes 矢量的概率分布 .....                     | 90  |
| 2.6.3 IPPV 的概率分布 .....                            | 98  |
| 2.7 随机极化波采样序列的统计特性 .....                          | 108 |
| 2.7.1 随机极化波采样序列均值的概率分布 .....                      | 109 |
| 2.7.2 极化聚类中心的概率分布 .....                           | 110 |
| 第三章 雷达目标散射瞬态极化的时频分布与统计表征 .....                    | 117 |
| 3.1 引言 .....                                      | 117 |
| 3.2 雷达目标极化散射的表征 .....                             | 118 |
| 3.2.1 雷达目标极化散射的经典表征 .....                         | 119 |
| 3.2.2 雷达目标散射的瞬态极化表征 .....                         | 121 |
| 3.3 雷达目标瞬态极化时频分布表征 .....                          | 141 |
| 3.3.1 雷达目标的瞬态极化 Wigner-Ville 分布 .....             | 142 |
| 3.3.2 雷达目标的一般类瞬态极化时频分析 .....                      | 153 |
| 3.4 雷达目标瞬态极化散射的统计描述 .....                         | 154 |
| 3.4.1 雷达目标瞬态极化散射矩阵的统计描述 .....                     | 154 |
| 3.4.2 典型电磁波激励下雷达目标散射波的统计特性 .....                  | 164 |
| 3.5 小结 .....                                      | 172 |
| 第四章 雷达目标的瞬态极化检测 .....                             | 174 |
| 4.1 引言 .....                                      | 174 |
| 4.2 基于瞬态极化投影序列(IPPS)的信号检测 .....                   | 176 |
| 4.2.1 极化雷达接收信号的 IPPS 表征及其统计分布 .....               | 176 |
| 4.2.2 极化已知情况下信号检测算法的设计及其性能分析 .....                | 181 |

|                                          |            |
|------------------------------------------|------------|
| 4.2.3 极化未知情况下信号检测算法的设计及其性能分析 .....       | 190        |
| 4.3 基于瞬态 Stokes 子矢量序列 (ISVS) 的信号检测 ..... | 203        |
| 4.3.1 极化雷达接收信号的 ISVS 表征及其统计分布 .....      | 203        |
| 4.3.2 极化已知情况下信号检测算法的设计及其性能分析 .....       | 207        |
| 4.3.3 极化未知情况下信号检测算法的设计及其性能分析 .....       | 213        |
| 4.4 相参脉冲雷达目标检测的新方法 .....                 | 219        |
| 4.4.1 脉冲雷达接收信号的 PIPPS 表征及其概率分布 .....     | 219        |
| 4.4.2 基于 PIPPS 的脉冲雷达目标检测算法的设计 .....      | 222        |
| 4.4.3 雷达目标径向速度的提取 .....                  | 226        |
| 4.4.4 检测性能的仿真分析 .....                    | 227        |
| 4.5 小结 .....                             | 232        |
| <b>第五章 真假目标的瞬态极化鉴别与识别 .....</b>          | <b>234</b> |
| 5.1 引言 .....                             | 234        |
| 5.2 窄带全极化测量雷达系统有源假目标的极化鉴别 .....          | 236        |
| 5.2.1 有源假目标的极化特性 .....                   | 236        |
| 5.2.2 窄带雷达目标的极化散射特性 .....                | 242        |
| 5.2.3 有源假目标的极化鉴别 .....                   | 254        |
| 5.2.4 极化鉴别算法的应用策略 .....                  | 261        |
| 5.3 窄带分时极化测量雷达的有源假目标瞬态极化鉴别 .....         | 263        |
| 5.3.1 有源假目标的 IPPV 特性 .....               | 264        |
| 5.3.2 雷达目标回波的 IPPV 特性 .....              | 265        |
| 5.3.3 有源假目标的瞬态极化鉴别 .....                 | 271        |
| 5.4 宽带分时极化测量雷达的有源假目标瞬态极化鉴别 .....         | 275        |
| 5.4.1 有源假目标的极化特性 .....                   | 275        |
| 5.4.2 雷达目标的高分辨极化特性 .....                 | 277        |
| 5.4.3 有源假目标的瞬态极化鉴别 .....                 | 284        |
| 5.5 地基雷达防御系统的有源假目标极化抑制能力 .....           | 293        |
| 5.5.1 GBR 地基防御系统概述 .....                 | 294        |
| 5.5.2 有源假目标极化抑制能力的分析 .....               | 296        |
| 5.6 弹道导弹目标的瞬态极化识别 .....                  | 298        |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 5.6.1 弹道导弹目标的瞬态极化特征提取与识别 ..... | 299 |
| 5.6.2 仿真实验与结果分析 .....          | 310 |
| 5.7 小结 .....                   | 311 |
| 参考文献 .....                     | 313 |

# Contents

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Chapter 1 Introduction</b>                                              | 1  |
| 1.1 Introduction                                                           | 1  |
| 1.2 The basic theory on radar polarization                                 | 3  |
| 1.2.1 The polarization basic theory of EM waves                            | 3  |
| 1.2.2 The polarization basic theory of radar target's scattering           | 6  |
| 1.3 Radar polarization information processing                              | 8  |
| 1.3.1 Polarization filtering                                               | 9  |
| 1.3.2 Polarization detection                                               | 10 |
| 1.3.3 Polarization recognition                                             | 12 |
| 1.4 Polarimetric radar and target's polarization characteristics           | 17 |
| 1.4.1 Polarimetric radar system                                            | 17 |
| 1.4.2 Polarization characteristics of radar targets                        | 19 |
| <b>Chapter 2 Statistics of EM waves' instantaneous polarization(InPol)</b> | 21 |
| 2.1 Introduction                                                           | 21 |
| 2.2 The description and physical mechanism of EM waves' polarization       | 23 |
| 2.2.1 The traditional description of EM waves' polarization                | 23 |
| 2.2.2 The InPol description of EM waves                                    | 25 |
| 2.2.3 The physical mechanism of instantaneous Stokes vector in time domain | 36 |
| 2.3 The statistical properties of random EM waves' amplitude and phase     | 38 |

|                  |                                                                                                          |            |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.3.1            | The probability density function (PDF) of random EM waves' amplitude .....                               | 39         |
| 2.3.2            | PDF of random EM waves' power .....                                                                      | 43         |
| 2.3.3            | PDFs of random EM waves' amplitude ratio and phase difference .....                                      | 44         |
| 2.4              | The statistical properties of the instantaneous Stokes vector .....                                      | 49         |
| 2.4.1            | PDF of each component in instantaneous Stokes vector .....                                               | 50         |
| 2.4.2            | PDF of instantaneous Stokes sub - vector .....                                                           | 59         |
| 2.4.3            | The joint PDF of $(g_{HV0}, g_{HV1}, g_{HV2})$ .....                                                     | 64         |
| 2.5              | The statistical properties of InPol projection vector (IPPV) .....                                       | 66         |
| 2.5.1            | PDF of each component in IPPV .....                                                                      | 66         |
| 2.5.2            | The joint PDF of IPPV's components .....                                                                 | 74         |
| 2.5.3            | Numerical characteristics of IPPV .....                                                                  | 77         |
| 2.6              | The statistical properties of Non - zero - mean EM wave's InPol .....                                    | 85         |
| 2.6.1            | PDFs of EM waves' amplitude and phase .....                                                              | 85         |
| 2.6.2            | PDF of InPol Stokes vector .....                                                                         | 90         |
| 2.6.3            | PDF of IPPV .....                                                                                        | 98         |
| 2.7              | The statistical properties of random polarization sampling sequences .....                               | 108        |
| 2.7.1            | PDF of the mean of random polarization sampling sequences .....                                          | 109        |
| 2.7.2            | PDF of polarization cluster center .....                                                                 | 110        |
| <b>Chapter 3</b> | <b>Time - frequency distribution and statistical descriptions of radar target InPol scattering .....</b> | <b>117</b> |
| 3.1              | Introduction .....                                                                                       | 117        |
| 3.2              | The descriptions of radar target EM scattering .....                                                     | 118        |
| 3.2.1            | The traditional description of radar target polarization scattering .....                                | 119        |

|                  |                                                                                                                  |            |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.2.2            | InPol description of radar target EM scattering                                                                  | 121        |
| 3.3              | Time – frequency distribution description of radar target InPol scattering                                       | 141        |
| 3.3.1            | InPol Wigner – Ville distribution of radar target                                                                | 142        |
| 3.3.2            | The common InPol Time – frequency analysis of radar target                                                       | 153        |
| 3.4              | Statistical description of radar target InPol scattering                                                         | 154        |
| 3.4.1            | Statistical description of radar target InPol scattering matrix                                                  | 154        |
| 3.4.2            | Statistical properties of scattering wave of radar target inspired by typical EM wave                            | 164        |
| 3.5              | Summary                                                                                                          | 172        |
| <b>Chapter 4</b> | <b>InPol detection of radar target</b>                                                                           | <b>174</b> |
| 4.1              | Introduction                                                                                                     | 174        |
| 4.2              | Signal detection based on InPol projection sequence (IPPS)                                                       | 176        |
| 4.2.1            | IPPS description and statistical properties of received signal                                                   | 176        |
| 4.2.2            | Design of signal detection algorithms and analysis of detection performance when signal polarization is known    | 181        |
| 4.2.3            | Design of signal detection algorithms and analysis of detection performance when signal polarization isn't known | 190        |
| 4.3              | Signal detection based on instantaneous sub – Stokes vector sequence (ISVS)                                      | 203        |
| 4.3.1            | ISVS description and statistical properties of received signal                                                   | 203        |
| 4.3.2            | Design of signal detection algorithms and analysis of detection performance when signal polarization is known    | 207        |
| 4.3.3            | Design of signal detection algorithms and analysis of detection performance when signal polarization isn't known | 213        |
| 4.4              | A Novel target detection algorithm aiming at coherent pulse radar system                                         | 219        |
| 4.4.1            | PIPPS description and statistical properties of received signal of pulse radar                                   | 219        |

|                                                                                                  |                                                                                                                    |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.4.2                                                                                            | Design of pulse radar target detection algorithms<br>based on PIPPS .....                                          | 222        |
| 4.4.3                                                                                            | Extracting radial speed of radar target .....                                                                      | 226        |
| 4.4.4                                                                                            | Simulation analysis of detection performance .....                                                                 | 227        |
| 4.5                                                                                              | Summary .....                                                                                                      | 232        |
| <b>Chapter 5 InPol discrimination and recognition between radar<br/>targets and decoys .....</b> |                                                                                                                    | <b>234</b> |
| 5.1                                                                                              | Introduction .....                                                                                                 | 234        |
| 5.2                                                                                              | Polarization discrimination of active – decoys for narrowband<br>full – polarimetric radar .....                   | 236        |
| 5.2.1                                                                                            | Polarization characteristics of active – decoys .....                                                              | 236        |
| 5.2.2                                                                                            | Polarization scattering characteristics of narrowband<br>radar target .....                                        | 243        |
| 5.2.3                                                                                            | Polarization discrimination of active – decoys .....                                                               | 254        |
| 5.2.4                                                                                            | Application Strategies of the polarization discrimination<br>algorithm .....                                       | 261        |
| 5.3                                                                                              | InPol discrimination of active – decoys for narrowband<br>timesharing polarization measurement radar .....         | 263        |
| 5.3.1                                                                                            | IPPV characteristics of active – decoys .....                                                                      | 264        |
| 5.3.2                                                                                            | IPPV characteristics of wave scattered by radar target .....                                                       | 265        |
| 5.3.3                                                                                            | InPol discrimination of active – decoys .....                                                                      | 271        |
| 5.4                                                                                              | InPol discrimination of active – decoys for broadband time-<br>sharing polarization measurement radar .....        | 275        |
| 5.4.1                                                                                            | Polarization characteristics of active – decoys .....                                                              | 275        |
| 5.4.2                                                                                            | High – resolution polarization scattering characteristics of<br>radar target .....                                 | 277        |
| 5.4.3                                                                                            | InPol discrimination of active – decoys .....                                                                      | 284        |
| 5.5                                                                                              | Analysis of polarimetric active – decoys suppression capacity<br>for the ground – based radar defense system ..... | 293        |
| 5.5.1                                                                                            | Introduction of GBR defense system .....                                                                           | 294        |

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.5.2 Analysis of polarimetric active – decoys restraining capacity .....              | 296 |
| 5.6 InPol recognition of ballistic missile targets .....                               | 298 |
| 5.6.1 InPol feature – extraction and recognition of ballistic<br>missile targets ..... | 299 |
| 5.6.2 Simulation experiments and analysis of the results .....                         | 310 |
| 5.7 Summary .....                                                                      | 311 |
| <b>Reference</b> .....                                                                 | 313 |

# 第一章 绪 论

电磁波的极化现象以及雷达目标的变极化效应早在 20 世纪 50 年代就已经受到学术界的广泛关注<sup>[2,4,5,22]</sup>。在随后的几十年中,雷达极化问题的研究引起了美、俄、英、法、意、日等发达国家浓厚的研究兴趣,积累了一批基础性研究成果并逐渐迈入实用阶段<sup>[7~10]</sup>。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,具体包括极化基础理论、极化信号处理、极化雷达与目标极化特性等方面所做的工作。

## 1.1 引 言

现代局部高技术战争,尤其是海湾战争、科索沃战争,以及举世瞩目的美军对阿富汗和伊拉克的军事行动,都从正反两个方面显示了战场的感知能力以及传感系统在恶劣环境中的对抗性能对现代战争所起的重要作用,要求新一代战场感知信息处理系统具备在恶劣气候条件和复杂战场环境中鉴别真假目标、克服杂波及电子干扰和有效识别目标属性等能力。现代雷达作为一种全天候、远距离、高精度的战场感知手段,在空中预警探测、战场态势侦察与感知、空中目标监视和精确打击武器控制等诸多方面都扮演着不可或缺的重要角色,不仅能够对目标进行探测、定位、跟踪以及参数估计,而且能够对飞机、舰船、地表、地上的移动目标成像,并完成对目标的识别等功能。随着电子战、信息技术的飞速发展,现代战场电磁环境的日益高度复杂恶劣,对战场传感系统,特别是单极化雷达系统的探测性能、感知能力及生存能力提出了日益严峻的挑战。

雷达目标的极化特性继其能量、频率和相位特性之后,成为雷达信息处理和电子对抗等领域的重要研究对象,在诸如反杂波、抗电子干扰、反隐身、目标几何结构刻画、特征提取与目标识别等方面显示出了巨大的潜力。具有全极化测量或极化捷变能力的新体制雷达迅速崛起,逐渐取代了传统的单极化体制雷达而成为现代雷达技术的发展潮流,极大地增强并扩展了雷达的探测功能和应用范围。极化信息的开发利用为雷达系统削弱恶劣电磁环境的影响、对抗有源干扰、抑制环境杂波、反隐身和鉴别目标等方面,提供了极具潜力的技术途径。单极化探测系统只是从一个侧面反映了目标的属性,而极化信息的利用并不是一个简单的融合处理过程,而是需要从目标电磁散射机理层面出发提出新思路、新方法,从而使雷达系统性能得到质的提高。

历经半个世纪的曲折发展,美、俄、英、法、德、意、加拿大、荷兰等诸多发达国家对雷达极化学基础理论、雷达目标极化特性、高速极化捷变、极化成像雷达技术等基础性课题开展了深入研究,极大地促进了极化雷达技术的发展,并取得了比较丰硕的研究成果,并且极大地推动了雷达技术的发展<sup>[1~3]</sup>。但是,在经典雷达极化学中,关于电磁波、天线和目标极化散射特性的种种表述和理论一般都隐含所研究对象是“时谐性”或“窄带性”的,同其它雷达信息资源相比,现代雷达系统对极化信息资源的开发利用还十分有限,极化信息处理对于雷达技术的巨大推动潜力尚未得到充分的发掘。1999年,王雪松率先提出了“瞬态极化”的概念<sup>[7]</sup>,以此为核心建立了全新的极化信息处理的基本理论框架,为确定性时变电磁波的极化表征、雷达目标动态极化散射特性刻画提供了有力的理论工具。

然而,在诸如雷达信号检测、目标检测与跟踪、真假目标的分类与识别等实际应用中,有意和无意的随机干扰以及雷达目标本身姿态在空中的不确定性等因素,使得电磁波和雷达目标电磁散射均存在一定的随机特性。现有文献关于随机极化波和起伏目标极化散射统计特性的刻画均隐含其是各态历经的平稳随机过程,