



无线通信中的 极化信息处理

✉ 郭彩丽 刘芳芳 冯春燕 曾志民 著

WIRELESS



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

■ 郭彩丽 刘芳芳 冯春燕 曾志民 著

无线通信中的 极化信息处理



WIRELESS

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

无线通信中的极化信息处理 / 郭彩丽等著. — 北京:
人民邮电出版社, 2015. 7
ISBN 978-7-115-37685-5

I. ①无… II. ①郭… III. ①无线电通信—极化 (电
子学)—信息处理—研究 IV. ①TN92

中国版本图书馆CIP数据核字 (2015) 第021695号

内 容 提 要

极化作为电磁波的固有性质, 是无线通信可资利用的重要信息。但在无线通信中, 对这一信息资源研究开发的深度和广度还远远不能与其重要性相称。本书围绕无线通信中极化信息处理的理论与技术展开, 共分为 7 章。第 1~2 章介绍了极化信息处理概况及极化基础理论; 第 3~6 章深入探讨了无线通信中极化信息处理的理论和方法, 包括极化信道模型、极化调制/解调、极化频谱感知、极化频谱共享等; 第 7 章搭建实验平台验证极化频谱共享系统的功能和性能。

本书可作为高等工科学学校通信等相关专业高年级本科生或研究生教材, 以及通信新技术培训参考书, 也可作为从事无线通信领域研究的科研人员与工程技术人员的技术参考用书。

-
- ◆ 著 郭彩丽 刘芳芳 冯春燕 曾志民
责任编辑 邢建春
责任印制 彭志环
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 19.5 2015 年 7 月第 1 版
字数: 486 千字 2015 年 7 月北京第 1 次印刷
-

定价: 89.00 元

读者服务热线: (010) 8105488 印装质量热线: (010) 81055316
反盗版热线: (010) 81055315

前言

过去的几十年里,无线通信主要通过开发电磁波时域、频域和空域的资源来提高频谱利用率,提升系统容量。随着无线通信技术的飞速发展和用户对数据业务宽带化、多样化需求的日益增加,传统时、频和空域的无线资源面临紧缺现状,制约了无线移动通信与业务应用的持续发展。极化作为无线信号传输介质——电磁波的固有性质,很自然将成为未来无线通信发展中的又一可资利用的重要信息。目前信号的极化信息已在雷达、光通信以及卫星通信中已显示出其巨大的应用潜力,但在无线通信中,对这一信息资源研究开发的深度和广度还远远不能与其重要性相称。充分挖掘和利用潜在的极化域资源是未来无线通信发展的重要研究方向。

但如何在无线通信中利用极化资源面临诸多挑战,如无线信道特有的多径和富散射特性会使信号的极化特性产生严重的去极化效应,极化状态将发生随机变化,这无疑对无线通信来说是个严峻的考验。本书作者正是围绕如何在无线通信中有效利用极化信息这一迫切需求,在国际上率先深入开展了无线极化信道建模、无线信号极化调制、无线信号极化感知、无线极化频谱共享等一系列新理论和新方法的研究,并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最新研究成果,作者着手撰写了这本有关无线通信中极化信息处理方面的专著,试图对该领域所涉及的主要问题和关键技术进行理论分析和总结,供相关领域的研究工作者阅读参考。

本书的研究均来自作者从事的实际研究工作,部分内容汇总了所承担的国家自然科学基金“基于认知与极化信号处理的功放能效研究”(项目编号:61271177)和“极化域频谱感知理论与技术研究”(项目编号:60902047)等项目的突出研究成果。本书成果将开创无线通信中极化信息处理的新的理论体系,并进一步丰富和完善极化信息处理基础理论。

本书系统论述了无线通信中极化信息处理的相关理论与技术,共分为7章。第1~2章系统全面地介绍了极化信息处理概况及极化基础理论,包括极化的表征、极化基的变换、极化状态的产生、极化波的最佳接收等;第3~6章深入探讨了无线通信中极化信息处理的相关理论和方法,包括极化信道建模、极化调制/解调、极化频谱感知、极化频谱共享等;第7章展示了基于极化信息处理的实验平台在极化频谱共享方面的有关功能和成果。

本书可作为高等工科学学校通信等相关专业高年级本科生或研究生教材，以及通信新技术培训参考书，也可作为从事无线通信领域研究的科研人员与工程技术人员的技术参考用书。

在本书的写作过程中，研究生厉东明、聂尧、吴晓彬、林琳、陈硕、乔荣、徐飞和袁小雨等做了大量工作，在此向他们表示衷心地感谢。

无线通信中的极化信息处理本身还在不断地完善和演进，加之作者的学识和水平有限，书中有疏漏甚至不妥之处，恳请读者批评指正。

作 者

2014 年 10 月于北京

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 引言	1
1.2 极化的历史	1
1.3 极化信息处理概况	3
1.3.1 雷达通信中的极化信息处理	3
1.3.2 光通信中的极化信息处理	8
1.3.3 卫星通信中的极化信息处理	10
1.3.4 无线通信中的极化信息处理	12
1.4 无线通信中极化信息处理面临的主要问题	13
1.4.1 无线信道去极化效应研究	14
1.4.2 无线通信中极化信息处理关键技术研究	14
1.4.3 面向极化信息处理的实验平台搭建与性能验证	15
参考文献	16
第 2 章 极化基础理论	22
2.1 极化概述	22
2.1.1 电磁波基本场方程	22
2.1.2 极化概念与极化椭圆	24
2.2 电磁波的极化表征	30
2.2.1 完全极化波表征	30
2.2.2 部分极化波表征	34
2.2.3 瞬态极化波表征	38
2.2.4 随机极化波表征	40
2.2.5 电磁波极化表征方法的相互关系	44
2.3 极化基及其变换	46
2.4 极化时频分布表征	48
2.4.1 电磁波瞬态极化短时傅里叶变换	48

2.4.2 电磁波瞬态极化 Wigner-Ville 分布	49
2.5 任意极化状态的产生	53
2.6 极化电波的最佳接收问题	55
2.6.1 任意极化接收原理	55
2.6.2 极化匹配与失配	56
参考文献	59
第 3 章 无线极化信道	60
3.1 概述	60
3.2 经典 MIMO 信道模型	60
3.3 无线极化信道模型	62
3.3.1 极化信道物理模型	63
3.3.2 极化信道解析模型	71
3.3.3 标准化工作中的极化信道模型	76
3.4 无线信道去极化效应分析	81
3.4.1 极化相关性与极化功率不平衡	81
3.4.2 极化模式色散和极化相关损耗	85
3.5 无线极化信道未来挑战及研究方向	91
参考文献	92
第 4 章 无线信号极化调制与解调	95
4.1 概述	95
4.2 无线信号极化调制解调理论	96
4.2.1 极化调制原理	96
4.2.2 极化解调原理	98
4.2.3 极化调制收发信机设计	99
4.2.4 极化调制性能	101
4.3 极化和传统幅—相联合调制解调理论	105
4.3.1 联合调制原理	105
4.3.2 联合解调原理	106
4.3.3 PAPM 收发信机设计	108
4.4 极化调制理论在绿色无线通信中的应用	109
4.4.1 基于极化调制理论的功放能效优化	110
4.4.2 基于联合调制理论的功放能效优化	119
4.4.3 基于联合调制理论的多载波系统功放能效优化	125
4.5 无线信号极化调制未来挑战及研究方向	132
参考文献	133
第 5 章 极化频谱感知	137
5.1 概述	137
5.2 极化感知模型	138
5.3 极化似然比检验	140
5.3.1 基于似然比检验的极化感知	141

5.3.2	加性高斯白噪声下的极化似然比检验	144
5.4	极化匹配滤波器	147
5.5	极化能量感知	149
5.5.1	基于能量最优加权的极化感知	150
5.5.2	基于虚拟变极化的极化能量感知	154
5.5.3	感知性能仿真分析	157
5.6	基于广义似然比检验的极化感知	162
5.6.1	R_s 已知, σ_η^2 未知的广义似然比检验	163
5.6.2	σ_η^2 已知, R_s 未知的广义似然比检验	164
5.6.3	R_s 和 σ_η^2 均未知的极化盲感知算法	166
5.6.4	感知性能仿真分析	171
5.7	基于瞬态 Stokes 矢量的极化感知	175
5.7.1	基于瞬态归一化 Stokes 矢量的极化感知	175
5.7.2	基于瞬态 Stokes 子矢量的极化感知	180
5.7.3	感知性能仿真分析	184
5.8	考虑 PMD 现象的极化感知	187
5.8.1	PMD 现象及其对感知性能的影响	188
5.8.2	频域差分极化感知算法设计	191
5.8.3	极化距离方差盲感知算法设计	192
5.8.4	感知性能仿真分析	197
5.9	非理想噪声下的极化感知	199
5.9.1	非理想噪声问题	200
5.9.2	非理想噪声下的极化盲感知	201
5.9.3	基于预白化的极化感知	202
5.9.4	感知性能仿真分析	205
5.10	考虑空间到达角的极化感知	206
5.10.1	极化频谱感知中的到达角问题	207
5.10.2	W 未知, R_s 和 σ_η^2 已知的广义似然比检验	210
5.10.3	R_s 和 W 未知, σ_η^2 已知的广义似然比检验	212
5.10.4	σ_η^2 , R_s 和 W 未知的广义似然比检验	213
5.10.5	感知性能仿真分析	215
5.11	极化频谱感知未来挑战及研究方向	217
	参考文献	218
第 6 章	无线极化频谱共享	223
6.1	概述	223
6.2	基于变极化的极化域频谱共享	224
6.2.1	系统及信号描述	224
6.2.2	极化域频谱共享模型	225
6.2.3	基于干扰约束的极化域频谱共享算法	228

6.2.4	基于半盲极化适配的极化域频谱共享算法	229
6.2.5	频谱效率分析	232
6.2.6	仿真分析	235
6.3	基于联合变极化和波束成形的极化-空域频谱共享	239
6.3.1	系统及信号描述	240
6.3.2	极化-空域频谱共享模型	242
6.3.3	基于联合变极化和波束成形的极化-空域频谱共享算法	245
6.3.4	理论分析	248
6.3.5	仿真分析	252
6.4	PMD 现象下的极化域/极化-空域频谱共享	258
6.4.1	影响 PMD 现象的因素分析	258
6.4.2	PMD 现象对极化频谱共享的影响分析	260
6.4.3	基于子载波分簇的极化频谱共享算法	261
6.4.4	实验和仿真分析	263
6.5	具有极化频谱共享功能的 OFDM 发射机原理框图设计	267
6.5.1	具有 PSS 功能的 OFDM 发射机原理框图	267
6.5.2	具有 PSSS 功能的 OFDM 发射机原理框图	268
6.5.3	具有 DCPSS 功能的 OFDM 发射机原理框图	269
6.6	极化频谱共享未来挑战及研究方向	270
	参考文献	271
第 7 章	基于极化信息处理的无线频谱共享系统实验平台	274
7.1	平台结构设计	274
7.1.1	平台网络结构	274
7.1.2	平台节点架构	275
7.2	平台的设计与实现	278
7.2.1	物理层的设计与实现	279
7.2.2	MAC 层的设计与实现	282
7.2.3	PHY-MAC 接口设计与实现	287
7.3	遇到的问题及解决方法	288
7.3.1	RFX2400 子板引入的相位差问题	288
7.3.2	平台发送端相位差校准问题	291
7.3.3	调制/解调方式选择问题	292
7.4	平台测试及分析	293
7.4.1	相位差校准测试及分析	294
7.4.2	任意极化状态的发送和识别测试及分析	294
7.4.3	极化域频谱共享平台的性能测试	295
	参考文献	299
附录	英文缩略语	300

第 1 章

概 论

1.1 引言

无线通信技术的飞速发展始终以满足人们多样化、宽带化的业务需求为主要目标。预计到 2016 年全球无线业务的数据流量需求将达到 129 艾字节^[1]，面对这一“爆炸式”增长，无线通信业已存在的频谱资源供需矛盾、异构网络频谱共享以及高能耗等问题将更加突出，亟待取得信息获取、变换、存储、传输、交换、应用等信息处理技术的重大突破。长期以来，无线通信的信息处理技术基本上是围绕信号的幅度、相位和频率特性展开。而根据电磁学理论，一个电磁波除了具有幅度、相位、频率特性之外，还具有极化这一基本特征。事实上，无线信号作为电磁波所天然具有的极化特性也是信息处理可利用的重要资源。目前，极化信息处理在光、雷达和卫星通信领域均获得了广泛关注，特别是在雷达目标检测、增强、滤波及识别中已显示出其巨大的应用潜力^[2,3]，但无线通信中极化信息处理研究开发的深度和广度还远远不能与其重要性相称^[2,4]。

极化是电磁波的电场矢量在传播截面上随时间的变化轨迹^[3]。在无线通信中引入极化信息处理，将充分利用极化这一电磁波所固有的矢量属性，开拓极化域无线频谱资源利用的全新维度，从而进一步丰富无线信号的分析、处理与传输理论，能够从根本上有效缓解有限频谱资源日益紧张和匮乏的难题，可为解决未来无线通信系统容量提升、异构网络共存、绿色可持续发展等热点问题开辟新的途径，是无线通信最具理论价值和应用前景的研究方向之一。

本章从极化的历史入手，介绍了从自然界到学术界、从可见光极化到电磁波极化的应用与研究历程，重点阐述了极化信息处理在雷达、光通信、卫星通信和无线通信中的研究现状，并指出其在无线通信中应用所面临的主要问题。

1.2 极化的历史

自然界中的一些昆虫、鱼类和哺乳动物等生物能够轻易地分辨极化光和未极化光，并利用

光的极化特性来确定航向、控制运动路线等。与之相比，人类几乎是“极化盲”，使用肉眼很难分辨光的极化，通常需要借助极化滤波器等工具来进行辨别。人类历史上对极化的利用最早可以追溯到公元 8 世纪，维京人（Vikings）利用阳光照射到堇青石上所产生的极化光来判断太阳的位置，即使是在阴天、浓雾天等无法看见太阳的天气中，也能够波罗的海导航^[4]。

对于极化的最早科学研究记载由丹麦科学家 Erasmus Bartolinus 于 1669 年提出^[5]，他利用方解石晶体将一束入射光分解产生了“普通光”和“异常光”两束不同的折射光线。然而由于当时人们对光的物理特性的理解有限，Bartolinus 将这种双折射现象误解为是由于方解石晶体存在两个“孔道”而引起的。1690 年，荷兰科学家 Christian Huygens 继 Bartolinus 之后研究发现^[6]，方解石的两束折射光线的本质差别在于具有不同的极化，但仍然无法解释双折射现象的产生原因。

伴随着光学理论不断发展，人们对极化的理解和研究也在逐渐深入。直到 1808 年，法国科学家 Etienne Louis Malus 证实了极化是光的本质属性而非由晶体所产生^[7]。他将方解石晶体看作滤光器来研究光的极化，发现当极化光照射到方解石合适的位置时就会产生双折射现象，并给出了入射光为线极化光时方解石位置与折射光量之间的关系式。David Brewster 拓展了 Malus 的工作，在 1812 年得到了当反射光为完全线极化光时入射角与折射率之间应满足的条件（这一发现被称为 Brewster 定律），并在 1816 年进一步得到了极化角和介电材料相对折射功率之间的关系^[8]。同年，法国物理学家 Augustin-Jean Fresnel 从理论上解释了极化的存在。1852 年，George Gabriel Stokes 引入了 4 个参量来表征极化、未极化和部分极化光，即著名的“Stokes 参数”，奠定了极化表征的数学理论基础^[9]。特别是在 1892 年，Henri Poincare 将所有可能的极化状态表征到圆球上，即“Poincare 极化球”，球面上每个点的纬度和经度唯一地定义了极化椭圆的偏心率和倾角。Poincare 极化球加深了人们对极化的直观理解，成为非常有用的极化状态表征工具^[2,4]。可以看出，上述研究主要是围绕自然界中可见光的极化属性展开的。

将极化的存在从可见光扩展到整个电磁波频段（如图 1-1 所示）则要从 1873 年说起，James Clerk Maxwell 成功地提出了电磁场方程组，预言了电磁波的存在^[10]，并相继引发了 Hermann von Helmholtz 和 Gustav Kirchhoff 等人对衍射理论的研究。在此基础上，1886 年德国物理学家 Heinrich Hertz 证明了电磁理论能够适用于无线电波^[11]等频率较低的波段^[4]，进而在 1888 年观察到了电磁波的极化特性^[10]。这一发现标志着电磁波现代应用的开端，激发了无线电波在通信、目标检测和测距等领域的广泛应用^[2]。同时也表明无线电波作为电磁波的一种，从本质上也具有极化属性。这是本书所阐述的极化信息处理技术能够应用于光通信之外的雷达、卫星通信和无线通信等领域的最为重要的理论前提。

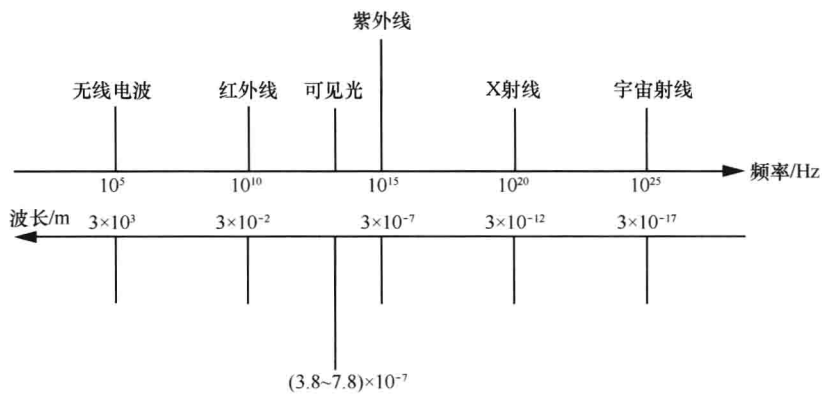


图 1-1 电磁波波谱

1.3 极化信息处理概况

关于极化信息处理技术的研究与应用,目前国内外的研究主要集中在雷达、光通信、卫星通信和无线通信等方面,下文将分别予以详细介绍。

1.3.1 雷达通信中的极化信息处理

围绕现代雷达技术核心关注的“目标在哪里以及是什么样的目标”这一问题,雷达中的极化信息处理利用电磁波本身的极化矢量性,在丰富表征雷达目标特征尤其是极化散射特性的基础上,通过极化测量及数据校准来获取目标的极化信息,进而采用极化滤波、目标极化检测、极化优化与增强、极化跟踪与关联等关键技术手段,充分挖掘其在极化雷达成像、抗干扰以及极化目标识别等领域的应用潜力,从而极大增强并扩展了雷达的探测功能和应用范围。雷达中的极化信息处理涉及电磁散射、信号处理、电子对抗以及模式识别等多个学科领域,已成为现代雷达技术的重要分支^[3]。下文将在介绍雷达极化信息处理研究历史的基础上,重点阐述目标极化检测、干扰抑制和目标识别等较为活跃研究领域的现状及未来发展趋势。

雷达极化信息处理技术研究的萌芽起源于1926~1929年, Wolfgang Pauli 在量子力学研究中引入了“旋量(Spinor)”这一概念,被证明是描述极化雷达问题的非常成功的理论工具。随后同样是在量子力学领域, Norbert Wiener 研究谐波分析方法时,于1929年发现了部分极化波的相干矩阵是 Pauli 旋量矩阵和 Stokes 参数的线性组合。Pauli 和 Wiener 的这些研究直接启发了 R. Clark Jones 的研究工作,并促使 Jones 所在的 MIT 研究团队产生了大量的极化波传播分析理论,逐渐形成了“Jones 运算(Jones Calculus)”,对极化雷达气象学等前向散射雷达分析理论研究具有重要价值^[4]。

雷达极化信息处理技术研究真正的开端,主要是针对如何描述更多更全面的雷达目标特征信息,分别从相干散射目标和非相干散射目标两方面开展了目标极化特性表征的一系列研究。针对相干散射目标,1946年,美国俄亥俄州立大学天线实验室的 George Sinclair 提出了雷达目标的“极化散射矩阵”,认为可将雷达目标视作极化变换器(Polarization Transformer),并建立 2×2 维的相干散射矩阵将目标散射的能量、相位和极化特性以统一、直观而方便的形式表达出来,完整地描述了雷达目标相干电磁散射性能^[2]。针对非相干散射目标,先后提出了 Mueller 矩阵、Kennaugh 矩阵、极化协方差矩阵和相干矩阵等一系列表征方法,用来描述部分极化波激励下的非相干散射目标极化特性。其中, Mueller 矩阵和 Kennaugh 矩阵相互联系并且可以互推,即二者所包含的关于目标电磁散射特性信息是完全相同的;但物理意义不同, Mueller 矩阵描述了目标对于入射波的变极化效应,而 Kennaugh 矩阵则反映了雷达接收功率与收/发天线极化的依赖关系,可见二者描述了同一个电磁散射过程的两个不同的方面^[2]。这些研究通过雷达目标散射矩阵定量描述了目标的变极化效应,不但取决于目标本身的物理特性,同时也与入射波频率、雷达视角以及目标姿态等客观观测条件有关^[3]。

随后,以极化散射矩阵为基础的各种目标极化特性的描述方法应运而生。Edward Morton Kennaugh 于1952年针对单静态条件、互易及相干情况给出“目标最佳极化”的概念,描述了雷达共极化接收功率为极值时所对应的极化状态特征^[12]。可以证明,在一般情况下,对任

何有确定散射矩阵的目标,都唯一地存在最佳极化,从而构成了识别目标的极化特征空间^[2]。Copeland 在 Kennaugh 的指导下提出了第一个利用雷达极化信息对互易对称目标进行分类与识别的技术方案^[4, 13]。借鉴这一研究思路, J. Richard Huynen 通过大量关于相干极化散射矩阵的测量工作,进一步发展了 Kennaugh 的目标最佳极化概念,提出了著名的 Huynen 极化交叉的概念,并由极化散射矩阵得到了目标的幅度、方位角、跳跃角、螺旋角和特征角等独立参数,并阐述了这 5 个独立参数与目标物理结构属性之间的内在联系。按照 Huygen 的描述方法,可利用雷达目标的极化特性将其粗略地划分为线状目标、球状目标、对称目标、螺旋目标与其他目标类别等。此外,目标极化特性还可通过由极化散射矩阵获得的极化不变量来进行描述。极化不变量是与接收天线极化或视距条件下天线旋转角度无关的参量,如散射矩阵行列式的值、散射矩阵的迹、功率散射矩阵行列式的值、功率散射矩阵的迹和去极化系数等,其优势在于不受法拉第效应和天线极化误差的影响,仅与目标散射特性有关,从而可以用于目标分类与识别^[14]。可见,早期的目标极化特性研究主要应用于雷达目标分类与识别中,这些研究显示了极化在目标检测、分类与识别等领域的应用潜力,为雷达极化信息处理研究奠定了初步的理论基础。

在随后的几十年中,借助于极化雷达实用技术水平的日益提高,雷达极化信息处理得到不断的完善与发展。国际上,美国于 1955 年 7 月启动了 GITA235 项目,旨在利用极化来区分雷达目标和杂波^[4]。在弹道导弹防御和近地空间/深空探测等多个项目的牵引下,以 1958 年研制成功的 Millstone Hill 雷达和随后的 AMRAD 雷达为标志,美国研制了一系列大型空间探测和深空探测极化雷达。为提高实际雷达系统的变极化速度,美国佐治亚理工学院于 1980 年研制成功了极化捷变雷达,并通过极化编码技术进行脉冲压缩,在 1984 年实现了脉内极化捷变雷达。与此同时,俄罗斯等国也涌现了大量关于雷达极化信息处理的研究,同样是以极化雷达目标与杂波分析等研究为主进行展开。直到 1985 年,世界上第一部机载极化合成孔径雷达(PolSAR, Polarimetric Synthetic Radar)问世,由美国加州理工学院的喷气推进实验室为美国国家航空航天局设计并生产,标志着 PolSAR 进入了实用阶段。以此为开端,美国、前苏联、日本、加拿大和欧洲各国相继研发了能实现对地全极化观测的机载/星载 SAR 系统,使 PolSAR 迅速成为 SAR 发展的主流方向之一。在国内,中国科学院电子学研究所于 1976 年率先开展了机载 SAR 的研制工作,由中国电子科技集团公司第三十八研究所研制的机载双极化 SAR 系统于 2004 年试飞并获得了一批 HH-HV、VH-VV 双极化数据,而且我国新一代星载 SAR 雷达也将具备多频段、多极化同时成像的能力,以满足军事应用和民用遥感的需求。另一方面,研制成功并投入使用的极化雷达系统在实际目标检测、识别等方面体现出了良好的性能,不仅大大拓宽了雷达的探测功能和应用领域,也为进一步开展理论研究积累了丰富的实测极化数据,从而激发了雷达极化信息处理的研究热潮,并不断促进其向高分辨率和全极化方向发展^[3]。

目前,雷达极化信息处理围绕如何获取与处理极化信息,形成了相对成熟的窄带极化信息处理理论,并逐步从窄带、单极化、低分辨率向宽带、全极化测量以及高分辨成像方向发展。其中,宽带和高分辨成像技术提高了对雷达目标细微特征的表征能力,全极化描述了更为完整的目标散射特性并刻画了目标表面粗糙度、对称性和取向等其他参数难以表征的目标物理结构。高分辨和全极化相结合使极化雷达成像与目标特征提取等极化信息处理理论与技术成为雷达学界研究的前沿课题之一。下文将从目标检测、干扰抑制及目标识别等关键技术领域入手,具体阐述雷达极化信息处理的研究与应用现状。

(1) 目标检测

目标检测是利用目标和其环境各自不同的极化散射特性来判断目标是否存在。相比利用目标回波幅度信息的能量检测等方法,极化检测可利用由回波幅度比和相位差共同确定的极化信息,重点关注回波信号中目标和杂波的极化信息差异,优势在于能够在一定信噪比或信杂比情况下提高目标的检测概率,或在一定的目标检测概率下降低所需信杂比,有助于雷达对弱目标的探测^[2]。

尽管目标检测利用的是极化信息,从本质上来讲仍然是一个基于二元假设的检测问题,即某分辨单元是否包含目标。极化检测的基本思想是建立目标和杂波的极化散射统计模型,然后选用合适的检测统计量,进而建立相应的极化检测算法。根据检测目标类型不同,目标极化检测可分为点目标极化检测和面目标极化检测两种。由于面目标是由多个点目标组成,面目标极化检测可在点目标极化检测的基础上通过图像匹配等方式实现,因此下面重点介绍点目标的极化检测研究^[3],主要集中在目标增强和极化检测两方面^[15]。

目标增强是为了在一定的噪声或杂波背景下,选择适当的雷达发射极化和接收极化,使得目标回波最强或信杂比最大,主要以极化测量及数据校准等技术为实现基础^[2]。早期的极化雷达如 Millstone Hill 雷达和 AMRAD 雷达等,采取的是单极化发射、全极化接收的极化测量模式,这种模式仅能够获取目标散射矩阵的部分元素。为了能够获取完整的目标极化散射特性信息,分时极化测量通过两个正交极化通道“轮流发射、同时接收”^[16],成为最早出现也是目前应用广泛的全极化测量技术,主要应用于雷达目标相对静态的场景。考虑到雷达目标(例如高速弹道目标)可能存在空间位置和观测姿态的动态变化,同时极化测量采用两个正交极化通道“同时发射、同时接收”的模式,在单个脉冲内即可完成全极化测量。在极化测量获取极化散射矩阵信息并进行数据校准的基础上,Kostinski 和 Boerner 针对理想无噪/杂环境中非时变目标回波的极化增强,于 1985 年提出了著名的求解最佳极化的三步法原理^[17],并证明了无噪/杂环境中时变目标的极化增强也可以采用三步法。针对杂波环境,Kostinski 和 Boerner 于 1987 年提出了使信杂比最大的扩展三步法原理,其基本思路是:第一步寻求最佳的发射极化状态使目标回波功率与杂波功率之比最大,第二步计算此时的杂波极化状态,第三步为调整接收极化状态使之与杂波极化失配,这样三步之后的收发极化即是最佳的^[2]。可见,通过目标极化增强和信干噪比(SINR, Signal to Interference Plus Noise Ratio)最优化,目标增强能够提高对有用信息的接收^[15]。

极化检测主要研究目标极化特性与检测算法,前者主要对极化散射矩阵进行信号处理以获取检测信息,建立了最佳目标极化理论^[15]、双静态非互易非相干下的目标最佳极化理论^[18]、基于雷达与光通信的镜面零极化理论^[18]、目标极化分解理论及瞬态极化处理技术^[18]等;后者主要研究适合不同环境下的最佳极化检测算法,如适用于非高斯噪声及杂波环境中的恒虚警检测算法^[19]、目标与杂波极化特性未知情况下的极化广义似然检测算法^[19]、宽带场景中的基于横向极化滤波器组的检测算法^[20]、基于极化白化器的目标极化检测算法^[21]、针对瞬态极化微弱信号的瞬态 Stokes 子矢量序列检测算法^[22]及基于 MIMO 雷达的极化检测算法^[23]等。其中,最佳极化检测算法假设目标回波和杂波近似为复高斯分布,且协方差矩阵已知,从而可归结为似然比检验的形式。最佳极化检测算法从原理上讲可等效于极化匹配滤波器,充分利用了回波中的所有极化信息,问题在于实际中协方差矩阵等先验信息难以获取,导致最佳极化检测往往难以实现,但是其检测性能可作为各种极化检测器的上限,用来衡量其他极化检测算法性能的好坏^[3]。

(2) 干扰抑制

雷达干扰与抗干扰的斗争是 60 多年来军用雷达持续发展与不断创新的基本动力^[3]。干扰抑制主要研究如何抑制接收信号中的杂波干扰及如何对抗欺骗式干扰。其中,杂波干扰主要是以噪声为主的有源压制性干扰,通过发射大功率的简单噪声或者将噪声与有用信号波形混合生成的相干压制干扰来影响雷达接收机。这种干扰方式实现简单,可使有用信号被遮盖或淹没,甚至可能导致接收机因饱和而无法正常工作。考虑到雷达通过相干接收处理可使有用信号增益远大于对噪声的增益,杂波干扰通常需要较高的发射功率,性价比较低,因此出现了与有用信号高度逼近的欺骗式干扰,并以其高效的性价比成为目前雷达干扰领域研究的一个热点。如何有效提高雷达对这些干扰的对抗能力,已经成为十分迫切的需求^[3]。针对这一干扰抑制问题,在雷达极化信息处理研究中,抑制杂波干扰主要是采用极化滤波技术以提高接收 SINR,对抗欺骗式干扰则主要是采用极化鉴别技术以提高有源假目标的鉴别能力^[24]。

在杂波干扰抑制方面,极化滤波从本质上可认为是利用干扰和信号不同的极化特性,实现对混杂在干扰背景中有用信号的最佳接收。大部分极化抗干扰方面的研究都集中在极化滤波这一领域,是雷达极化信息处理的重要研究内容之一^[3]。极化滤波在数学上可抽象为线性或非线性最优化问题,优化准则主要有信号功率最大化、干扰功率最小化或者 SINR 最大化等。其中以 SINR 最大化作为优化准则从理论上讲可获得最优的滤波性能,在实际应用中,由于需要目标回波信号和干扰信号的极化状态、发射功率以及自身接收机噪声等先验信息,直接以 SINR 作为优化函数的极化滤波器并不多见,然而 SINR 最大化获得的最优解为度量实际极化滤波器性能提供了理论参考上界,具有重要的指导意义^[3]。现有极化滤波算法的研究主要集中在如何优化接收极化状态为干扰极化状态的交叉极化状态,并针对不同的干扰特性有相应的改进算法,如对抗宽带阻塞式干扰和雨杂波的自适应极化对消算法^[25]、针对部分极化杂波和干扰的多凹口极化滤波算法^[26]、基于自适应极化对消和多凹口联合的极化滤波算法^[27]、适用于高频地波雷达的序贯极化滤波算法^[28]及目标极化散射矩阵未知情况下的最佳收发极化分布估计算法^[29]等。这些极化滤波算法研究均面临两个共性的难题,一是干扰与有用信号的极化状态过于接近;二是干扰信号是极化度很低的信号甚至是未极化波时,极化滤波性能都将会受到影响^[3]。

在对抗欺骗式干扰方面,极化鉴别的基本思想同样是利用有源假目标干扰与目标回波之间的差异性来实现真假目标鉴别。尽管欺骗式干扰与真实雷达目标回波的有用信号高度逼近,但仍然存在明显差异。例如,真实雷达目标通常是无源的散射体,其回波取决于雷达收发极化以及目标极化特性,而有源假目标干扰则与干扰机极化和雷达接收极化有关,与雷达发射极化无关。现有的研究主要集中在假目标干扰的极化抑制及角度欺骗干扰的极化抑制。其中假目标干扰抑制是利用极化特征来鉴别假目标,如基于共极化特征的鉴别算法^[30]、基于瞬态极化投影矢量起伏度的鉴别算法及散射矩阵归一化行列式值鉴别算法等^[31];角度欺骗干扰的极化抑制研究主要集中在利用极化特征对抗角闪烁效应^[32],如基于极化分集的角闪烁抑制算法、基于角闪烁误差与雷达截面积负相关性的抑制算法^[33]、对抗两点源的极化抑制算法及对抗角闪烁的 MIMO (多输入多输出, Multiple Input Multiple Output) 雷达技术等^[34]。这些研究多是假设有源假目标与真实目标不同时出现或者其中一方信号强度远强于另一方,限制了欺骗式干扰对抗方法的实际应用性能^[3]。随着高分辨率、全极化雷达的不断发展,如何利用极化信息实现有源假目标的鉴别和对抗将成为一个非常重要的开放性研究课题。

(3) 目标识别

雷达目标识别主要解决“什么样的目标”这一问题,需要获取目标的大小、形状、姿态、表面材料的电磁参数和表面粗糙度等信息。研究雷达目标识别在军事及遥感等国防安全和国民经济发展领域具有重大意义^[3]。例如,敌方指挥中心、飞行器、军用车辆、机场导航台等通常都是军事侦察的重点目标和主要攻击对象,对这些目标进行识别可为重点目标监视、捕捉及打击效果评估等军事应用提供支持。此外,提取并识别城区中的典型建筑物是城市遥感等领域的基本问题,可以反映城市的整体布局及发展变化等信息,为绘制城市地图、城市规划及资源管理等提供决策支持。

目标识别方法性能主要取决于雷达所能获取目标信息量的多少,而目标信息量最重要的衡量指标是雷达分辨率,同时电磁波本身的极化矢量性可提供丰富的雷达目标特征信息,因此全极化和高分辨综合是解决雷达目标识别问题的重要途径^[3]。目标识别方法性能主要有两个方面的衡量标准,一方面取决于所提取的目标特征能否达到良好的目标类内的重聚性及目标类间的差异性,即识别的有效性;另一方面取决于目标识别方法所涉及的目标特征提取或特征处理等过程能否自适应目标姿态的变化,以及是否具有抗各种振动的性能,即识别的可靠性^[2]。

极化目标识别主要利用不同目标间的极化特性差异来揭示目标的极化散射机理,进而通过有效的模式识别等技术手段对目标进行识别与分类,是雷达目标识别的主要研究内容之一。极化目标识别主要从极化散射矩阵、极化目标分解以及瞬态极化信号处理三个方面展开。

在雷达极化信息处理研究的初期,人们就发现了极化散射矩阵以及以此为基础的最佳极化、极化不变量等极化特性描述理论在极化目标识别中的应用潜力,主要是利用最优化学理论及目标唯象学理论对极化散射矩阵进行变换、分解以提取可用于目标识别的极化特征^[34]。采用最佳极化进行目标识别的方法主要有基于轨迹分布特征的目标识别算法^[35]和适用于目标方向持续改变下的零极化轨迹特征目标识别算法^[36]等;直接采用极化散射矩阵元素来辨识目标的方法有基于三参数轨迹的目标识别算法及具有一般意义的基于五参数的目标识别算法等^[37];还有基于极化不变量以及极化参数描述符特征的目标识别方法等^[38]。这些算法都是围绕目标的宏观极化散射特性展开,而且通常情况下雷达发射极化状态都是固定的。进一步地,对目标局部极化散射特性的分析与研究则依赖于全极化和高分辨率相结合的不断发。此外,当雷达发射极化状态可变时,例如通过极化调制技术可同时获取目标多极化信息,为变极化雷达目标识别的发展奠定了技术基础^[39]。

随着目标散射机理研究的不断深入,极化目标分解理论在雷达特别是 PolSAR 雷达目标识别与分类中获得越来越广泛的应用。极化目标分解的基本思想是将目标的极化散射分解为几种基本散射机理的组合,然后根据分类单元与基本散射机理的相似性或直接利用所提取的新特征进行分类。极化目标分解研究主要分为相干目标分解和部分相干目标分解两大类,分别针对相干的极化散射矩阵和部分相干的极化协方差矩阵、极化相干矩阵、Mueller 矩阵或 Kennaugh 矩阵等。在此基础上,基于极化目标分解的识别算法主要有基于散射分量的目标识别算法^[40]、基于简单散射体组合的目标识别算法^[41]、基于目标形状极化重建的识别算法^[42]及基于全极化合成孔径雷达数据的自适应分类算法^[43]等。这些研究的优势在于分类结果能较好地揭示地物的散射机理,有助于人们对图像的理解,而且一般情况下分类时不需要训练数据,适用范围较广。然而现有研究对散射机理类型的区分能力有限,比如某些人造目标可能表现出与自然杂波相类似的极化特征,这些目标可能会和杂波一起被划为同种散射机理类型,影响了极化目标识别的准确性^[44]。为此,极化目标分解需要引入更多可体现人造目标与

自然杂波散射特性差异的有效特征,为极化目标识别提供更为丰富和有效的判别依据^[3]。

随着宽带信号极化处理的发展,王雪松等人提出了瞬态极化信号处理理论并不断完善,使相应基于宽带信号极化特征与瞬态信号极化特性的目标识别算法也受到了关注^[45,46]。利用目标瞬态极化特性的研究工作主要有众多诸如基于极化椭圆曲线拟合技术的目标识别算法^[47]、基于复杂目标高频模型的目标识别算法^[48]、基于多维极化特征空间^[38]、本征极化及极化谱特征的目标识别算法^[39]、基于瞬态极化散射特征的目标识别算法及基于瞬态极化统计学的目标识别算法^[49]等。瞬态极化更为充分地刻画了宽带电磁波激励下分布式目标的电磁散射特性,通过在研究目标瞬态极化散射信息分解表征方法的基础上,构建相应的目标瞬态极化电磁特征空间,进而研究目标瞬态极化特征的提取与分类识别理论与方法,是对光学区雷达目标识别理论体系的有力补充,适用于大多数应用问题中主要关心的军事和民用目标识别^[45]。

综上所述,目标极化检测和极化滤波等关键技术是雷达极化信息处理研究的重要内容,其显著特点是提出了极化域的概念,促进了矢量化的极化域信号处理和数据处理体系的出现。极化鉴别与极化目标识别等关键技术则属于雷达极化信息处理比较有特色的研究内容,从某种程度上讲,在这部分研究内容里极化信息的作用表现得更为突出,有望解决时域、频域和空域不能有效解决的干扰抑制和目标识别等问题,它不是解决由“不好”到“好”或由“好”到“更好”的问题,而是解决由“不能”到“能”的问题^[3]。未来全极化和高分辨率相结合将会为雷达极化信息处理带来更为广阔的应用前景。

1.3.2 光通信中的极化信息处理

自从1976年成功运行了世界上第一个商用试验性光纤系统^[50],光通信不断发展并逐渐成为大容量数据传输的支撑技术^[51]。在光通信中,信号的极化状态通常被称为偏振状态。一方面,随着高速光通信与光纤传感技术的飞速发展,各种复杂的偏振现象逐渐凸现,偏振模色散、偏振相关损耗以及非线性偏振旋转等偏振效应所引起的大量偏振问题已成为影响高速光通信系统性能的重要因素;另一方面,偏振状态作为不同于光信号时频和空间特性的矢量特性,在高速光信号处理中具有得天独厚的优势。无论是作为限制光通信性能的问题因素还是作为具有独特处理优势的解决方法,光通信中的极化信息处理均受到了广泛的关注和应用。

对于由复杂偏振现象引起的各种偏振效应研究,最初关注的是光纤制造过程中由不对称性、残余应力、扭转等引起的材料双折射和波导结构(或形状)双折射等偏振特性分析。然而由于早期光通信系统大多采用多模光纤以及强度调制—直接检测等实现方案,传输速率低,偏振效应对信号传输几乎没有影响,并没有引起广泛重视。在1980年开始使用单模光纤之后,偏振效应引入了大量的噪声或扰动,特别是随着通信速率的不断提高,光信号变得不稳定和不可预知,终端解调难度增大,严重影响系统的传输性能。因此,在光纤偏振特性分析的基础上,人们开始关注光通信中引起各种偏振效应的原因以及偏振状态随机变化的规律。其中引起偏振效应的原因主要有光纤自身特性和环境随机影响两类,目前得益于制造工艺的改进,光纤本身的偏振模色散影响已经降到足以忽略的水平,而环境的随机影响却始终难以被消除,例如光纤应力分布及其应力双折射研究依然是一个热点问题^[52]。偏振状态随机变化的规律研究以偏振模色散为主,对偏振模色散机理的分析也逐渐趋于系统化和理论化。目前,光通信中克服偏振效应影响的重要途径是偏振补偿,以补偿光纤系统中各种偏振相关的信号损伤,从而提升高速光通信系统的性能^[53]。