



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2013
09
VOL.18

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



城市交通规划 P1197



第18卷第9期（总第209期）

2013年9月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

2013 all rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995 010-82614429

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995 010-82614429

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元

综述

高分辨率遥感影像空间结构特征建模方法综述

秦昆, 陈一祥, 甘顺子, 冯霞, 任文力

1055

简缩极化SAR数据信息提取与应用

张红, 谢镭, 王超, 张波, 吴樊, 汤益先

1065

图像处理和编码

融合CCCTI码和谱系聚类的仿射配准

张桂梅, 江少波, 刘丕玉, 张松

1074

面向虚拟视点绘制的深度图滤波及上采样方法

高凯, 陈贺新, 赵岩, 耿英楠, 王钢

1085

图像分析和识别

包空间多示例图像自动分类

王科平, 杨艺, 王新良

1093

表情和姿态的双模态情感识别

闫静杰, 郑文明, 辛明海, 邱伟

1101

等级关联的粒子群迭代多目标检测跟踪

程旭, 李拟珺, 张索非, 吴镇扬

1107

改进后的TLD视频目标跟踪方法

周鑫, 钱秋朦, 叶永强, 王从庆

1115

多特征稳健主成分分析的视频运动目标分割

甘超, 王莹, 王向阳

1124

融合全局最好和声搜索算法的模糊C均值聚类图像分割

崔兆华, 高立群, 欧阳海滨, 李文娜

1133

从运动中恢复目标结构的改进因子分解法

邱少华, 文贡坚, 回丙伟, 张鹏

1142

计算机图形学

并行扫描转换结构中的状态管理

殷诚信, 韩俊刚, 黄虎才

1149

医学图像处理

3维颅骨表面模型的复杂孔洞修补

包佳蕊, 梁荣华, 吴福理, 黄鲜萍, 蒋莉, 陈矛

1156

归一化Radon变换和统计测度的超声图像肌束方向自动跟踪

李乔亮, 李振宇, 张会生, 张小飞, 陈昕, 陈思平, 汪天富

1164

遥感图像处理

改进的多光谱双边滤波图像融合

吴川, 杨冬

1170

长度归一化扫描的合成孔径雷达图像船舶尾迹恒虚警率检测

南杰, 张红, 王超, 吴樊, 张波

1176

地理信息技术

3D可视化输电线路中杆塔空间挂点计算

何国辉, 周聪

1184

地图符号服务与地图服务的耦合

焦东来, 张海涛, 闫国年, 姜杰

1190

不同表达粒度对城市路网结构健壮性评价的影响

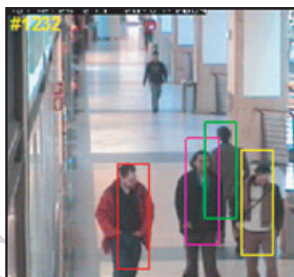
段滢滢, 陆锋

1197

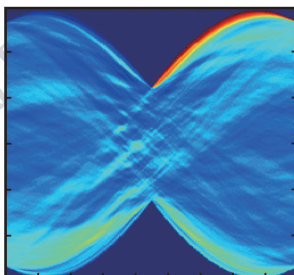
DEM保真精度量化描述模型

张锦明, 游雄

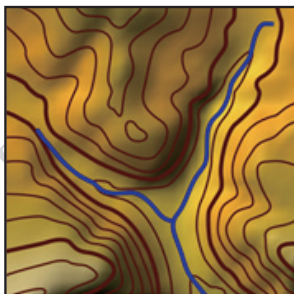
1206



等级关联的粒子群迭代多目标检测跟踪(第1107页)



归一化Radon变换和统计测度的超声图像肌束方向自动跟踪(第1164页)



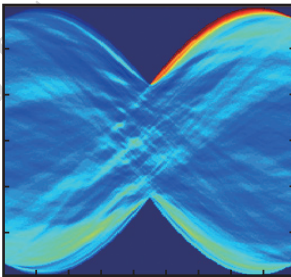
DEM保真精度量化描述模型(第1206页)

CONTENTS

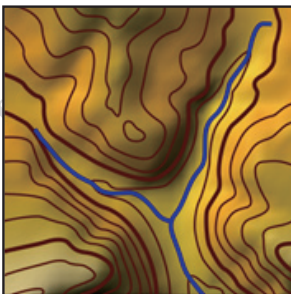
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Hierarchical associative multi-target detection and tracking with particle swarm optimization(P1107)



Automatic tracking of muscle fascicle orientation in ultrasound images: a approach based on a normalized Radon transform and statistical measure (P1164)



Quantitative descriptive model of DEM fidelity accuracy(P1206)

Review

Review on methods of spatial structural feature modeling of high resolution remote sensing images

Qin Kun, Chen Yixiang, Gan Shunzi, Feng Xia, Ren Wenli 1055

Information extraction and application of compact polarimetric SAR data

Zhang Hong, Xie Lei, Wang Chao, Zhang Bo, Wu Fan, Tang Yixian 1065

Image Processing and Coding

Affine registration based on CCCTI and hierarchical clustering

Zhang Guimei, Jiang Shaobo, Liu Piyu, Zhang Song 1074

Depth map filtering and upsampling method for virtual view rendering

Gao Kai, Chen Hexin, Zhao Yan, Geng Yingnan, Wang Gang 1085

Image Analysis and Recognition

Automatic classification of multiple-instance image based on the bag space

Wang Keping, Yang Yi, Wang Xinliang 1093

Bimodal emotion recognition based on body gesture and facial expression

Yan Jingjie, Zheng Wenming, Xin Minghai, Qiu Wei 1101

Hierarchical associative multi-target detection and tracking with particle swarm optimization

Cheng Xu, Li Nijun, Zhang Suofei, Wu Zhenyang 1107

Improved TLD visual target tracking algorithm

Zhou Xin, Qian Qiumeng, Ye Yongqiang, Wang Congqing 1115

Multi-feature robust principal component analysis for video moving object segmentation

Gan Chao, Wang Ying, Wang Xiangyang 1124

Improved fuzzy C-means clustering combined with the global best harmony search algorithm for image segmentation

Cui Zhaohua, Gao Liqun, Ouyang Haibin, Li Wenna 1133

Improved factorization method for structure from motion

Qiu Shaohua, Wen Gongjian, Hui Bingwei, Zhang Peng 1142

Computer Graphics

Efficient state management for parallel rasterization

Yin Chengxin, Han Jungang, Huang Hucai 1149

Medical Image Processing

Various hole repairing algorithm for 3D mesh surface models of human skull

Bao Jiarui, Liang Ronghua, Wu Fuli, Huang Xianping, Jiang Li, Chen Mao 1156

Automatic tracking of muscle fascicle orientation in ultrasound images: a approach based on a normalized Radon transform and statistical measure

Li Qiaoliang, Li Zhenyu, Zhang Huisheng, Zhang Xiaofei, Chen Xin, Chen Siping, Wang Tianfu 1164

Remote Sensing Image Processing

Improved multispectral bilateral filter video fusion algorithm

Wu Chuan, Yang Dong 1170

Ship wake constant false alarm rate detection algorithm in synthetic aperture radar images based on length normalized scanning

Nan Jie, Zhang Hong, Wang Chao, Wu Fan, Zhang Bo 1176

Geoinformatics

Tower hanging point calculation for transmission line on three-dimensional visualization

He Guohui, Zhou Cong 1184

Coupling of map symbol web service and web map service

Jiao Donglai, Zhang Haitao, Lv Guonian, Jiang Jie 1190

The impact of different granularity representations on robustness evaluation of city road network

Duan Yingying, Lu Feng 1197

Quantitative descriptive model of DEM fidelity accuracy

Zhang Jinming, You Xiong 1206

中图法分类号: TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)09-1065-09

论文引用格式: 张红, 谢镭, 王超, 张波, 吴樊, 汤益先. 简缩极化 SAR 数据信息提取与应用[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(9): 1065-1073.
 [DOI:10.11834/jig.20130902]

简缩极化 SAR 数据信息提取与应用

张红¹, 谢镭^{1,2}, 王超¹, 张波¹, 吴樊¹, 汤益先¹

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 全极化(FP)成像模式丰富了合成孔径雷达(SAR)数据的信息量,在地物分类、环境监测、目标探测等领域取得了广泛应用,但是全极化系统受设计和维护复杂度、功率消耗、覆盖范围和数据下传等因素影响,制约了全极化 SAR 的应用。简缩极化(CP)SAR 系统不仅降低了全极化 SAR 系统的复杂度,还能在一定程度上保持全极化信息,在森林参数反演、地物分类、目标检测等领域已取得了初步的成果。本文简要介绍了简缩极化 SAR 系统的基本原理,阐述了简缩极化 SAR 的全极化信息重建及分解的主要方法,并总结其近十年的主要研究成果,最后给出了其发展趋势。

关键词: 全极化;合成孔径雷达;简缩极化;全极化信息重建;分解

Information extraction and application of compact polarimetric SAR data

Zhang Hong¹, Xie Lei^{1,2}, Wang Chao¹, Zhang Bo¹, Wu Fan¹, Tang Yixian¹

1. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The full-polarimetric (FP) imaging mode has enriched the information of Synthetic Aperture Radar (SAR) data, and has been widely used in remote sensing applications, e. g. for land cover classification, environmental monitoring, or target detection. However, the application of FP SAR has been constrained by the design and maintenance complexity, power consumption, image swath, and data-downloading rate. Compact Polarimetric (CP) SAR systems not only overcome the drawbacks of FP SAR system, but also keep the FP information to a certain extent. Preliminary results are available in several fields, such as forest parameters estimation, feature classification and target detection. This paper provides an overview of compact polarimetric SAR system fundamentals, describes the methods of FP information reconstruction and decomposition, and summarizes its main research achievements of the last decade. At the end, we give its development trends.

Key words: fully polarimetry; synthetic aperture radar (SAR); compact polarimetry; full polarimetry reconstruction; decomposition

收稿日期:2012-12-17;修回日期:2013-02-22

基金项目:国家自然科学基金项目(40971198);中国科学院对地观测与数字地球科学中心主任科学基金

第一作者简介:张红(1972—),女,研究员,2002 年于中国科学院遥感与数字地球研究所获地图学与地理信息专业博士学位,主要研究方向为极化 SAR、极化干涉 SAR。E-mail:h Zhang@ceode.ac.cn

通讯作者:王超, E-mail:cwang@ceode.ac.cn

0 引言

自日本 ALOS-PALSAR 卫星于 2006 年成功发射以来,相继有多颗具有全极化对地观测能力的 SAR 卫星进入轨道,获取了大量全极化数据^[1]。与单极化 SAR 系统相比,全极化 SAR 系统交替发射水平和垂直方向电磁波,同时接收一组相互正交回波信号,丰富了 SAR 数据的信息,能够更准确描述地物特征。研究表明,全极化信息在地物分类^[2-4]、森林参数估计^[5-7]、目标识别^[8]、溢油监测^[9]等方面极具潜力,为 SAR 的研究和应用开辟了新的方向。信息量的丰富提高了对 SAR 系统性能要求,全极化系统增加了 SAR 系统设计复杂度,对天线技术、数据下传速率及功率消耗等方面提出了更高的要求,而且全极化 SAR 影像测绘带只有单极化 SAR 影像的一半,这些因素都限制了全极化 SAR 系统的应用^[10-12]。

为了克服全极化系统的缺点,近年来简缩极化 SAR 系统引起了广泛的关注和研究。简缩极化 SAR 系统只发射一个方向的电磁波,接收两个方向的回波信号,降低了系统设计和维护的复杂度,扩大了系统的成像范围。简缩极化 SAR 系统是双极化 SAR 与全极化 SAR 系统的折中,与双极化 SAR 系统相比,简缩极化 SAR 系统发射和接收信号组合更丰富,能够获取回波信号的相对相位,具有更丰富的信息量。尽管目前还没有星载简缩极化 SAR 数据,但基于模拟数据的研究工作已经展开,为计划发射的 DESDynI 卫星及雷达星座计划(RCM)提供依据^[12-13]。3 种常用的简缩极化模式相继被提出,Souyris 等人在 2002 年首次提出了一种简缩系统,即 $\pi/4$ 模式(发射 45° 方向的线极化波,接收水平和垂直回波信号)的简缩极化系统,并提出了一种从简缩极化重建全极化数据的方法,是目前数据重建的基本思想^[10,14]。2006 年 Stacy 和 Preiss 等人^[15]提出了一种双圆极化(DCP)模式,雷达系统发射圆极化波,同时接收左圆和右圆极化波,这种模式最大程度上保持了雷达遥感在天文学中的应用能力,但在对地观测领域应用较少。次年 Raney 也提出了一种混合极化方式以及相应数据处理方法,系统发射圆极化波,接收一组水平和垂直回波信号,这被称为 CTRLR 模式^[16-17],这种模式比 DCP 模式更简单、稳定,对噪声敏感程度下降,具有自校正能力,DCP 模

式实际上是 CTRLR 模式的线性组合。

从信息量的角度,全极化 SAR 系统能够获取地物 4×4 的协方差矩阵,而简缩极化 SAR 系统只能获取 2×2 的协方差矩阵,信息量下降,限制了简缩极化 SAR 的研究和应用价值,但近年来,简缩极化 SAR 应用研究取得了初步进展,并成为 SAR 研究的新热点,在森林参数反演^[18-20]、极化分解^[21-23]、地物分类^[23-25]、溢油检测^[26]、船只检测^[26-27]、冰川检测^[13]、土壤参数估计^[28]、天文学^[29]等领域均开展了机理与应用研究,实验结果表明,简缩极化 SAR 数据可取得与全极化 SAR 数据相近的应用效果。

本文将按照简缩极化研究的基本思路,首先介绍和分析简缩极化 SAR 重建全极化信息的基本方法,然后介绍简缩极化分解主要方法及特点,简缩极化 SAR 应用的现状,最后,对简缩极化 SAR 进一步发展的趋势提出设想。

1 简缩极化 SAR 的全极化信息重建

目前,从简缩极化信息重建全极化信息是简缩极化数据重要的研究和应用方法之一,重建的目的是获取全极化模式下协方差矩阵或干涉协方差矩阵。

在 Souyris 等人提出的基于 $\pi/4$ 模式的伪协方差矩阵的重建模型基础上^[10],Nord 等人^[11]对算法进行修正,并提出了 DCP 和 CTRLR 模式下重建方法;Collins 等人^[12-13]分析了 Souyris 和 Nord 方法的不足,建立了重建表达式与成像入射角之间的非线性关系,提高了重建的稳定性。Lavalley 等人将从简缩极化信息重建全极化信息的工作扩展到极化干涉测量的研究中,并推导了伪干涉协方差矩阵的重建过程^[19],得到 $\pi/4$ 模式数据的重建表达式。

1.1 伪协方差矩阵重建

Souyris^[10]以 $\pi/4$ 模式为例,将简缩极化协方差矩阵分解为共极化部分、交叉极化部分和残差部分,分解后的方程更直观地表明重建过程就是从简缩极化的 3 个观测值计算全极化模式下的 6 个待重建参数。Souyris 首先假设目标具有反射对称性,认为交叉极化通道与共极化通道完全不相干,即 $S_{HH}S_{HV}^* \approx S_{VV}S_{HV}^* \approx 0$,这样残差部分变成 0,同时简化了全极化协方差矩阵的形式,使得待重建参数个数从 6 降低到 4,但方程仍无确定解。因此 Souyris 建立了共极化通道功率与交叉极化通道功率之间的关系:

$$\frac{X}{H+V} \approx \frac{1-|\rho_{H-V}|}{N} \quad (1)$$

式中, H 、 V 、 X 分别表示 HH 极化、VV 极化和 HV 极化通道的功率, ρ_{H-V} 是共极化相干系数, 对完全去极化波, $\rho_{H-V} = 0$, 对完全极化波, $\rho_{H-V} = 1$, 自然目标介于这两种情况之间; 参数 N 是经验值, 在 Souyris 试验中, N 设定为 4, 这样就建立了待重建量与观测量的方程。当交叉极化通道功率 X 确定后, 就可以完成重建。Souyris 设计了迭代搜索的方法获得参数 X , 但在迭代过程中, 相干系数 ρ_{H-V} 可能会大于 1 或出现无效解, 此时认为 $\rho_{H-V} = 1$, 参数 $X = 0$ 。

Nord 等人^[11] 利用 Freeman-Durden 三分量分解^[30]的体散射模型解释了 Souyris 模型中 $N = 4$ 的原因, 发现 Souyris 重建方法在森林或茂密植被区域重建结果较好, 但对于表面散射或偶次散射占优的目标, 条件式(1)不一定能满足, Souyris 重建模型失效。因此, Nord 等人提出了一种更新参数 N 的方法, 利用 Souyris 算法获得初始重建结果, 然后更新 N 为

$$N = \frac{|S_{HH} - S_{VV}|^2}{|S_{HV}|^2} \quad (2)$$

更新后的 N 值使条件式(1)更容易成立, 利用更新参数 N 进行二次重建具有更稳定的重建结果。按照 Souyris 重建方法的思路, Nord 等人推导了 DCP 模式与 CTRLR 模式的重建模型, 仍然使用了反射对称性假设和条件式(1)。

在 Nord 提出的修正重建方法中, 忽略了初始重建结果对参数 N 的影响, 在很多情况下, 如海洋、城市地区, Souyris 重建结果不准确, 严重影响参数 N 的更新结果。Collins 等人^[12] 利用不同入射角的 Radarsat-2 全极化数据模拟 CTRLR 模式简缩数据, 分别

$$C_{12}^{\text{ref}} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 3j_{11} + j_{12} + j_{21} - j_{22} & 0 & -j_{11} + 5j_{12} + j_{21} - j_{22} \\ 0 & 2(j_{11} - j_{12} - j_{21} + j_{22}) & 0 \\ -j_{11} + j_{12} + 5j_{21} - j_{22} & 0 & -j_{11} + j_{12} + j_{21} + 3j_{22} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中, j_{ij} 是矩阵 J_{12} 的元素; 将共极化协方差矩阵 J_{11} 和 J_{22} 中的相应元素代入式(4)中, 可以获得全极化协方差矩阵 C_{11} 和 C_{22} 。Lavalley 利用 ESAR DLR 获取的 Traunstein 森林区域全极化数据, 计算伪干涉协方差矩阵的干涉相干系数, 证明重建后的数据仍能保持良好相干性, 为森林参数反演、地形高程估计提供了保证。

谈璐璐等人在 Lavalley 等人成果的基础上, 详细

利用 Souyris 和 Nord 方法进行协方差矩阵重建, 发现重建结果都不能真实反映实际极化信息。为了对海上目标进行监测, Collins 在海洋区域选择了一组实验区域, 实验区内风速相同, 视为均匀地区。Collins 首先证明了实验区内反射对称性成立, 并利用式(2)计算不同成像入射角图像下参数 N 的均值 $\bar{N}$, 实验结果表明, $\bar{N}$ 随入射角增大逐渐变小, 因此他建立一个 $\bar{N}$ 关于入射角 θ 的经验模型

$$\bar{N} = b_1 + b_2 \exp(-\theta^{b_3}) \quad (3)$$

实验结果表明, 模型式(3)改善了重建的效果。虽然这个模型并不稳定, 但说明了成像的几何条件是影响重建精度的因素之一。

Yin 等人^[27] 采用新的体散射模型, 提出了改进四分量分解算法, 并基于改进的分解方法, 对 Souyris 重建模型进行了修正, 新模型不需要进行反射对称性假设, 而且还能从简缩极化协方差矩阵中获取螺旋体散射分量, 对城市等复杂场景具有更好的重建结果。

1.2 伪干涉协方差矩阵的重建

极化干涉 SAR 是极化信息应用的重要领域, 已经应用于森林树高估计、地形高程提取等方面, 极具实用价值。Lavalley 等人以 $\pi/4$ 模式的简缩极化干涉协方差矩阵的重建为例, 分别根据反射对称性、旋转对称性、方位向对称性假设, 获取不同对称性条件下伪全极化协方差矩阵的形式^[19]。当采用旋转对称性和方位向对称性假设时, 无需引入其他假设条件就能获得重建结果, 但基于反射对称性的假设条件时, 还需要引入交叉极化项的旋转不变性条件才能保证重建过程具有唯一解。在反射对称性条件下, 简缩干涉协方差矩阵 J_{12} 项重建全极化协方差矩阵 C_{12} 项表达式为

推导了 DCP 模式和 CTRLR 模式下, 不同对称性假设条件下的伪干涉协方差矩阵重建表达式^[31]。

1.3 伪协方差矩阵重建的问题

综上, 从简缩极化 SAR 到全极化 SAR 的信息重建研究还处在初始阶段。无论是 Nord 等人提出的改进的重建算法, 还是 Collins 等人提出的基于经验模型的重建算法, 都没能给出通用的重建模型。对于城市等拥有丰富人造目标的区域, 难以用一个

简单的模型建立简缩极化与全极化之间的关系,而且,反射对称性假设并不总是满足,因此这些重建方法都会导致全极化信息的损失或错误。Yin 等人^[27]提出了一种无需反射对称性假设的模型,为重建算法的改进提供了新的思路。总之,重建应该综合考虑成像几何条件、地物类型、传感器参数等各方面的因素,是一个复杂的过程。

事实上,Reigber 等人^[32]指出,从信息量的角度,重建的过程就是人为地将 2 维信息提高到 3 维,信息量并没有增加,这个过程是没有意义的。考虑到重建的复杂性,越来越多的研究考虑直接从简缩极化协方差矩阵进行,取得了一些初步的研究成果^[17, 20]。

2 简缩极化分解

极化分解是极化 SAR 数据应用的预处理过程,为地物分类、目标识别提供决策依据,针对全极化 SAR 数据的极化分解是目前极化 SAR 研究的热点之一,取得了相当丰富的研究成果^[1, 9, 16, 33]。目前简缩极化分解的研究还不成熟,采用较多的是 $m-\delta$ 分解^[17],以及在其基础上发展起来的三分量分解算法^[22-23, 34-35]。

2.1 $m-\delta$ 分解

Raney 推导了 DCP 模式和 CTLR 模式下回波信号的 Stokes 矢量 $\mathbf{g} = [g_0 \ g_1 \ g_2 \ g_3]^T$,提出了 $m-\delta$ 分解算法, m 表示极化度,是部分极化波最重要的特征之一, δ 表示回波信号的相对相位。 $m-\delta$ 分解^[17]能够将回波信号中去极化分量和完全极化分量分离开,但分析目标散射机制时还需要获取不同散射机制的成分,因此 Raney 提出了 m -chi 三分量分解算法^[34]。在文献[34]中,Raney 提出了圆度(degree of circularity) χ 的概念,该参数体现了完全极化波中偶次散射 P_D 和表面散射 P_S 所占比重,并且视体散射成分 P_V 是完全去极化部分的功率,三分量分解表达式为

$$\begin{aligned} P_D &= mg_0(1 + \sin 2\chi)/2 \\ P_V &= (1 - m)g_0 \\ P_S &= mg_0(1 - \sin 2\chi)/2 \end{aligned} \quad (5)$$

2010 年,Charbonneau 等人^[23]指出,相对相位 δ 可用来判断完全极化波中偶次散射与表面散射的占优机制,当 $\delta > 0$ 时,表面散射强于偶次散射,当 $\delta < 0$ 时,偶次散射强于表面散射,因此, δ 可以用来取代

圆度 χ 建立三分量分解表达式。Cloude 等人^[22]基于 RVoG 模型和 OVoG 模型,将全极化模式 H - α 分解的散射角度 α 映射到简缩极化模式下,得到参数 α_s ,利用 α_s 取代 m -chi 三分量中的参数 χ 建立了新的三分量分解方法,并利用这种分解方法进行了林区着火点探测。

2.2 基于散射模型的三分量分解

基于模型的三分量分解是将不同散射机制模型化,认为:体散射相当于一组方向完全随机的偶极子集合,偶次散射是一个二面角反射器,表面散射是一阶布拉格表面散射体。刘萌等人^[35]以 CTLR 模式为例,提出了一种基于散射模型的简缩三分量分解算法,体散射模型采用 An 模型^[33],表面散射与偶次散射沿用 Freeman-Durden 提出的模型^[30]。首先将简缩协方差矩阵分解为完全去极化部分和完全极化部分,考虑到体散射随机性比较高,认为体散射分量对应完全去极化部分,而完全极化部分由偶次散射和表面散射组成,建立了 3 种散射分量与协方差矩阵之间的关系。引入参数 δ 作为完全极化部分占优散射机制判定条件,保证分解结果的唯一性。

2.3 H - α 分解

Guo 等人^[21]将全极化模式下 H - α 分解结果映射到 3 种简缩极化模式下,结果表明,在 CTLR 模式和 $\pi/4$ 模式下,各种散射机制在 H - α 空间分布混乱,但在 DCP 模式下具有良好的可分性。Guo 等人根据散射机制分布特征提出了 DCP 模式下的 H - α 空间:

- 1) 低熵与中熵界限为 $H=0.5$,中熵与高熵界限为 $H=0.95$;
- 2) 在低熵区,多次散射与体散射分解为 $\alpha = 43^\circ$,体散射与表面散射分解为 $\alpha = 49^\circ$;
- 3) 在中熵区,多次散射与体散射分解为 $\alpha = 38^\circ$,体散射与表面散射分解为 $\alpha = 50^\circ$;
- 4) 在高熵区,多次散射与体散射分解为 $\alpha = 43^\circ$,体散射与表面散射分解为 $\alpha = 56.8^\circ$ 。

基于 DCP 模式下的 H - α 分解,可以快速提取出不同地物的主要散射机制,为许多研究提供支持。但由于不同散射机制在 H - α 空间存在部分重叠,DCP 模式下 H - α 的分解结果并不能与全极化模式一一对应。

2.4 简缩极化分解的若干问题

由于简缩极化分解的研究还不成熟,现有的算法都有一定的适用范围,并且难以达到全极化模式

下的效果。

最新研究成果指出,基于标准的 Stokes 矢量估算极化度并不能得到最优解,Shirvany 等人^[36]提出了一种改进的 Stokes 矢量,分别利用最大似然估计和矩估计法获得了更准确的极化度值。基于 $m-\delta$ 的三分量分解算法均以部分极化波二分量理论为基础,这种分解方法在平原地区和森林区域具有良好的分解能力,但是在城市这种复杂场景中,分解结果不能表达地物的真实信息,体散射分量严重过估计,这是因为完全去极化分量不仅包含了体散射分量,还包含了噪声以及其他分量表现出的去极化特征。

基于散射模型的三分量分解也会造成体散射分量过估计,而且,完全极化部分矩阵行列式为 0,导致偶次散射分量和表面散射分量总有一个为 0,三分量分解退化为二分模型。如果能从完全去极化分量中估计出偶次散射和表面散射表现出的去极化部分并补偿到完全极化矩阵中,完全极化部分的行列式将不再为 0,三分量模型才成立。

Guo 等人仅从映射的 $H-\alpha$ 空间散射机制分布情况估计 DCP 模式下 $H-\alpha$ 空间并不准确,后成像的点会覆盖先成像的点,因此在散射机制重叠严重的区域,还需要参考不同散射机制的分布密度,首先确定散射机制的散射中心,在重叠区域根据散射点密度确定分界线。同时,统计落在简缩极化和全极化模式 $H-\alpha$ 空间相同区域的散射机制的数目相似程度并不能准确反应分解的精度,一种更准确的统计方法是建立简缩极化与全极化模式的混淆矩阵,通过统计整体精度和 Kappa 系数反映分解整体效果。

3 简缩极化 SAR 的应用

目前,简缩极化应用的基本思路分为两大类:1)通过简缩极化数据重建伪全极化信息,在全极化模式下进行应用;2)挖掘简缩极化数据的信息,直接在简缩极化空间进行处理。前者的优势在于全极化模式下已经有许多较为成熟的算法提供支持,但重建条件苛刻,目前还没有提出稳定的重建模型;后者的优势在于无需进行重建,避免了重建过程信息的损失和错误,但目前还处于探索阶段。图 1 是目前简缩极化和全极化数据应用的基本思路^[23]。

近年来,研究人员开展了基于简缩极化数据森林的参数反演、地物分类、地表参数估计、目标识别等方面的研究^[18-23, 27, 37-38],很多简缩极化数据实验

获得了与全极化模式下相似的结果,证明了简缩极化数据应用的潜力。

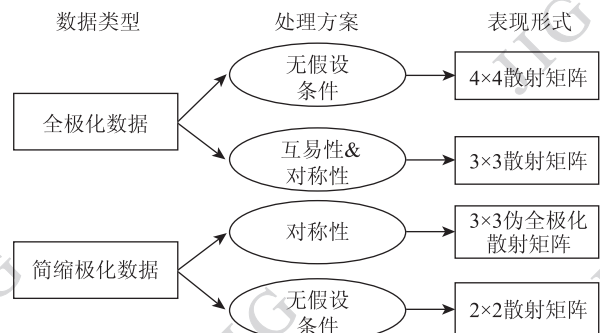


图 1 简缩极化、全极化数据应用的基本思路^[23]

Fig. 1 The basic application idea of compact polarimetric data and fully polarimetric data^[23]

3.1 森林参数反演

森林参数反演是极化干涉测量的重要内容,在全极化模式下,已经有三阶段法和 ESPRIT 等较成熟的反演算法,国内外对简缩极化模式森林树高反演也进行了初步的研究。Lavalley 等人推导伪干涉协方差矩阵重建过程,证明重建伪干涉协方差矩阵仍能保证数据具有良好的相干性,并且将简缩极化空间的反演问题转化到了全极化空间。Lavalley 等人^[39]利用 PolSARProSim 软件模拟 L 波段的森林数据,分别利用反射对称性、旋转对称性重建伪协方差矩阵,基于最大相位差法估计树高,并与全极化模式下树高估计结果进行了对比,实验结果表明基于重建思想树高估计结果与全极化模式下估计结果相近,且 $\pi/4$ 模式具有比 CTRL 模式更好的估计结果。

Dubois-Fernandez 等人^[18]利用低频数据,在不进行伪干涉协方差矩阵重建的基础上,提出了一种遍历求解简缩极化数据相干区域并反演植被树高的方法,将三阶段反演法引入到了简缩极化模式下;谈璐璐等人^[20]利用相干性最优化和幅度最大化算法获得了一组相干点,通过直线拟合得到地表相位候选点,并利用相干区域边界提取体去相干系数,基于三阶段反演算法得到良好的树高反演结果,该方法还能降低计算量,提高运算效率。

黄平平等人^[38]对不同模式下简缩极化干涉 SAR 的植被高度反演性能进行了比较,实验结果表明,在同时采用 ESPRIT 算法的情况下, $\pi/4$ 模式下具有比 DCP 模式和 CTRL 模式更高的反演精度。考虑到简缩极化回波通道只有 2 个,因此,无论是基

于伪干涉协方差矩阵,还是直接利用简缩干涉协方差矩阵进行树高估计时,有效散射相位中心只能设置为2。

Lavalle 指出^[39],在利用重建思想进行数据处理时,由于引入了假设条件,使重建结果偏离真实值,成为影响树高估计的重要因素。在利用三阶段法进行树高估计时,由于重建协方差矩阵信息错误或缺失,部分散射机制下干涉相干系数可能会出现大于1的现象,在进行数据处理时,这些点都应该被剔除或修正。直接从简缩干涉协方差矩阵进行树高估计避免了假设条件的引入,并且与全极化模式具有相近的效果,而且算法更加稳定,效率更高。

3.2 地物分类与地表参数反演

Souyris 等人^[10]选取某一农场区的 L 波段全极化数据模拟 $\pi/4$ 模式简缩数据,该实验区土壤结构相似,地形平坦,符合对称性假设条件。再选取 11 种不同类型地物进行训练,利用基于复 Wishart 分布的最大似然比例作为测度,分别对全极化模式数据和重建数据进行分类。实验结果表明,对于分布式的目标,如森林、农作物, $\pi/4$ 模式分类结果与全极化模式相似。

2010 年,Charbonneau 等人^[23]分别利用在 4 个不同月份成像的 RADARSAT-2 全极化数据,在全极化模式下,对数据进行 $H-\alpha$ 分解和 Freeman-Durden 分解,建立了 (H/α) 、 $(H/\alpha/A)$ 、(表面散射/体散射/偶次散射)3 组特征量,选取实测数据作为决策树的训练样本,建立基于这 3 组特征的分类器。然后利用全极化数据模拟 CTLR 模式简缩极化数据,计算 Stokes 矢量,并进行 $m-\delta$ 分解,形成了(去极化/偶次散射/单次散射)、Stokes 矢量、 $(m/\mu_c/\delta/\mu_e)$ 3 组特征,分别训练这 3 组特征的分类器。实验结果表明:在全极化模式下,基于 Freeman-Durden 分解的分类总体精度最高,在简缩极化模式下,基于 Stokes 矢量的分类总体精度最高;并且全极化模式和简缩模式下的分类精度相似。这再一次证明了简缩极化数据在地物分类中的应用潜力。

Chen 等人^[24]以 Freeman-Durden 三分量分解结果为参考,建立了简缩极化 Charbonneau 三分量分解结果的混淆矩阵。实验结果表明,偶次散射和表面散射分解精度较高,但体散射机制精度较低。这主要是由于 Charbonneau 认为去极化分量表示体散射部分,造成体散射分量过估计。事实上去极化分量占优的目标中约有 19.1% 是偶次散射占优,

15.4% 属于表面散射占优。文中还以 Charbonneau 三分量作为初始分类结果,结合 SPAN 影像,基于复 Wishart 分类器对简缩极化图像进行分类,提高了初始分类结果的精度,保持了图像的纹理和细节。

电磁波在传输过程中,会受到法拉第旋转的影响,如何估算法拉第旋转角并进行校正正是 SAR 数据预处理十分重要的内容,Truong-Loi 等人^[28]利用 DCP 和 CTLR 模式的简缩极化数据,通过分析裸地的极化特征,建立了法拉第旋转角度与回波信号的关系。他们首先建立裸地判定参数 μ ,设定两个阈值 μ_1 、 μ_2 ,当满足 $\mu_2 < \mu < 1$ 时表示表面散射占优,即视为裸地。利用裸地区域数据信息,能够分别利用 DCP 模式和 CTLR 模式估算法拉第旋转角,估算结果与真实值吻合。Truong-Loi 对观测数据进行法拉第旋转校正,利用 Dubois 等人提出的方法进行土壤湿度和粗糙度进行估计,实验结果表明,土壤湿度估计与全极化模式下估算结果具有良好的一致性,但粗糙度估计结果随土壤实际粗糙度增加精度降低。

3.3 海上目标检测

海上目标包括船只、浮标、生物油膜、船只溢油等,海上目标检测具有重要意义,为海上交通调度、污染治理提供指导依据。目前,全极化 SAR 数据的海上应用已经取得了很多成果^[8-9],基于简缩极化 SAR 数据研究也已经展开。

Shirvany 等人^[26]基于简缩极化数据的极化度 P 或去极化度 $1-P$,检测出了海面上的船只、浮标、溢油以及部分海上设施。对于船只和浮标,海洋区域的去极化度比目标去极化度小很多,通过人工设置阈值,就能够区分船只和浮标。对于溢油检测,去极化度同样能够区分海面 and 溢油区域。Shirvany 分析了不同入射角下溢油检测结果,证明了极化度作为海上目标检测判断因子的有效性。

Denbina 等人^[13]利用简缩极化数据进行冰川检测,首先利用一组不同入射角全极化数据模拟简缩极化数据,基于经验模型的伪协方差矩阵重建方法,获得伪全极化协方差矩阵;再建立入射角与 N 之间的非线性关系,引入了一个新的经验模型;利用修正参数 N 重建伪协方差矩阵,选取 500×500 大小平静海面区域作为背景,得到平均协方差矩阵的逆 C_0^{-1} 作为海面特征,利用似然比检测方法,通过设定阈值就能检测冰川、船舶等目标。

Yin 等人^[27]利用修正的重建模型获得了伪协方差矩阵,能更好地描述船舶等海上目标的特征,再基

于似然比进行船舶检测。实验结果表明,与 Souyris 重建方法相比,修正的重建模型能够提高船舶检测精度。

上述的目标检测方法都是假设目标与背景具有较大的差异,通过单一的评价指标就能区分不同目标与背景,但对于复杂的海况,通过简单的评价因子往往不能描述目标与背景的特征,可能会造成大量的虚警或漏检,因此,还需要引入其他辅助评价因子来增强检测效率,如将简缩极化分解的结果引入作为检测的决策依据。

3.4 其他应用

雷达是研究行星地质结构的重要手段,因为雷达波对物质组成、结构、粗糙度非常敏感,同时具有一定的穿透性。在过去 10 年中,随着地面观测系统性能的提升,已经能获取太阳系行星的高分辨率的影像,其中极化数据已用于金星、月球的火山和地表特性研究,多次实验和交叉验证证明,极化信息能够用于区分不同的地表和覆盖物类型^[29]。Carter 等人^[29]利用简缩极化数据,获取 Stokes 矢量和衍生参量,如圆极化比 μ_c 、线极化度 m_l ,分析比较了金星、月球、地球相似地形的散射特性,首次实现在高分辨率数据下各星球地表特征之间的交叉对比。

4 结 语

简缩极化 SAR 是近年来 SAR 系统研究的新领域,它在降低全极化系统复杂度的同时,能够保持良好的极化信息,在许多遥感应用中获得了全极化模式下相近的效果。

现阶段,基于重建伪全极化信息的方法仍然是简缩极化信息研究和应用的重要方式,但重建过程复杂,现有的模型不能满足不同地物目标和成像条件下的重建。下一步的工作应该充分考虑目标散射特性、成像几何条件、传感器参数等因素,建立更加稳定的重建模型。此外,直接从简缩极化数据中挖掘不同目标散射特征也非常重要,这种方法更稳定,效率更高,进一步的研究中,应该分析目标在不同简缩模式下的散射特性,建立相应的散射模型,逐步从实验探索阶段中总结根本的物理机制,为不同遥感应用提供决策依据。

目前,加拿大和美国已经提出简缩极化 SAR 卫星计划,加拿大 RCM 计划在 2016 年至 2017 年发射 3 颗具备全极化和简缩极化对地观测能力的卫星,

达到快速获取 SAR 数据的能力,对自然资源管理和环境监测提供支持。美国将在 2021 年发射 DESDynI 卫星,并具备简缩极化观测能力以保证全球尺度的信息定量分析,目前计划采用 CTLR 模式^[40]。随着简缩极化卫星计划的提出与实施,不仅能够对现有的方法进行检核,还能为简缩极化 SAR 深入研究提供丰富的数据。我国在简缩极化 SAR 方面的研究还处于起步阶段,本文的目的就是通过回顾和总结简缩极化 SAR 取得的成果,希望能为我国开展相关研究提供帮助和启发。

参考文献 (References)

- [1] Yamaguchi Y, Sato A, Boerner W M, et al. Four-component scattering power decomposition with rotation of coherency matrix [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49 (6): 2251-2258. [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2099124]
- [2] Ferro-Famil L, Pottier E, Lee J S. Unsupervised classification of multifrequency and fully polarimetric SAR images based on the H/A/Alpha-Wishart classifier [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39 (11): 2332-2342. [DOI: 10.1109/36.964969]
- [3] Cao F, Hong W, Wu Y R, et al. An unsupervised segmentation with an adaptive number of clusters using the SPAN/H/A space and the complex wishart clustering for fully polarimetric SAR data analysis [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45 (11): 3454-3467. [DOI: 10.1109/TGRS.2007.907601]
- [4] Cloude S R, Pottier E. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35 (1): 68-78. [DOI: 10.1109/36.551935]
- [5] Cloude S R, Papathanassiou K P. Polarimetric SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36 (5): 1551-1565. [DOI: 10.1109/36.718859]
- [6] Garestier F, Dubois-Fernandez P C, Papathanassiou K P. Pine forest height inversion using single-pass X-band PolInSAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46 (1): 9-68. [DOI: 10.1109/TGRS.2007.907602]
- [7] Bai L, Cao F, Hong W. Forest height estimation method using cross-variance matrix of polarimetric interferometric SAR data [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2009, 26 (6): 841-845. [白璐, 曹芳, 洪文. 基于极化干涉互相关矩阵的林高估计方法 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2009, 26 (6): 841-845.]
- [8] Liu C, Gierull C H. A new application for PolSAR imagery in the field of moving target indication/ship detection [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45 (11):

- 3426-3436. [DOI: 10.1109/TGRS.2007.907192]
- [9] Migliaccio M, Nunziata F, Gambardella A. Polarimetric signature for oil spill observation [C]// US/EU-Baltic 2008 International Symposium. Tallinn, Estonia: US/EU-Baltic 2008. 2008: 1-5.
- [10] Souyris J C, Imbo P, Fjortoft R, et al. Compact polarimetry based on symmetry properties of geophysical media: the $\pi/4$ mode [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43 (3): 634-646. [DOI: 10.1109/TGRS.2004.842486]
- [11] Nord M E, Ainsworth T L, Lee J S, et al. Comparison of compact polarimetric synthetic aperture radar modes [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47 (1): 174-188. [DOI: 10.1109/TGRS.2008.2000925]
- [12] Collins M J, Denbina M, Atteia G. On the reconstruction of Quad-Pol SAR data from compact polarimetry data for ocean target detection [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51 (1): 591-600. [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2199760]
- [13] Denbina M, Collins M J. Iceberg detection using compact polarimetric synthetic aperture radar [J]. Atmosphere-Ocean, 2012, 50 (4): 437-446. [DOI: 10.1080/07055900.2012.733307]
- [14] Souyris J C, Mingot S. Polarimetry based on one transmitting and two receiving polarizations: the $\pi/4$ mode [C]// 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toronto, Canada: IEEE Press, 2002: 629-631. [DOI: 10.1109/IGARSS.2002.1025127]
- [15] Stacy N, Preiss M. Compact polarimetric analysis of X-band SAR data [C]// Proceedings of the 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Dresden, Germany: VDE Publishing House, 2006: 99 (1-4).
- [16] Raney R K. Dual-polarized SAR and stokes parameters [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3 (3): 317-319. [DOI: 10.1109/LGRS.2006.871746]
- [17] Raney R K. Hybrid-polarity SAR architecture [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45 (11): 3397-3404. [DOI: 10.1109/TGRS.2007.895883]
- [18] Dubois-Fernandez P C, Souyris J C, Angelliaume S, et al. The Compact polarimetry alternative for spaceborne SAR at low frequency [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46 (10): 3208-3222. [DOI: 10.1109/TGRS.2008.919143]
- [19] Lavalley M, Solimini D, Pottier E, et al. Compact polarimetric SAR interferometry [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2010, 4 (3): 449-456. [DOI: 10.1049/iet-rsn.2009.0049]
- [20] Tan L L, Yang L B, Yang R L. Investigation on vegetation height retrieval technique with compact PolInSAR data [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32 (12): 2814-2819. [DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00091] [谈璐璐, 杨立波, 杨汝良. 合成孔径雷达简缩极化干涉数据的植被高度反演技术研究 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32 (12): 2814-2819.]
- [21] Guo R, Liu Y B, Wu Y H, et al. Applying H/ α decomposition to compact polarimetric SAR [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2012, 6 (2): 61-70. [DOI: 10.1049/iet-rsn.2011.0007]
- [22] Cloude S, Goodenough D, Chen H. Compact decomposition theory [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9 (1): 28-32. [DOI: 10.1109/LGRS.2011.2158983]
- [23] Charbonneau F, Brisco B, Rancy R K, et al. Compact polarimetry overview and applications assessment [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2010, 36 (S2): 298-315. [DOI: 10.5589/m10-062]
- [24] Chen L, Cao F, Hong W. Unsupervised classification for compact polarimetric SAR data using m- δ decomposition, SPAN and the Wishart classifier [C]// Proceedings of 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar. Xi'an China: APSAR2009, 2009. 2009: 742-745. [DOI: 10.1109/APSAR.2009.5374214]
- [25] Ainsworth T, Kelly J, Lee J S. Classification comparisons between dual-pol, compact polarimetric and quad-pol SAR imagery [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64 (5): 464-471. [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2008.12.008]
- [26] Shirvany R, Chabert M, Tournet J Y. Ship and oil-spill detection using the degree of polarization in linear and hybrid/compact dual-pol SAR [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2012, 5 (3): 885-892. [DOI: 10.1109/JSTARS.2012.2182760]
- [27] Yin J, Yang J, Zhang X. On the ship detection performance with compact polarimetry [C]// Proceedings of IEEE CIE International Conference on Radar. Chengdu, China: IEEE Press, 2011: 675-680. [DOI: 10.1109/RADAR.2011.5960623]
- [28] Truong-Loi M L, Freeman A, Dubois-Fernandez P C, et al. Estimation of soil moisture and Faraday rotation from bare surfaces using compact polarimetry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47 (11): 3608-3615. [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2031428]
- [29] Carter L M, Campbell D B, Campbell B A. Geologic studies of planetary surfaces using radar polarimetric imaging [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99 (5): 770-782. [DOI: 10.1109/JPROC.2010.2099090]
- [30] Freeman A, Durden S L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36 (3): 963-973. [DOI: 10.1109/36.673687]
- [31] Tan L L. The research on polarimetric and compact polarimetric interferometric synthetic aperture radar processing technology [D]. Beijing: Institute of Electronics, CAS, 2010. [谈璐璐. 极化与简缩极化干涉合成孔径雷达信息处理技术研究 [D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2010.]
- [32] Reigber A, Neumann M, Ferro-Famil L, et al. Multi-baseline coherence optimisation in partial and compact polarimetric modes [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Boston, MA: IEEE Press, 2008: 597-600. [DOI: 10.

- 1109/IGARSS. 2008. 4779063]
- [33] An W T, Cui Y, Yang J. Three-component model-based decomposition for polarimetric SAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(6): 2732-2739. [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2041242]
- [34] Raney R, Cahill J, Patterson G, et al. Characterization of lunar craters using m-chi decompositions of Mini-RF radar data[C]// Proceedings of the 43rd Lunar and Planetary Science Conference. Texas, USA: Lunar and Planetary Institute. 2012; 1-2.
- [35] Liu M, Zhang H, Wang C. Three-component scattering model for compact polarimetric SAR data[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 27(2): 365-371. [刘萌, 张红, 王超. 基于简缩极化数据的三分量分解模型[J]. 电波科学学报, 2011, 27(2): 365-371.]
- [36] Shirvany R, Chabert M, Tourneret J Y. Estimation of the degree of polarization for Hybrid/compact and linear Dual-Pol SAR intensity images: principles and applications[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(1): 539-551. [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2202242]
- [37] Shirvany R, Chabert M, Tourneret J Y. Comparison of ship detection performance based on the degree of polarization in hybrid/compact and linear dual-pol SAR imagery [C]//2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, Canada: IEEE Press, 2011: 3550-3553. [DOI: 10.1109/IGARSS.2011.6049988]
- [38] Huang P P, Tan L L. Investigation of the capability of compact polarimetric SAR interferometry in different modes to estimate forest height[J]. Inner Mongolia Prataculture, 2011, 23(1): 35-27. [黄平平, 谈璐璐. 不同模式简缩极化干涉 SAR 的植被高度反演性能比较[J]. 内蒙古草业, 2011, 23(1): 35-37.]
- [39] Lavallo M, Solimini D, Pottier E, et al. Investigation on the performance of compact polarimetry in SAR interferometry[C]// Proceedings of the 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Friedrichshafen, Germany: VDE Publishing House 2008. 2008: 1-4.
- [40] Raney R K. DESDynI adopts hybrid polarity SAR architecture [C]// Proceedings of the 2009 IEEE Radar Conference. California, USA: IEEE Press, 2009: 1-4.