

简缩极化SAR数据处理与应用研究进展

许璐^① 张红^{*①} 王超^{①②} 吴樊^① 张波^① 汤益先^①

^①(中国科学院空天信息创新研究院数字地球重点实验室 北京 100094)

^②(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 极化信息能丰富合成孔径雷达(SAR)数据的信息量,在农业、环境、海洋、森林、军事等领域取得了广泛的应用,但同时也面临分辨率较低、幅宽较小的问题,带来较高的应用成本。简缩极化SAR(CP SAR)作为一种能同时获取较为丰富的地表信息并实现较大幅宽观测的极化SAR模式,在过去十余年中引起了科研人员的广泛关注。随着印度RISAT-1卫星的成功发射,简缩极化SAR在一系列应用研究中取得了新进展。该文简要介绍了简缩极化SAR的经典数据处理方法,总结了近十余年来简缩极化SAR在农业和海洋应用领域的主要研究成果,最后对其发展方向进行了分析与展望。

关键词: 合成孔径雷达; 简缩极化SAR; 混合极化; 极化分解; 分类

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2020)01-0055-18

DOI: 10.12000/JR19106

引用格式: 许璐,张红,王超,等. 简缩极化SAR数据处理与应用研究进展[J]. 雷达学报, 2020, 9(1): 55-72. doi: 10.12000/JR19106.

Reference format: XU Lu, ZHANG Hong, WANG Chao, *et al.* Progress in the processing and application of compact polarimetric SAR[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(1): 55-72. doi: 10.12000/JR19106.

Progress in the Processing and Application of Compact Polarimetric SAR

XU Lu^① ZHANG Hong^{*①} WANG Chao^{①②} WU Fan^①
ZHANG Bo^① TANG Yixian^①

^①(Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Beijing 100094, China)

^②(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Polarimetric information enriches the content of a Synthetic Aperture Radar (SAR) and has been widely used in agriculture, environment, ocean, forest, military, and other fields. However, it also faces limitations regarding its low resolution and small width, which lead to high application cost. As a novel polarimetric SAR system that can simultaneously obtain relatively rich scatter information and large swath, Compact Polarimetric SAR (CP SAR) has attracted extensive attention from researchers in the past decade. With the successful launch of India's RISAT-1 satellite, new progresses have been made in the application fields on CP SAR. In this paper, the classical data processing methods of CP SAR are briefly introduced and the main research results of the application of CP SAR in the agriculture and maritime fields over the past 10 years are summarized. Finally, the prospects on its development are given.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Compact Polarimetry SAR(CP SAR); Hybrid polarimetric; Polarimetric decomposition; Classification

收稿日期: 2019-12-02; 改回日期: 2020-02-02; 网络出版: 2020-02-17

*通信作者: 张红 zhanghong@radi.ac.cn *Corresponding Author: ZHANG Hong, zhanghong@radi.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(41971395, 41930110)

Foundation Items: The Natural National Science Foundation of China (41971395, 41930110)

责任编辑: 洪文 Corresponding Editor: HONG Wen

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种工作于微波波段的主动式遥感手段,利用电磁波的相干获取对地观测影像,具有全天时、全天候成像的优点,在多云多雨区域比传统的光学遥感更有优势,对全球地表观测有重要意义^[1]。相较于单极化SAR,全极化SAR包含更加全面的地表散射信息,能有效提高SAR系统进行精确地表分类的能力,在农业^[2,3]、环境^[4]、海洋^[5,6]等应用领域极具潜力。但是,全极化需交替发射水平(H)和垂直(V)两个线性极化电磁波信号,这对SAR系统天线技术、数据下传速率、系统功耗等性能提出了更高的要求,其脉冲重复频率需为传统双极化SAR系统的两倍,而数据覆盖面积理论上也仅为双极化系统的1/2^[7],使得系统设计复杂度、系统维护和数据获取成本增加,限制了全极化SAR的应用。为了弥补这一缺陷, Souyris等人^[8]于2005年首次提出简缩极化SAR的概念。

简缩极化SAR本质上是一种双极化系统,相较于全极化SAR,系统的设计和维护复杂度较低、成像范围更大。目前已提出3种简缩极化SAR工作模式,分别是发射45°线极化波、接收H和V线极化波的 $\pi/4$ 模式^[8];发射左旋或右旋圆极化波、接收左旋和右旋圆极化波的双圆极化(Dual Circular Polarization, DCP)模式^[9];发射左旋或右旋圆极化波、接收H和V线极化波的混合极化(Hybrid Polarimetric, HP)模式,又被称为圆极化发射线极化接收模式(Circular Transmit and Linear Receive, CTRLR)^[10]。相较于传统线性双极化SAR,简缩极化SAR能够存储回波信号的相位,信号组合方式更加灵活,从而能获取更丰富的散射信息,在许多应用中取得了与全极化SAR数据相近的结果。

简缩极化SAR观测系统经历了对月到对地的发展。2008年,印度空间研究组织(IRSO)和美国宇航局(NASA)分别将搭载Mini-SAR的Chandraayan-1卫星和搭载Mini-RF的月球勘测卫星(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)发射至近极地低空月球轨道,用HP模式简缩极化SAR系统观测月球表面极化散射特性^[11,12]。2012年4月, IRSO发射RISAT-1卫星^[13],可提供HP模式简缩极化SAR数据,目标是服务于农业、林业、土壤、地质及海岸线监测等应用领域的全天时和全天候观测。作为第1颗具备简缩极化对地观测模式的星载成像雷达卫星, RISAT-1已向研究人员和应用部门提供了非常有价值的实际数据,为简缩极化SAR的应用与推广奠定了基础。虽然IRSO已在2017~2018年度的年度报

告中宣布RISAT-1停止运行,未来仍有多个国家计划发展简缩极化SAR系统,如2014年,日本发射ALOS-2卫星,搭载PALSAR-2雷达成像传感器,将HP模式的简缩极化成像作为实验模式^[14];加拿大已于2019年6月12日发射3颗雷达卫星星座任务(RADARSAT Constellation Mission, RCM)卫星^[15];美国DESDynI计划的L波段干涉SAR^[16]、印度的第2次探月任务Chandrayaan-2^[17]和RISAT-1A卫星等都将具备HP模式的简缩极化观测能力。可以预见,这些任务将为简缩极化SAR的实际应用提供有利条件。

目前,研究人员们已利用模拟数据和RISAT-1获取的真实简缩极化SAR数据开展了简缩极化SAR数据处理方法与应用研究。本文首先对简缩极化SAR数据处理方法进行总结,分别介绍简缩极化SAR的全极化信息重建和极化分解方法,随后对简缩极化SAR在农业和海洋领域的应用研究进行综述,最后提出对简缩极化SAR未来发展趋势的设想与展望。

2 简缩极化SAR数据处理方法

2.1 全极化信息重建

简缩极化SAR数据处理方法可以分为两类^[18],第1类是用简缩极化SAR数据重建全极化数据的相干矩阵或协方差矩阵;第2类是直接提取简缩极化SAR数据的信息来描述目标的极化散射特性。3种模式的简缩极化SAR散射矢量均可以表示为全极化SAR散射矩阵元素的线性组合,因此可以很方便地利用全极化SAR进行简缩极化SAR的数据仿真。反之,如果能够利用简缩极化SAR数据重建全极化模式下协方差矩阵,即可直接应用传统的全极化数据处理和应用算法。因此,全极化信息重建是简缩极化SAR的重要研究方向。由于目前仅有印度RISAT-1卫星提供了简缩极化SAR实测数据,ALOS-2卫星并未公开提供其实验模式数据,绝大部分简缩极化SAR的研究都建立在仿真数据的基础上。仿真数据与全极化SAR本质上是同一套数据,因此通过仿真数据重建的全极化伪协方差矩阵可以直接与原始全极化数据进行比较。本节将对基于简缩极化SAR的全极化信息重建方法进行总结。

2005年, Souyris等人^[8]首次提出了 $\pi/4$ 模式的结构,并设计了全极化伪协方差矩阵重建算法:(1)假设反射对称性成立,同极化和交叉极化散射不相关,即 $\langle S_{HH}S_{HV}^* \rangle = \langle S_{HV}S_{VV}^* \rangle = 0$,将待重建的未知数个数从6个降低到了4个;(2)假设旋转对称性条件成立,提出共极化通道与交叉极化通道之间的功率关系

$$\frac{\langle |S_{HV}|^2 \rangle}{\langle |S_{HH}|^2 \rangle + \langle |S_{VV}|^2 \rangle} = \frac{(1 - |\rho_{HH-VV}|)}{N} \quad (1)$$

其中, S_{HH} , S_{VV} , S_{HV} 分别表示HH, VV, HV通道的散射矩阵元素; ρ_{HH-VV} 为共极化通道相干系数, 完全极化波的 ρ_{HH-VV} 为1, 完全去极化波的 ρ_{HH-VV} 为0, 自然目标的 ρ_{HH-VV} 介于两者之间; 参数 N 为经验值, Souyris将其设置为4。基于式(1)可迭代地估计 S_{HV} 项, 并根据全极化与 $\pi/4$ 模式协方差矩阵元素之间的关系, 重建全极化协方差矩阵。Nord等人^[19]提出, 式(1)适用于完全随机的偶极子散射, 但是并不适用于完全随机的体散射, 从这一点出发, 对Souyris重建算法进行了改进, 并推导了DCP和HP模式下简缩极化SAR数据的重建模型。改进的重建方法将Souyris模型作为初值, 根据式(2)进行 N 和 $\langle |S_{HV}|^2 \rangle$ 的迭代更新

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

将更新的 N 值重新代入模型中, 获取修正的重建结果并继续更新参数 N , 直到两次迭代 N 的变化较小时, 认为模型获得稳定解。2011年, Yin等人^[20]针对反射对称性条件不成立的情况提出一个基于四分量分解的重建方法, 用单位矩阵描述体散射分量, 通过体散射功率 P_v 和螺旋体散射功率 P_h , 将共极化与交叉极化通道之间的关系修改为

$$\frac{\langle |S_{HV}|^2 \rangle}{\langle |S_{HH}|^2 \rangle + \langle |S_{VV}|^2 \rangle} = \frac{(1 - |\rho_{HH-VV}|)}{4} \left(\frac{P_v + 2P_h}{P_v} \right) \quad (3)$$

其中, P_v 和 P_h 分别表示体散射功率和螺旋体散射功率。将这一方法应用于两组AIRSAR C波段图像的船舶检测中, 实验结果表明改进后的重建算法比Souyris算法检测效果更优。

以上全极化信息重构算法没有以特定地物为目标, 可以适用于许多简缩极化SAR的应用领域, 但某些地物的散射机制与假设条件并不相符。针对海面的布拉格散射机制, 研究人员提出了其他重建方法。Denbina和Collins等人^[21,22]认为Nord模型会受到初值的影响, 而遵从布拉格散射机制的平静海面不应直接采用 $N=4$ 作为初值。他们提出利用 N 的平均值 \bar{N} 进行全极化伪协方差矩阵的计算, 建立了 \bar{N} 与成像入射角的非线性检验模型

$$\bar{N} = b_1 + b_2 \exp(-\theta^{b_3}) \quad (4)$$

其中, $b_{i=1,2,3}$ 为模型拟合系数, θ 表示入射角, 改

进后的算法可称为Constant- N 算法。利用不同入射角的RADARSAT-2图像模拟HP模式的简缩极化SAR数据开展海面目标检测, 结果表明该模型能够改善海洋场景下的重建效果。Li等人^[23]认为已有的重建算法不能满足定量风速反演对参数 N 的估计要求, 他们利用2062个带浮标观测数据的图像样本点研究了参数 N 与雷达入射角、风速和风向之间的关系, 明确指出 N 不仅是入射角的函数, 同时也是风速和风向的函数, 但入射角对 N 的影响比风速和风向更为显著, 在入射角大于 40° 时 N 的值接近于4, 但在入射角小于 30° 时 N 的值很大。据此, Li等人提出了一个新非线性回归模型来估计 N

$$N = P_1\theta^4 + P_2\theta^3 + P_3\theta^2 + P_4\theta + P_5 \quad (5)$$

其中, θ 表示入射角, $P_{i=1,2,3,4,5}$ 表示模型拟合系数。在实验结果中该模型的交叉极化项估计精度优于Nord方法和Collins方法, 与全极化反演结果之间的均方根误差(Root-Mean-Square Error, RMSE)仅有1.09 dB。针对海面溢油检测, Li等人^[24]将式(1)等号左边的部分定义为参数 R , 提出一个新的参数 N 估计模型

$$N = a \times R^b; R = \frac{\langle |S_{HV}|^2 \rangle}{\langle |S_{HH}|^2 \rangle + \langle |S_{VV}|^2 \rangle} \quad (6)$$

其中, a 和 b 为模型拟合系数。在溢油检测对比实验中, 该方法的中误差、标准差、交叉熵和互信息均优于Souyris重建方法。

以上方法均用参数 N 描述交叉极化和共极化项之间的关系, 特点是针对不同的假设条件和应用需求改变 N 的迭代估计模型。也有部分研究人员针对HP模式简缩极化SAR的独特性质, 提出了不需要进行迭代计算的全极化信息重建方法。Espeseth等人^[25]提出了两个利用HP模式Stokes参数(g_0, g_1, g_2, g_3)进行全极化信息重建的方法: (1)基于极化度(Degree of Polarization, DoP)的重建方法, 根据交叉极化项与去极化能量之间的关系直接计算 $\langle |S_{HV}|^2 \rangle$

$$\langle |S_{HV}|^2 \rangle = \frac{(1 - \text{DoP})g_0}{2} \quad (7)$$

这一方法隐含的假设条件是交叉极化项贡献了所有去极化能量; (2)基于特征值的重建方法, 假设HP模式协方差矩阵特征值 λ_1 和 λ_2 的比率直接反应了 $\langle |S_{HV}|^2 \rangle$ 与散射总功率 g_0 之间的关系, 可根据式(8)直接计算 $\langle |S_{HV}|^2 \rangle$

$$\langle |S_{HV}|^2 \rangle = \frac{\lambda_2 g_0}{2\lambda_1} \quad (8)$$

将上述两种方法应用于L波段和C波段海冰图

像的全极化信息重建,发现L波段的重建效果优于C波段,基于特征值的重建方法与Souryis重建结果相当,略优于基于DoP的重建方法。相较于Souryis方法,这两种方法无需任何用户输入,解算更加简单。Ajeet Kumar等人^[26]假设所有去极化能量都来自体散射分量,HP模式的去极化程度又可以直接由散射熵 H 衡量,采用Freeman-Durden分解的体散射模型建立体散射分量、散射熵和总散射功率之间的关系,可以直接解得 $\langle |S_{HV}|^2 \rangle$

$$P_v = H \times (\lambda_1 + \lambda_2) = 8 \times \langle |S_{HV}|^2 \rangle \quad (9)$$

$$\langle |S_{HV}|^2 \rangle = \frac{1}{8} \times H \times (\lambda_1 + \lambda_2) \quad (10)$$

其中, P_v 表示体散射分量,根据HP模式特征值与Stokes参数之间的关系可知, $(\lambda_1 + \lambda_2)$ 等于散射总能量 g_0 。Ajeet Kumar等人的实验结果表明,该方法重建结果的Yamaguchi四分量分解结果与原始全极化数据较为接近,最高精度可达95%,在RISAT-1真实HP模式数据中的总体分类精度优于84%,显著优于Souryis方法和Espeseth特征值重建方法。

Espeseth等人和Ajeet Kumar等人提出的方法虽然规避了迭代求解 N 的过程,但仅适用于HP模式,且对假设条件的依赖性较强。Yue等人^[27]基于

反射对称性假设提出了一个不依赖于参数 N 的重建方法,利用Wishart-Bayesian正则化模型来重建全极化数据,通过引入一个独立复高斯分布的估计误差项,推导了多视全极化SAR图像协方差矩阵的后验概率密度函数表达式,将全极化信息重建问题转化为式(11)的优化问题

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{X}} \{-\ln p(\mathbf{X}|\mathbf{Y})\} \\ & = \min_{\mathbf{X}} \left(n \text{Tr}(\mathbf{C}^{-1}\mathbf{X}) + \frac{1}{\sigma^2} \left\| \mathbf{Y} - \frac{1}{2} \mathbf{A} \mathbf{X} \mathbf{A}^H \right\|_F^2 \right. \\ & \quad \left. - (n-q) \ln |\mathbf{X}| \right) \end{aligned} \quad (11)$$

其中, \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 分别表示全极化和简缩极化的协方差矩阵观测值, $p(\mathbf{X}|\mathbf{Y})$ 表示 \mathbf{X} 的后验概率, \mathbf{C} 表示全极化协方差矩阵期望值, \mathbf{A} 是一个 2×3 的矩阵,表示从全极化到简缩极化的线性变换, σ 为误差项的方差, n 表示视数, q 表示维度,对于全极化系统有 $q=3$ 。利用高效乘子交替方法对上式进行优化,即可获得全极化协方差矩阵的估计值。由于不依赖于反射对称性假设,该方法可以获取所有全极化协方差矩阵元素的估值,但是对 $\langle S_{HH} S_{HV}^* \rangle$ 和 $\langle S_{VV} S_{HV}^* \rangle$ 的虚部估计精度较低。

表1对上述各全极化信息重建方法的特点进行

表 1 简缩极化SAR全极化(FP)信息重建方法小结

Tab. 1 Summary of Fully Polarimetric (FP) information reconstruction methods for CP SAR

文献	方法特点	适用模式	应用领域
文献[8]	假设反射对称性成立, 提出 S_{HV} 与 S_{HH} 和 S_{VV} 的关系: $\frac{\langle S_{HV} ^2 \rangle}{\langle S_{HH} ^2 \rangle + \langle S_{VV} ^2 \rangle} = \frac{(1 - \rho_{HH-VV})}{N}$	不限	不限
文献[19]	考虑到完全随机体散射的情况, 提出应迭代地修改 N 的值: $N = \frac{\langle S_{HH} - S_{VV} ^2 \rangle}{\langle S_{HV} ^2 \rangle}$	不限	不限
文献[20]	假设反射对称性不成立, 用改进的四分量分解方法, 修改 S_{HV} 与 S_{HH} 和 S_{VV} 的关系 $\frac{\langle S_{HV} ^2 \rangle}{\langle S_{HH} ^2 \rangle + \langle S_{VV} ^2 \rangle} = \frac{(1 - \rho_{HH-VV})}{4} \left(\frac{P_v + 2P_h}{P_v} \right)$	不限	海面船舶检测
文献[21,22]	针对海面目标检测, 提出用 N 的平均值 \bar{N} 进行重建, 并给出 \bar{N} 的估计模型 $\bar{N} = b_1 + b_2 \exp(-\theta^{b_3})$	不限	海面目标检测
文献[23]	针对海面风速反演, 提出新的参数 N 估计模型: $N = P_1\theta^4 + P_2\theta^3 + P_3\theta^2 + P_4\theta + P_5$	不限	海面风速反演
文献[24]	针对海面溢油检测, 提出新的参数 N 估计模型 $N = a \times R^b; R = \frac{\langle S_{HV} ^2 \rangle}{\langle S_{HH} ^2 \rangle + \langle S_{VV} ^2 \rangle}$	不限	海面溢油检测
文献[25]	基于Stokes参数, 提出两个直接估计交叉极化项的方法 $\langle S_{HV} ^2 \rangle = \frac{(1 - \text{DoP}) g_0}{2}; \langle S_{HV} ^2 \rangle = \frac{\lambda_2 g_0}{2\lambda_1}$	HP模式	海冰监测
文献[26]	根据Freeman-Durden分解的体散射模型提出直接估计交叉极化项的方法 $P_v = H \times (\lambda_1 + \lambda_2) = 8 \times \langle S_{HV} ^2 \rangle$	HP模式	不限
文献[27]	提出基于Wishart-Bayesian正则化的重建方法, 不依赖参数 N 的估计	不限	不限

了简要总结。Souyris等人建立了重建方法的基本框架, 即通过建立 S_{HV} 与 S_{HH} 和 S_{VV} 的关系减少未知量的个数, 但采用固定值作为模型参数, 对某些场景应用效果不佳。Nord等人用迭代方法估计参数 N , 实现了对Souyris算法的扩展。后续发展的大部分重建算法都建立在Souyris和Nord算法的基础上, 提出新的参数 N 估计模型以改善应用表现, 在海洋应用领域尤为明显。部分研究人员根据HP模式的特征直接估计交叉极化项, 但是这些方法隐含着对散射机制的假设, 因此还需得到更多应用场景下的检验。

2.2 简缩极化SAR极化分解

全极化信息的重建过程实际上是利用3个观测值估计6个待重建参数的非确定性问题, 需要通过一定的假设条件降低未知数个数, 或者利用迭代优化方法逼近真值, 计算复杂度较高。考虑到SAR数据获取和地表条件的多样性, 很难提出一个通用的重建模型。文献[28-30]均不建议从重建角度使用简缩极化SAR, 因为全极化信息重建的过程没有引入有用信息, 假设条件可能为重建结果引入更多误差。因此, 越来越多的研究人员选择直接从简缩极化SAR中提取有用信息。本节将对目前主流的简缩极化SAR极化分解方法进行总结。

2.2.1 基于Stokes参数的极化分解

简缩极化SAR数据常用Stokes矢量 $[g_0, g_1, g_2, g_3]$ 的形式进行描述, 对于给定的入射极化波, 双极化系统的Stokes矢量可以表示为^[31]

$$g = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle |\mathbf{E}_H|^2 + |\mathbf{E}_V|^2 \rangle \\ \langle |\mathbf{E}_H|^2 - |\mathbf{E}_V|^2 \rangle \\ 2\text{Re} \langle \mathbf{E}_H \mathbf{E}_V^* \rangle \\ 2\text{Im} \langle \mathbf{E}_H \mathbf{E}_V^* \rangle \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \langle |\mathbf{E}_L|^2 + |\mathbf{E}_R|^2 \rangle \\ 2\text{Re} \langle \mathbf{E}_L \mathbf{E}_R^* \rangle \\ 2\text{Im} \langle \mathbf{E}_L \mathbf{E}_R^* \rangle \\ \langle |\mathbf{E}_L|^2 - |\mathbf{E}_R|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, \mathbf{E} 表示电场矢量, 下角标表示接收极化态, 符号*表示复数共轭操作, Re 表示取复数实部, Im 表示取复数虚部, $|\cdot|$ 表示复数的模, $\langle \cdot \rangle$ 表示空间平均, g_0 表示电磁波的总功率, g_1 表示水平或垂直线极化分量功率值, g_2 表示方位角 $\psi=45^\circ$ 或 $\psi=135^\circ$ 时的线极化分量功率值, g_3 为左旋圆极化和右旋圆极化分量的功率值^[1]。根据Stokes矢量可以计算一系列简缩极化SAR特征, 如极化度 m 、线极化比 μ_L 、线极化度 P_L 、圆极化比 μ_C 、圆极化度

P_C 、极化椭圆方位角 ψ 、轴长比 r 、相对相位 δ 、圆度 χ 等。

根据波的二分理论, 可以用极化度 m 将简缩极化SAR协方差矩阵分为去极化分量和完全极化分量。Charbonneau等人^[32]用相对相位 δ 表征完全极化波中偶次散射与表面散射的占优机制, 提出了 m - δ 分解。Raney认为^[11,33], 当发射电磁波具有很强的线极化分量时, 图中二面角结构的朝向发生任意改变均可能造成 δ 的符号变化, 而圆度 χ 则较为稳定, 提出了 m - χ 分解以描述月球表面陨石坑的偶次散射效应。Cloude等人^[34]利用随机地表二层散射模型(Random Volume Over Ground, RVOG)模型提出 m - α_s 分解方法, α_s 角从 0° 变化到 90° 表示主导散射机制由表面散射变为体散射最后变为偶次散射的过程, 将该分解应用于森林火点检测, 发现森林火点的体散射分量明显低于其他区域。Sabry等人^[35]将简缩极化特征表示为椭圆度角和横滚角的函数, 讨论了 m - χ 分解结果随椭圆度角的变化, 提出利用 P_C 修正偶次散射分量。实验结果表明不同椭圆度角下的简缩极化数据描述的散射机制存在差异, 右旋HP模式下, 改进 m - χ 分解的城市-植被边界比 m - χ 分解更加明确。需要注意的是, 在提高偶次散射和表面散射的差的同时, 改进 m - χ 分解的三分量散射功率之和发生变化。

基于Stokes参数的分解方法均根据极化度和 g_0 计算体散射分量, 本质上是将极化总功率中的完全去极化部分全部认定为体散射, 而实际上, 强偶次散射、噪声等也是造成去极化的原因, 因此该方法容易出现体散射分量过估计的情况。

2.2.2 H/α 分解

简缩极化SAR的 H/α 分解原理与全极化SAR类似。Guo等人^[36]验证了3种简缩极化SAR模式的 H/α 分解结果, 发现只有DCP模式能够区分不同散射机制, 提出了DCP模式下的 H/α 空间: 将0.5作为低熵与中熵分界, 0.95作为中熵与高熵分界; 在低熵区, 将 $\alpha=43^\circ$ 和 $\alpha=49^\circ$ 分别作为多次散射、体散射、表面散射分界; 在中熵区, 将 $\alpha=38^\circ$ 和 $\alpha=50^\circ$ 作为多次散射、体散射、表面散射分界; 在高熵区, 将 $\alpha=43^\circ$ 和 $\alpha=56.8^\circ$ 作为多次散射、体散射、表面散射分界。Zhang等人^[37]针对DCP模式提出了另一个 H/α 空间划分: 将0.65作为低熵与中熵分界, 0.96作为中熵与高熵分界; 在低熵区, 将 $\alpha=42^\circ$ 和 $\alpha=48^\circ$ 分别作为多次散射、体散射、表面散射分界; 在中熵区, 将 $\alpha=40^\circ$ 和 $\alpha=51^\circ$ 作为多次散射、体散射、表面散射分界; 在高熵区, 将 $\alpha=34.5^\circ$ 和 $\alpha=51^\circ$ 作为多次散射、体散射、表面散

射分界。谢镭^[38]在其博士论文中推导了3种简缩极化SAR在不同散射机制下的平均散射角，证实了Guo等人^[36]的研究结论，即只有DCP模式的 α 角具有区分不同散射机制的能力；通过散射熵和散射角的替代参数对分解结果进行了定性和定量比较，发现DCP模式的散射角与全极化SAR呈近似互余的关系，且其 H/α 分解结果不具备绕雷达视线方向的旋转不变性。

2.2.3 基于模型的三分量分解

基于模型的极化分解方法在全极化SAR中应用广泛，分别将方向随机的偶极子集合、二面角反射器和布拉格表面散射体的散射矩阵作为体散射、偶次散射和表面散射模型。Freeman-Durden分解是全极化SAR最常用的分解方法之一，2014年，Guo等人^[39]将其推广至 $\pi/4$ 模式和HP模式的简缩极化SAR数据中，在反射对称性假设条件下，给出了模型的求解过程，以 $\text{Re}(\langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle)$ 的符号作为表面散射或偶次散射占优的判别条件。刘萌等人^[40]以HP模式为例提出一个基于模型的三分量分解方法，采用 A_n 模型作为体散射模型，认为完全去极化部分全部属于体散射分量，利用相对相位 δ 进行主导散射机制的判别，但是该模型本质上是一个二分模型，当判定表面散射或偶次散射占主导时，另一种散射机制的值实际为0。Han等人^[41]将Freeman-Durden分解用于简缩极化SAR干涉测量中，建立了 $\pi/4$ 模式和HP模式的极化干涉三分量分解方程，首先用Stokes参数估计体散射分量，用RVOG模型估计偶次散射地形相位，生成包含8个未知数、4个复已知数的8个实方程组，随后用数值方法实现了3种散射机制的功率值和相位中心的联合反演。Ajeet Kumar等人^[42]针对HP模式提出了一个三分量分解模型，采用Yamaguchi提出的改进体散射模型、Freeman-Durden分解的表面散射和偶次散射模型，以 g_3 的符号作为表面散射或偶次散射占优的判别条件，并采用与Sabry等人类似的策略，用圆极化度修正了偶次散射强度。用RISAT-1真实HP模式图像对该方法进行验证，发现该方法能够较好地地区分表面散射和二面角散射。

表2总结了上述3类简缩极化SAR分解方法的优缺点。无论是基于Stokes参数的分解还是基于模型的分解都存在体散射过估计的问题，即三分量假彩色合成图色调偏“绿”。这是由于大部分分解方法将去极化全部归因于体散射机制，忽略了偶次散射和表面散射对去极化的贡献。体散射过估计可能导致复杂城市场景与植被覆盖区域的混淆，因此这些极化方法更适用于森林、平原等自然地物为主的场景。此外，基于模型的分解隐含着对散射机制的假设，而且目前很少有研究关注简缩极化SAR的负功率像素问题，各模型的适用性仍然有待进一步的检验。根据谢镭^[38]的分析，简缩极化的 H/α 分解存在散射熵过估计的问题，在城市区域表现较为明显。考虑到理论上只有DCP模式的 α 角能进行不同散射机制的区分，而目前已发射和计划发射的星载简缩极化SAR均为HP模式数据， H/α 分解的实用价值受到一定限制。由于简缩极化散射熵和极化度本质上都描述去极化程度，目前更多研究人员将 H/α 分解的结果作为特征，而非直接使用 H/α 空间本身开展应用。

3 简缩极化SAR应用

随着简缩极化SAR系统和数据处理技术研究的不断深入，国内外科研人员对简缩极化SAR在不同应用领域的表现进行了检验，研究结果表明简缩极化SAR在分类、地表参数反演、目标检测等领域能够取得与全极化相当的结果。本章将对其在农业和海洋领域的应用进行总结。

3.1 农业应用

3.1.1 农作物分类

与全极化SAR类似，Wishart分类是简缩极化SAR最主要的分类方法之一。基于重建的伪全极化数据，Souyris等人^[8]对荷兰Flevoland地区的仿真 $\pi/4$ 模式数据进行Wishart分类实验，其结果接近全极化SAR。Ainsworth等人^[43]对比了全极化、双极化和简缩极化SAR的Wishart分类精度，实验结果中简缩极化SAR的分类精度优于双极化SAR。Vineet Kumar等人^[44]对ALOS-2的全极化、仿真简缩极化

表 2 简缩极化SAR极化分解方法小结

Tab. 2 Summary of the polarimetric decomposition methods for CP SAR

类型	优点	缺点
基于Stokes参数	简单易行，便于理解	存在体散射过估计
H/α 分解	便于与全极化SAR进行直接对比	只有DCP模式的 α 角能指示不同散射机制，且与全极化之间存在近似余角的关系；存在散射熵过估计
基于模型的分解	便于与全极化SAR进行直接对比	分解结果受模型假设条件影响；存在体散射过估计；需迭代求解模型结果，计算较为复杂

和真实简缩极化数据进行Wishart分类,发现真实简缩极化数据在偶次散射主导区域的分类精度略高于仿真简缩极化数据,而在农作物区域的分类精度则略低于仿真数据。

基于极化分解特征,研究人员们主要利用机器学习方法开展农作物分类研究,将简缩极化的农作物分类结果与全极化进行对比。Charbonneau等人^[45]用决策树分类器对HP模式的农作物分类能力进行了研究,分别构建 m - δ 三分量分解、Stokes矢量和Stokes子参数3组特征空间,实验结果表明Stokes矢量空间能获取最好的总体分类精度,接近甚至优于全极化SAR。Ohki等人^[46]用400景ALOS-2全极化图像进行了日本的土地利用/土地覆盖(Land Use and Land Cover, LULC)分类,用支持向量机(Support Vector Machine, SVM)分类器对比了不同输入特征下全极化、仿真HP模式简缩极化和双极化数据的分类精度,实验结果中,简缩极化对水稻、草地、农作物和裸地的分类精度略低于全极化数据,对水体、森林和建筑的分类精度与全极化相当。Brisco等人^[47]用5景全极化数据仿真 $\pi/4$ 模式和HP模式,将简缩极化、双极化与全极化数据的水稻提取和湿地提取的精度进行比较,结果证明HP模式的简缩极化SAR能取得比HH/HV双极化SAR更好的分类结果。Xu等人^[48]用随机森林(Random Forest, RF)对比了HP模式与全极化SAR的农作物分类精度,发现在像素级分类策略下HP模式的分类精度略低于全极化,而在目标级分类策略下的分类精度与全极化相当;此外,用4景RADARSAT-2数据进行HP模式、 $\pi/4$ 模式和全极化SAR的玉米种植区提取^[49],发现多时相情况下简缩极化SAR的提取精度与全极化相当。Mahdianpari等人^[50]用4景5月—7月的全极化、双极化和简缩极化SAR图像进行农作物分类,获得了相似的实验结论:在像素级分类策略下,简缩极化SAR的农作物分类精度与双极化相当,低于全极化;在对象级分类策略下,简缩极化SAR的农作物分类精度与全极化相当,优于双极化。此外, Mahdianpari等人还发现体散射特征对全极化和简缩极化最重要,7月下旬的数据对C波段农作物分类最有利,但仅凭单时相图像很难获得高精度分类结果。

上述研究结果均证明简缩极化有能力取得与全极化相当的农作物分类精度,整体表现优于双极化SAR,在Charbonneau等人^[45]的实验结果中简缩极化SAR甚至能取得比全极化更优的分类精度, Brisco等人^[47]的实验结果中HP模式与全极化的水稻识别精度均超过90%。对于农作物分类,数据的选

择和特征的选择都对分类结果有很大影响。部分研究人员在分类时对简缩极化SAR的特征性质也进行了分析。Xie等人^[51]讨论了 μ_L 和 P_L 在水稻种植区提取中的有效性;此外,提出一个基于表面散射分量和散射角替代参数的农作物分类特征空间^[52],用TerraSAR-X数据实现了中国南方地区的水稻、桉树、甘蔗、香蕉、水体、建筑分类,该方法可同时适用于全极化、HH/VV双极化和简缩极化数据。Uppala等人^[53,54]对比了水稻、玉米等农作物区域与建筑等人工目标在RISAT-1真实HP模式数据中的后向散射强度和极化分解结果,用非参数平行6面体最小距离分类器进行水稻和玉米种植区提取,其结果与LISS-II光学数据具有较好的一致性。国贤玉等人^[55]从仿真HP模式数据中提取了22个特征,采用基于SVM的前序搜索策略进行3类水稻田分类的特征优选,选择RR极化后向散射系数 σ_{RR} 、 m - δ 分解偶次散射和体散射分量、 m - χ 分解偶次散射分量和 μ_C 构造决策树,其总体分类精度与相同参数下的SVM方法相当,均优于90%。Chirakkal等人^[56]对比了RISAT-1数据 m - δ 和 m - χ 分解对印度北部和西部的农作物分类精度,最大似然分类器的结果表明 m - χ 分解的分类效果更优。

上述研究结果证明了简缩极化SAR用于农作物分类的潜力,考虑到其幅宽的优势,简缩极化SAR很适合进行大面积农作物分类,在多时相数据和合适的特征集下分类精度可以达到全极化SAR的水平。

3.1.2 农作物参数反演

随着SAR载荷的发展,SAR数据的时间分辨率逐渐提高,多时相数据为农作物生长监测和生物物理学参数的反演提供了机会。许多学者研究了简缩极化SAR特征随农作物生长的变化情况及其与农作物生物物理学参数之间的关系。Ballester等人^[57]用ESAR L波段时间序列全极化数据仿真HP模式数据开展冬小麦、玉米和油菜生长监测,研究了简缩极化特征与种植面积、物候阶段、叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)、湿生物量、高度等参数的关系,用线性模型描述了 δ 与小麦、玉米湿生物量的关系和 m 与冬油菜高度的关系,用对数平方模型描述了 μ_C 与玉米湿生物量的关系。研究结果表明HP模式简缩极化SAR能为农作物的定性与定量监测提供充足的灵敏度。Zhang等人^[58]用覆盖油菜全生育期的5景仿真HP模式数据进行油菜生长参数的反演,考察了27维极化参数的时间演进规律,RF方法的重要性排序表明 g_0 、 g_3 、 m 、 δ 、 χ 、 μ_C 、 P_C 、后向散射系数、极化分解体散射分量对生物量较为敏感,在

各单参数模型中, g_3 能获取最优生物量反演精度, 圆极化比 μ_C 能获取最优LAI和株高反演精度。Dave等人^[59]研究了旱地和灌溉地条件下棉花的株高、株龄和生物量与12维HP模式特征和4维伪全极化特征之间的关系, 结果表明简缩极化特征与棉花的生物物理参数具有较好的相关性, 而伪全极化特征并没有获取更优越的结果。Homayouni等人^[60]评估了C波段RADARSAT-2全极化和仿真HP模式数据的体散射与表面散射之比(Volume to Surface Ratio, VSR)在监测作物生长方面的潜力, 研究表明VSR与归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)和土壤调整植被指数(Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI)有强相关性, HP模式VSR与农作物生物量之间相关性略高于全极化, 其中, 与玉米和油菜生物量的相关性超过0.8。Guo等人^[61]用改进的水云模型验证了简缩极化数据反演水稻生物物理参数的能力, 结果表明简缩极化对水稻株高、穗生物量、冠层含水量的反演精度较高, R^2 大于0.89; 对LAI的反演精度略低, 最高 R^2 为0.75。各类特征中, $g_0, \sigma_{RL}, \sigma_{RV}, m-\chi$ 分解对株高较为敏感, $g_0, \sigma_{RV}, \sigma_{RH}, \sigma_{RR}, \sigma_{RL}$ 对含水量较为敏感, $\sigma_{RH}, \sigma_{RR}, m-\chi$ 和 $m-\delta$ 分解对穗生物量较为敏感。Liu等人^[62]提出了一个基于遗传算法的非线性偏最小二乘(Genetic Partial Least Square, GA-PLS)模型, 从19维特征中选择最敏感的参数进行冬小麦LAI的估计, R^2 达到0.7。

上述研究表明简缩极化SAR对农作物参数反演

有较好潜力, 表3对其实验结论进行了简要总结, 可以发现指示散射机制变化的Stokes子参数对生物量和LAI反演有一定优势, $m-\chi$ 分解在株高和生物量反演中具有优势。

3.1.3 农作物生长物候监测

农作物的生物物理参数与其物候特征息息相关, 除了利用多时相简缩极化SAR进行参数反演, 研究人员还针对农作物生长物候阶段本身开展分类研究。2013年, Yang等人^[63]获取了9景仿真HP模式数据, 用决策树方法进行了水稻移栽田和粳稻直播田的分类, 并根据水稻样本极化特征的时间演进情况, 将其物候特征划分为7个阶段。2017年, Yang等人^[64]从时间序列光学、全极化和仿真简缩极化SAR数据中提取了149维特征(包含26维简缩极化SAR特征), 提出了一种基于Monte Carlo相关性限制(Monte Carlo and the Correlation Limitation, MCCL)的特征选择方法, 用多类相关向量机(multiclass Relevant Vector Machine, mRVM)分别实现了对水稻移栽田和粳稻直播田的物候阶段分类。Lopez-Sanchez等人^[65]详细分析了水稻在10景RADARSAT-2全极化数据、HH/VV双极化数据和仿真HP模式中的极化特征变化, 分别利用全极化的 $H/A/\alpha$ 分解结果和简缩极化的 α_s, m 和Freeman-Durden分解体散射分量, 构造水稻物候分类特征空间。Izumi等人^[66]对全圆极化(Full-Circular Polarimetric, FCP)和DCP模式简缩极化SAR的水稻物候监测进行研究, 对不同物候期的水稻在FCP和

表 3 基于简缩极化SAR特征的农作物生物物理学参数反演研究小结

Tab. 3 Summary of crop biophysical parameter inversion based on CP SAR features

文献	数据	相关植被参数	相关简缩极化特征
文献[57]	12景ESAR L波段仿真HP模式数据	小麦湿生物量	δ
		玉米湿生物量	δ, μ_C
		冬油菜高度	m
文献[58]	5景RADARSAT-2仿真HP模式数据	油菜生物量	g_3
		油菜株高	μ_C
		油菜LAI	μ_C
文献[59]	2景RISAT-1真实HP模式数据	棉花株高	$m-\chi/m-\delta$ 分解体散射分量
		棉花株龄	$\sigma_{RH}, \sigma_{RV}, m-\chi/m-\delta$ 分解体散射分量
		棉花生物量	
文献[60]	6景RADARSAT-2仿真HP模式数据	玉米生物量	$m-\delta$ 分解VSR
		水稻株高	$g_0, \sigma_{RL}, \sigma_{RV}, m-\chi$ 分解
文献[61]	5景RADARSAT-2仿真HP模式数据	水稻冠层含水量	$g_0, \sigma_{RV}, \sigma_{RH}, \sigma_{RR}, \sigma_{RL}$
		水稻穗生物量	$\sigma_{RH}, \sigma_{RR}, m-\chi/m-\delta$ 分解
		水稻LAI	g_0, g_1
文献[62]	1景RADARSAT-2仿真HP模式数据	冬小麦LAI	$H, P_L, m-\delta$ 分解偶次散射分量、反熵 A (即 m)

DCP数据中的后向散射系数、3种散射机制响应以及 H/α 分解结果进行了分析, 论证了圆极化基SAR数据对水稻物候时期的分辨能力。

上述研究证明了简缩极化SAR在农业应用中的潜力, 但由于RISAT-1数据获取存在一定难度, 大部分研究仍然采用仿真HP模式数据。由于HP模式和DCP模式都是圆极化发射, 仿真数据本质上提供了相同的信息, 部分研究通过极化基变换将圆极化接收的后向散射系数视为HP模式的特征。此外, HP模式的Stokes子参数具有指示散射机制变化的能力, 如 μ_C 和 P_C , 而 $\pi/4$ 模式不具备这一特性, 因此上述研究很少考虑 $\pi/4$ 模式。

3.2 海洋应用

3.2.1 船舶检测

部分研究人员针对船舶检测需求对简缩极化SAR的全极化信息重建算法进行了改进, 如2.1节中总结的Yin等人^[20]和Collins等人^[22]均提出改进的重建算法, 分别采取似然比检测器和最小比检测器对改进后的全极化信息重建结果进行船舶检测, 取得了优于Souyris重建模型的船舶检测结果; Collins等人对比了10组通道组合的船舶检测结果, 发现重建的HV通道能够在所有入射角和目标朝向中都取得很好的检测效果, 甚至优于全极化SAR。2014年, Atteia等人^[67]对3种分辨率的仿真RCM数据进行全极化信息重建, 讨论了入射角、船舶朝向对船舶检测的影响, 发现船舶检测的总体精度随着入射角的增大而提高, 在中低分辨率和中低入射角下, 简缩极化SAR检测性能优于双极化。

基于简缩极化特征, Shirvany等人^[68]提出一个基于空间平均的去极化度计算方法, 成功识别海面上的船舶、浮标以及溢油目标, 通过不同入射角下的检测结果验证了该特征的鲁棒性。Yin等人^[69]发现船舶目标周围的海洋背景像素具有较低的去极化度 m , 原因是船体和海面之间多次反射造成去极化; δ 和 χ 虽然会受到海面低风速区(Low Wind Region, LWR)的影响, 但是LWR区域的船舶和弱船舶目标均可通过三分量分解识别, 证明简缩极化的特征组合在海面目标检测方面具有鲁棒性。曹成会^[70]用欧氏距离对40个简缩极化SAR特征进行船舶检测性能评估, 发现表征散射机制变化的特征参数具有较高的船海对比度, 如 P_C 、椭圆方位角、 χ 、 δ 和 α 角等。

上述研究探索了目标和虚警在不同特征中的表现, 初步证明了简缩极化SAR在船舶检测中的有效性。在此基础上, 研究人员们设计了不同的简缩极化SAR船舶检测算法, 以提高船海对比度或减少虚警。Xu等人^[71]用 m - δ 分解的体散射分量和相对相位

构造了一个新的特征以降低虚警, 引入视觉注意模型增强特征对弱船舶目标的检测性能, 设计了基于Log-normal的恒虚警率(Constant False Alarm Rate, CFAR)船舶检测算法, 对3景RADARSAT-2仿真HP数据的船舶检测率和虚警率均优于基于强度或散射总功率SPAN的CFAR检测结果。Fan等人^[72]将CFAR检测结果作为初始结果, 使用双层滑动滤波降低海杂波的影响, 用SVM分类器实现船舶检测, 降低了虚警; 此外, 使用基于像素的全卷积网络U-Net对船舶、陆地和海洋进行分类^[73], 用GF-3数据验证该方法, 发现仿真HP模式的船舶检测表现优于HH单极化和HH/HV双极化数据, 此外, U-Net在降低虚警方面较CFAR方法和Faster RCNN网络更具优势。Gao等人^[74]提出了一种基于功率熵-GAMMA分布的CFAR检测方法, 将散射总功率分解成高熵散射(High-Entropy Scattering Amplitude, HESA)和低熵散射(Low-Entropy Scattering Amplitude, LESA)两部分, 其中HESA分量可以提高船海对比度, 在降低虚警的同时保证检测率, 其有效性在C波段和L波段仿真HP模式数据中得到了验证。此外, Gao等人^[75]将Notch滤波器引入简缩极化SAR, 推导了海杂波在HP模式下Notch距离的概率密度函数, 最后用基于广义GAMMA分布的CFAR算法实现了船舶检测。Ji等人^[76]用ReliefF方法进行简缩极化特征评估, 使用加权SVM进行船舶检测, 最后用 m - χ 分解的表面散射分量滤除方位向模糊, 取得了与全极化SAR相近的船舶检测结果。Cao等人^[77]利用欧氏距离和互信息对40维全极化、简缩极化和双极化SAR特征的船舶检测性能进行对比, 发现简缩极化特征总体上优于全极化或双极化, 此外, 基于X-Bragg模型构造了一个新特征(phase factor), 在各种海况下均取得了良好的检测性能, 但无法在检测的同时完全保持船舶目标的结构。

表4对上述方法的性能进行了简要总结。其中, Xu等人^[71]、Fan等人^[72,73]、Gao等人^[75]和Ji等人^[76]的研究是在已有简缩极化SAR特征的基础上, 设计特征增强方法或者检测器来提升检测性能; Gao等人^[74]、Cao等人^[77]则是通过构造新的特征参量来改进检测结果。这两类方法都可以取得与全极化相当, 甚至更优的检测结果。但是, 上述研究大多采用模拟HP模式数据, 其海杂波分布继承自全极化SAR, 各类虚警与全极化SAR具有较强的一致性。受分辨率、幅宽、入射角等因素的影响, 真实SAR数据中的目标散射特性可能与模拟数据不同, 因此, 未来还需利用真实数据对上述方法进行检验。

表 4 简缩极化SAR船舶检测算法小结
Tab. 4 Summary of the ship detection methods of CP SAR

文献	方法	相关特征	性能
文献[71]	视觉注意机制的特征增强、lognormal-CFAR检测	δ , m - δ 分解体散射分量	优于SPAN-CFAR或RH-CFAR
文献[72]	CFAR预检测、滤波、SVM分类器	δ , χ , RHRV通道相关系数、 m - χ 分解体散射分量	优于SPAN-CFAR、全极化PWF
文献[73]	U-Net网络	RH, RV通道强度	优于HH单极化、HH/HV双极化; 优于CFAR和Faster RCNN网络
文献[74]	广义GAMMA-CFAR检测	HESA, LESA	优于SPAN-CFAR、全极化SPAN-CFAR, H-CFAR
文献[75]	Notch滤波、广义GAMMA-CFAR检测	S_{RH}, S_{RV}	优于HH/HV双极化
文献[76]	ReliefF特征筛选、加权SVM检测、基于 m - χ 分解的虚警滤除	H/α 分解、 m - χ 分解表面散射分量	优于SVM检测器、与全极化相当
文献[77]	-	Phase Factor	优于不同分布下的CFAR检测器

3.2.2 溢油检测

海面溢油检测是海洋环境监测的重要部分。相较于只能提供散射强度信息的单极化SAR, 全极化SAR可以通过散射机制的差异辨别溢油和海水^[78]。简缩极化SAR继承了部分全极化信息, 在溢油检测中的应用得到了广泛关注。如2.1节所述, Li等人^[24]针对溢油检测提出一个新的参数 N 估计模型; Zhang等人^[78]评价了Souyris模型和Nord模型的重建信息在浮油检测中的性能, 发现在不同入射角和风速下重建信息与原始观测均有较好的一致性。

海面溢油检测的基础是光滑油膜的散射机制不同于海面布拉格散射。部分简缩极化SAR特征本身具有指示散射机制变化的能力, 因此无需进行全极化信息的重建也可以实现对溢油的识别。Li等人^[79,80]通过对RADARSAT-2仿真HP模式数据的分析, 发现油膜覆盖区域的 m 显著低于海面, 并提出可以用 χ 和 δ 的符号区分油膜覆盖区域和海面。Kumar等人^[81]对比了RISAT-1真实HP模式数据中溢油、虚警和海面在4种极化分解结果中的差异, 发现在不同极化分解方法的偶次散射和表面散射分量, 中溢油的强度存在差异, 在体散射分量和表面散射分量中, 溢油和虚警与海洋的对比度也存在比较明显的差异, 从而验证了简缩极化SAR极化分解方法探测海面溢油的潜力。Migliaccio等人^[82]用2景ALOS-PALSAR和2景RADARSAT-2数据开展全极化、HH/VV双极化和HP模式的溢油检测实验, 发现简缩极化的 χ 和一致性系数(conformity coefficient)可以在无需外部阈值的情况下实现对溢油的识别, H 和 m 也可以实现溢油与虚警的识别。Yin等人^[83]指出, 海面溢油和船舶目标一般不遵循Bragg散射模型, 利用X-Bragg模型构造了3个极化参数, 进行船舶和海面溢油的联合检测。Nunziata等人^[84]对一系列HP模式特征区分溢油和虚警的能力进行了评估,

提出用 δ 的标准差进行海面溢油检测。Buono等人^[85]分析了溢油、虚警和海水在L波段和C波段仿真 $\pi/4$ 模式和HP模式数据特征值中的响应, 发现 $\pi/4$ 模式和全极化SAR的海水表面均具有较大的 λ_1 , $\pi/4$ 模式的溢油检测性能与全极化相当, 略优于HP模式。Zhang等人^[86]提取全极化、双极化、仿真 $\pi/4$ 模式和HP模式简缩极化SAR中的多维极化特征, 用SVM、ANN和最大似然分类方法进行溢油与生物浮油等虚警的分类, 发现HP模式的总体分类精度优于双极化和 $\pi/4$ 模式。谢广奇等人^[87]使用HP模式特征值计算散射熵、极化比和基准高度, 对前者使用统计阈值分割, 对后者采用OTSU阈值分割, 以实现溢油检测, 实验结果中, RADARSAT-2仿真HP数据的溢油检测率优于基于全极化几何强度与共极化功率比的K均值分类检测方法以及基于混合全极化参数的溢油检测方法, 总体精度与全极化SAR检测结果相当。Dabboor等人^[88,89]研究了4种不同分辨率的仿真RCM数据对溢油的探测能力, 发现30 m和50 m分辨率的仿真数据具备检测溢油的潜力, 但分类结果总体精度不高; 2019年, 进一步分析3种中分辨率的仿真RCM简缩极化数据的噪声水平和海面溢油检测性能^[90], 发现入射角越大, 浮油探测表现越好, 且50 m分辨率的ScanSAR模式能取得最高分类精度, 对原油和虚警的识别率优于96%, 对虚警和乳化油的识别率优于95%。

上述研究通过仿真和真实数据证明简缩极化SAR的特征能够实现对溢油、虚警和洁净海面的区分, 并且可以取得与全极化相当甚至更优的结果, 在未来可能成为海面溢油检测的主要手段之一。但是, 上述研究主要关心简缩极化SAR的特征对溢油的响应, 只有部分研究人员采用机器学习算法实现了溢油检测并进行精度评价, 而机器学习算法对训练数据和训练参数依赖性较强, 因此, 未来仍需设

计更加简洁有效的溢油检测算法, 为简缩极化SAR的业务化运行做准备。

3.2.3 海冰检测与分类

冰川对全球环境变化具有重要影响, 研究人员用简缩极化SAR开展了海冰检测与分类。Denbina等^[21]完善了全极化SAR信息重建的模型, 利用似然比检测冰川目标, 发现当入射角较小时HP模式的检测精度较低, 而当入射角大于 28° 时, 重建的交叉极化项与全极化SAR具有相似的检测性能。Li和Perrie^[91]对仿真HP模式数据进行 H/α 分解和 $m-\chi$ 分解, 对比了一年冰、新冰、漂流薄冰、破碎浮冰、中度粗糙浮冰、冰山和开阔水域的极化特征, 认为 $m-\chi$ 分解的假彩色合成图具备区分不同海冰的能力。Singha等人^[92,93]用ANN方法对RISAT-1获取的全极化、双极化和HP模式数据进行海冰分类, 结果中, HP模式对光滑一年冰、粗糙一年冰或多年冰、新冰和开阔水域的分类精度超过96%, 并且与全极化数据符合的很好, 特征贡献排序表明香农熵和 g_0 对海冰分类最为有效。Espeseth等人^[94]获取了3对覆盖范围重叠的RISAT-1简缩极化数据和RADARSAT-2全极化数据, 评估了不同类型海冰在模拟和真实HP数据中的极化特征差异, 发现二者的散射系数具有较高的斯皮尔曼相关系数, RH或RR通道散射强度和 g_0 对海冰分类最敏感, 且不受非圆特性的影响。Nasonova等人^[95]利用Kolmogorov-Smirnov统计分析了仿真RCM数据的极化特征, 用SVM方法分别进行了海冰融化前期(pre-melt)和后期(advanced melt)的分类实验, 结果表明海冰融化前期的分类精度高于融化后期, 灰度共生矩阵(Gray Level Co-occurrence Matrices, GLCM)纹理特征的引入可以将海冰分类总体精度提升约10%, 大入射角($39.6\sim 42.2$)的HP模式海冰分类效果优于小入射角($22.3\sim 24.2$), 与Denbina等^[21]的研究结果相符。Dabboor等人^[96]比较了一年冰和多年冰在23维高分辨仿真RCM数据极化特征中的KS距离, 选择KS距离大于0.5的特征输入RF分类器, 取得了与全极化相当的海冰分类精度。Ghanbari等人^[97]提出一个基于同质区域预分割和SVM的海冰分类方法, 对全极化、双极化和仿真HP模式的海冰分类精度进行比较, 发现仅使用强度特征时HP模式的分类精度显著优于双极化, 使用20维特征时HP模式的总体精度与全极化相当, 均高于90%。

上述研究证明简缩极化SAR在海冰检测与分类中具有很好的潜力, 其结果可以与全极化相媲美。由于海冰类型多样、纹理复杂, 而SAR图像受入射

角和成像几何影响较大, 因此未来仍有必要针对不同频率、不同分辨率、不同模式的简缩极化SAR数据开展海冰纹理特性、散射特征和分类方法研究。

3.3 其他应用

除了上述应用外, 研究人员们还对简缩极化SAR在土壤湿度估计^[98-101]、森林参数反演^[102-105]、变化检测^[106,107]、湿地监测^[108-111]、专题图测绘^[112-115]、建筑损坏评估^[116,117]等方面的应用进行了探索, 研究结果表明简缩极化SAR与全极化SAR具有良好的一致性, 论证了简缩极化SAR在这些应用领域的有效性。

4 结束语

简缩极化SAR因能在保持较高信息量的同时实现大范围观测, 在过去十余年中引起了研究人员的广泛关注。本文首先回顾了当前主流的简缩极化SAR数据处理方法, 对简缩极化SAR重建方法和极化分解方法进行了综述, 随后对简缩极化SAR在农业和海洋应用领域的研究成果进行了总结。

全极化信息重建方法是简缩极化SAR的重要研究内容, 但重建算法本质上是用较少观测量估计较多参数的过程, 得到的伪全极化信息并不全面, 还面临计算过程中的信息损失。此外, 由于雷达散射信号对物质介电常数十分敏感, 很难提出统一的全极化信息重建方法以适应不同应用目的、不同地物分布、不同成像条件下的数据处理需求, 因此在使用重建算法之前有必要对假设条件进行检验。目前并没有可靠的研究结果能够证明重建伪全极化信息优于原始简缩极化信息, 重建算法的发展速度已经放缓, 研究人员们越来越多的使用简缩极化本身的特征开展研究。

目前, 已发射的和计划中的简缩极化SAR载荷系统都采取HP模式, 研究人员们已经对该模式的极化特征进行了较为深入的探索。圆极化和线极化特征描述地物散射特性的能力不同, $\pi/4$ 模式和DCP模式的特征与HP模式具有不同的性质, 其潜力仍然有待挖掘。未来应加强对 $\pi/4$ 模式和DCP模式特征提取方法的研究, 对其在不同应用领域中的适用性进行评价。

在农业和海洋应用领域, 许多研究人员将真实或仿真简缩极化SAR数据与全极化和双极化SAR进行了对比, 在大部分实验结果中, 简缩极化SAR的表现优于双极化SAR, 接近全极化SAR, 在个别研究中甚至优于全极化SAR。这是由于全极化SAR虽然提供了最全面的信息, 但信息量的提升未必一定带来精度的提高, 简缩极化SAR的特征在某些情况下可能更加优越。综上所述, 不应当将简缩极化

SAR仅仅视为全极化SAR的替代,未来仍需更多地针对简缩极化SAR本身的特点进行算法设计,并进行更多验证。

简缩极化SAR系统的主要特点是发射电磁波与接收电磁波的独特极化基,而发射波极化状态偏离理想发射模式时会影响简缩极化SAR产品质量和应用结果。目前仅有印度、日本和加拿大发射了具有HP模式简缩极化成像能力的卫星,针对简缩极化系统设计与定标的研究仍在进行中。未来,随着加拿大RCM数据的公开发布,简缩极化SAR的数据特点和应用潜力将得到更加广泛的研究与检验。

参 考 文 献

- [1] LEE J S and POTTIER E. Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications[M]. New York: CRC Press, 2009: 43–44.
- [2] LARRAÑAGA A and ÁLVAREZ-MOZOS J. On the added value of quad-pol data in a multi-temporal crop classification framework based on RADARSAT-2 imagery[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(4): 335. doi: [10.3390/rs8040335](https://doi.org/10.3390/rs8040335).
- [3] WU Fu, WANG Chao, ZHANG Hong, *et al.* Rice crop monitoring in South China with RADARSAT-2 quad-polarization SAR data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(2): 196–200. doi: [10.1109/LGRS.2010.2055830](https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2055830).
- [4] YAJIMA Y, YAMAGUCHI Y, SATO R, *et al.* POLSAR image analysis of wetlands using a modified four-component scattering power decomposition[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(6): 1667–1673. doi: [10.1109/tgrs.2008.916326](https://doi.org/10.1109/tgrs.2008.916326).
- [5] ZHANG Biao, PERRIE W, LI Xiaofeng, *et al.* Mapping sea surface oil slicks using RADARSAT - 2 quad - polarization SAR image[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(10): L10602. doi: [10.1029/2011gl047013](https://doi.org/10.1029/2011gl047013).
- [6] NUNZIATA F, MIGLIACCIO M, and BROWN C E. Reflection symmetry for polarimetric observation of man-made metallic targets at sea[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2012, 37(3): 384–394. doi: [10.1109/JOE.2012.2198931](https://doi.org/10.1109/JOE.2012.2198931).
- [7] 洪文. 基于混合极化架构的极化SAR: 原理与应用(中英文)[J]. *雷达学报*, 2016, 5(6): 559–595. doi: [10.12000/JR16074](https://doi.org/10.12000/JR16074).
HONG Wen. Hybrid-polarity architecture based polarimetric SAR: Principles and applications[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(6): 559–595. doi: [10.12000/JR16074](https://doi.org/10.12000/JR16074).
- [8] 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](https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.842486).
- [9] STACY N and PREISS M. Compact polarimetric analysis of X-band SAR data[C]. The 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Dresden, Germany, 2006.
- [10] 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](https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.895883).
- [11] RANEY R K, CAHILL J T S, PATTERSON G W, *et al.* The m-chi decomposition of hybrid dual-polarimetric radar data with application to lunar craters[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, 117(E12): E00H21. doi: [10.1029/2011je003986](https://doi.org/10.1029/2011je003986).
- [12] RANEY R K, SPUDIS P D, BUSSEY B, *et al.* The lunar mini-RF radars: Hybrid polarimetric architecture and initial results[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(5): 808–823. doi: [10.1109/JPROC.2010.2084970](https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2084970).
- [13] MISRA T and KUMAR A S K. Scatterometer and RISAT-1: ISRO'S contribution to radar remote sensing[C]. 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Milan, Italy, 2015: 4220–4223. doi: [10.1109/IGARSS.2015.7326757](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326757).
- [14] YOKOTA Y, NAKAMURA S, ENDO J, *et al.* Evaluation of compact polarimetry and along track interferometry as experimental mode of PALSAR-2[C]. 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Milan, Italy, 2015: 4125–4128. doi: [10.1109/IGARSS.2015.7326733](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326733).
- [15] SPACEX. RADARSAT constellation mission[EB/OL]. https://www.spacex.com/sites/spacex/files/radarsat_constellation_mission_press_kit.pdf, 2019.
- [16] RANEY R K. DESDynI adopts hybrid polarity SAR architecture[C]. 2009 IEEE Radar Conference, Pasadena, US, 2009: 1–4. doi: [10.1109/RADAR.2009.4977046](https://doi.org/10.1109/RADAR.2009.4977046).
- [17] PUTREVU D, DAS A, VACHHANI J G, *et al.* Chandrayaan-2 dual-frequency SAR: Further investigation into lunar water and regolith[J]. *Advances in Space Research*, 2016, 57(2): 627–646. doi: [10.1016/J.ASR.2015.10.029](https://doi.org/10.1016/J.ASR.2015.10.029).
- [18] 张红, 谢镭, 王超, 等. 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](https://doi.org/10.11834/jig.20130902).
ZHANG Hong, XIE Lei, WANG Chao, *et al.* Information extraction and application of compact polarimetric SAR data[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2013, 18(9): 1065–1073. doi: [10.11834/jig.20130902](https://doi.org/10.11834/jig.20130902).
- [19] 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*, 2005, 43(3): 634–646. doi: [10.1109/TGRS.2004.842486](https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.842486).

- Remote Sensing*, 2009, 47(1): 174–188. doi: [10.1109/TGRS.2008.2000925](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2000925).
- [20] YIN Junjun, YANG Jian, and ZHANG Xinzheng. On the ship detection performance with compact polarimetry[C]. 2011 IEEE RadarCon (RADAR), Kansas City, USA, 2011: 675–680. doi: [10.1109/RADAR.2011.5960623](https://doi.org/10.1109/RADAR.2011.5960623).
- [21] DENBINA M and 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](https://doi.org/10.1080/07055900.2012.733307).
- [22] COLLINS M J, DENBINA M, and 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](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2199760).
- [23] LI Haiyan, WU Jin, PERRIE W, *et al.* Wind speed retrieval from hybrid-pol compact polarization synthetic aperture radar images[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2018, 43(3): 713–724. doi: [10.1109/JOE.2017.2722225](https://doi.org/10.1109/JOE.2017.2722225).
- [24] LI Yu, ZHANG Yuanzhi, CHEN Jie, *et al.* Improved compact polarimetric SAR quad-pol reconstruction algorithm for oil spill detection[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(6): 1139–1142. doi: [10.1109/lgrs.2013.2288336](https://doi.org/10.1109/lgrs.2013.2288336).
- [25] ESPESETH M M, BREKKE C, and ANFINSEN S N. Hybrid-polarity and reconstruction methods for sea ice with L-and C-band SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(3): 467–471. doi: [10.1109/LGRS.2016.2519824](https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2519824).
- [26] KUMAR A and PANIGRAHI R K. Entropy based reconstruction technique for analysis of hybrid-polarimetric SAR data[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2019, 13(4): 620–626. doi: [10.1049/iet-rsn.2018.5338](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2018.5338).
- [27] YUE Dongxiao, XU Feng, and JIN Yaqiu. Wishart-Bayesian reconstruction of Quad-Pol from Compact-Pol SAR image[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(9): 1623–1627. doi: [10.1109/LGRS.2017.2727280](https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2727280).
- [28] REIGBER A, NEUMANN M, FERRO-FAMIL L, *et al.* Multi-baseline coherence optimisation in partial and compact polarimetric modes[C]. 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, USA, 2008: 597–600. doi: [10.1109/IGARSS.2008.4779063](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2008.4779063).
- [29] RANEY R K. Comparing compact and quadrature polarimetric SAR performance[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(6): 861–864. doi: [10.1109/lgrs.2016.2550863](https://doi.org/10.1109/lgrs.2016.2550863).
- [30] RANEY R K. Hybrid dual-polarization synthetic aperture radar[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(13): 1521. doi: [10.3390/rs11131521](https://doi.org/10.3390/rs11131521).
- [31] 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](https://doi.org/10.1109/LGRS.2006.871746).
- [32] CHARBONNEAU F J, BRISCO B, RANEY R K, *et al.* Compact polarimetry: Multi-thematic evaluation[C]. The 4th International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry (PolInSAR), Frascati, Italy, 2009, 26–30.
- [33] RANEY R K, CAHILL J T S, PATTERSON G W, *et al.* The m-chi decomposition of hybrid dual-polarimetric radar data[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Munich: Germany, 2012, 5093–5096. doi: [10.1109/IGARSS.2012.6352465](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6352465).
- [34] CLOUDE S R, GOODENOUGH D G, and CHEN H. Compact decomposition theory[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(1): 28–32. doi: [10.1109/LGRS.2011.2158983](https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2158983).
- [35] SABRY R and VACHON P W. A unified framework for general compact and quad polarimetric SAR data and imagery analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 582–602. doi: [10.1109/TGRS.2013.2242479](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2242479).
- [36] 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](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2011.0007).
- [37] ZHANG Hong, XIE Lei, WANG Chao, *et al.* Investigation of the capability of $H-\alpha$ decomposition of compact polarimetric SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(4): 868–872. doi: [10.1109/LGRS.2013.2280456](https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2280456).
- [38] 谢镛. 多模式极化SAR图像分解与分类方法及应用研究[D]. [博士学位论文], 中国科学院大学, 2016: 46–59.
- XIE Lei. Researches on methods and applications of image decomposition and classification for multi-mode polarimetric SAR[D]. [Ph.D. dissertation], University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 46–59.
- [39] GUO Rui, HE Wei, ZHANG Shuangxi, *et al.* Analysis of three-component decomposition to compact polarimetric synthetic aperture radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2014, 8(6): 685–691. doi: [10.1049/iet-rsn.2013.0114](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2013.0114).
- [40] 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*, 2012, 27(2): 365–371.
- LIU Meng, ZHANG Hong, and WANG Chao. Three-component scattering model for compact polarimetric SAR

- data[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2012, 27(2): 365–371.
- [41] HAN Kuoye, JIANG Mian, WANG Mingjiang, *et al.* Compact polarimetric SAR interferometry target decomposition with the freeman-durden method[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(8): 2847–2861. doi: [10.1109/JSTARS.2018.2842125](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2842125).
- [42] KUMAR A, DAS A, and PANIGRAHI R K. Hybrid-pol based three-component scattering model for analysis of RISAT data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(12): 5155–5162. doi: [10.1109/JSTARS.2017.2768378](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2768378).
- [43] AINSWORTH T L, KELLY J P, and 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](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.12.008).
- [44] KUMAR V, RAO Y S, BHATTACHARYA A, *et al.* Classification assessment of real versus simulated compact and quad-pol modes of ALOS-2[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 16(9): 1497–1501. doi: [10.1109/LGRS.2019.2899268](https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2899268).
- [45] CHARBONNEAU F J, BRISCO B, RANEY R K, *et al.* Compact polarimetry overview and applications assessment[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2010, 36(S2): S298–S315. doi: [10.5589/m10-062](https://doi.org/10.5589/m10-062).
- [46] OHKI M and SHIMADA M. Large-area land use and land cover classification with quad, compact, and dual polarization SAR data by PALSAR-2[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(9): 5550–5557. doi: [10.1109/TGRS.2018.2819694](https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2819694).
- [47] BRISCO B, LI K, TEDFORD B, *et al.* Compact polarimetry assessment for rice and wetland mapping[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(6): 1949–1964. doi: [10.1080/01431161.2012.730156](https://doi.org/10.1080/01431161.2012.730156).
- [48] XU Lu, ZHANG Hong, and WANG Chao. Comparative analysis of classification results between compact and fully polarimetric SAR images in random forest classifier[C]. 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Fort Worth, USA, 2017: 3929–3932. doi: [10.1109/IGARSS.2017.8127859](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2017.8127859).
- [49] XU Lu, ZHANG Hong, WANG Chao, *et al.* Corn mapping using multi-temporal fully and compact SAR data[C]. 2017 SAR in Big Data Era: Models, Methods and Applications (BIGSAR DATA), Beijing, China, 2017. doi: [10.1109/BIGSAR DATA.2017.8124925](https://doi.org/10.1109/BIGSAR DATA.2017.8124925).
- [50] MAHDIANPARI M, MOHAMMADIMANESH F, MCNAIRN H, *et al.* Mid-season crop classification using dual-, compact-, and full-polarization in preparation for the Radarsat Constellation Mission (RCM)[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(13): 1582. doi: [10.3390/rs11131582](https://doi.org/10.3390/rs11131582).
- [51] XIE Lei, ZHANG Hong, WU Fan, *et al.* Capability of rice mapping using hybrid polarimetric SAR data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(8): 3812–3822. doi: [10.1109/JSTARS.2014.2387214](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2387214).
- [52] XIE Lei, ZHANG Hong, LI Hongzhong, *et al.* A unified framework for crop classification in southern China using fully polarimetric, dual polarimetric, and compact polarimetric SAR data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(14): 3798–3818. doi: [10.1080/01431161.2015.1070319](https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1070319).
- [53] UPPALA D, KOTHAPALLI R V, POLOJU S, *et al.* Rice crop discrimination using single date RISAT1 hybrid (RH, RV) polarimetric data[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2015, 81(7): 557–563. doi: [10.14358/PERS.81.7.557](https://doi.org/10.14358/PERS.81.7.557).
- [54] UPPALA D, VENKATA R K, POLOJU S, *et al.* Discrimination of maize crop with hybrid polarimetric RISAT1 data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(11): 2641–2652. doi: [10.1080/01431161.2016.1184353](https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1184353).
- [55] 国贤玉, 李坤, 王志勇, 等. 基于SVM+SFS策略的多时相紧致极化SAR水稻精细分类[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(4): 20–27. doi: [10.6046/gtzyyg.2018.04.04](https://doi.org/10.6046/gtzyyg.2018.04.04).
- GUO Xianyu, LI Kun, WANG Zhiyong, *et al.* Fine classification of rice with multi-temporal compact polarimetric SAR based on SVM+SFS strategy[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2018, 30(4): 20–27. doi: [10.6046/gtzyyg.2018.04.04](https://doi.org/10.6046/gtzyyg.2018.04.04).
- [56] CHIRAKKAL S, HALDAR D, and MISRA A. Evaluation of hybrid polarimetric decomposition techniques for winter crop discrimination[J]. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2017, 55: 73–84. doi: [10.2528/PIERM17011603](https://doi.org/10.2528/PIERM17011603).
- [57] BALLESTER-BERMAN J D, and LOPEZ-SANCHEZ J M. Time series of hybrid-polarity parameters over agricultural crops[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(1): 139–143. doi: [10.1109/LGRS.2011.2162312](https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2162312).
- [58] ZHANG Wangfei, LI Zengyuan, CHEN Erxue, *et al.* Compact polarimetric response of rape (*Brassica napus* L.) at C-band: Analysis and growth parameters inversion[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(6): 591. doi: [10.3390/rs9060591](https://doi.org/10.3390/rs9060591).
- [59] DAVE V A, HALDAR D, DAVE R, *et al.* Cotton crop biophysical parameter study using hybrid/compact polarimetric RISAT-1 SAR data[J]. *Progress in*

- Electromagnetics Research M*, 2017, 57: 185–196. doi: [10.2528/PIERM16121903](https://doi.org/10.2528/PIERM16121903).
- [60] HOMAYOUNI S, MCNAIRN H, HOSSEINI M, *et al.* Quad and compact multitemporal C-band PolSAR observations for crop characterization and monitoring[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 74: 78–87. doi: [10.1016/j.jag.2018.09.009](https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.009).
- [61] GUO Xianyu, LI Kun, SHAO Yun, *et al.* Inversion of rice biophysical parameters using simulated compact polarimetric SAR C-band data[J]. *Sensors*, 2018, 18(7): 2271. doi: [10.3390/s18072271](https://doi.org/10.3390/s18072271).
- [62] LIU Changan, CHEN Zhongxin, HAO Pengyu, *et al.* LAI Retrieval of winter wheat using simulated compact SAR data through GA-PLS modeling[C]. 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Valencia, Spain, 2018: 3840–3843. doi: [10.1109/IGARSS.2018.8518005](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518005).
- [63] YANG Zhi, LI Kun, LIU Long, *et al.* Rice growth monitoring using simulated compact polarimetric C band SAR[J]. *Radio Science*, 2014, 49(12): 1300–1315. doi: [10.1002/2014RS005498](https://doi.org/10.1002/2014RS005498).
- [64] YANG Zhi, SHAO Yun, LI Kun, *et al.* An improved scheme for rice phenology estimation based on time-series multispectral HJ-1A/B and polarimetric RADARSAT-2 data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 195: 184–201. doi: [10.1016/j.rse.2017.04.016](https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.04.016).
- [65] LOPEZ-SANCHEZ J M, VICENTE-GUIJALBA F, BALLESTER-BERMAN J D, *et al.* Polarimetric response of rice fields at C-band: Analysis and phenology retrieval[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(5): 2977–2993. doi: [10.1109/TGRS.2013.2268319](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2268319).
- [66] IZUMI Y, DEMIRCI S, BIN BAHARUDDIN M, *et al.* Analysis of dual-and full-circular polarimetric SAR modes for rice phenology monitoring: An experimental investigation through ground-based measurements[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(4): 368. doi: [10.3390/app7040368](https://doi.org/10.3390/app7040368).
- [67] ATTEIA G and COLLINS M J. Ship detection performance assessment for simulated RCM SAR data[C]. 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Quebec City, Canada, 2014: 553–556. doi: [10.1109/IGARSS.2014.6946482](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946482).
- [68] SHIRVANY R, CHABERT M, and TOURNERET 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](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2182760).
- [69] YIN Junjun and YANG Jian. Ship detection by using the M-Chi and M-Delta decompositions[C]. 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Quebec City, Canada, 2014: 2738–2741. doi: [10.1109/IGARSS.2014.6947042](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947042).
- [70] 曹成会, 张杰, 张晰, 等. C波段紧缩极化合成孔径雷达船只目标检测性能分析[J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(2): 85–93. doi: [10.16441/j.cnki.hdxh.20160347](https://doi.org/10.16441/j.cnki.hdxh.20160347). CAO Chenghui, ZHANG Jie, ZHANG Xi, *et al.* The analysis of ship target detection performance with C band compact polarimetric SAR[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(2): 85–93. doi: [10.16441/j.cnki.hdxh.20160347](https://doi.org/10.16441/j.cnki.hdxh.20160347).
- [71] XU Lu, ZHANG Hong, WANG Chao, *et al.* Compact polarimetric SAR ship detection with m - δ decomposition using visual attention model[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(9): 751. doi: [10.3390/rs8090751](https://doi.org/10.3390/rs8090751).
- [72] FAN Qiancong, CHEN Feng, CHENG Ming, *et al.* A modified framework for ship detection from compact polarization SAR image[C]. 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Valencia, Spain, 2018: 3539–3542. doi: [10.1109/IGARSS.2018.8518763](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518763).
- [73] FAN Qiancong, CHEN Feng, CHENG Ming, *et al.* Ship detection using a fully convolutional network with compact polarimetric sar images[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(18): 2171. doi: [10.3390/rs11182171](https://doi.org/10.3390/rs11182171).
- [74] GAO Gui, GAO Sheng, HE Juan, *et al.* Adaptive ship detection in hybrid-polarimetric SAR images based on the power-entropy decomposition[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(9): 5394–5407. doi: [10.1109/TGRS.2018.2815592](https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2815592).
- [75] GAO Gui, GAO Sheng, HE Juan, *et al.* Ship detection using compact polarimetric SAR based on the notch filter[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(9): 5380–5393. doi: [10.1109/TGRS.2018.2815582](https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2815582).
- [76] JI Kefeng, LENG Xiangguang, WANG Haibo, *et al.* Ship detection using weighted SVM and M-CHI decomposition in compact polarimetric SAR imagery[C]. 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Fort Worth, USA, 2017: 890–893. doi: [10.1109/IGARSS.2017.8127095](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2017.8127095).
- [77] CAO Chenghui, ZHANG Jie, MENG Junmei, *et al.* Analysis of ship detection performance with full-, compact-and dual-polarimetric SAR[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(18): 2160. doi: [10.3390/rs11182160](https://doi.org/10.3390/rs11182160).
- [78] ZHANG Biao, LI Xiaofeng, PERRIE W, *et al.* Compact

- polarimetric synthetic aperture radar for marine oil platform and slick detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(3): 1407–1423. doi: [10.1109/TGRS.2016.2623809](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2623809).
- [79] LI Haiyan, PERRIE W, HE Yijun, *et al.* Target detection on the ocean with the relative phase of compact polarimetry SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(6): 3299–3305. doi: [10.1109/TGRS.2012.2224119](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2224119).
- [80] LI Haiyan, PERRIE W, HE Yijun, *et al.* Analysis of the polarimetric SAR scattering properties of oil-covered waters[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(8): 3751–3759. doi: [10.1109/JSTARS.2014.2348173](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2348173).
- [81] KUMAR L J V, KISHORE K J, and RAO K P. Decomposition methods for detection of oil spills based on RISAT-1 SAR images[J]. *International Journal of Remote Sensing & Geoscience*, 2014, 3(4): 2319–3484.
- [82] MIGLIACCIO M, NUNZIATA F, and BUONO A. SAR polarimetry for sea oil slick observation[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(12): 3243–3273. doi: [10.1080/01431161.2015.1057301](https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1057301).
- [83] YIN Junjun, YANG Jian, ZHOU Zhengshu, *et al.* The extended Bragg scattering model-based method for ship and oil-spill observation using compact polarimetric SAR[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(8): 3760–3772. doi: [10.1109/JSTARS.2014.2359141](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2359141).
- [84] NUNZIATA F, MIGLIACCIO M, and LI Xiaofeng. Sea oil slick observation using hybrid-polarity SAR architecture[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, 40(2): 426–440. doi: [10.1109/JOE.2014.2329424](https://doi.org/10.1109/JOE.2014.2329424).
- [85] BUONO A, NUNZIATA F, MIGLIACCIO M, *et al.* Polarimetric analysis of compact-polarimetry SAR architectures for sea oil slick observation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(10): 5862–5874. doi: [10.1109/TGRS.2016.2574561](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2574561).
- [86] ZHANG Yuanzhi, LI Yu, LIANG X S, *et al.* Comparison of oil spill classifications using fully and compact polarimetric SAR images[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(2): 193. doi: [10.3390/app7020193](https://doi.org/10.3390/app7020193).
- [87] 谢广奇, 杨帅, 陈启浩, 等. 简缩极化特征值分析的溢油检测[J]. *遥感学报*, 2019, 23(2): 303–312. doi: [10.11834/jrs.20197260](https://doi.org/10.11834/jrs.20197260).
- XIE Guangqi, YANG Shuai, CHEN Qihao, *et al.* Oil spill detection based on compact polarimetric eigenvalue decomposition[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(2): 303–312. doi: [10.11834/jrs.20197260](https://doi.org/10.11834/jrs.20197260).
- [88] DABBOOR M, SINGHA S, TOPOUZELIS K, *et al.* Oil spill detection using simulated radarsat constellation mission compact polarimetric SAR data[C]. 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Fort Worth, USA, 2017: 4582–4585. doi: [10.1109/IGARSS.2017.8128021](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2017.8128021).
- [89] DABBOOR M, SINGHA S, MONTPETIT B, *et al.* Assessment of simulated compact polarimetry of the RCM medium resolution SAR modes for oil spill detection[C]. 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Valencia, Spain, 2018: 2416–2419. doi: [10.1109/IGARSS.2018.8517756](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8517756).
- [90] DABBOOR M, SINGHA S, MONTPETIT B, *et al.* Pre-launch assessment of RADARSAT constellation mission medium resolution modes for sea oil slicks and lookalike discrimination[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2019, 45(3/4): 530–549. doi: [10.1080/07038992.2019.1659722](https://doi.org/10.1080/07038992.2019.1659722).
- [91] LI Haiyan and PERRIE W. Sea ice characterization and classification using hybrid polarimetry SAR[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(11): 4998–5010. doi: [10.1109/JSTARS.2016.2584542](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2584542).
- [92] SINGHA S and RESSEL R. Arctic sea ice characterization using RISAT-1 compact-pol SAR imagery and feature evaluation: A case study over Northeast Greenland[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(8): 3504–3514. doi: [10.1109/JSTARS.2017.2691258](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2691258).
- [93] SINGHA S. Potential of compact polarimetry for operational sea ice monitoring over arctic and Antarctic region[C]. 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Valencia, Spain, 2018: 7113–7116. doi: [10.1109/IGARSS.2018.8517653](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8517653).
- [94] ESPESETH M M, BREKKE C, and JOHANSSON A M. Assessment of RISAT-1 and radarsat-2 for sea ice observations from a hybrid-polarity perspective[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(11): 1088. doi: [10.3390/rs9111088](https://doi.org/10.3390/rs9111088).
- [95] NASONOVA S, SCHARIEN R K, GELDSETZER T, *et al.* Optimal compact polarimetric parameters and texture features for discriminating sea ice types during winter and advanced melt[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2018, 44(4): 390–411. doi: [10.1080/07038992.2018.1527683](https://doi.org/10.1080/07038992.2018.1527683).
- [96] DABBOOR M, MONTPETIT B, and HOWELL S. Assessment of simulated compact polarimetry of the high resolution radarsat constellation mission SAR mode for multiyear and first year sea ice characterization[C]. 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Valencia, Spain, 2018: 2420–2423. doi: [10.1109/IGARSS.2018.8517737](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8517737).

- [97] GHANBARI M, CLAUSI D A, XU Linlin, *et al.* Contextual classification of sea-ice types using compact polarimetric SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(10): 7476–7491. doi: [10.1109/TGRS.2019.2913796](https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2913796).
- [98] 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](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2031428).
- [99] PONNURANGAM G G, JAGDHUBER T, HAJNSEK I, *et al.* Soil moisture estimation using hybrid polarimetric SAR data of RISAT-1[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(4): 2033–2049. doi: [10.1109/TGRS.2015.2494860](https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2494860).
- [100] SANTI E, PETTINATO S, PALOSCIA S, *et al.* Estimating soil moisture from C and X band Sar using machine learning algorithms and compact polarimetry[C]. 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Valencia, Spain, 2018: 1426–1429. doi: [10.1109/IGARSS.2018.8518469](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518469).
- [101] PONNURANGAM G G and RAO Y S. The application of compact polarimetric decomposition algorithms to L-band PolSAR data in agricultural areas[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(22): 8337–8360. doi: [10.1080/01431161.2018.1488281](https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1488281).
- [102] LAVALLE 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](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2009.0049).
- [103] 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](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.919143).
- [104] 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. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.00091](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.00091).
TAN Lulu, YANG Libo, and YANG Ruliang. 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](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.00091).
- [105] RAMACHANDRAN N and DIKSHIT O. Experimental validation of compact tomosar for vegetation characterization[C]. 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Valencia, Spain, 2018: 6727–6730. doi: [10.1109/IGARSS.2018.8517824](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8517824).
- [106] SABRY R and AINSWORTH T L. SAR compact polarimetry for change detection and characterization[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, 12(3): 898–909. doi: [10.1109/JSTARS.2019.2896536](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2896536).
- [107] ZHANG Xuefei, ZHANG Hong, and WANG Chao. Water-change detection with Chinese Gaofen-3 simulated compact polarimetric SAR images[C]. 2017 SAR in Big Data Era: Models, Methods and Applications (BIGSAR DATA), Beijing, China, 2017. doi: [10.1109/BIGSAR DATA.2017.8124940](https://doi.org/10.1109/BIGSAR DATA.2017.8124940).
- [108] MAHDIANPARI M, SALEHI B, MOHAMMADIMANESH F, *et al.* An assessment of simulated compact polarimetric SAR data for wetland classification using random forest algorithm[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2017, 43(5): 468–484. doi: [10.1080/07038992.2017.1381550](https://doi.org/10.1080/07038992.2017.1381550).
- [109] DABBOOR M, BRISCO B, BANKS S, *et al.* Multitemporal monitoring of wetlands using simulated radarsat constellation mission compact polarimetric SAR data[C]. 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Fort Worth, USA, 2017: 4586–4589. doi: [10.1109/IGARSS.2017.8128022](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2017.8128022).
- [110] DABBOOR M, BANKS S, WHITE L, *et al.* Comparison of compact and fully polarimetric SAR for multitemporal wetland monitoring[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, 12(5): 1417–1430. doi: [10.1109/JSTARS.2019.2909437](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2909437).
- [111] MOHAMMADIMANESH F, SALEHI B, MAHDIANPARI M, *et al.* Full and simulated compact polarimetry sar responses to Canadian wetlands: Separability analysis and classification[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(5): 516. doi: [10.3390/rs11050516](https://doi.org/10.3390/rs11050516).
- [112] BANKS S, MILLARD K, BEHNAMIAN A, *et al.* Contributions of actual and simulated satellite SAR data for substrate type differentiation and shoreline mapping in the Canadian arctic[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(12): 1206. doi: [10.3390/rs9121206](https://doi.org/10.3390/rs9121206).
- [113] WHITE L, MILLARD K, BANKS S, *et al.* Moving to the RADARSAT constellation mission: Comparing synthesized compact polarimetry and dual polarimetry data with fully polarimetric RADARSAT-2 data for image classification of peatlands[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(6): 573. doi: [10.3390/rs9060573](https://doi.org/10.3390/rs9060573).
- [114] FOBERT M A, SPRAY J G, and SINGHROY V. Assessing the benefits of simulated RADARSAT constellation mission polarimetry images for structural mapping of an impact crater in the Canadian shield[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2018, 44(4):

321–336. doi: [10.1080/07038992.2018.1517022](https://doi.org/10.1080/07038992.2018.1517022).

- [115] BRISCO B, SHELAT Y, MURNAGHAN K, *et al.* Evaluation of C-band SAR for identification of flooded vegetation in emergency response products[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2019, 45(1): 73–87. doi: [10.1080/07038992.2019.1612236](https://doi.org/10.1080/07038992.2019.1612236).
- [116] LIU Yin, LI Linlin, CHEN Qihao, *et al.* Building damage assessment of compact polarimetric SAR using statistical

model texture parameter[C]. 2017 SAR in Big Data Era: Models, Methods and Applications (BIGSAR DATA), Beijing, China, 2017. doi: [10.1109/BIGSAR DATA.2017.8124923](https://doi.org/10.1109/BIGSAR DATA.2017.8124923).

- [117] JEON W and KIM Y. Investigation of hybrid polarimetric features for tsunami-induced damage assessment of urban areas[J]. *Remote Sensing Letters*, 2019, 10(10): 988–997. doi: [10.1080/2150704x.2019.1637957](https://doi.org/10.1080/2150704x.2019.1637957).

作者简介



许 璐(1992–), 女, 助理研究员, 2019年毕业于中国科学院遥感与数字地球研究所, 获理学博士学位。现为中国科学院空天信息创新研究院助理研究员。研究方向为极化SAR、时间序列SAR智能处理与应用。

E-mail: xulu@radi.ac.cn



张 红(1972–), 女, 研究员, 博士生导师, 2002年毕业于中国科学院遥感应用所, 获理学博士学位, 现为中国科学院空天信息创新研究院研究员, 担任IEEE GRSS北京分会副主席, 中国图象图形学学会遥感图像专业委员会委员, 主要研究领域为SAR图像智能处理、极化SAR、干涉SAR等。

E-mail: zhanghong@radi.ac.cn



王 超(1963–), 男, 研究员, 博士生导师, 曾任德国宇航院高频技术研究所客座研究员, 现为中国科学院空天信息创新研究院研究员, 中国科学院大学岗位教授, 担任中国图象图形学会常务理事、IEEE GRSS高级会员、《遥感技术与应用》副主编、《中国图象图形学报》副主编, 曾任IEEE GRSS Beijing Chapter主席, 主要从事InSAR高性能处理、SAR图像智能处理与应用研究。

E-mail: wangchao@radi.ac.cn



吴 樊(1976–), 男, 副研究员, 2005年于中国科学院遥感应用研究所获博士学位, 现为中国科学院空天信息创新研究院副研究员, 研究方向为SAR图像处理与信息提取。

E-mail: wufan@radi.ac.cn



张 波(1976–), 男, 副研究员, 硕士生导师, 2005年于中国科学院遥感应用研究所获博士学位, 现为中国科学院空天信息创新研究院副研究员, 研究方向为SAR大数据处理, 雷达目标特性, 目标检测与识别等。

E-mail: zhangbo@radi.ac.cn



汤益先(1978–), 男, 副研究员, 2006年于中国科学院遥感应用研究所获博士学位, 现为中国科学院空天信息创新研究院副研究员, 研究方向为高性能InSAR处理与应用。

E-mail: tangyx@aircas.ac.cn