

文章编号: 2095-4980(2017)06-0965-07

星载简缩极化 SAR 海上舰船目标检测性能分析

王海波¹, 蔡正谊², 冷祥光¹, 武院生³, 计科峰¹

(1.国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2.中国运载火箭技术研究院研发中心, 北京 100076;
3.武警云南省总队迪庆支队, 云南 迪庆 674400)

摘要: 与全极化相比, 简缩极化合成孔径雷达(SAR)因其更宽的幅宽, 在海洋监视方面具有先天的优势。针对星载简缩极化 SAR 图像海上舰船目标检测, 在全极化及简缩极化 SAR 特征参数提取方法研究基础上, 基于实测 Radarsat-2 全极化数据模拟的混合极化(CTLR)模式简缩极化 SAR 图像数据, 通过归一化距离对所提取极化特征参数的舰船目标和海杂波背景区分能力进行了系统分析与比较, 在此基础上进一步对全极化及简缩极化的极化特征参数相似性进行了定量分析与评估, 得到简缩极化和全极化的舰船目标检测分析结果。结果表明, 简缩极化 SAR 的检测性能总体上接近于全极化。

关键词: 简缩极化 SAR; 极化特征; 舰船检测; 性能分析

中图分类号: TN957.52

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201706.0965

Performance analysis on maritime ship detection based on spaceborne compact polarimetric SAR

WANG Haibo¹, CAI Zhengyi², LENG Xiangguang¹, WU Yuansheng³, JI Kefeng¹

(1.College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China;
2.China Academy of Launch Vehicle Technology R & D Center, Beijing 100076, China;
3.The Armed Police Corps of Yunnan Diqing City Team, Diqing Yunnan 674400, China)

Abstract: Compared with full polarimetric, compact polarimetric Synthetic Aperture Radar(SAR) has the advantage of providing larger swath. Thus it is very useful in ocean monitoring. Aiming at maritime ship detection based on compact polarimetric spaceborne SAR imagery, this paper constructs compact polarimetric data under Circular Transmit-Linear Receive(CTLR) mode based on the Radarsat-2 full polarimetric data. Conventional extraction methods of spaceborne SAR compact polarimetric features are explored in this paper. The performance results on maritime ship detection based on spaceborne compact polarimetric SAR are obtained. The results show that the overall performance of the detection of compact polarimetric SAR closes to that of full polarization.

Keywords: compact polarimetric Synthetic Aperture Radar(SAR); polarimetric features; ship detection; performance analysis

简缩极化系统自 2005 年由 Souyris 提出^[1]以来, 引起了各国研究者的广泛关注。与全极化不同, 简缩极化合成孔径雷达(SAR)系统只发射一路特定极化方向的电磁波(可为线极化波或圆极化波), 同时接收不同方向的 2 路回波信号(也可为线极化或圆极化波信号)^[2], 能够在降低系统设计复杂度及维护难度的同时, 扩大系统的成像范围, 获取更大幅宽的图像。与双极化相比, 简缩极化 SAR 系统信号收发组合更加灵活, 不仅能够得到回波信号的强度值, 同时还能得到回波信号的相对相位, 包含更为丰富的信息。事实上, 在无法获取全极化 SAR 数据时, 简缩极化 SAR 数据是比双极化更理想的选择。与全极化相比, 简缩极化能在系统结构相对简单的情况下, 获得目标更丰富的极化信息, 达到与全极化相近的效果^[3]。简缩极化 SAR 系统的以上优点决定了其在海洋遥感应用^[4-6]领域, 尤其是在广阔的海面舰船目标检测^[7-10]中具有得天独厚的优势。

收稿日期: 2016-05-27; 修回日期: 2016-07-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61372163; 61331015)

目前,典型的简缩极化 SAR 舰船目标检测方法主要包括基于伪全极化信息重建以及基于极化特征参数两大类^[6,11]。与基于伪全极化信息重建方法相比,基于极化特征参数的方法直接对简缩极化 SAR 数据进行处理,可有效避免伪全极化重建误差^[2]。另外,由于每个极化特征参数都具有相对明确的物理意义,更有利于分析舰船目标与海洋背景的散射机理。因此,基于极化特征参数的方法已成为简缩极化 SAR 舰船目标检测研究的主要方向^[6-7,12]。与全极化相比,由于收发通道减少,简缩极化特征参数与全极化存在一定差别。本文针对星载简缩极化 SAR 图像海上舰船目标检测,在全极化及简缩极化 SAR 特征参数提取基础上,重点分析其对舰船目标检测性能的影响。典型的简缩极化方式主要有 $\pi/4$ 模式^[1]、双圆极化(Dual Circular Polarization, DCP)^[13]模式和混合极化(CTLR)^[14]模式 3 种,其中较为常用的是 DCP 模式和 CTLR 模式^[15],由于这 2 种模式的散射向量存在线性关系,可以相互转换^[3],因此本文主要针对 CTLR 模式简缩极化进行研究。由于目前国内外缺乏真实的简缩极化 SAR 数据,本文中所有简缩极化数据均是对全极化数据进行仿真的结果。采用的仿真方法是国内外通用的方法,仿真结果和真实的简缩极化 SAR 数据可能会有一定差别,但具有代表性。

1 全极化与简缩极化特征参数提取

1.1 常用的极化特征参数

目前,常用的 SAR 图像舰船目标检测的极化特征参数主要包括各极化通道的极化信息与其衍生信息以及极化目标分解后得到的极化特征等。一般来讲,可分为 2 大类:一类是基于实测数据的线性组合或变换,如极化协方差矩阵或相干矩阵的各元素或其线性组合,极化总功率(Span)、同极化率、交叉极化率、共极化相干系数等;另一类是通过各种极化分解($H-\alpha$ 分解、 $m-\chi$ 分解,等)得到的极化特性参数,如极化熵、平均散射角($\bar{\alpha}$)等。

1.2 极化特征参数提取

本节分别对全极化和 CTLR 模式的简缩极化 SAR 图像进行极化特征提取与分析。

1.2.1 全极化 SAR 极化特征参数提取

1) HH 通道相干系数。全极化 4 个通道组合的相干系数,定义为^[16]:

$$\rho_{ij} = 10 \log \left(\langle S_{ij} S_{ij}^* \rangle \right) = 10 \log \left(\langle |S_{ij}|^2 \rangle \right) \quad (ij = \text{HH, HV, VH, VV}) \quad (1)$$

式中 S_{ij} 表示 ij 极化组合的极化分量。

每一个通道的相干系数,实际上就是该通道的后向散射功率,可表征不同目标在该通道下极化波的后向散射能力。一般来讲, SAR 图像中 VV 极化波在海洋地区的回波强度要强于 HH,而对于舰船目标, VV 和 HH 极化都具有较强的散射强度,但 VV 极化中舰船目标容易受海浪杂波影响,交叉极化通道(HV 或 VH)在舰船目标和海洋背景上后向散射强度较弱,获取能量较低。正是由于极化 SAR 图像中 HH 极化舰船目标和海洋背景具有更明显的对比度,因此 HH 极化 SAR 图像更适合于海上舰船目标检测^[17]。本文取 HH 通道相干系数作为极化特征参数。

2) 极化总功率。全极化 SAR 图像的灰度直接反映了目标后向散射强度的大小,而极化总功率(Span)^[18]是目标在各极化通道散射强度的总和,包含了所有散射机制的极化散射信息,因此可用于表征空间信息,定义为:

$$\text{Span} = |S_{\text{HH}}|^2 + |S_{\text{HV}}|^2 + |S_{\text{VH}}|^2 + |S_{\text{VV}}|^2 \quad (2)$$

在后向散射情况下,满足互易性,因此有 $S_{\text{HV}} = S_{\text{VH}}$,于是 Span 可进一步表示为:

$$\text{Span} = |S_{\text{HH}}|^2 + 2|S_{\text{HV}}|^2 + |S_{\text{VV}}|^2 \quad (3)$$

Span 对极化 SAR 图像中的相干斑具有一定的抑制作用,另外还具有旋转不变性,与单极化相比,Span 还能够较好地保留图像的边缘和纹理信息,因此其检测性能显然优于仅利用一个极化通道数据。

3) 共极化率。共极化率^[19]定义为相同极化通道之间的散射能量比,表示为:

$$R_{\text{VV/HH}} = \frac{\langle S_{\text{VV}} S_{\text{VV}}^* \rangle}{\langle S_{\text{HH}} S_{\text{HH}}^* \rangle} = \frac{\langle |S_{\text{VV}}|^2 \rangle}{\langle |S_{\text{HH}}|^2 \rangle} \quad (4)$$

由于共极化率对目标的介电常数比较敏感,舰船主要由钢铁制造而成,铁和海水具有不同的介电常数,且海洋表面以布拉格散射为主, S_{HH} 和 S_{VV} 高度相关,因此其共极化率接近于 1,而对于舰船目标, S_{HH} 和 S_{VV} 相关度较低,共极化率也较低。因此共极化率对舰船目标和海洋背景也具有一定的区分能力。

4) 共极化相干系数。计算共极化相干系数同样依赖于共极化通道 HH 和 VV,定义为^[19]:

$$\rho_{HHVV} = \frac{\langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle}{\sqrt{\langle |S_{HH}|^2 \rangle \langle |S_{VV}|^2 \rangle}} \quad (5)$$

由于分子 $\langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle$ 为复数, 从而 ρ_{HHVV} 也为复数, 因此在计算中通常取该参数的绝对值^[20]。

5) 相似系数。相似系数在满足反射对称性条件下定义为^[21]:

$$\mu = \frac{2(\operatorname{Re}\langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle - \langle |S_{HV}|^2 \rangle)}{\langle |S_{HH}|^2 \rangle + \langle |S_{HV}|^2 \rangle + \langle |S_{VH}|^2 \rangle + \langle |S_{VV}|^2 \rangle} = \frac{2(\operatorname{Re}\langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle - \langle |S_{HV}|^2 \rangle)}{P_{\text{Total}}} \quad (6)$$

由于海洋表面满足布拉格散射, 交叉极化通道值 S_{HV} 很小, S_{HH} 和 S_{HV} 的实部大于 $|S_{HV}|^2$ ^[22], 因此相似系数 μ 为正值, 若为负值, 那么该地区散射机制不满足布拉格散射。

6) 极化度。极化度是反映目标极化特性的重要参数, Barakat^[23]给出了全极化模式下的定义:

$$DoP = \sqrt{1 - 27 \frac{\det(\mathbf{C})}{(\operatorname{tr}(\mathbf{C}))^3}} \quad (7)$$

式中: \mathbf{C} 为全极化协方差矩阵; $\operatorname{tr}(\mathbf{C})$ 表示求 \mathbf{C} 的迹, 即主对角线元素之和; $\det(\mathbf{C})$ 表示 \mathbf{C} 矩阵的行列式值。Barakat 极化度是全极化 SAR 图像中比较常用且比较有效的极化特征, 当 $DoP=1$ 时, 目标表现出完全极化特性; 当 $DoP=0$ 时, 目标表现出完全去极化特性。由于海洋的极化度强于舰船目标, 因此, 极化度也可以用于检测舰船目标。

7) 极化熵。极化熵表示目标对入射极化雷达波后向散射过程的随机程度, 定义为^[24]:

$$H = -\sum_{i=1}^3 P_i \log_3 P_i \quad (8)$$

式中 $P_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^3 \lambda_i$, λ_i 为相干矩阵特征值。显然, H 的取值范围为 $[0, 1]$, 由于 P_i 为旋转不变特征量, H 也为不变特征量, 当 $H=0$ 时, 目标表现为完全极化特性, 后向散射是单一的散射机制。随着极化熵 H 的增加, 目标的去极化效应也随之增强, 表现为几种散射机制的组合。舰船结构比较复杂, 导致散射机理也复杂多样, 表现出较强的随机性, 因而舰船的极化熵值比较大; 而海洋表面以表面散射为主, 散射机理较为单一, 极化熵值也比较低。舰船目标和海杂波的极化熵取值范围不同, 有较强的区分能力, 因此可用于海上舰船检测。

8) 平均散射角。平均散射角定义为:

$$\bar{\alpha} = P_1 \alpha_1 + P_2 \alpha_2 + P_3 \alpha_3 \quad (0^\circ \leq \bar{\alpha} \leq 90^\circ) \quad (9)$$

平均散射角也是识别不同目标主要散射机理的一个重要参数, 对于不同类型的目标, $\bar{\alpha}$ 取值范围不同。Praks 等^[25]指出, 平均散射角 $\bar{\alpha}$ 表示表面散射分量与极化总功率的比值, 因此, 对于以表面散射为主的海洋地区 $\bar{\alpha}$ 值较低, 而舰船目标含有多种散射, 其 $\bar{\alpha}$ 值则相对较高, 因此通过对 $\bar{\alpha}$ 设置不同的阈值, 可区分舰船目标和海洋背景。

1.2.2 简缩极化 SAR 极化特征参数提取

全极化 SAR 中极化特征参数能够直接计算得到, 但由于简缩极化 SAR 与全极化 SAR 相比, 在维度上存在不足, 因此提取简缩极化相对应的极化特征参数首先需要对简缩极化 SAR 数据进行一定的变化调整。

1) RH 通道相干系数。由于简缩极化 SAR 不存在交叉极化通道, 因此将 CTRL 模式简缩极化的 S_{RH} 和 S_{RV} 与全极化模式的 S_{HH} 和 S_{VV} 相对应, 选取对应于全极化 $|S_{HH}|^2$ 的 $|S_{RH}|^2$ 作为简缩极化特征参数^[26]。

2) 极化总功率。简缩极化模式下的极化总功率跟全极化模式下类似, 可表示为:

$$Span = |S_{RH}|^2 + |S_{RV}|^2 = \lambda_1 + \lambda_2 = C_{11} + C_{22} \quad (10)$$

式中: λ_1, λ_2 为简缩极化协方差矩阵的特征值; C_{11}, C_{22} 为简缩极化协方差矩阵对角线元素。

3) 共极化率。全极化中求共极化率需要 HH 和 VV 通道的功率, 但是在简缩极化中无法获取该通道的功率, 因此需要定义一种新的比率^[4]:

$$R_{RV/RH} = \frac{\langle |S_{RV}|^2 \rangle}{\langle |S_{RH}|^2 \rangle} = \frac{\langle |S_{VV}|^2 \rangle + \langle |S_{HV}|^2 \rangle}{\langle |S_{HH}|^2 \rangle + \langle |S_{HV}|^2 \rangle} \quad (11)$$

4) 共极化相干系数。简缩极化共极化相干系数, 定义为^[27]:

$$\rho_{RH,RV} = \frac{-j\langle S_{RH}S_{RV}^* \rangle}{\sqrt{\langle |S_{RH}|^2 \rangle \langle |S_{RV}|^2 \rangle}} = \frac{-j\left(2\left(j\langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle - j\langle |S_{HV}|^2 \rangle\right)\right)}{\sqrt{(1/2)\left(\langle |S_{HH}|^2 \rangle + \langle |S_{HV}|^2 \rangle\right)(1/2)\left(\langle |S_{VV}|^2 \rangle + \langle |S_{HV}|^2 \rangle\right)}} \quad (12)$$

5) 相似系数。类似于极化特征参数, 简缩极化 CTLR 模式下的相似系数^[22]定义为:

$$\mu = -2 \frac{\operatorname{Re}(j\langle S_{RH}S_{RV} \rangle)}{\langle |S_{RH}|^2 \rangle + \langle |S_{RV}|^2 \rangle} \quad (13)$$

6) 极化度。简缩极化极化度定义为^[14]:

$$DoP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (14)$$

7) 极化熵。简缩极化的极化熵可由其协方差矩阵特征值计算得到, 具体为^[28]:

$$H = -\sum_{i=1}^2 P_i \log_2 P_i \quad (15)$$

8) 平均散射角。简缩极化平均散射角定义为^[28]:

$$\bar{\alpha} = P_1\alpha_1 + P_2\alpha_2, \quad 0^\circ \leq \bar{\alpha} \leq 90^\circ \quad (16)$$

2 极化特征参数分析

通过归一化距离对所提取极化特征参数的舰船目标和海杂波背景区分能力进行定量分析与比较, 在此基础上进一步对全极化及简缩极化的极化特征参数相似性进行定量分析与评估。

实验选用直布罗陀海峡区域 Radarsat-2 C 波段精细成像模式单视复数据。方位向(垂直方向)和距离向(水平方向)分辨力均为 8 m, 获取时间为 2008 年 3 月 31 日, 入射角为 20.8°~22.8°, 由人工判读此时为低海况条件。选取距离向 1 200 像素、方位向 700 像素范围区域作为实验数据, 图 1(a)为所选取的实验区域 Pauli 合成图, 图 1(b)为人工预判模板图, 通过人工判读, 有 7 个舰船目标(白色方形框内)。为分析和评估各极化特征参数对舰船目标和杂波背景的区分能力, 在实验图像中分别选取舰船、模糊噪声(黑色虚线框)和海杂波(白色虚线框)各 900 个像素进行实验。

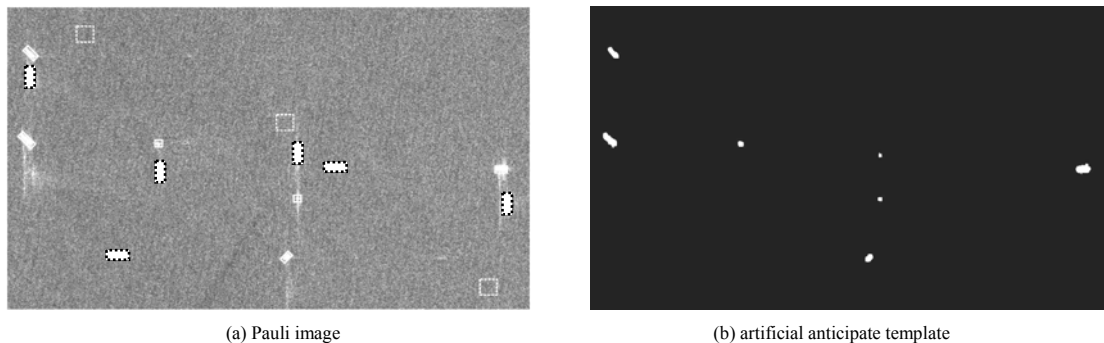


Fig.1 Experimental region of Gibraltar
图 1 直布罗陀海峡实验区域

2.1 极化特征参数对舰船目标与海洋背景的区分能力分析

由上文方法提取的极化特征参数对海洋背景和舰船目标都有一定的区分能力, 为进一步研究其对舰船目标的“敏感”程度, 对选取的舰船、模糊噪声和海杂波样本分别进行统计分析, 以定量分析与评估每种特征参数对舰船目标与海洋背景、模糊噪声等的区分能力。

为进一步分析舰船目标、模糊噪声和海洋杂波各极化特征参数的差异, 定义归一化距离:

$$d_{\text{norm}} = \frac{|\mu_1 - \mu_2|}{\sigma_1 + \sigma_2} \quad (17)$$

式中: μ 和 σ 分别表示选取的某种样本的均值和标准差; 下标 1 和 2 表示不同的样本类别。归一化距离数值越大, 表示二者差别越大, 区分度越明显。

由表 1 可见, HH 通道功率、极化总功率、共极化相干系数、相似系数、极化度、极化熵等 6 个极化特征的舰船目标与模糊噪声和海杂波的对比度要优于共极化率和平均散射角。

表 1 不同参数下舰船与噪声和海杂波的归一化距离

Table1 Normalized distances of ship-ambiguity and ship-clutter under different polarimetric features

polarimetric features	quad-polarimetric SAR		compact polarimetric SAR(CTLR)	
	ship-ambiguity	ship-clutter	ship-ambiguity	ship-clutter
$ S_{HH} ^2 (S_{RH} ^2)$	1.304 0	0.633 8	0.518 0	0.185 3
Span	1.472 0	0.677 8	1.422 7	0.662 5
co-polarization ratio	0.101 1	0.112 2	0.059 5	0.107 6
co-polarization correlation coefficient	2.149 7	0.362 3	1.444 6	0.717 0
conformity coefficient	3.032 6	0.119 0	2.896 2	0.119 1
degree of polarization	2.650 6	0.661 3	2.170 2	0.589 0
entropy	1.566 3	0.689 0	1.991 5	0.537 8
average scattering angle	0.907 0	0.170 9	0.024 7	0.051 6

2.2 全极化与简缩极化 SAR 极化特征相似性分析

为进一步分析简缩极化的极化特征参数跟全极化极化特征参数的相似性,定义归一化距离的相对差,表示为:

$$R_d = \frac{d_{\text{norm_QP}} - d_{\text{norm_CP}}}{d_{\text{norm_FP}}} \quad (18)$$

式中 $d_{\text{norm_QP}}$, $d_{\text{norm_CP}}$ 分别表示由式(17)计算得到的全极化和简缩极化模式下的舰船目标与模糊噪声、舰船目标与海杂波的归一化距离。

表 2 给出了各极化特征参数归一化距离的相对差,该数值越接近于零,说明简缩极化中该特征参数与全极化对应的特征参数越接近。由表 2 可见,极化总功率、相似系数、极化度和极化熵等 4 个特征参数相对更接近于全极化。

表中其他特征参数间相差很大,主要是因为简缩极化 SAR 与全极化 SAR 相比,在维度上存在不足,信息量也没有全极化数据丰富。其他特征,虽然名字相似或相同,但实际代表的物理意义发生变化,如 RH 通道相干系数和 HH 通道相干系数就代表完全不同的物理意义。

表 2 各极化特征参数相对差

Table2 Relative difference of different polarimetric features

polarimetric features	ship-ambiguity	ship-clutter
$ S_{HH} ^2 (S_{RH} ^2)$	0.603	0.708
Span	0.034	0.023
co-polarization ratio	0.412	0.041
co-polarization correlation coefficient	0.328	-0.979
conformity coefficient	0.045	-0.001
degree of polarization	0.181	0.109
entropy	-0.271	0.219
average scattering angle	0.973	0.698

3 基于极化特征参数的舰船目标检测性能分析

通过全极化与简缩极化 SAR 图像舰船目标恒虚警率(Constant False Alarm Rate, CFAR)检测结果,对比分析基于不同极化特征参数的舰船目标检测性能。CFAR 检测是 SAR 图像海上舰船目标检测最常用的一种方法,对各种海况条件下的舰船检测稳健性较好,即使对于恶劣海况,也能得到较好的舰船目标检测性能^[26]。实验同样基于 Radarsat-2 全极化和简缩极化 SAR 图像数据,实验中根据图像分辨率大小和要检舰船目标的尺寸,将背景窗设为 51×51,保护窗设为 35×35,目标窗设为 1×1,虚警概率设为 $P_{fa}=0.000\ 01$ 。

为进一步定量分析与评估,定义算法品质因数(Figures of Merit, FoM)为:

$$FoM = \frac{N_{dt}}{N_{gt} + N_{fa}} \quad (19)$$

式中: N_{dt} 为检测出的目标个数; N_{fa} 为虚警个数; N_{gt} 为地面真实目标个数。表 3 给出了基于各极化特征参数 CFAR 检测结果的对比。

由表 3 可见:总体上,对每种极化特征参数而言,简缩极化的检测性能接近于全极化,特别是对极化总功率、相似系数、极化度和极化熵等 4 个特征参数,与 2.2 小节的分析结果是一致的。其次,每种极化特征参数的检测结果各不相同,有的极化特征参数的检测性能要优于其他特征参数。其中,共极化系数、极化度和极化熵检测结果相对较好,都能够检测出舰船目标,目标结构相对完整,但都不同程度地存在虚警;平均散射角检测结果不存在虚警,但存在漏检,目标形状保持不够完好;共极化率检测结果无论是从检测率还是品质因数,效果最差,而且其中舰船目标形状保持不够好。正是由于不同极化特征参数对舰船目标与海洋背景散射机理区分能力的不同,直接决定了其舰船目标检测性能的差异。最后,虽然有的极化特征参数的检测性能相对其他而言更好一些,但没有单独的哪个极化特征参数可以得到理想的检测结果。因此对具体的极化、简缩极化 SAR 图像舰船目标检

测问题, 还需对极化特征参数进行优选组合得到最优的极化特征参数集, 以得到理想的舰船目标检测性能。

表 3 不同参数 CFAR 检测结果统计
Table 3 Summary of CFAR detection results under different polarimetric features

polarimetric features	type	targets detected	targets missed	false alarms	detection probability/%	false alarm rate/%	FoM/%
$ S_{HH} ^2 (S_{RH} ^2)$	Quad-Pol SAR	6	1	5	85.7	41.7	46.1
	CP SAR	6	1	1	85.7	12.5	75.0
Span	Quad-Pol SAR	6	1	4	85.7	36.4	60.0
	CP SAR	6	1	5	85.7	41.7	54.5
co-polarization ratio	Quad-Pol SAR	4	3	2	57.1	22.2	44.4
	CP SAR	4	3	2	57.1	22.2	44.4
co-polarization correlation coefficient	Quad-Pol SAR	7	0	2	100.0	22.2	77.8
	CP SAR	7	0	3	100.0	30.0	70.0
conformity coefficient	Quad-Pol SAR	6	1	1	85.7	12.5	75.0
	CP SAR	6	1	1	85.7	12.5	75.0
degree of polarization	Quad-Pol SAR	7	0	2	100.0	22.2	77.8
	CP SAR	7	0	2	100.0	22.2	77.8
entropy	Quad-Pol SAR	7	0	6	100.0	46.2	53.8
	CP SAR	7	0	5	100.0	41.7	58.3
average scattering angle	Quad-Pol SAR	5	2	0	71.4	0	71.4
	CP SAR	6	1	0	85.7	0	85.7

4 结论

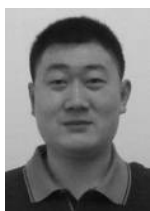
基于星载简缩极化 SAR 图像的海上舰船目标检测是当前海洋遥感领域中的研究热点。本文针对星载简缩极化 SAR 图像海上舰船目标检测问题, 在全极化及简缩极化 SAR 特征参数提取方法研究基础上, 基于实测 Radarsat-2 全极化数据模拟的 CTRLR 模式简缩极化 SAR 图像数据, 通过归一化距离等对所提取极化特征参数的舰船目标和海杂波背景区分能力进行了系统分析与比较, 在此基础上进一步对全极化及简缩极化的极化特征参数相似度进行了定量分析与评估。通过全极化与简缩极化 SAR 图像舰船目标 CFAR 检测结果, 对比分析了基于不同极化特征参数的舰船目标检测性能。结果表明: 简缩极化 SAR 系统的检测性能总体上接近于全极化。不同极化特征参数对舰船目标与海洋背景散射机理区分能力不同, 决定了其舰船目标检测性能的差异, 虽然有的极化特征参数的检测性能相对其他而言更好一些, 但没有单独的哪个极化特征参数可以得到理想的检测结果。因此如何对所有的极化特征参数进行优选组合, 得到最优的极化特征参数集, 以得到理想的舰船目标检测性能, 将是进一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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. (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.)
- [3] CHARBONNEAU F J, BRISCO B, RANEY R K, et al. Compact polarimetry overview and applications assessment[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2010, 36(sup2): S298–S315.
- [4] LI H, PERRIE W, HE Y, 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.
- [5] 樊庆聚, 计科峰, 冷祥光, 等. 一种基于分块预判的 SAR 图像舰船目标检测方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(3): 378–384. (FAN Qingju, JI Kefeng, LENG Xiangguang, et al. A method for SAR ship detection based on block prescreen[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016, 14(3): 378–384.)
- [6] YIN J J, YANG J, ZHOU Z S. New parameters in compact polarimetry for ocean target detection[C]// 2013 IET International Radar Conference. Xi'an, China: IET, 2013: 1–6.
- [7] SHIRVANY R, CHABERT M, 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.
- [8] YIN J, YANG J. Ship detection by using the M-Chi and M-Delta decompositions[C]// 2014 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Quebec City, QC, Canada: IEEE, 2014: 2738–2741.
- [9] ATTEIA G, COLLINS M. Ship detection performance using simulated dual-polarization RADARSAT constellation mission data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2015, 36(6): 1705–1727.

- [10] YIN J, YANG J, ZHANG X. On the ship detection performance with compact polarimetry[C]// 2011 IEEE Radar Conference. Kansas city, MO, USA: IEEE, 2011: 675–680.
- [11] 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.
- [12] YIN J, YANG J, ZHOU Z S, 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.
- [13] STACY N, PREISS M. Compact polarimetric analysis of X-band SAR data[C]// 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Dresden, Germany: [s.n.], 2006: 1–4.
- [14] RANEY R K. Hybrid-polarity SAR architecture[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(11): 3397–3404.
- [15] 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.
- [16] 张腊梅. 极化 SAR 图像人造目标特征提取与检测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. (ZHANG Lamei. Research on feature extraction and detection of man-made target using polarimetric SAR images[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2010.)
- [17] 陈文婷, 邢相薇, 计科峰. SAR 图像舰船目标识别综述[J]. 现代雷达, 2012, 34(11): 53–58. (CHEN Wenting, XING Xiangwei, JI Kefeng. A survey of ship target recognition in SAR images[J]. Modern Radar, 2012, 34(11): 53–58.)
- [18] 王梁文敬. 典型地物的极化后向散射特性分析及其在分类中的应用[D]. 济南: 山东科技大学, 2010. (WANG Liangwenjing. Back scattering mechanisms of typical terrain cover types and its application in image classification[D]. Jinan, China: Shandong University of Science and Technology, 2010.)
- [19] BOERNER W M. Basic concepts in radar polarimetry[Z]. PolSARpro v3.0–lecture note, 2014.
- [20] MOEN M A, DOULGERIS A P, ANFINSEN S N, et al. Comparison of automatic segmentation of full polarimetric SAR sea ice images with manually drawn ice charts[J]. Cryosphere, 2013, 7(6): 1693–1705.
- [21] TRUONG-LOI M L, DUBOIS-FERNANDEZ P, FREEMAN A, et al. The conformity coefficient or how to explore the scattering behavior from compact polarimetry mode[C]// 2009 IEEE Radar Conference. Pasadena, CA, USA: IEEE, 2009: 1–6.
- [22] 王超, 张红, 吴樊, 等. 高分辨率 SAR 图像船舶目标检测与分类[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (WANG Chao, ZHANG Hong, WU Fan, et al. Ship target detection and classification in high resolution SAR image[M]. Beijing: Science Press, 2013.)
- [23] BARAKAT R. n-fold polarization measures and associated thermodynamic entropy of N partially coherent pencils of radiation[J]. Journal of Modern Optics, 1983, 30(8): 1171–1182.
- [24] CLOUDE S R, POTTIER E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(2): 498–518.
- [25] PRAKS J, KOENIGUER E C, HALLIKAINEN M T. Alternatives to target entropy and alpha angle in SAR polarimetry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(7): 2262–2274.
- [26] LI Y, LIN H, ZHANG Y, et al. Comparisons of circular transmit and linear receive compact polarimetric SAR features for oil slicks discrimination[J]. Journal of Sensors, 2015(99): 1–14.
- [27] SALBERG A B, RUDJORD O, SOLBERG A H S. Oil spill detection in hybrid-polarimetric SAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(10): 6521–6533.
- [28] 谢镭. 简缩极化 SAR 图像分解及分类技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014. (XIE Lei. Decomposition and classification for compact polarimetric SAR images[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.)

作者简介:



王海波(1982–), 男, 山东省青州市人, 硕士, 主要研究方向为遥感信息处理. email: wjmsn@qq.com.

蔡正谊(1974–), 男, 西安市人, 副研究员, 长期从事航天预先研究项目管理工。

冷祥光(1991–), 男, 江西省修水县人, 在读博士研究生, 主要研究方向为遥感信息处理。

计科峰(1974–), 男, 陕西省长武县人, 博士, 副教授, 主要研究方向为 SAR 图像处理、判读解译与目标识别。

武院生(1978–), 男, 山东省东明县人, 助理工程师, 主要研究方向为成像与图像自动目标识别。