

研究论文

基于简缩极化 SAR 的溢油检测与分类方法

舒思京^{1,2}, 孟俊敏^{1,2*}, 张 晰^{1,2}, 刘根旺^{1,2}

(1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 自然资源部海洋工程技术创新中心, 山东 青岛 266061)

摘要: 针对简缩极化 SAR 在海上溢油的检测与分类应用开展研究, 利用欧式距离全面分析了简缩极化 SAR 的 36 种极化特征在溢油检测与油膜分类中的性能, 发现简缩极化特征中的奇次散射系数的溢油检测性能最好, 简缩极化熵的疑似溢油鉴别性能最好。在此基础上, 提出了结合二叉树原理的简缩极化 SAR 溢油检测与油膜分类算法, 并分析了 RADARSAT-2 和 SIR-C 全极化溢油数据模拟的简缩极化数据。结果表明, 此方法对溢油的检测精度可达 95.67%, 对于疑似溢油的识别精度可达 95.71%, 证明了简缩极化 SAR 在溢油检测与分类中具有较好的应用前景。

关键词: 溢油检测; 简缩极化 SAR; 油膜分类

中图分类号: TP753

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2021)01-0146-12

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2021.01.015

引用格式: SHU S J, MENG J M, ZHANG X, et al. Oil spill detection and classification method based on compact polarization SAR[J]. Advances in Marine Science, 2021, 39(1): 146-157. 舒思京, 孟俊敏, 张晰, 等. 基于简缩极化 SAR 的溢油检测与分类方法[J]. 海洋科学进展, 2021, 39(1): 146-157.

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)具有全天时、全天候、高分辨率成像的优势, 是目前海上溢油监视监测的重要手段^[1]。当海面发生溢油事故时, 油膜对海面的中短波和毛细波有较强的抑制作用(马朗戈尼效应, Marangoni Effect), 导致雷达回波强度减弱, 海上溢油覆盖区域在 SAR 图像中呈暗斑特征^[2]。因此, 早期的 SAR 溢油检测是通过探测海面中的暗区域进行的^[3-5]。

然而, 除了海面溢油, 其它海洋、大气现象也可在 SAR 图像中表现出暗斑特征, 如由鱼类或浮游生物产生的天然生物油膜、低风速区和上升流等^[4-5]。这严重影响了单极化 SAR 的溢油探测精度。随着雷达技术的发展, 全极化 SAR 能够获取比单极化 SAR 更全面的极化信息, 不仅能有效克服单极化 SAR 溢油探测精度低的问题, 还使油膜和疑似油膜(类油膜)的区分成为可能。Cloude 和 Pottier 将 H/A/α(熵/各向异性/平均散射角)特征应用于溢油监测^[6-9]; Milgliaccio 等^[10]进一步利用 H/A/α 特征进行了重油、油醇、油酸甲酯等不同种类的油膜识别。Nunziata 等^[11]发展了基于 Mueller 矩阵的滤波技术, 该技术能够区分海面的布拉格散射区域(如生物油膜或清洁海面)和非布拉格散射区域(溢油覆盖海面), 并在 SIR-C/X SAR 数据中进行了溢油检测。除此之外, 同极化相位差的标准差也可用于区分溢油和类溢油^[12]。

尽管全极化 SAR 有较好的溢油探测能力, 但由于全极化 SAR 幅宽远小于单极化 SAR 数据(如 RADARSAT-2 的全极化 SAR 数据幅宽仅有 25 或 50 km, 而单极化 ScanSAR 模式的幅宽为 500 km), 且系统结构复杂、成本高, 极大的限制了全极化 SAR 的应用。为克服全极化 SAR 的缺陷, 简缩极化 SAR 于 2005 年被提出^[13-14], 其采用特殊的双极化 SAR 结构, 不仅能实现大幅宽观测(可达 350 km), 还能获取接近全极化的

收稿日期: 2019-10-22

资助项目: 国家重点研发计划——(2017YFC1405300); 国家自然科学基金项目——基于无人机紫外与 SAR 的溢油遥感监测方法研究(41706208)

作者简介: 舒思京(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋遥感方面研究. E-mail: shusijing@fio.org.cn

* 通信作者: 孟俊敏(1973—), 男, 研究员, 博士, 主要从事海洋遥感方面研究. E-mail: mengjm@fio.org.cn

(陈 靖 编辑)

极化散射信息。鉴于简缩极化 SAR 的独特优势,加拿大的“雷达卫星星座任务”(Radarsat Constellation Mission, RCM)、印度 RISAT 卫星以及日本的 ALOS-2 卫星都已支持了简缩极化模式。

在简缩极化 SAR 溢油探测方面,最早有 Zhang 等利用简缩极化的一致性参数(conformity coefficient)进行了溢油检测^[15]; Shirvany 等引入简缩极化度开展 C 波段和 X 波段 SAR 溢油检测^[16]。近 5 a 来, Salberg 等和 Nunziata 等将部分全极化 SAR 极化特征引入到简缩极化 SAR 溢油检测中^[17],此外还进行了简缩极化 $m-\chi$ 分解得到极化度和椭圆率,并将其用于溢油检测^[18]; Xie 等基于简缩极化特征值参数简缩极化熵、简缩极化比和简缩极化基准高度等进行溢油检测^[19]。这些研究证明了简缩极化 SAR 在溢油探测中有较大的应用潜力。

然而,在简缩极化 SAR 海面溢油探测研究方面还有问题未解决:1)简缩极化 SAR 已发展了较多溢油检测特征,但对于众多的特征尚未进行全面的对比分析;2)尚未有利用简缩极化 SAR 开展溢油分类的研究。因此,本文将针对上述 2 个问题开展研究:首先利用简缩极化 SAR 数据提取常用的 36 个极化特征,通过对比分析这 36 个简缩极化特征图像中不同类型油膜和清洁海面间的欧式距离,分别筛选出最优的溢油检测和油膜类型(包括疑似溢油)区分的特征;然后,基于筛选的最优特征,提出了一种基于二叉树原理的溢油检测与分类的方法;最后利用模拟的简缩极化 SAR 数据开展方法有效性评估。

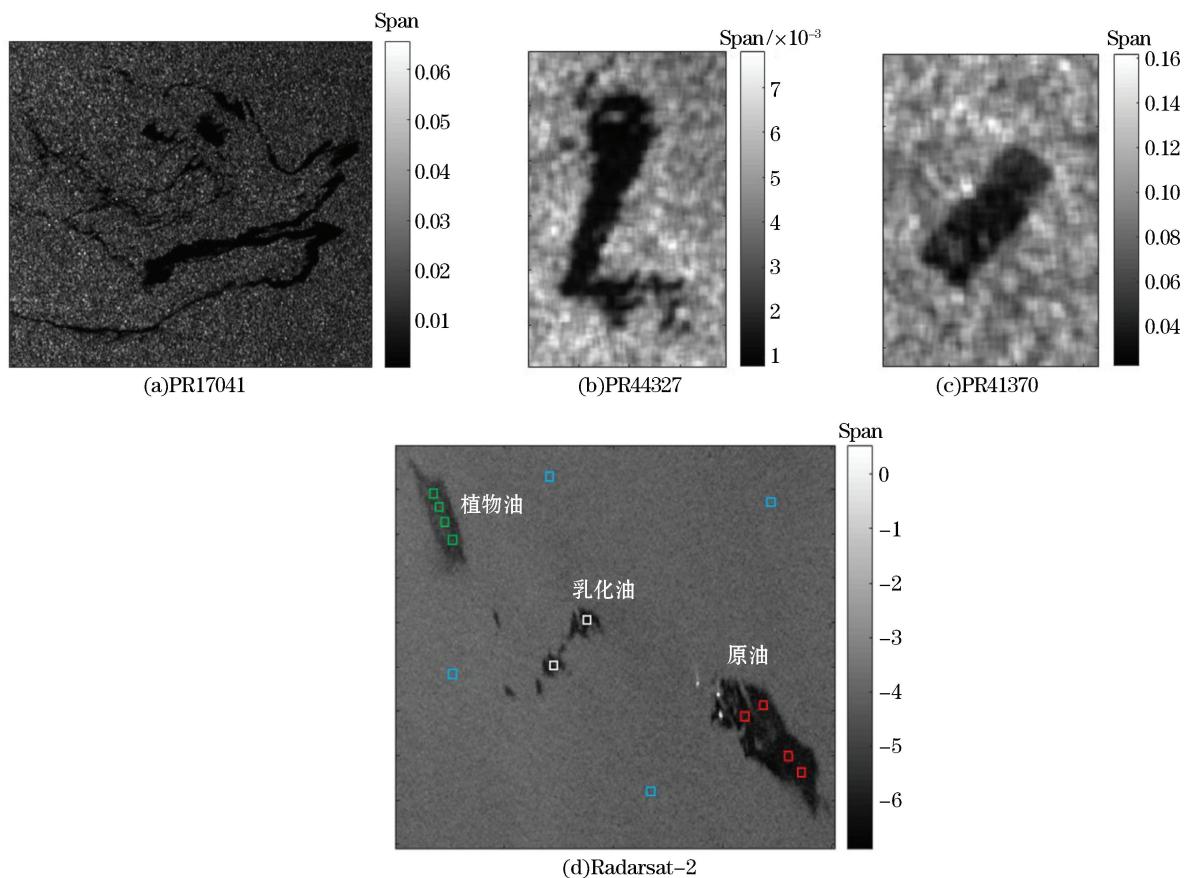
1 实验与数据

本文利用 2 次在欧洲海域开展的海上溢油实验获取的同步星载 SAR 数据(2 次实验分别获取了 1 景 Radarsat-2 和 3 景 SIR-C 全极化数据),重构出所需的简缩极化 SAR 数据。其中,实验一于 1994-04-02 在北海附近海域($5^{\circ}21' E, 54^{\circ}38' N$)开展,数据源于“奋进号”航天飞机进行的 STS-59 任务(1994 年 4 月)和 STS-68 任务(1994 年 10 月),其中数据影像 PR17041(图 1a)和 PR44327(图 1b)中的暗斑为人工铺设的 Olay alcohol 原油,数据影像 PR41370(图 1c)中的暗斑为疑似溢油。详细的数据参数见表 1。实验二为 NOFO 公司(Norwegian Clean Seas Association for Operating Companies)于 2011-06-06—09 在北海($2^{\circ}27' E, 59^{\circ}59' N$)开展的海上溢油实验。此实验在海上布放了植物油、乳化油和原油三种类型的油品。其中,植物油为 Radiagreen ebo 植物油,成分主要为油酸 2-乙基己酯,在 $20^{\circ}C$ 时,密度为 865 kg/m^3 ,此时动态黏度为 $6.92 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。由于该植物油成分中的酯基构成分子具有亲水性,使得此植物油具有与天然浮油相似的结构和属性。因此,本实验中选择该植物油的目的是用于模拟天然单分子生物浮油,也即疑似溢油。实验使用的原油为 Barlder 原油,根据 2001 年 Barlder 等的实验研究,此原油的密度为 0.914 g/mL ,在 $13^{\circ}C$ 时,动态黏度为 $219 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。乳化油为 Oseberg blend 原油和 5% 中性燃油(IFO380)的混合液,经样本分析可知,乳化油在实验过程中含水量为 69%,黏度为 $4.860 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。详细的油品属性见表 2。图 1d 为油膜区域的总功率 SPAN 图像,尽管此时风速较低($1.6 \sim 3.3 \text{ m/s}$),但 3 种油膜依然清晰可见,图中自左向右依次为植物油、乳化油和原油,并且在图中由植物油模拟的生物油膜在视觉上与原油/乳化油无显著差别。原油油膜附近的高亮点为实验协同船只,图中方框选取的区域将用于下文数据分析。

表 1 实验数据列表
Table 1 Experimental data

实验	数据	模式	区域	时间	油膜类型	风速
实验一	PR17041	MLC C-Band	北海	1994-04-11	OLA 原油	低速至中速
	PR44327	MLC C-Band	北海	1994-04-11	OLA 原油	低速至中速
	PR41370	MLC C-Band	太平洋	1994-10-01	疑似溢油	$5.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
实验二	SAR-PF-1307733525	Fine Quad C-Band	北海	2011-06-08	植物油、原油、乳化油	$3 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

注:风速数据源于实验协同船只和邻近石油平台的观测



注:图 a~图 c 为 SIR-C 数据;图 d 为 Radarsat-2 数据,图像为特征 Span 图

图 1 溢油区域及选择感兴趣区域

Fig.1 Oil spill area and selected regions of interest

表 2 实验二中植物油、原油和乳化油的油膜属性

Table 2 Oil film properties of plant oil, crude and emulsion

属性	植物油	原 油	乳化油
成分	Radiagreen ebo 植物油	Barlder 原油	Oseberg blend 原油和 5% 中性燃油 (IFO380)
密度/(kg · m ⁻³)	865	914	—
黏度/(mPa · s)	6.92	219	4 860
释放量/m ³	0.4	20	30

注:“—”表示无数据

2 简缩极化 SAR 理论

2.1 简缩极化构建

简缩极化 SAR 实质上是一种特殊的双极化 SAR。典型的工作方式为发射左/右旋圆单极化电磁波,然后用水平和垂直双极化接收。由于目前缺乏真实的简缩极化 SAR 数据,大部分研究是利用全极化 SAR 数据重构生成简缩极化 SAR 数据,由极化散射矩阵得到简缩极化散射矢量^[20]:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} E_{HC} \\ E_{VC} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{VH} \\ S_{HV} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \pm i \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH} \pm iS_{HV} \\ S_{VH} \pm iS_{VV} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:下标 C 表示圆极化、下标 L 表示左圆极化、下标 R 表示右圆极化;“+”表示系统发射左圆极化波(LHC);“-”表示系统发射右圆极化波(RHC)。

本文采用右旋圆极化发射,水平和垂直线极化接收的模式。由式(1)可知,右圆极化的简缩极化 SAR 协方差矩阵表示为

$$\mathbf{C}_2 = \langle \mathbf{K} \mathbf{K}^* \rangle = \begin{bmatrix} \langle |E_{RH}|^2 \rangle & \langle E_{RH} E_{RV}^* \rangle \\ \langle E_{RV} E_{RH}^* \rangle & \langle |E_{RV}|^2 \rangle \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中:T 表示矩阵转置,“*”表示复共轭,“<>”表示空间集平均。

2.2 简缩极化 $H\text{-}\alpha$ 分解理论

类似于全极化 $H\text{-}\alpha$ 分解理论,Clonde 等于 2012 年基于协方差矩阵 C_2 提出了简缩极化 $H\text{-}\alpha$ 分解方法^[21]:

$$\mathbf{C}_2 = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} \mathbf{U}_2 \begin{bmatrix} p_1 & 0 \\ 0 & p_2 \end{bmatrix} \mathbf{U}_2^{-1}, \quad (3)$$

式中: \mathbf{U}_2 为 2×2 的可逆矩阵, \mathbf{U}_2^{-1} 为 \mathbf{U}_2 的逆矩阵, 该分解能够得到极化协方差矩阵的特征值 λ_i 和概率 p_i , 并且特征值满足 $\lambda_1 \geq \lambda_2$ 。利用简缩极化特征值,可以获取一系列基于特征值的参数,例如简缩极化熵^[21]、简缩极化比^[22]和简缩极化基准高度^[23]等。

2.3 $m\text{-}\chi$ 分解理论

简缩极化 SAR 除了用散射矢量与协方差矩阵表示,还可以使用 Stokes 矢量表示。Raney 等给出了简缩极化模式下的 Stokes 矢量表达式^[24]:

$$\vec{g} = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle |E_{RH}|^2 + |E_{RV}|^2 \rangle \\ \langle |E_{RH}|^2 - |E_{RV}|^2 \rangle \\ 2Re \langle E_{RH} E_{RV}^* \rangle \\ -2Im \langle E_{RH} E_{RV}^* \rangle \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: g_0 表示电磁波总功率; g_1 表示水平或垂直线极化分量功率值; g_2 表示倾角为 45° 或 135° 时的线极化分量功率值; g_3 为右旋圆极化分量的功率值; Re 和 Im 分别表示复数的实部和虚部。

利用 Stokes 矢量可以得到极化度 m 、圆度 χ 和相对相位 δ :

$$m = \frac{\sqrt{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2}}{g_0}, \quad (5)$$

$$\sin 2\chi = -\frac{g_3}{m g_0} \quad \chi \in [-45^\circ, 45^\circ], \quad (6)$$

$$\delta = -\arctan \left(\frac{g_3}{g_2} \right) \quad \delta \in [-180^\circ, 180^\circ], \quad (7)$$

基于此 Raney 提出了一种基于 $m\text{-}\chi$ 的三分量分解方法,其分解公式为

$$\begin{bmatrix} V_R \\ V_G \\ V_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{g_0 m \frac{1 + \sin 2\chi}{2}} \\ \sqrt{g_0 (1 - m)} \\ \sqrt{g_0 m \frac{1 - \sin 2\chi}{2}} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: V_R 、 V_G 和 V_B 分别为偶次散射系数、体散射系数和奇次散射系数。

为分析简缩极化 SAR 特征的溢油检测和疑似溢油区分能力, 本文共提取了 36 种极化特征, 详细特性见表 3。

表 3 提取的简缩极化特征

Table 3 The extracted compact polarization features

简缩极化协方差矩阵 ^[21]	特征值参数 ^[21-23]	Stokes 参数 ^[24]	Raney 分解参数 ^[24]
		c16 矢量(g_0)	
		c17 矢量(g_1)	
	c5 平均散射角	c18 矢量(g_2)	
	c6 各项异性指数	c19 矢量(g_3)	
	c7 简缩极化熵	c20 圆极化比	c31 偶次散射
c1 C_{11}	c8 特征值(λ_1)	c21 圆极化度	c32 奇次散射
c2 C_{12}	c9 特征值(λ_2)	c22 线极化度	c33 体散射
c3 C_{12} 相位	c10 概率(p_1)	c23 线极化比	c34 圆度
c4 C_{22}	c11 概率(p_2)	c24 对比度	c35 相对相位
	c12 总功率	c25 特征值(λ_3)	c36 极化度
	c13 简缩极化比	c26 特征值(λ_4)	
	c14 简缩极化基准高度	c27 概率(p_3)	
		c28 概率(p_4)	
		c29 椭圆方位角	
		c30 椭圆角	

3 特征筛选

为了定量地比较 36 个极化特征(表 3)的溢油检测和油膜类型区分能力, 采用欧式距离(D)度量清洁海面和不同油膜之间的对比度。欧式距离的定义^[25]:

$$D = \frac{|m_1 - m_2|}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}, \quad (9)$$

式中: m 和 σ 分别表示样本均值和方差。欧式距离满足 $D > 0$, 欧式距离值越大, 表明 2 种样本间的可分性越强, 反之则越难区分。区域间的均值差异越大, 方差越小, 欧式距离越大, 可分性越强。

本文以 Radarsat-2 数据为例, 根据图 1 中黄色方框选取原油、植物油、乳化油和清洁海面四种区域的样本, 统计每个简缩极化特征图像中各区域样本的均值和方差, 再根据式(9)计算各区域间的欧式距离。其中, 油膜(原油、植物油、乳化油)与清洁海面之间的欧式距离用于度量每个特征的溢油检测能力, 不同油膜相互之间的欧式距离用于度量每个特征的油膜分类能力。

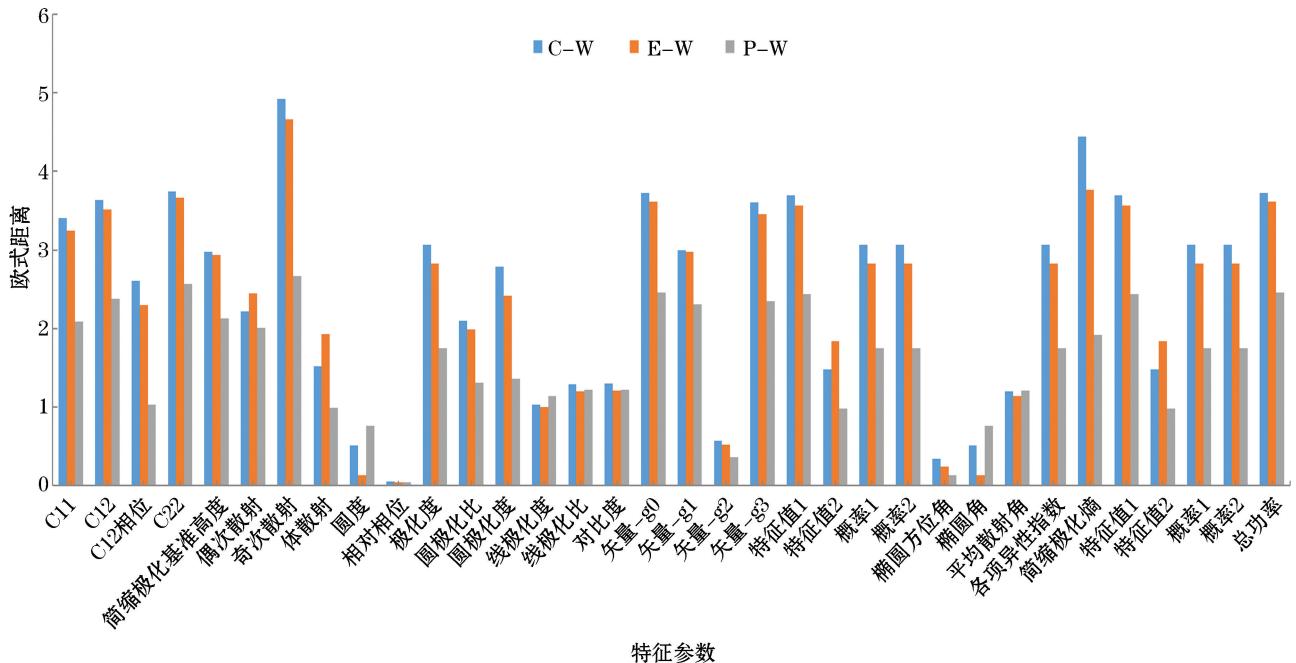
3.1 溢油检测

溢油检测是基于油膜与清洁海面之间的差异进行, 差异越大, 越容易区分, 故在极化特征图像中两者间的欧式距离越大, 代表该特征的溢油检测能力越强。图 2 分别给出了计算的植物油与清洁海面(D_{P-W})、原油与清洁海面(D_{C-W})以及乳化油与清洁海面(D_{E-W})间的欧式距离。由图 2 可知, 大部分特征的 D_{C-W} 最大, D_{E-W} 次之, D_{P-W} 最小, 并且 D_{C-W} 和 D_{E-W} 两者差异较小, 造成此现象的主要原因是原油和乳化油同属于矿物质

油,油膜性质相近,其对波浪的抑制作用强于植物油。 D_{C-W} 、 D_{E-W} 和 D_{P-W} 三者都相对较大的特征:奇次散射系数 V_B ,简缩极化熵 H_C , C_{22} ,总功率 $Span$,矢量 g_0 ,特征值 λ_1 , C_{12} 和矢量 g_3 等特征具有很好的溢油检测能力。其中,奇次散射系数 V_B 表现最优,并且在以往的溢油检测研究中并未考虑该特征,本文首次提出将奇次散射系数引入简缩极化 SAR 溢油检测中,其定义如下:

$$V_B = \sqrt{g_0 m \frac{1 - \sin 2\chi}{2}}。 \quad (10)$$

由式(10)可知, V_B 对表面粗糙度非常敏感,其值越大说明目标散射机制中单次散射越强。当雷达波束照射到海水表面时,主要以布拉格散射机制为主,去极化效应弱,极化度 m 大,单次散射较强, V_B 大。当雷达波束照射到油膜时,其表面以非布拉格散射为主^[4],去极化效应强,极化度 m 低,单次散射较弱, V_B 小。基于上述差异,因此奇次散射系数可以有效地区分油膜和海水。



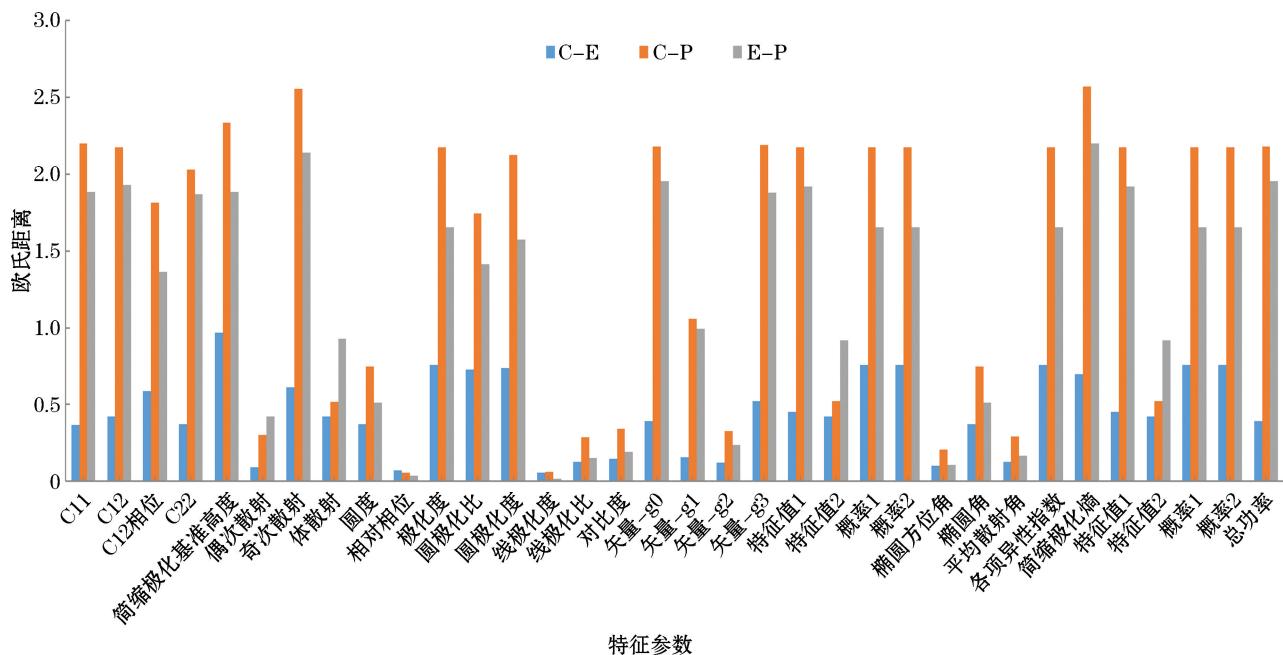
注: $C-W$ 为原油与清洁海面间的欧氏距离, $E-W$ 为乳化油与清洁海面间的欧氏距离, $P-W$ 为植物油与清洁海面间的欧氏距离

图 2 油膜与清洁海面之间的欧氏距离

Fig.2 Euclidean distances between oil film and clean seawater

3.2 油膜分类

本文中油膜分类主要是植物油、原油和乳化油三者间的区分,其中原油和乳化油属于溢油,植物油模拟生物油膜属于疑似溢油。图 3 分别给出了计算的原油与植物油(D_{C-P})、原油与乳化油(D_{C-E})以及乳化油与植物油(D_{E-P})间的欧式距离。可以看出,大部分特征下 D_{C-P} 最大,其次为 D_{E-P} ,最小为 D_{C-E} ,并且 D_{C-E} 最大值小于 1,可见原油和乳化油可分性较低,这是由于两者都是矿物质油,性质相近的缘故。因此,后续的油膜分类中首先将原油和乳化油作为一类与植物油区分。所有特征中, D_{C-P} 和 D_{E-P} 都相对最大的特征为简缩极化熵, D_{C-E} 相对最大的特征为简缩极化基准高度 PH_C 。因此,本文提出利用简缩极化熵 H_C 区分溢油(原油和乳化油)与疑似溢油(植物油);利用简缩极化基准高度区分乳化油与原油。



注: C-E 为原油与乳化油间的欧氏距离, C-P 为原油与植物油间的欧氏距离, E-P 为乳化油与植物油间的欧氏距离

图3 原油、植物油和乳化油三种类型相互间的欧氏距离

Fig.3 Euclidean distances among crude, plant oil and emulsion

4 检测与分类方法

4.1 基于二叉树的检测与分类方法

本节利用奇次散射系数 V_B 、简缩极化熵 H_c 和简缩极化基准高度 PH_c 等简缩极化特征, 结合二叉树原理的对海上溢油实验获取的 Radarsat-2 SAR 溢油影像进行分类: 由于奇次散射系数特征图像中 D_{C-W} 、 D_{E-W} 和 D_{P-W} 三者都相对较大, 因此, 首先利用该特征分割海水和油膜, 其中油膜包括原油、乳化油、植物油; 再利用 D_{C-P} 和 D_{E-P} 都相对最大的简缩极化熵 H_c 识别溢油与疑似溢油, 其中溢油包括原油和乳化油, 疑似溢油为植物油; 最后利用 D_{C-E} 最大的简缩极化基准高度 PH_c 区分原油和乳化油。每一次分类过程只得到 2 种类别, 依次逐步分类, 直到把所有油膜类型都区分出来。相较于一次区分多种类别的方法, 这种方法可有效提高分类精度。图 4 为本文提出的基

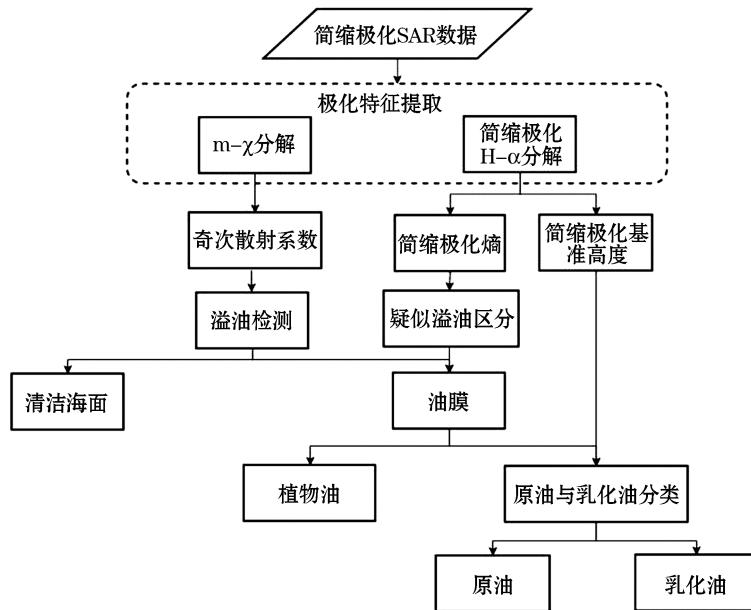


图4 基于简缩极化 SAR 特征和二叉树原理的溢油检测与油膜分类算法流程

Fig.4 Flow chart for oil film detection and classification algorithm based on compact polarization SAR feature and binary tree principle

于简缩极化 SAR 特征和二叉树原理的溢油检测与油膜分类算法流程图。

4.2 溢油检测结果

本文算法的第一步为溢油检测,即区分油膜和清洁海面,提取出油膜区域。主要使用阈值分割法对溢油进行检测,阈值是通过最大类间方差法(OTSU)^[19]确定。图 5 和图 6 分别为 Radarsat-2 数据和 SIR-C 数据中简缩极化奇次散射系数的特征图像以及溢油检测结果。特征图像中油膜与清洁海面有明显的目视差异,这说明该奇次散射系数 V_B 能够用于溢油检测。从检测结果图像中可知, V_B 能够突出溢油区域,增大溢油与海杂波的差异,同时也能够有效地保持油膜边缘细节。

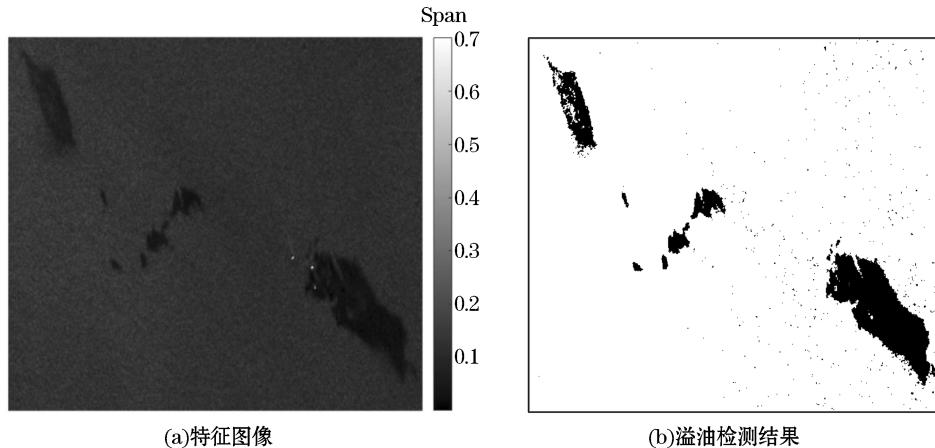


图 5 基于奇次散射系数对 Radarsat-2 数据进行溢油检测的结果

Fig.5 Oil spill detection results for Radarsat-2 data based on odd-order scattering coefficients

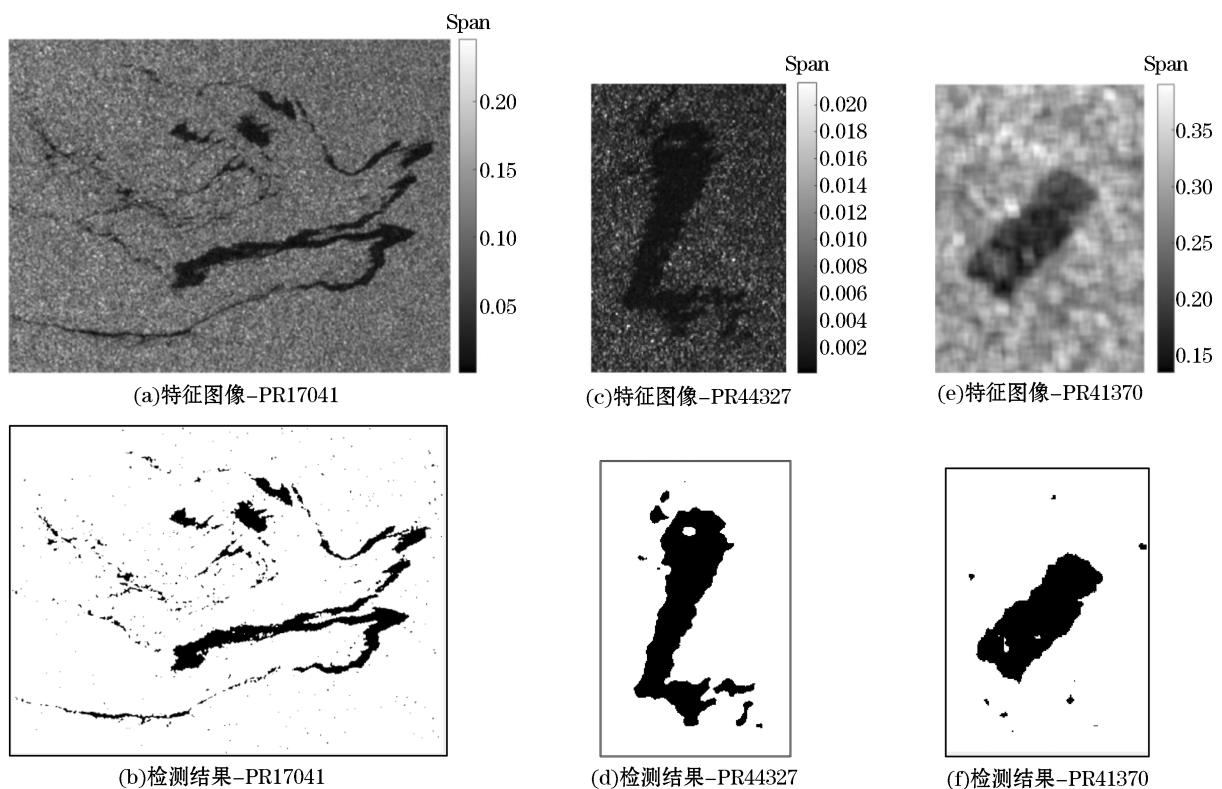


图 6 基于奇次散射系数对 SIR-C 数据进行溢油检测的结果

Fig.6 Oil spill detection results for SIR-C data based on odd-order scattering coefficients

为对检测结果进行精度评价,本文依据文献[19]和文献[26]中记载的现场实验信息确定溢油类型和油膜中心位置,再结合专家经验知识对分别对图5和图6中的溢油区域进行目视解译,将各数据的溢油检测结果与专家目视解译结果进行逐像元精确定判,得到溢油检测精度(表4),其中由于图6a中油膜分布不集中,文中仅对联通面积较大区域进行精度评价。由表4中可知,PR44327(图6c)的溢油检测精度最高为95.67%,所有检测结果的平均检测精度为92.61%。结合4景数据的检测结果,可以看出简缩极化奇次散射系数 V_B 在溢油检测中具有很大的应用潜力。

4.3 油膜分类结果

将提取的油膜区域(图5b)对油膜区域进行分类:首先我们对提取的油膜区域像素利用简缩极化熵 H_C 区分植物油与原油/乳化油,也即疑似溢油的鉴别。分类结果如图7a所示,为了便于观察,我们将分割后的植物油和乳化油/原油区域以不同颜色置于一幅图中,绿色主要为植物油,红色主要为乳化油/原油,图中植物油和乳化油/原油绝大部分区域被分割开,仅有少数乳化油/原油区域边缘被分为植物油,这可能是由于边缘区域油膜较薄,在图像中此区域的特征与植物油相近的缘故。然后,基于上述提取的红色区域再利用简缩极化基准高度 PH_C 区分乳化油和原油。结果如图7b所示,同样的将两者以不同颜色置于一幅图中,白色主要为乳化油,红色主要为原油,图中白色与红色混叠,没有明显的划分,这可能是由于原油和乳化油同属于矿物质油、性质相近的缘故,总体分类结果见图7c。

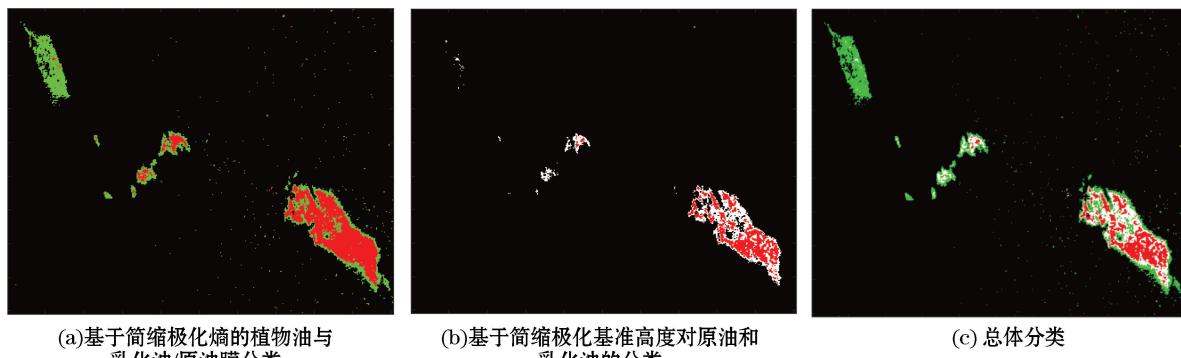


图7 分类方法的油膜分类结果

Fig.7 Oil film classification results of proposed classification method

为进行对比分析,将本文分类方法与经典的 Wishart 极化 SAR 监督分类方法结果进行比较,后者结果见图8。图8a中红色为油膜,黑色为清洁海面,紫色为船只,其中原油/乳化油的检测结果基本与图5b相同,但植物油仅有部分与清洁海面分离,效果不及本文提出的基于奇次散射系数的溢油检测结果。图8b中,绿色主要为植物油,红色主要为原油/乳化油,可知植物油与清洁海面混淆较为严重。对比图7a和图8b,可知在植物油与原油/乳化油的区分上,本文提出的分类方法优于 Wishart 极化 SAR 监督分类方法。图8c中绿色主要为植物油,白色主要为乳化油,红色主要为原油,黑色主要为清洁海面,对比图7c可以看出2种方法的分类结果中,原油与乳化油混淆较为严重,但总体上本文的分类方法受海面的影响较小。

表4 基于简缩极化奇次散射系数的溢油检测精度

Table 4 Oil spill detection accuracy of odd-order scattering coefficients

数 据	检测精度
Radarsat-2	95.18%
PR44327	95.67%
PR41370	92.35%
PR17041	87.21%

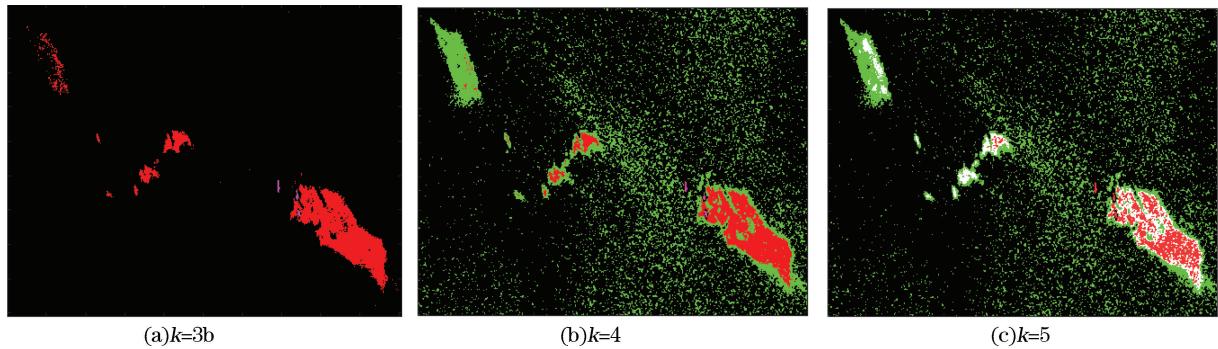


图 8 基于 Wishart 极化 SAR 监督分类方法的油膜分类结果

Fig.8 Classification results of wishart Pol-SAR supervised classification

为对 2 种分类方法进行定量的评价,本文采用逐像元判别的方式计算分类精度。文中采用的 Radarsat-2 数据来自卫星同步的海上溢油实验,文献[26]详细介绍了实验过程,乳化油,植物油和原油的布放时间为 6 月 7 日 12:15,6 月 8 日 04:10 和 08:23,卫星过境时刻(17:27)实验精确记录了 3 种油膜中心位置,根据航拍图像及各油膜中心位置给出粗略人工分类结果。本文基于上述实验的观测信息和专家经验知识,对图 1 作了高精度的溢油类型专家解译图(图 9),图中绿色为植物油,白色为乳化油,红色为原油,黑色为清洁海面。下文以此溢油类型专家解译图,对本算法进行了定量评价。

参照溢油类型专家解译图(图 9),对溢油分类结果图 7c 和图 8c 中所有像元进行逐点精确判定,得到本文分类方法和 Wishart 极化 SAR 监督分类方法的溢油分类精度(表 5 和表 6)。由表 5 和表 6 可知,在本文提出的溢油分类方法中,清洁水面的识别精度最高,精度达到 96.24%,而 Wishart 监督分类中植物油与清洁海面的混淆较为严重,精度仅为 83.57%;本文分类方法的植物油识别精度可达到 95.71%,优于 Wishart 监督分类方法的 93.59%;然而对于原油和乳化油的区分,2 种方法的精度均不理想,乳化油的分类精度分别为 63.21% 和 65.40%,原油的分类精度分别为 56.62% 和 50.56%,这可能是原油和乳化油成分相似,性质相近的缘故。此外,考察两种分类方法的结果可知,原油和乳化油区域边缘与植物油发生混淆,这可能是由于边缘区域油膜较薄,在图像中此区域的特征与植物油相近的缘故,但两者主体部分有明显的区分。总之,本文的分类方法优于 Wishart 极化 SAR 监督分类方法。

表 5 本文提出方法的分类结果混淆矩阵(%)

Table 5 Confusion matrix of proposed classification method (%)

确定类型	植物油	乳化油	原油	清洁水面
植物油	95.71	1.11	0.05	3.13
乳化油	27.75	63.21	8.53	0.51
原油	12.08	31.10	56.62	0.20
清洁水面	3.04	0.43	0.29	96.24

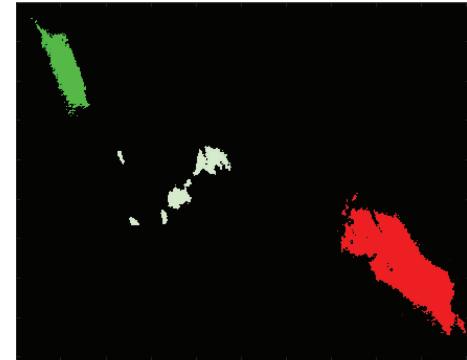


图 9 溢油类型专家解译结果

Fig.9 Oil spill types from expert interpretation

表 6 Wishart 极化 SAR 监督分类的混淆矩阵(%)

Table 6 Confusion matrix of Wishart supervised classification (%)

确定类型	植物油	乳化油	原油	清洁水面
植物油	93.59	5.18	0.05	1.18
乳化油	24.67	65.40	9.81	0.12
原油	15.90	33.47	50.56	0.07
清洁水面	15.81	0.35	0.27	83.57

综上所述,我们提出的基于简缩极化 SAR 特征和二叉树原理的溢油检测与油膜分类算法可以准确的区分海水和疑似溢油,由于目前没有能够有效区分原油和乳化油的简缩极化特征,所以最终实验结果中原油和乳化油发生混淆,分类精度低。本文引入的简缩极化特征奇次散射系数在溢油检测中具有较大优势,以及简

缩极化熵在过滤生物油膜中具有很大的应用潜力;利用奇次散射系数和简缩极化熵,结合二叉树分类思想的溢油分类方法能够有效地检测溢油并过滤疑似溢油。

5 结 语

简缩极化 SAR 作为极化 SAR 新兴的方向,在大范围海洋溢油检测方面具有很大的应用潜力。为了更好地利用简缩极化 SAR 进行海洋溢油检测,我们针对简缩极化 SAR 溢油检测特征筛选问题和简缩极化 SAR 溢油油膜分类应用开展研究。首先,本文利用简缩极化 SAR 数据提取了常用的 36 个简缩极化特征,并且基于特征图像中原油、植物油、乳化油和清洁海面四种区域间的欧氏距离,分别筛选出溢油检测和油膜类型区分的最优特征;然后,利用全极化 SIR-C 和 Radarsat-2 数据生成的模拟简缩极化 SAR 数据,对本文提出的基于简缩极化特征和二叉树原理的溢油检测与分类方法的有效性进行评估。实验结果表明,本文中的简缩极化特征奇次散射系数能有效区分油膜和清洁海面,具有很大的溢油检测应用潜力;利用奇次散射系数和简缩极化熵,结合二叉树分类思想的溢油分类方法能有效过滤疑似溢油。对比分析多种简缩极化 SAR 特征为溢油监测极化特征的选择提供了参考,提出的溢油检测与分类方法对溢油的检测精度可达 95.67%,对于疑似溢油的识别精度可达 95.71%,该方法的应用有助于提高极化 SAR 溢油监测能力。

参考文献(References):

- [1] LI H, PERRIE W, WU J. Retrieval of oil-water mixture ratio at ocean surface using compact polarimetry synthetic aperture radar[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(7): 816-837.
- [2] MERV F, CARL B. A review of oil spill remote sensing[J]. *Sensors*, 2017, 18(2): 91-111.
- [3] WU Y Q, JI Y, SHEN Y, et al. Marine spill oil SAR image segmentation based on Tsallis entropy and improved Chan Vese model[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(4): 678-690. 吴一全, 吉场, 沈毅, 等. Tsallis 熵和改进 CV 模型的海面溢油 SAR 图像分割[J]. 遥感学报, 2012, 16(4): 678-690.
- [4] LEIFER I, LEHR W J, SIMECEKBEATTY D, et al. State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: application to the BP deepwater horizon oil spill[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 185-209.
- [5] SONG S S, ZHAO Y P, AN W, et al. Research on the oil spill SAR remote sensing and fast numerical simulation[J]. *Advances in Marine Science*, 2016, 34(1): 138-146. 宋莎莎, 赵宇鹏, 安伟, 等. 海上溢油 SAR 遥感监测及溢油漂移快速数值预报技术研究[J]. 海洋科学进展, 2016, 34(1): 138-146.
- [6] MIGLIACCIO M, GAMBARDELLA A, TRANFAGLIA M. SAR polarimetry to observe oil spills[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(2): 506-511.
- [7] TIAN W, SHAO Y, YUAN J, et al. An experiment for oil spill recognition using RADARSAT-2 image[C]// 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2010: 2761-2764.
- [8] SCHULER D L, LEE J S. Mapping ocean surface features using biogenic slick-fields and SAR polarimetric decomposition techniques[J]. *IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(3): 260-270.
- [9] FORTUNY-GUASCH J. Improved oil slick detection and classification with polarimetric SAR[J]. *Guasch*, 2009(529): 68-73.
- [10] MIGLIACCIO M, TRANFAGLIA M. A study on the capability of sar polarimetry to observe oil spills[J]. *ESA Special*, 2005, 586: 25-36.
- [11] NUNZIATA F, GAMBARDELLA A, MIGLIACCIO M. On the mueller scattering matrix for SAR sea oil slick observation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(4): 691-695.
- [12] MIGLIACCIO M, NUNZIATA F, GAMBARDELLA A. On the co-polarized phase difference for oil spill observation[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(6): 1587-1602.
- [13] SOUYRIS J C, MINGOT S. Polarimetry based on one transmitting and two receiving polarizations: the $\pi/4$ mode[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2002, 1: 629-631.
- [14] 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.
- [15] ZHANG B, PERRIE W, LI X, et al. Mapping sea surface oil slicks using RADARSAT-2 quad-polarization SAR image[J]. *Geophysical*

- Research Letters, 2011, 38(10): 415-421.
- [16] 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.
- [17] SALBERG A B, RUDJORDØ, 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.
- [18] NUNZIATA F, MIGLIACCIO M, LI X. Sea oil slick observation using hybrid-polarity SAR architecture[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2015, 40(2): 426-440.
- [19] XIE G Q, YANG S, CHEN Q H, et al. Oil spill detection based on compact polarimetric eigenvalue decomposition[J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(2): 303-312. 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.
- [20] 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, 2012, 51(6): 3299-3305.
- [21] CLOUDE S R, GOODENOUGH D G, CHEN H. Compact decomposition theory[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(1): 28-32.
- [22] AINSWORTH T L, CLOUDE S R, LEE J S. Eigenvector analysis of polarimetric SAR data[C]// IEEE international geoscience and remote sensing symposium. IEEE, 2002, 1: 626-628.
- [23] NUNZIATA F, MIGLIACCIO M, GAMBARDELLA A. Pedestal height for sea oil slick observation[J]. IET radar, sonar & navigation, 2011, 5(2): 103-110.
- [24] RANEY R K. Hybrid-polarity SAR architecture[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(11): 3397-3404.
- [25] CAO C H, ZHANG J, ZHANG X, 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. 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(自然科学版), 2017, 47(2): 85-93.
- [26] SKRUNES S, BREKKE C, ELTOFT T. Characterization of marine surface slicks by Radarsat-2 multipolarization features[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 52(9): 5302-5319.

Oil Spill Detection and Classification Method Based on Compact Polarization SAR

SHU Si-jing^{1,2}, MENG Jun-min^{1,2}, ZHANG Xi^{1,2}, LIU Gen-wang^{1,2}

(1. First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;

2. Ocean Telemetry Technology Innovation Center, MNR, Qingdao 266061, China)

Abstract: The application of compact polarization SAR in the detection and classification of oil spill was analyzed in this study. First, we performed a comprehensive analysis of the performance of 36 features of compact polarization SAR in oil spill detection and classification by using Euclidean distance, and found that the odd-order scattering coefficient had best performance on oil spill detection, and the compact polarization entropy achieved better performance on oil spill lookalikes identification. Then, we proposed a compact polarization SAR oil spill detection and classification algorithm based on the binary tree idea, and the fully-polarimetric data of RADARSAT-2 and SIR-C were used to reconstruct the reduced polarized data and experiments. Results showed that the detection accuracy of oil spill detection is 95.67%, and the identification accuracy of oil spill lookalikes can reach 95.71%, which is 2% higher than the classic Wishart supervised classification method, indicating that the compact polarization SAR has a better application prospect in oil spill detection and classification.

Key words: oil spill detection; compact polarimetric SAR; oil spill types classification

Received: October 22, 2019