

宋莎莎, 赵朝方, 安伟, 等. 雷达波段对多极化 SAR 海面溢油检测极化特征参数的影响[J]. 海洋学报, 2018, 40(9): 125-136, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2018.09.011

Song Shasha, Zhao Chaofang, An Wei, et al. The influence of the radar bands on polarimetric SAR oil spill characteristics[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(9): 125-136, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2018.09.011

雷达波段对多极化 SAR 海面溢油检测极化特征参数的影响

宋莎莎^{1,2}, 赵朝方^{1*}, 安伟², 赵宇鹏²

(1. 中国海洋大学 信息科学与工程学院 山东 青岛 266100; 2. 中海石油环保服务(天津)有限公司, 天津 300450)

摘要: 多极化 SAR 数据海面溢油检测研究日益受到重视。本文研究不同波段极化 SAR 数据的海面溢油检测能力, 为最大程度减小观测条件、环境因素等的影响, 选取准同步获取的 SIR-C/X 多极化 SAR 数据。针对海面油膜、生物油膜和低风区疑似溢油现象, 研究 L 波段和 C 波段的共极化相位差、一致性系数、极化熵、各向异性和平均散射角等极化特征对海面油膜以及不同海面暗斑现象的检测能力。研究表明: 在海面溢油检测以及探测不同暗斑现象间差异方面, C 波段总体优于 L 波段; L 波段, 极化分解特征各向异性参数优于共极化相位差和一致性系数; C 波段, 共极化相位差、一致性系数特征优于极化分解特征各向异性和极化熵, 结合平均散射角特征有助于滤除生物油膜和低风区。

关键词: 海面溢油; L 波段; C 波段; 极化 SAR; 极化特征参数; SIR-C/X

中图分类号: TP79

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2018)09-0125-12

1 引言

近年来, 随着卫星遥感技术的发展, 合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)数据用于溢油检测的研究越来越多。单极化 SAR 数据油膜检测的原理是油膜对海面毛细波和短重力波的抑制作用, 油膜在 SAR 影像中表现为暗斑或暗条纹现象, 从而与清洁海面区分开来^[1]。但是海面往往存在低风区、生物油膜等同样表现为暗特征的疑似油膜现象, 单极化 SAR 影像往往无法将其与油膜区分开来。多极化 SAR 数据可以同时提供幅度和相位信息, 为海面疑似油膜现象的区分提供了新的可能。

国内外发展了多种基于多极化 SAR 数据的溢油检测特征, 以及滤除生物油膜疑似现象的方法^[2-18]。

与此同时, 目前多极化 SAR 数据源也越来越多, 继 1994 年的 SIR-C/X 观测, 至 2006 年和 2007 年投入运行的 ALOS PALSAR、Radarsat-2 和 TerraSAR, 以及 2012 年至今应用的 RISAT、SENTINEL 和国产高分三号数据, 为多极化 SAR 数据溢油检测的研究和应用提供了更大的便利性。如 2008 年, Migliaccio 等^[2] 和 Nunziata 等^[3] 主要基于 C 波段多极化 SAR 数据研究 Muller 矩阵参数、共极化相位差等极化参数的溢油检测, 其中共极化相位差在 C 波段应用效果优于 L 波段。2011 年, Zhang 等^[4] 提出一致性系数参数进行溢油检测, 并基于 C 波段极化 SAR 数据进行了试验。邹亚荣等^[5] 开展了 SAR 数据海上溢油监测条件分析, 主要基于雷达后向散射系数从波段、极化方式、入射角等方面分析海上溢油监测最佳探测参数,

收稿日期: 2017-12-29; 修订日期: 2018-03-15。

基金项目: 山东省国家自然科学基金联合基金(U1406405); 海上溢油卫星自动识别和预警业务化系统研发项目(20130639)。

作者简介: 宋莎莎(1989-), 女, 山东省青岛市人, 主要从事海洋卫星遥感探测技术研究。E-mail: songshsh2@cnoc.com.cn

* 通信作者: 赵朝方, 教授, 主要从事海洋遥感研究。E-mail: zhaocf@ouc.edu.cn

但未涉及不同探测参数对极化特征的影响分析。Gade 等^[6]和 Wismann 等^[7]通过海上试验研究多频多极化 SAR 数据对生物油膜和矿物油膜的成像,指出海面膜在不同波段的阻尼特性不同。Liu 等^[8]基于 L 波段 UAVSAR 极化 SAR 数据进行溢油检测研究。多位研究人员^[9-13]基于 L 波段 ALOS 数据和 C 波段 Radarsat-2 极化 SAR 数据进行多频极化 SAR 数据溢油检测流程和紧致极化溢油检测特征。2011—2015 年在挪威北海海域开展了几次大规模海上溢油试验,试验同步获取了多频多极化 SAR 数据,Skrunes 等^[14-17]据此对比分析了 C 波段和 X 波段 SAR 海面油膜的极化特征,实验结果表明,C 波段极化 SAR 数据对海面油膜进行检测比 X 波段极化 SAR 数据更有潜力。2016 年,Latini 等^[18]将墨西哥湾深水地平线溢油事故中的多种 SAR 数据进行比较分析 SAR 系统的不同性能,评估后向散射系数和极化特征,分析结果表明等效噪声水平最低的 L 波段 UAVSAR 数据油膜区分能力最优。郑洪磊等^[19]和 Zheng 等^[20]比较了油膜样本在 L 波段和 C 波段的极化特征,但未分析不同波段下疑似油膜现象与清洁海面的差异。

目前虽有多种极化 SAR 数据,并据此开展了多种溢油检测方法研究,但缺少同步获取的环境条件和观测条件类似的极化 SAR 数据,难以评估雷达波段、入射角、海洋环境等对极化特征参数的影响。2015 年挪威海上溢油试验^[21]中虽然获取了 L 波段 UAVSAR、C 波段 Radarsat-2 和 X 波段 TerraSAR-X 极化 SAR 数据,但卫星平台不同其观测条件(如入射角等)也不同。同时,目前极化 SAR 溢油检测多为个例研究,所得结果没有可比性,缺少对极化特征参数的适用性研究^[22]。

为研究雷达波段对海面溢油检测极化特征参数的影响,最大程度减少观测条件和环境因素等的影响,本文研究选用 1994 年 SIR-C/X 观测计划中准同

步获取的海面 SIR-C/X L 波段和 C 波段多极化 SAR 数据进行分析,因两种波段的极化 SAR 数据近乎同时获取,观测入射角、海面环境条件均一致。研究两种波段下典型极化特征参数溢油检测能力的差异,为不同波段极化 SAR 溢油探测参数的选择提供依据。论文首先介绍研究使用的极化 SAR 数据,其次介绍所用的几种典型的极化 SAR 溢油检测特征参数,再结合海面油膜、生物油膜和低风区疑似现象对不同波段的极化 SAR 特征参数进行分析,最后给出研究结论与讨论。

2 所用极化 SAR 数据

本文研究基于 1994 年的两次 SIR-C/X 监测任务获取的 L 波段和 C 波段多极化 SAR 数据开展。SIR-C/X 合成孔径雷达搭载于奋进号航天飞机,有 L、C、X 3 个工作波段,频率分别为 1.25 GHz、5.30 GHz 和 9.60 GHz。其中 L、C 波段可工作于多极化模式,可以获取 HH、HV、VV、VH 通道数据,而 X 波段只在 VV 极化下工作,SAR 数据入射角范围 $20^{\circ}\sim 55^{\circ}$,地面刈幅宽度为 15~90 km。L、C 波段的噪声水平分别为 -36 dB、-28 dB;X 波段的噪声水平与入射角有关,噪声水平为 -40~-30 dB^[2]。

文中所用的 12 景 SIR-C/X L 波段和 C 波段多极化 SAR 影像数据详细信息见表 1,此数据为 1994 年 4 月和 10 月在欧洲北海海域和日本海域开展溢油和生物油膜现场实验中获取的。SAR 数据风速范围为中低风速,风速数据来源于文献^[2]。其中序号 1~6 的影像数据中海面暗斑现象为油膜,序号 7~12 影像中为生物油膜,序号 3~4 影像数据中还可以观察到船尾迹,序号 9~10 影像下方可见低风区疑似溢油现象。下文将针对清洁海面、油膜、生物膜和低风区分别分析雷达波段对极化参数的影响。

表 1 本文研究所用 SIR-C/X 数据

Tab.1 The SIR-C/X data used in the paper

| 序号 | 数据 | 波段 | 中心坐标 | 时间(UTC) | 海面现象* | 风速/ $m \cdot s^{-1}$ |
|----|---------|----|-----------------|-----------------------|-----------|----------------------|
| 1 | PR17040 | L | 57.23°N, 1.87°E | 1994 年 4 月 11 日 10:49 | 油膜 | 中低 |
| 2 | PR17041 | C | | | | |
| 3 | PR44326 | L | 51.49°N, 2.03°E | 1994 年 10 月 1 日 08:14 | 油膜 船尾迹 | 中低 |
| 4 | PR44327 | C | | | | |

续表 1

| 序号 | 数据 | 波段 | 中心坐标 | 时间(UTC) | 海面现象* | 风速/m·s ⁻¹ |
|----|---------|----|-------------------|-----------------|------------|----------------------|
| 5 | PR49938 | L | 52.90°N, 2.46°E | 1994年10月8日05:57 | 油膜 | 4.0 |
| 6 | PR49939 | C | | | | |
| 7 | PR11587 | L | 43.67°N, 140.53°E | 1994年4月15日02:14 | 生物膜 | 8.8 |
| 8 | PR11588 | C | | | | |
| 9 | PR11438 | L | 43.23°N, 139.88°E | 1994年4月16日01:53 | 生物膜 低风区 | 6.8 |
| 10 | PR11439 | C | | | | |
| 11 | PR41369 | L | 32.69°N, 135.30°E | 1994年10月1日05:33 | 生物膜 | 5.7 |
| 12 | PR41370 | C | | | | |

注: * 标示的海面现象和风速数据均来自文献[2]。

3 溢油检测极化参数

本文重点对多极化 SAR 共极化相位差、一致性系数和极化分解特征进行分析,所用极化参数总结如下。

3.1 共极化相位差

散射矩阵的每个复元素可以表示为 S_{pq} ,

$$S_{pq} = S_{pq} e^{j\varphi_{pq}}, \quad (1)$$

式中, p, q 分别为 H、V 极化方式; φ_{pq} 为相位; S_{pq} 为振幅。

考虑互易性, 散射矩阵可以表示为:

$$\mathbf{S} = e^{j\varphi_{VV}} \begin{pmatrix} S_{HH} e^{j\varphi_c} & S_{HV} e^{j\varphi_x} \\ S_{HV} e^{j\varphi_x} & S_{VV} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中, $\varphi_c = \varphi_{HH} - \varphi_{VV}$ 为共极化相位差; φ_x 为交叉极化相位差^[2]。

3.2 一致性系数

一致性系数的概念来源于紧致极化数据反演土

$$[\mathbf{T}] = \frac{1}{2} \left\langle \begin{bmatrix} (S_{HH} + S_{VV}) (S_{HH} + S_{VV})^* & (S_{HH} + S_{VV}) (S_{HH} - S_{VV})^* & 2(S_{HH} + S_{VV}) S_{HV}^* \\ (S_{HH} - S_{VV}) (S_{HH} + S_{VV})^* & (S_{HH} - S_{VV}) (S_{HH} - S_{VV})^* & 2(S_{HH} - S_{VV}) S_{HV}^* \\ 2 S_{HV} (S_{HH} + S_{VV})^* & 2 S_{HV} (S_{HH} - S_{VV})^* & 4 S_{HV} S_{HV}^* \end{bmatrix} \right\rangle. \quad (4)$$

对上述矩阵进行本征分解, 本征值从大到小排列为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 。

各向异性参数可表示为:

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3}. \quad (5)$$

极化熵可表示为:

$$H = - \sum_{i=1}^3 p_i \log_3(p_i). \quad (6)$$

壤湿度^[23]。陆地分类中, 紧致极化估计的一致性系数可将表面散射与二次散射、体散射区分开。一致性系数可以表示为^[4]:

$$\mu \cong \frac{2[\operatorname{Re}(S_{HH} S_{VV}^*) - |S_{HV}|^2]}{(|S_{HH}|^2 + 2|S_{HV}|^2 + |S_{VV}|^2)}, \quad (3)$$

式中, S_{pq} 为散射矩阵的复散射振幅; p, q 分别代表发射极化和接收极化方式; * 表示复共轭。

对于海洋表面, 当海面为 Bragg 散射, S_{HV} 较小, 接近 0, 而 S_{HH} 、 S_{VV} 高度相关, 相位差接近 0, 因此 $\mu > 0$; 对于船舶目标等非 Bragg 散射, S_{HH} 、 S_{VV} 相关性低, 相位差接近 180°, 因此 $\mu < 0$ ^[4,24]。

3.3 极化分解特征

基于 Cloude-Pottier 本征值极化分解^[25], 对相干矩阵 \mathbf{T} 进行分解可以得到极化特征: 各向异性参数 (A)、极化熵 (H) 和平均散射角 (α)。其中, 相干矩阵 \mathbf{T} 可以表达为:

$$\text{式中, } p_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}。$$

平均散射角可表示为:

$$\alpha = \sum_{i=1}^3 p_i \alpha_i. \quad (7)$$

各项异性参数可以用于表征小尺度表面的粗糙度, 取值范围 0 ~ 1, $A=0$ 表示散射机制方位向对称。极化熵(取值 0 ~ 1)表示目标散射体随机分布的程

度,低熵值(H 小于或约等于 0.3) 散射体以单一散射机制为主,高熵值(H 大于或约等于 0.3) 表征随机散射。平均散射角 α ($0 \sim 90^\circ$) 表示目标散射机制的类型;中等风速,自由海面面散射为主时 $\alpha < 42.5^\circ$; 体散射时 $\alpha > 42.5^\circ$ [23]。

4 不同波段极化 SAR 溢油检测参数分析

利用 SIR-C/X 多极化数据对 L、C 波段下的极化参数进行分析,并分别研究清洁海面、海面油膜、生物膜、低风区在不同波段的极化特征的表现。

4.1 海面油膜

研究 L、C 波段对海面油膜检测极化参数的影响。首先分析 L 波段下极化特征参数的溢油检测能力。表 1 中第 1 景数据是 1994 年 4 月 11 日 10:49 在欧洲北海海域现场油膜实验中获取的 L 波段数据。图 1 给出 L 波段数据 VV 极化图像(其中海面油膜清

晰可见),图 2 为清洁海面和油膜的后向散射系数、共极化相位差、一致性系数和极化分解参数(A, H, α) 的概率密度曲线。从图 2 可以看出,L 波段情况下,清洁海面和海面油膜的共极化相位差基本无差异。这与 Gade 和 Migliaccio 的分析结果一致。同样清洁海面和海面油膜的一致性系数概率密度曲线也近乎重合。而极化特征分解参数各向异性的概率密度曲线,清洁海面和海面油膜虽有重合,但二者的峰值明显不同,可以在一定程度上表征清洁海面和海面油膜极化特征的差异。油膜与清洁海面极化熵和平均散射角差异也较小。而海面与油膜的后向散射系数概率密度曲线中,二者峰值明显不同,可在一定程度上表征油膜与清洁海面的差异。由上述分析可知:L 波段,清洁海面和油膜的极化特征共极化相位差、一致性系数、极化熵和平均散射角特征基本相同,各向异性特征和后向散射特征有差异。

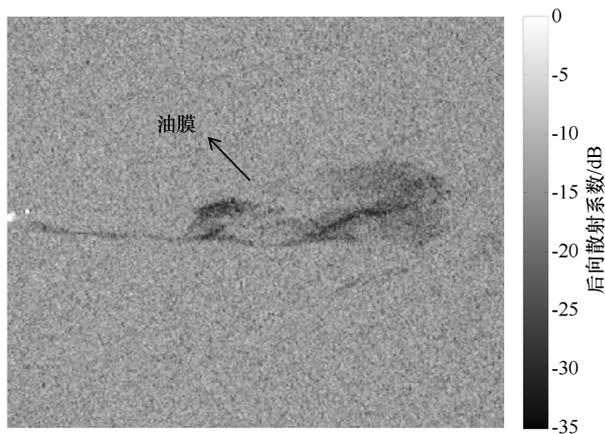


图 1 L 波段 1994 年 4 月 11 日 10:49 SIR-C/X 数据 VV 极化影像(数据编号 PR17040,中心坐标 57.23°N , 1.87°E)
Fig.1 VV image of L band SIR-C/X data at 10:49 UTC on April 11, 1994 (data No.PR17040, center latitude and longitude 57.23°N , 1.87°E)

下面分析 C 波段极化特征对海面油膜的检测能力。第 2 景数据与第 1 景数据近乎同时获取,但工作波段为 C 波段,图 3 给出该数据 VV 极化图像,图 4 为清洁海面和油膜的极化特征概率密度曲线,由图可以看出,C 波段下,清洁海面和油膜的后向散射系数、共极化相位差、一致性系数和极化熵概率密度曲线明显不同。清洁海面共极化相位差标准差远小于海面油膜,经计算,清洁海面共极化相位差标准差为 10° 左右,海面油膜约为 80° 。海面油膜的一致性系数分布

在 $-0.2 \sim 0.2$ 之间,清洁海面集中在 0.4 附近,油膜的极化熵分布在 $0.7 \sim 0.8$ 之间,清洁海面的在 $0.2 \sim 0.3$ 之间,二者差异明显。极化分解的各向异性参数和平均散射角概率密度曲线中,清洁海面和油膜差异也较大,但仍有一定重合。上述分析可知:C 波段下,油膜和清洁海面的共极化相位差、一致性系数和极化熵特征差异明显。

分析另外两组包含油膜现象的极化 SAR 影像。第 3、5 景 L 波段 SIR-C 数据中的清洁海面和油膜的

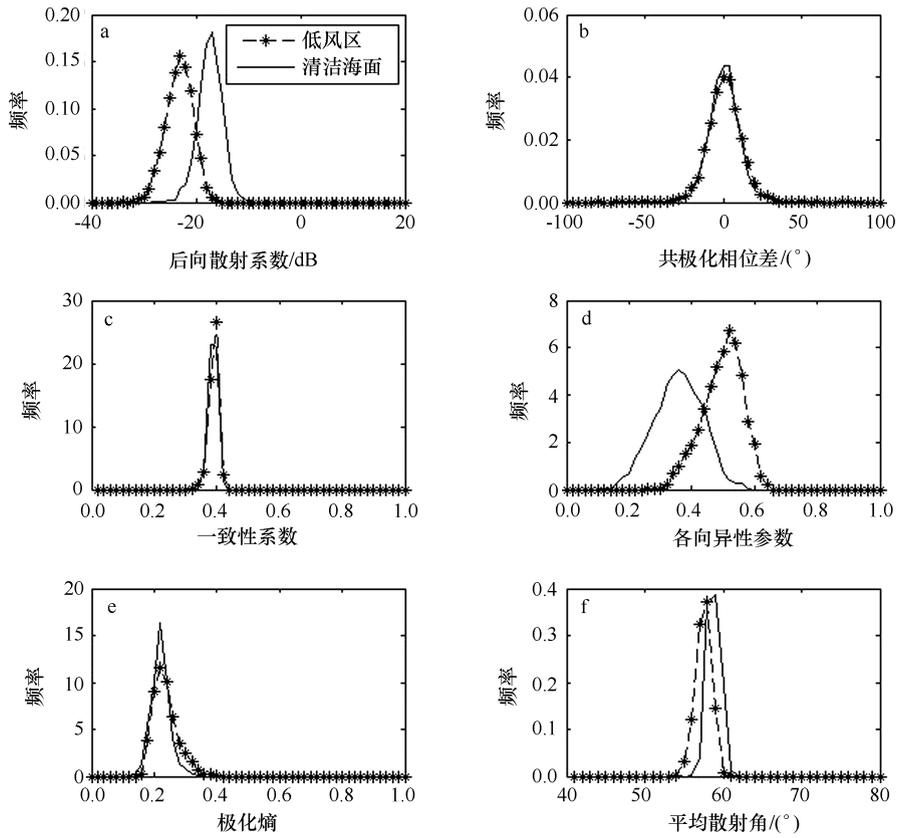


图2 L波段 PR17040 数据清洁海面 and 油膜的不同极化特征参数的概率密度分布

Fig.2 Polarimetric characteristics of clean sea and oil slick in L band PR17040 data

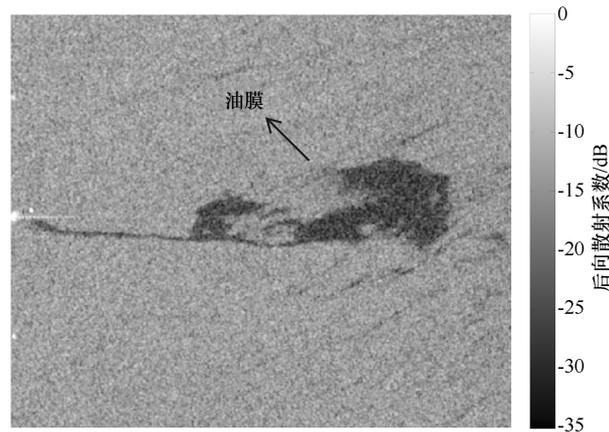


图3 C波段 1994年4月11日 10:49 SIR-C/X数据 VV极化影像

(数据编号 PR17041, 中心坐标 57.23°N, 1.87°E)

Fig.3 VV image of C band SIR-C/X data at 10:49 UTC on April 11, 1994 (data No. PR17041, center latitude and longitude 57.23°N, 1.87°E)

共极化相位差、一致性系数和极化分解参数(H, α)的概率密度函数曲线几乎相同,差异不明显,而各向异性参数特征有一定差异。第4、6景C波段数据与

第2景数据的结果相同,清洁海面和油膜的共极化相位差、一致性系数、极化熵特征差异都比较明显。为节省篇幅,第3~6景数据的具体结果不再给出。上

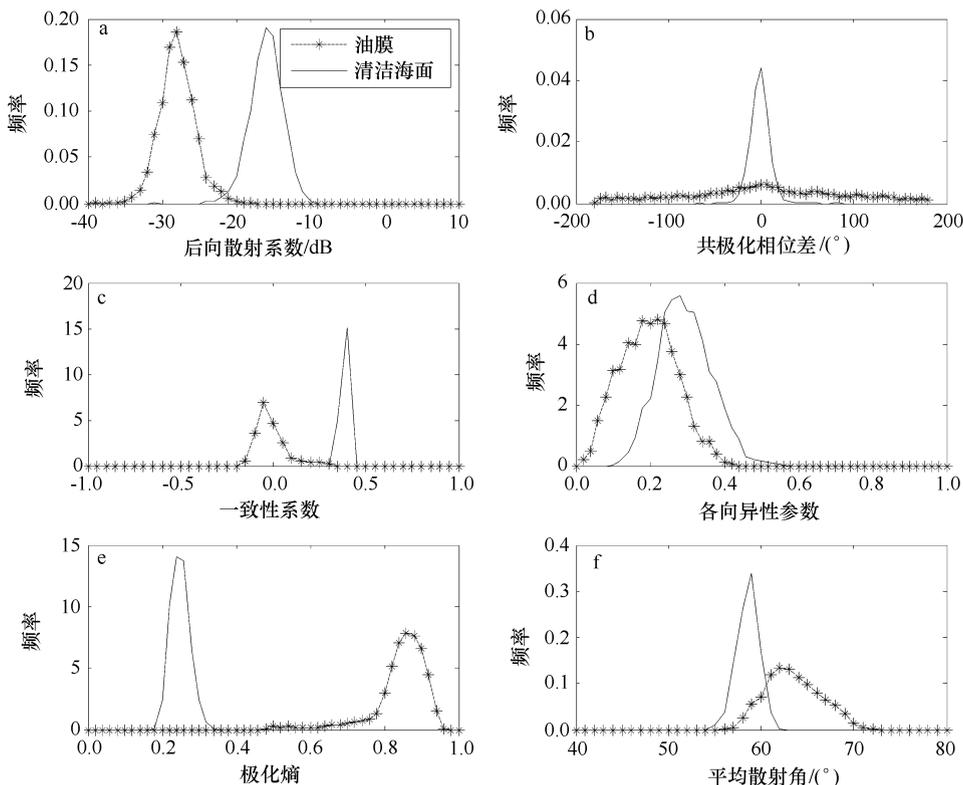


图 4 C 波段 PR17041 数据清洁海面 and 油膜的不同极化特征参数的概率密度分布

Fig.4 Polarimetric characteristics of clean sea and oil slick in C band PR17041 data

述数据分析结果表明,对海面油膜和清洁海面而言,L波段的共极化相位差和一致性系数、极化熵和平均散射角几乎相同,无法检测油膜;各向异性参数有一定差异,具有溢油检测的潜能;C波段的共极化相位差和一致性系数、极化熵可以很好地表现油膜、清洁海面的差异,油膜检测能力好。

4.2 生物油膜

研究 L、C 波段下生物油膜极化特征的表现。表 1 中第 7 景数据是 1994 年 4 月 15 日 02:14 在日本附近海域现场生物油膜实验中获取的 L 波段 SIR-C 多极化 SAR 数据,该生物油膜是利用油醇(OLA)形成的^[2]。油醇在海面扩散形成单分子层的海面膜,能够很好地模拟自然形成的生物膜。多次海面油膜试验中均利用油醇研究 SAR 传感器是否能够检测生物油膜^[6-7]。第 8 景数据是同步获取的 C 波段数据。图 5 至图 8 中给出 VV 极化图像(生物油膜清晰可见),以及清洁海面和生物油膜的极化特征概率密度曲线图。由图 5 和图 6 可以看出,L 波段数据的清洁海面和生物油膜的后向散射系数、共极化相位差、一致性系数、极化熵和平均散射角概率密度曲线近乎重合,各向异

性参数差异较大。

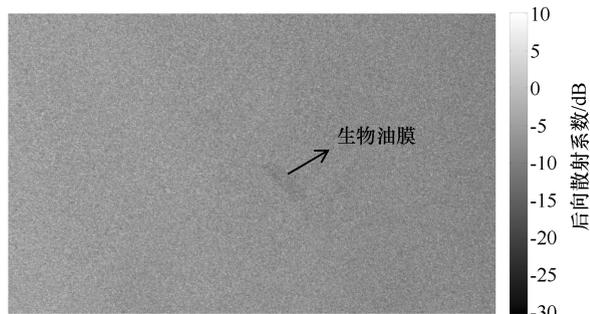


图 5 L 波段 1994 年 4 月 15 日 02:14 SIR-C/X 数据 VV 极化影像(数据编号 PR11587,中心坐标 43.67°N, 140.53°E)

Fig.5 VV image of L band SIR-C/X data at 02:14 UTC on April 15, 1994 (data No. PR11587, center latitude and longitude 43.67°N, 140.53°E)

图 7 和图 8 中 C 波段数据海面和生物油膜的各向异性、极化熵参数差异较大,其他特征基本相同。表 1 中的第 9 景、第 11 景数据也是 L 波段 SIR-C 多极化数据,其中生物油膜的特征与第 7 景数据类似;

对应的第 10、12 景数据为同步获取的 C 波段数据,其

中生物油膜的特征与第 10 景数据类似。

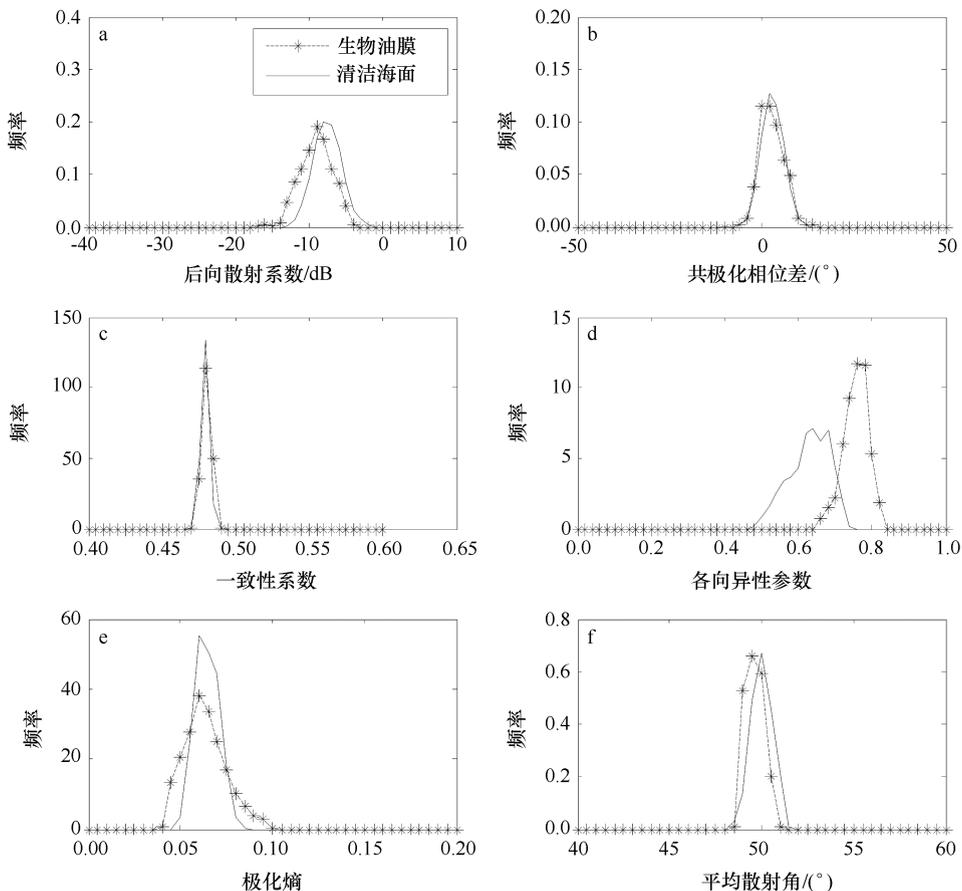


图 6 L 波段 PR11587 数据清洁海面和生物油膜的不同极化特征参数的概率密度分布

Fig.6 Polarimetric characteristics of clean sea and biogenic slick in L band PR11587 data

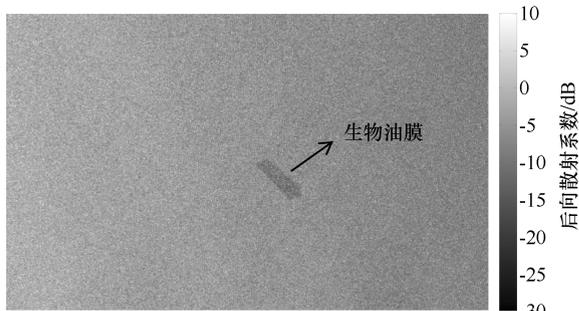


图 7 C 波段 1994 年 4 月 15 日 02:14 SIR-C/X 数据 VV 极化影像(数据编号 PR11588,中心坐标 43.67°N, 140.53°E)

Fig.7 VV image of C band SIR-C/X data at 02:14 UTC on April 15, 1994 (data No. PR11588, center latitude and longitude 43.67°N, 140.53°E)

段的共极化相位差、一致性系数和平均散射角极化特征类似。从海面溢油检测的角度,这些特征有助于生物油膜现象的滤除。

4.3 低风区

以低风区为例,研究疑似油膜现象在 L、C 波段的极化特征的表现。表 1 中第 9 景、第 10 景数据为 1994 年 4 月 16 日在日本附近海域获取的 L 波段和 C 波段多极化 SAR 数据,图像下方有一片低风区。这里比较分析低风区与清洁海面的极化特征,见图 9 至图 12。比较直方图,可以看到在 L 波段,低风区和清洁海面的共极化相位差、一致性系数和平均散射角几乎相同,具有溢油检测时滤除低风区的潜能;而 C 波段低风区和清洁海面的各种特征均不同,相对而言,平均散射角差异较小,可尝试用于低风区的滤除。

上述分析表明,生物油膜和清洁海面在 L、C 波

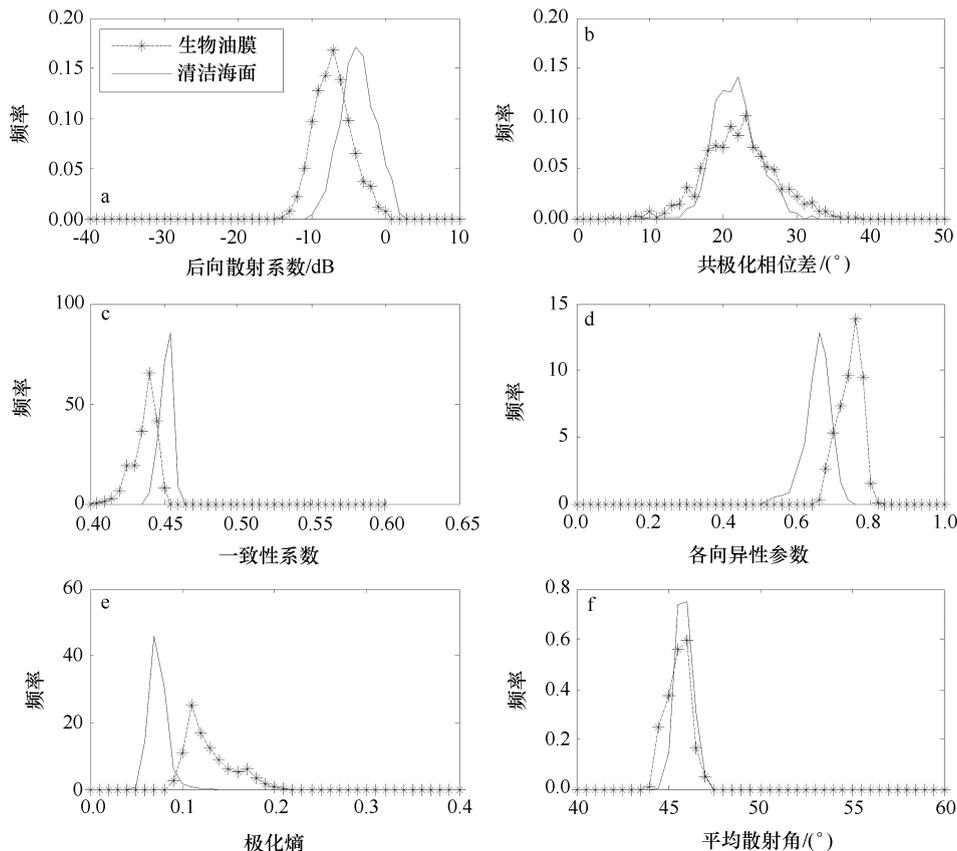


图 8 C 波段 PR11588 数据清洁海面 and 生物油膜的不同极化特征参数的概率密度分布
 Fig.8 Polarimetric characteristics of clean sea and biogenic slick in C band PR11588 data

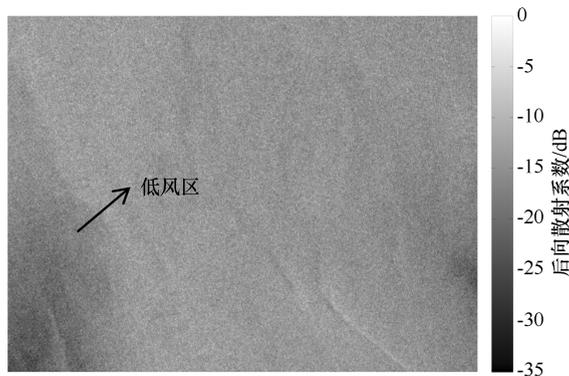


图 9 L 波段 1994 年 4 月 16 日 01:53 SIR-C/X 数据 VV 极化影像(数据编号 PR11438,中心坐标 43.23°N, 139.88°E)

Fig.9 VV image of L band SIR-C/X data at 01:53 UTC on April 16, 1994 (data No.PR11438, center latitude and longitude 43.23°N, 139.88°E)

以上对海面油膜、生物油膜及低风区暗斑现象的极化特征的比较,可以看出:比较准同步获取的 L 波

段和 C 波段极化 SAR 影像,C 波段探测暗斑(油膜、生物油膜、低风区)与清洁海面特征差异的能力较 L

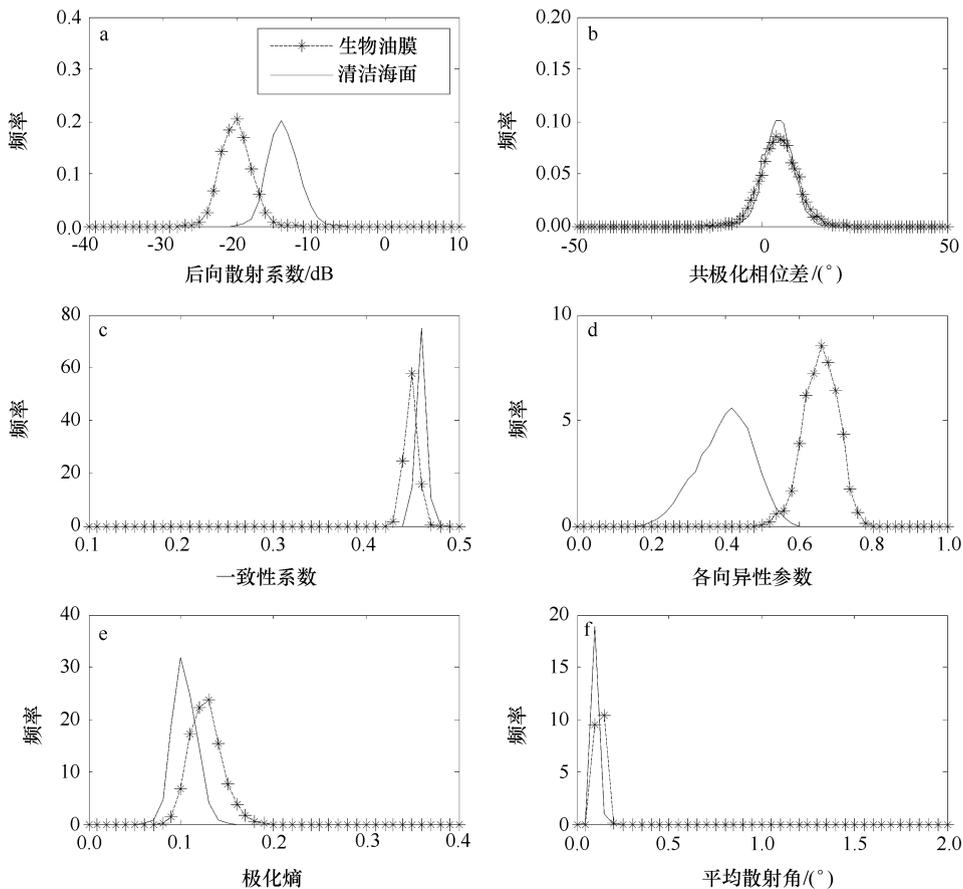


图 10 L 波段 PR11438 数据低风区和清洁海面的不同极化特征参数的概率密度分布
Fig.10 Polarimetric characteristics of clean sea and biogenic slick in L band PR11438 data

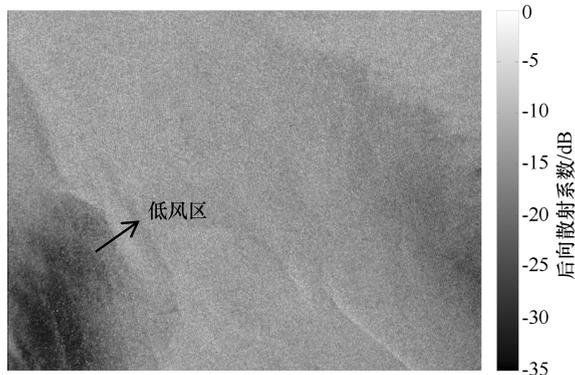


图 11 C 波段 1994 年 4 月 16 日 01:53 SIR-C/X 数据 VV 极化影像
(数据编号 PR11439, 中心坐标 43.23°N, 139.88°E)

Fig.11 VV image of C band SIR-C/X data at 01:53 UTC on April 16, 1994 (data No. PR11439, center latitude and longitude 43.23°N, 139.88°E)

波段强。

L 波段,海面油膜与清洁海面(PR17040 影像)、生物油膜与清洁海面(PR11587 影像)、低风区与清洁

海面(PR11438 影像)的共极化相位差、一致性系数和平均散射角类似,有利于生物油膜和低风区的滤除,但不利于油膜的检测。相对而言,L 波段极化分解各

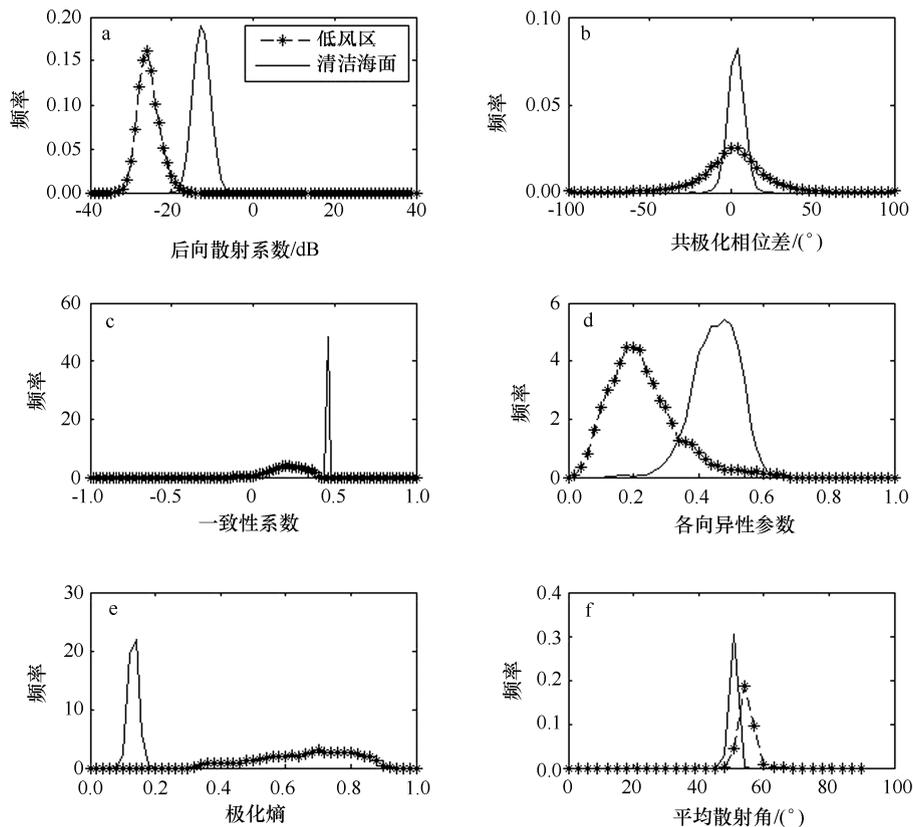


图 12 C 波段 PR11439 数据低风区和清洁海面的不同极化特征参数的概率密度分布
Fig.12 Polarimetric characteristics of clean sea and biogenic slick in C band PR11439 data

向异性参数具有一定的溢油检测能力。

C 波段,海面油膜与清洁海面(如 PR17041 影像)的共极化相位差、一致性系数、极化熵特征差异大,有利于溢油检测;生物油膜与清洁海面(如 PR11588 影像)的共极化相位差、一致性系数、平均散射角特征接近,有利于生物油膜的滤除;低风区与清洁海面(PR11439 影像)的平均散射角差异较小有利于低风区的滤除。C 波段,共极化相位差、一致性系数海面油膜检测能力较好,结合平均散射角可以滤除低风区和生物油膜。

5 结论与讨论

本文利用近同步获取的 SIR-C/X L 波段和 C 波段多极化 SAR 数据,最大程度减少极化 SAR 观测条件和海洋环境条件的干扰,研究雷达波段对溢油检测

极化 SAR 特征参数的影响。基于共极化相位差、一致性系数和极化分解特征,针对海面油膜、生物油膜、低风区和清洁海面,研究 L 波段和 C 波段不同极化特征对海面油膜的检测能力,以及对于不同暗斑现象差异的探测能力。总体而言,本文应用的 SIR-C/X 多极化 SAR 数据分析结果表明:在海面溢油检测以及探测不同暗斑现象间差异方面,C 波段总体优于 L 波段;L 波段,极化分解特征各向异性参数优于共极化相位差和一致性系数;C 波段,共极化相位差、一致性系数特征优于极化分解特征各向异性参数和极化熵,结合平均散射角特征有助于滤除生物油膜和低风区。

本文所用 L、C 波段数据为 SIR-C/X 数据,尚未对搭载在其他卫星上的 L 波段和 C 波段多极化 SAR 数据进行分析,下一步将继续开展相关工作。

参考文献:

- [1] Christopher R J, John R A. Oils and Surfactants[M]//Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual. Washington, DC: U.S. Department of Commerce & National Oceanic and Atmospheric Administration, 2004:263-276.
- [2] Migliaccio M, Nunziata F, Gambardella A. On the co-polarized phase difference for oil spill observation[J]. International Journal of Remote Sens-

- ing, 2009, 30(6):1587—1602.
- [3] 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.
- [4] Zhang B, Perrie W, Li X F, et al. Mapping sea surface oil slicks using Radarsat-2 quad-polarization SAR image[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(10):415—421.
- [5] 邹亚荣, 梁超, 陈江麟, 等. 基于 SAR 的海上溢油监测最佳探测参数分析[J]. *海洋学报*, 2011, 33(1):36—44.
Zou Yarong, Liang Chao, Chen Jianglin, et al. An optimal parametric analysis of monitoring oil spill based on SAR[J]. *Haiyang Xuebao*, 2011, 33(1):36—44.
- [6] Gade M, Alpers W, Hühnerfuss H, et al. Imaging of biogenic and anthropogenic ocean surface films by the multifrequency/multipolarization SIR-C/X-SAR[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C9):18851—18866.
- [7] Wismann V, Gade M, Alper W, et al. Radar signatures of marine mineral oil spills measured by an airborne multi-frequency radar[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(18):3607—3623.
- [8] Liu P, Li X, Qu J J, et al. Oil spill detection with fully polarimetric UAVSAR data[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(12):2611.
- [9] Migliaccio M, Nunziata F, Montuori A, et al. A multifrequency polarimetric SAR processing chain to observe oil fields in the Gulf of Mexico[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2011, 49(12):4729—4737.
- [10] 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.
- [11] 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 & Remote Sensing*, 2016, 54(10):5862—5874.
- [12] Li X, Nunziata F, Garcia O. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences: Oil Spill Detection From Single- and Multipolarization SAR Imagery[M]. Elsevier, 2017.
- [13] Song D, Ding Y, Li X, et al. Ocean oil spill classification with RADARSAT-2 SAR based on an optimized wavelet neural network[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(8):799.
- [14] Skrunes S, Brekke C, Eltoft T. Oil spill characterization with multi-polarization C- and X-band SAR[C]// *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Germany: IEEE, 2012:5117—5120.
- [15] Skrunes S, Brekke C, Eltoft T. An experimental study on oil spill characterization by multi-polarization SAR[C]// *Proceedings of European Conference on Synthetic Aperture Radar*. Germany: VDE, 2012:139—142.
- [16] Skrunes S, Brekke C, Eltoft T. Characterization of marine surface slicks by Radarsat-2 multipolarization features[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2014, 52(9):5302—5319.
- [17] Skrunes S, Brekke C, Eltoft T, et al. Comparing near-coincident C- and X-band SAR acquisitions of marine oil spills[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2014, 53(4):1958—1975.
- [18] Latini D, Frate F D, Jones C E. Multi-frequency and polarimetric quantitative analysis of the Gulf of Mexico oil spill event comparing different SAR systems[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 183:26—42.
- [19] 郑洪磊, 张彦敏, 王运华. 基于极化特征 SERD 的 SAR 溢油检测[J]. *海洋湖沼通报*, 2015(4):173—180.
Zheng Honglei, Zhang Yanmin, Wang Yunhua, et al. Oil spill detection based on polarimetric feature SERD[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2015(4):173—180.
- [20] Zheng Honglei, Zhang Yanmin, Wang Yunhua, et al. The polarimetric features of oil spills in full polarimetric synthetic aperture radar images[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(5):105—114.
- [21] Skrunes S, Brekke C, Jones C E, et al. A multisensor comparison of experimental oil spills in polarimetric SAR for high wind conditions[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2016, 9(11):4948—4961.
- [22] 邹亚荣, 邹斌, 梁超. 应用极化合成孔径雷达检测海上溢油研究进展[J]. *海洋学报*, 2014, 36(9):1—6.
Zou Yarong, Zou Bin, Liang Chao. Research on progress of oil spill detection using polarization SAR data[J]. *Haiyang Xuebao*, 2014, 36(9):1—6.
- [23] Freeman A, Dubois-Fernandez P, Truong-Loi M L. Soil moisture estimation from compact polarimetry—a viable alternative for SMAP[C]. *Oxford: Microwave Remote Sensing for Land Hydrology Workshop*, 2008.
- [24] Schuler D L, Lee J S, Hoppel K W. Polarimetric SAR image signatures of the ocean and gulf stream features[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(6):1210—1221.
- [25] 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.

The influence of the radar bands on polarimetric SAR oil spill characteristics

Song Shasha^{1,2}, Zhao Chaofang¹, An Wei², Zhao Yupeng²

(1. College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. China Offshore Environmental Service Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: Emphasis has been laid on polarimetric SAR oil spill detection in this study. For the research of the oil spill detection of different radar bands polarimetric SAR, SIR-C/X polarimetric SAR data acquired synchronously are adopted to reduce the effect of observation and environment conditions. Research of the identification capability of co-polarization phase difference, conformity coefficient and decomposition parameters on oil slick and the discrepancy of diverse dark phenomena such as biogenic slick and low wind area have been carried out using the SIR-C/X multi-polarization data. The analysis results indicate that C band is superior to L band in oil slick identification and the detection of the discrepancy of diverse dark phenomena. For L band, the anisotropy parameter has better performance than co-polarization phase difference and conformity coefficient. And co-polarization phase difference and conformity coefficient are better than decomposition parameters anisotropy and entropy in C band, with averaged scattering angle in helping to filter out biogenic slick and low wind area.

Key words: marine oil spill; L band; C band; multi-polarization SAR; polarimetric features; SIR-C/X