

引用格式: Ren Huimin, Song Dongmei, Wang Bin, *et al.* New Polarimetric Feature Parameter for Marine Oil Spill Detection in SAR Images[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(4): 934-942. [任慧敏, 宋冬梅, 王斌, 等. 基于新极化特征参数的SAR海洋溢油检测[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(4): 934-942.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.4.0934

基于新极化特征参数的SAR海洋溢油检测

任慧敏^{1,2}, 宋冬梅^{1,3}, 王斌^{1,3}, 甄宗晋^{1,2}, 刘斌⁴, 张婷⁵

(1. 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院, 山东 青岛 266580;

2. 中国石油大学(华东)研究生院, 山东 青岛 266580;

3. 海洋矿物资源实验室 青岛海洋科学技术国家实验室, 山东 青岛 266071;

4. 青岛海洋科学技术国家实验室, 山东 青岛 266071;

5. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 为了提升海上油膜与其他目标的可分离程度, 提出基于特征值分解的一种新的极化特征G, 该特征不仅能够反映集合中不同目标之间的极化状态, 还能够描述不同散射类型在统计意义上的不纯度。若某个区域中去极化状态越弱, 不纯度越低, 则该区域中新极化特征G的值越低。利用两景Radarsat-2全极化SAR (Synthetic Aperture Radar)影像对新特征的有效性进行实验验证。结果表明: 海水具有较小的特征值, 油膜具有较大的特征值, 生物膜的特征值介于两者之间。且与span、 $\bar{\alpha}$ 、P、A、CPD等5种经典的极化特征相比, 新特征在图像对比度、局部标准偏差及概率密度曲线等三个指标上均有更好的表现, 不仅能区分生物膜(植物油模拟)与原油, 且具有更好的抑噪性。

关键词: Radarsat-2 SAR; 极化特征; 特征值分解; 不纯度; 溢油检测

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2020)04-0934-09

1 引言

随着海洋运输业的不断发展, 由管道破裂、油轮碰撞及钻井平台炸裂引起的海上溢油事故频繁发生。自1970年以来, 全球万吨以上的溢油污染事故几乎年年发生, 因此如何对海面油膜进行有效的检测显得尤为重要。目前用于溢油检测的传感器有可见光、红外^[1]、紫外^[2]、激光荧光^[3]以及微波^[4]传感器等。其中星载SAR由于具有全天时、全天候并可穿云透雾的能力而被广泛应用^[5]。

油膜在SAR影像中呈暗斑状, 这是由于漂浮在海面上的油膜抑制海面毛细波和短重力波, 降低海面粗糙度, 从而减弱雷达后向散射信号所导致^[5]。传统的单极化SAR溢油检测分三步: 暗斑检测、特

征提取以及油膜识别^[6]。随着极化方式的多样化, 基于全极化SAR的溢油检测方法不断发展。相比于单极化SAR, 全极化SAR不仅含有后向散射信息, 而且还包含极化信息, 能够有效地获取海面目标的全极化散射特性, 更全面地反映海面目标的几何形状和物理特性^[7-8]。

近年来, 很多研究证实了极化特征在溢油检测中的有效性。Skrunes等^[9]利用同极化功率比(co-pol power ratio, γ_{co})检测溢油, 认为油膜比海水具有更高的 γ_{co} ; Skrunes等^[10]利用逆熵观察植物油与矿物油之间的差异; Nunziata等^[11]将极化度(degree of polarization, DOP)应用于溢油检测, 认为能以0.45为阈值区分油膜与海水; Zhang等^[12]利用一致性参

收稿日期: 2019-05-08; 修订日期: 2020-06-12

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1405600), 国家自然科学基金委-山东省联合基金重点项目(U190621), 国家自然科学基金项目(41772350、61371189、41701513、41706208、41576032、61701542)。

作者简介: 任慧敏(1994—), 女, 新疆克拉玛依人, 硕士研究生, 主要从事极化SAR图像处理与溢油识别方法研究。E-mail: 328684934@qq.com

通讯作者: 宋冬梅(1973—), 女, 吉林长春人, 副教授, 主要从事图像处理与应用方面的研究。E-mail: songdongmei@upc.edu.cn

数(Conformity Coefficient, μ)将油膜与海水/类油膜进行二值分割;Velotto等^[13]将同极化相位差的标准差(Co-polarized Phase Difference, CPD)应用于溢油检测,分析了海水、油膜与生物膜间CPD的差异;段冰等^[14]研究了交叉极化在矿物油膜与生物油膜间的差异;Migliaccio等^[15]利用三分量分解,比较了H/A/ α 溢油检测的能力;Nunziata等^[16]将基座高度(Pedestal Height, PH)应用于溢油检测,认为海水比油膜具有较小的PH值;Allian等提出两个用来描述自然媒质特征参数SERD与DERD,郑鸿磊等^[17]通过实验证明可以通过SERD与DERD区分油膜与海水。

极化特征反映了目标的散射特性^[18-20],因此统计特征能更好地提取溢油信息。本文基于特征值分解提出了一个新的极化特征参数G,该特征用来描述不同散射类型在统计意义上的不纯度,若不纯度越小,则G越小,若不纯度越大,则G越大,当不纯度为0时表明对应集合中的散射机制类别一致。新特征G通过目标分解理论得到不同散射机制类别,通过计算该像素的主导散射机制在统计意义上的不纯度提取溢油信息。为了验证新特征的有效性,将新特征G与span、 $\bar{\alpha}$ 、P、A、CPD等5种极化特征进行对比,并采用图像对比度、局部标准偏差及概率密度曲线3个指标进行评价,分析不同特征对油膜与其他目标的区分能力。

2 研究方法与评价指标

2.1 数据介绍

本次实验选取的是两景Radarsat-2全极化影像,该数据成像模式为精细四极化。其中数据集1是在墨西哥湾获得的,数据集2是在位于斯塔万格西北部的Frigg油田中获得的。此外,Radarsat-2的成像模式对HH,VV,HV和VH通道都提供单视复数据,且该模式下的数据只有-35 dB的基底噪声。

图1和表1分别给出了两个数据集的相关子场景的原始强度图像(VV通道)与影像在精细四极化模式下的成像参数。其中,图1左侧的数据集1中有海水和油膜,数据集2中有海水、植物油、乳化油和原油。

2.2 基础理论介绍

2.2.1 散射矩阵与相干矩阵

极化散射矩阵S能完整描述SAR目标的电磁散射特性,其定义如公式(1)所示^[21-23]:

表1 两景Radarsat-2数据集的成像参数

Table 1 Imaging parameters of two Radarsat-2 datasets

数据集	数据一	数据二
产品类型	SLC	SLC
拍摄日期	2011-05-08	2011-06-08
成像时间	UTC 12:01:25	UTC 17:27:52
聚束方式	FQ23	FQ15
极化方式	HH,VV,HV,VH	HH,VV,HV,VH
空间像素	4.73m×4.95m	4.73m×4.81m
入射角	41.9°~43.3°	34.5°~36.1°

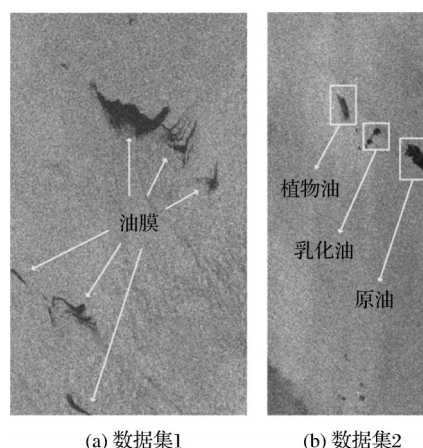


图1 Radarsat-2全极化成像模式中VV通道的强度图像

Fig.1 Intensity images of VV channel from Radarsat-2 in quad-polarization imaging mode

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: S_{HV} 代表水平极化发射,垂直极化接收; S_{VH} 代表垂直极化发射,水平极化接收; S_{HH} 代表水平极化发射与接收; S_{VV} 代表垂直极化发射与接收。

当满足互易性定理时,有 $S_{HV} = S_{VH}$,此时Sinclair散射矩阵可利用Pauli基分解得到目标散射矢量 k :

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV} \quad S_{HH} - S_{VV} \quad 2S_{HV}]^T \quad (2)$$

相干矩阵 T_3 可以由目标矢量 k 与自身共轭转置矢量的外积生成, T_3 定义为:

$$T_3 = \langle k * k^{*T} \rangle \quad (3)$$

其中, $*T$ 与 $*$ 分别为共轭转置与共轭, $\langle \cdot \rangle$ 为整体平均值。

2.2.2 特征值分解

基于目标分解理论^[24-25],将相干矩阵 T_3 进行特征值分解,对角化后的 T_3 为:

$$T_3 = U_3 \Sigma U_3^{-1} \quad (4)$$

其中: Σ 是 3×3 的非负实对角阵,有特征值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0$, $U_3 = [e_1 \quad e_2 \quad e_3]$ 是 3×3 特殊酉矩阵 $SU(3)$,

其中 e_1, e_2, e_3 分别是 T_3 的特征矢量, 则 T_3 被重新定义为:

$$T_3 = \sum_{i=1}^3 \lambda_i e_i e_i^{*T} \quad (5)$$

该过程对应于将 T_3 展开为 3 个相互独立的目标之和, 每个目标对应一种确定的散射机制。确定的散射机制成分 i 在整个散射过程中所占的权重由特征值 λ_i 决定, 而散射机制的类型则与归一化特征矢量 e_i 有关。

2.3 极化 SAR 溢油检测的新特征

2.3.1 新特征的定义

基于特征值与特征向量分解, 本文提出一种新的极化特征 G , 定义为:

$$G = 1 - \sum_{i=1}^3 p_i^2 \quad (6)$$

其中: p_i 对应特征值 λ_i 获得的伪概率, 满足 $p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^3 \lambda_i} = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}$, 且 $p_1 + p_2 + p_3 = 1$, $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0$; 由于特征值是旋转不变的, 新特征 G 也是旋转不变的。

一种极端情况是, 若极化特征 G 中只有一个非零特征值 ($\lambda_1 \neq 0, \lambda_2 = \lambda_3 = 0$), 此时相干矩阵 T_3 就退化为由 Sinclair 矩阵定义的点目标的散射; 另一种极端情况是, 若极化特征 G 中所有的特征值均不为零且相等 ($\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 \neq 0$), 则相干矩阵 T_3 就代表一种完全去极化的随机散射状态。而介于这两种极端情况之间的目标是部分极化的, 此时相干矩阵的非零特征值的数量大于 1 且彼此不相等。

2.3.2 新特征 G 的机理

新特征可以描述各种不同散射类型在统计意义上的不纯度, 如果不纯度越低, 则对应散射机制的有序程度就越高, G 值也就越小; 反之, 若不纯度越高, 则对应散射机制的有序程度就越低, G 值也就越大; 当不纯度达到最小值时表明对应集合中的散射机制类别一致; 当不纯度达到最大值时表明集合中的目标散射呈现随机噪声状态。

从极化状态来看, G 值较低时, 可以认为系统是弱去极化的, 主导散射机制可以看成特定等效点的目标散射机制, 据此可以选择最大特征值对应的特征向量, 而忽略其他特征向量。但当 G 的值较高时, 集合内的平均散射体呈现去极化状态, 且不再存在单个散射目标, 这需要考虑来自整个特征值分布谱的所有可能点目标散射类型的混合比例。当 G 的值进一步增大, 从极化测量数据中可以识别的散

射机制的数目也将逐渐减少。当 G 达到最大值时极化信息为零, 此时目标散射完全是随机噪声过程。

在溢油影像中, 干净海水由布拉格散射占主导, 散射机制较单一, 此时相干矩阵 T_3 中存在一个较大的特征值, 因此新特征 G 的值接近于 0。浮油与生物膜的散射机制较为复杂, 除布拉格散射外还具有其他的散射机制, 如镜面散射等, 此时相干矩阵 T_3 中存在两个或三个非零特征值, 因此浮油与生物膜的 G 值都大于清洁海水的 G 值。除此之外, 油膜与生物膜呈现部分极化状态, 需要考虑测量数据内所有可能点目标散射类型的混合比例, 而生物膜从测量数据中可以识别的散射机制数目比油膜中的多, 去极化状态弱, 因此 G 值介于浮油与海水之间。

2.4 新特征效能的评价

为验证新特征的有效性, 本研究从图像对比度、局部标准偏差及概率密度曲线三个方面进行评价, 分析新特征的溢油检测能力。

2.4.1 图像对比度

遥感图像中地物类型的分类主要基于地物间的差异。一般而言, 差异越大, 准确分类的概率越高。若地物类型不同, 那么像素的特征值也将不同。为了更好的度量新特征提取溢油信息的能力, 定义油膜与其他目标之间的图像对比度^[26]为:

$$C_i = \left| \frac{M_{i,oil} - M_{i,other}}{M_{i,oil} + M_{i,other}} \right| \quad (7)$$

其中: $M_{i,oil}$ 表示在不同极化特征下油膜区域的平均值, $M_{i,other}$ 表示在不同极化特征下海水或生物油膜等其他目标区域的平均值, i 代表 G , span , $\bar{\alpha}$, P , A 与 CPD 六个极化特征。 C_i 的取值在 0 到 1 之间, C_i 值越大, 说明不同研究对象之间的对比度越高。如果图像对比度越大, 则该特征就越有利于提取海面油膜, 即更适用于溢油检测。

2.4.2 局部标准偏差 STD

不同特征的局部标准偏差值^[27]可用于测量噪声的抑制能力。该方法首先将不同特征下的图像按照感兴趣区域分割成大小相等的子块, 计算每个子块的局部均值 (LM) 与局部标准差 (LSD):

$$LM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (8)$$

$$LSD = \sqrt{\left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - LM)^2 \right)} \quad (9)$$

式中: X_i 为图像子块第 i 个像素的特征值, N 为图像子块的像素总数。计算出整幅图像中不同类别下的所有子块的标准差,并在最大与最小局部标准差值之间建立若干区间,选择子块数最多的区间的局部标准差的平均值作为最后的局部标准偏差。若局部标准偏差值较小,则影像的噪声越小,证明该特征在提取溢油信息方面具有较好的抑噪性。

2.4.3 概率密度曲线PDF

概率密度曲线能够定量地显示每个特征区分油膜与其他目标的能力。在曲线中, X 轴表示特征值, Y 轴表示相应特征值下的像素总数。实际上,概率密度曲线能够给出一维特征空间条件下,感兴趣区域中的油膜与其他目标之间的概率密度分布,并且通过不同目标之间的可分离程度反映不同极化特征提取溢油信息的能力,从而得出较优的极化特征。

3 结果与分析

3.1 新特征G用于溢油检测的结果

从图1中可以看出,仅凭单极化SAR影像无法准确地辨别油膜与其他目标,因此有必要提取影像的极化特征以增强目标的可分性。将本文构建的新特征G应用于数据集1,发现该特征可以很好地区分油膜与海水。而在数据集2中,新特征可以很好地区分生物膜与矿物油。

3.1.1 实验1:油膜与海水的区分

对墨西哥湾一景全极化SAR影像(数据集1)提取新特征G,如图2所示,发现在该特征图中油膜清晰可见,且该特征能反映由风引起的海水波动。

新极化特征G之所以能清晰地区分油膜与海水是因为不同目标具有不同散射机理,而不同散射

机理又对应着不同的特征值频谱分布,油膜与海水最本质的区别在于两者存在的散射机制不同。通常在干净海水中布拉格散射占主导,这种单一散射机制的目标所提取的相干矩阵 T_3 中仅存在一个较大的特征值,其余特征可忽略,由公式(6)可知新特征G将接近于0;而浮油的散射机制较为复杂,除布拉格散射外还存在镜面散射等其他多种散射机制,此时系统是部分极化的,对应相干矩阵 T_3 中可能存在三个非零特征值,且三个特征值不完全相等(完全相等为随机噪声),因此浮油的G值较大,有 $G_{oil} > G_{sea}$,该特征能够较好地地区分油膜与海水。

3.1.2 实验2:生物油膜与原油的区分

该实验数据来自于斯塔万格西北部的Frigg油田模拟的一场溢油事件(数据集2),该事件中有三种物质被释放:植物油、乳化油与原油。其中植物油用来模拟天然的单分子生物油膜,乳化油为5%浓度的IFO3801与Oseberg混合原油,原油为Bald-er原油,释放时间与体积如表2所示。

该实验中采集的原始溢油影像如图1所示,最左侧是植物油(释放13小时后采集),中间是乳化油(释放29小时后采集),右侧是原油(释放9小时后采集)。虽然风速低至1.6~3.3 m/s,但原油清晰可见。在图1中,植物油模拟的生物油膜在视觉上会被错误地解译为油膜,然而提取新特征G以后,可以在特征图上观察到植物油与原油之间的差异,该特征图如图3所示,显示出新特征对于生物油膜(植物油)与原油具有较好的区分能力。

表2 数据集2中植物油、原油与乳化油的排放情况

Table 2 Emissions information for plant oil, crude oil and emulsion in dataset 2

品种	乳化油	植物油	原油
日期	2011.06.07	2011.06.08	2011.06.08
时间	12:15	4:10	8:23
体积/ m^3	20	0.4	30

3.2 与其他极化特征的对比

为了证明所提特征的有效性,将新特征G与 span 、 $\bar{\alpha}$ 、P、A、CPD等5种经典的极化特征(表3)进行对比,并采用概率密度曲线、图像对比度以及局部标准偏差对特征提取结果定量地评估。数据集1的特征提取结果如图4所示。另外,为了区分生物膜、原油与海水,数据集2的特征提取结果以彩图显示在图5中。

从图4和图5的特征提取结果可以看出,新特

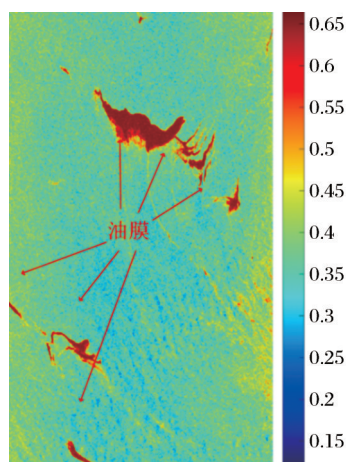


图2 新特征G在数据集1上的提取结果

Fig.2 Extraction results of the new feature G on dataset 1

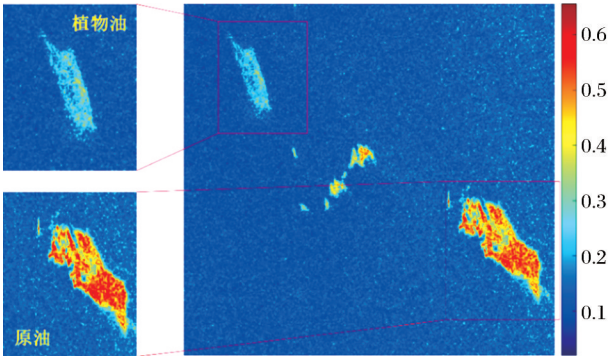


图 3 新极化特征 G 在数据集 2 上的提取结果

Fig.3 Extraction results of the new polarization feature G based on dataset 2

征 G 视觉上就能较好地地区分油膜与其他目标。图 6 与图 7 分别展示了不同特征在两个数据集上的概率密度曲线。值得注意的是,不同目标间的概率密度曲线峰值距离越近,对应特征分辨不同目标的能力就越差。通过观察两个数据集中 G 的概率密度曲线,发现该特征不仅对油和水具有较好的可分性,且对生物油膜(植物油模拟)与原油也具有可分性。此外,通过观察峰值的可分离程度,发现 G、span 及 P 在两个数据集上都表现出较好的可分性,下面通过图像对比度定量地评定不同特征下油膜与海水、原油与生物膜(植物油模拟)之间的差异,见表 4 和表 5。

表 3 用于对比的极化特征参量

Table 3 Polarization features parameter for comparison

特征	相关公式	符号	描述
span	$\text{span} = S_{hh} ^2 + S_{hv} ^2 + S_{vh} ^2 + S_{vv} ^2$	S_{xy} : 散射振幅	SAR 散射目标的总功率
$\bar{\alpha}$	$\bar{\alpha} = \sum_{i=1}^3 p_i \alpha_i$	α_i : 与散射机制相关相位	表征场景的散射机制
P	$P = \frac{\sqrt{s^s(2) + s^s(3) + s^s(4)}}{s^s(1)}$	$s^s(i)$: 斯托克斯元素	表征散射机制的确定性
A	$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3}, (\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3)$	λ_i : 相干矩阵的特征值	旋转不变性参数
CPD	$\text{CPD} = \angle(S_{hh} S_{vv}^*)$	\angle : 平均相位	不同散射机制 CPD 不同

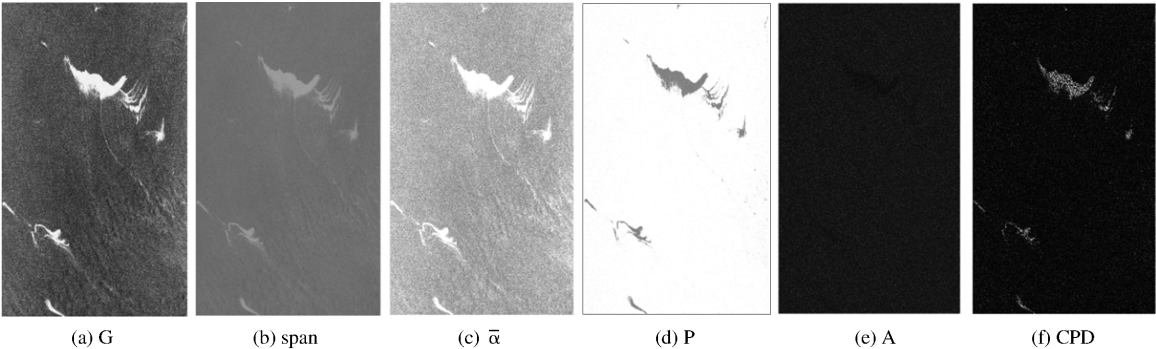


图 4 新特征 G 与 span、 $\bar{\alpha}$ 、P、A、CPD 的特征提取结果(数据集 1)

Fig.4 Feature extraction results of the new feature G and span, $\bar{\alpha}$, P, A, CPD (dataset 1)

从表 4 和表 5 中可以看出,新特征 G 的图像对比度在两个数据集上均超过 span、 $\bar{\alpha}$ 、P 及 A 的图像对比度,这表明新特征对于其他特征而言能更有效地提取溢油信息。不同的是,在数据集 1 中 CPD 的图像对比度高于新特征 G 的图像对比度,这可能是由于海水中的浮油发生了乳化作用,从而改变了浮油的性质。为了分析噪声对溢油信息提取的影响,表 6 用局部标准偏差来衡量不同极化特征的抑噪性。

从表 6 中可以看出,新特征 G 较其他极化特征

而言具有最小的局部标准偏差值,这表明新特征 G 的不同类别之间的特征值差异较小,因此聚类后的杂斑也较少。此外,数据集 1 中的 CPD 存在较大的局部标准偏差,从而间接地证明了 CPD 的抑噪能力较差。

综上所述,新特征 G 不仅能区分油膜与海水,还能区分生物膜(植物油模拟)与原油,且与 span、 $\bar{\alpha}$ 、P、A 及 CPD 等其他经典的极化特征相比,新特征 G 具有更好的抑噪性。最后本文给出新特征 G 经 Otsu 阈值分割后的结果,如图 8 所示。

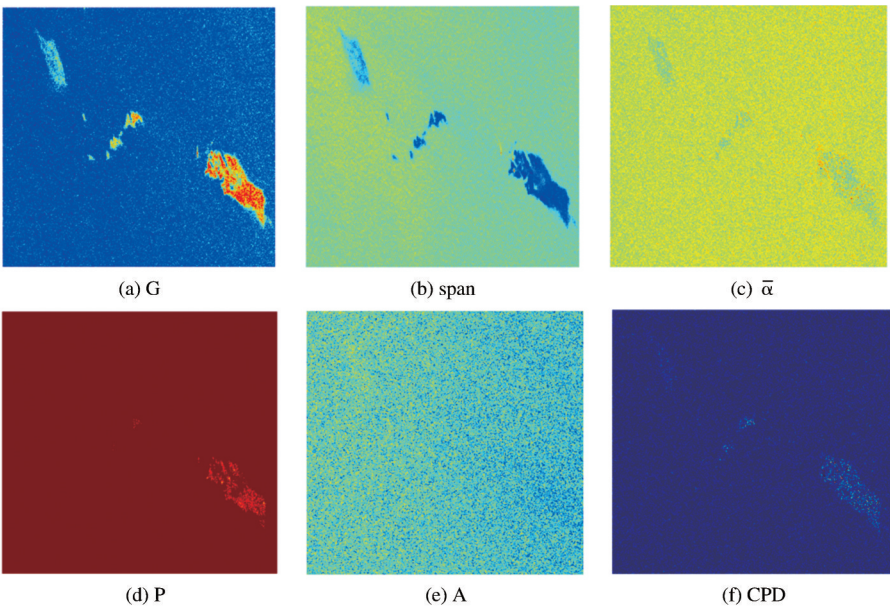


图 5 新特征 G 与 span、 $\bar{\alpha}$ 、P、A、CPD 的特征提取结果 (数据集 2)

Fig.5 Feature extraction results of the new feature G and span, $\bar{\alpha}$, P, A, CPD (dataset 2)

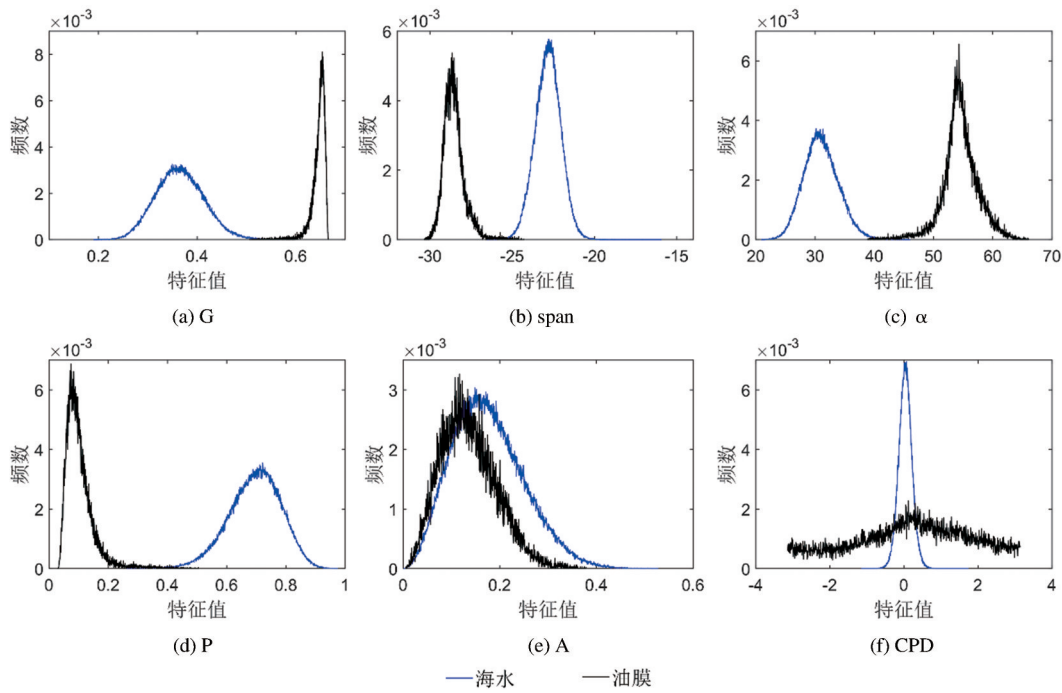


图 6 新特征 G 与 span、 $\bar{\alpha}$ 、P、A、CPD 在数据集 1 上的概率密度曲线。

Fig.6 The probability density distribution of the new feature G, span, $\bar{\alpha}$, P, A and CPD on dataset 1

表 4 油膜与海水的图像对比度 (数据集 1)

极化特征	G(本文提出)	span	$\bar{\alpha}$	P	A	CPD
图像对比度 Ci	0.278 1	0.111 5	0.164 9	0.212 9	0.128 8	0.678 2

表 5 原油与植物油的图像对比度 (数据集 2)

极化特征	G(本文提出)	span	$\bar{\alpha}$	P	A	CPD
图像对比度 Ci	0.376 7	0.124 4	0.011 0	0.181 4	0.165 6	0.230 4

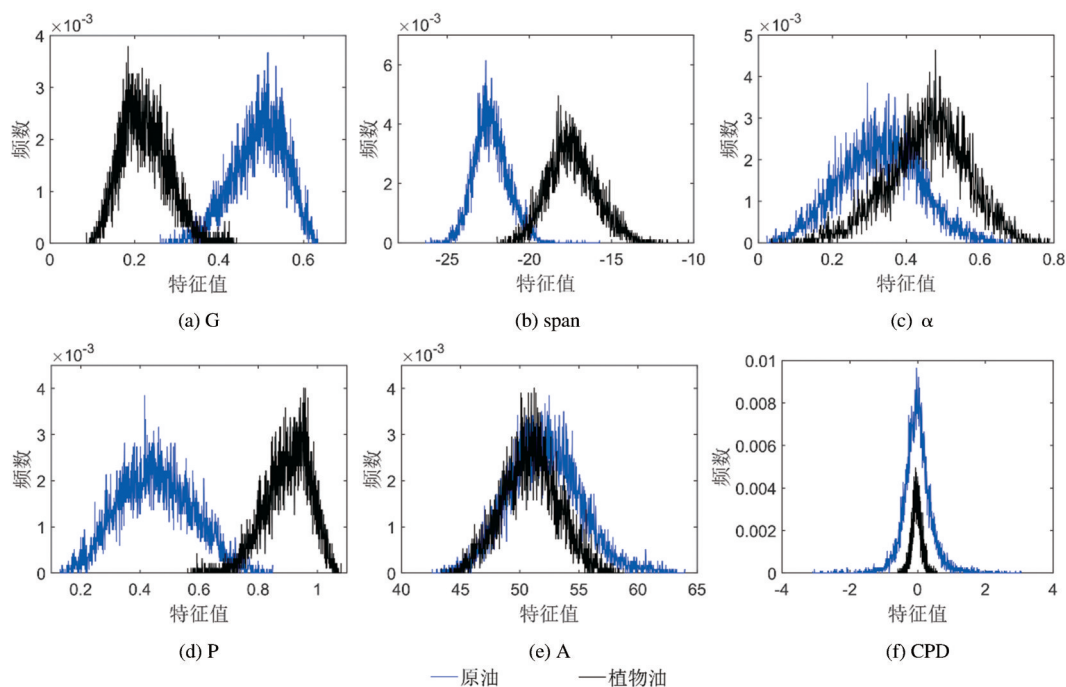


图 7 新特征 G 与 span、 $\bar{\alpha}$ 、P、A、CPD 在数据集 2 上的概率密度曲线。

Fig.7 The probability density distribution of the new feature G , span, $\bar{\alpha}$, P ,A and CPD on dataset 2

表 6 油膜、海水与植物油在两个数据集上的局部标准偏差
Table 6 The local standard deviation values of oil films ,
seawater , biofilms on two datasets

局部标准偏差 STD	数据集 1		数据集 2	
	油膜	海水	原油	植物油
G(本文)	0.014 4	0.048 7	0.062 8	0.055 2
span	0.626 1	0.780 8	1.031 2	1.444 2
$\bar{\alpha}$	3.025 1	2.930 2	3.017 2	2.346 7
P	0.046 8	0.088 4	0.123 6	0.077 4
A	0.057 4	0.073 9	0.107 5	0.108 3
CPD	1.585 7	0.180 5	0.442 5	0.143 0

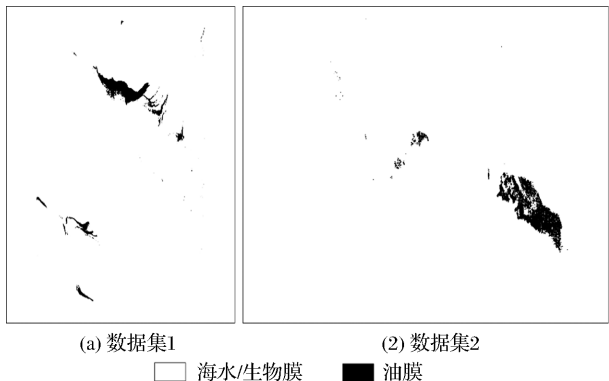


图 8 新特征 G 在两个数据集上的阈值分割结果

Fig.8 Threshold segmentation of new feature G on two datasets

从图 8 中可以看出,在阈值分割之后,可以从新特征 G 中提取溢油区域。值得注意的是,在数据集

2 中,新特征 G 可以区分生物膜(植物油模拟),原油和海水,但由于本研究的重点是提取原油信息,因此在阈值分割结果中将生物膜与海水进行了合并(白色区域)。阈值分割结果进一步证明了新特征 G 在提取溢油信息方面的有效性。

4 结 语

由于传统特征难以准确的提取海上油膜,且现有的极化特征无法区分生物膜与原油。针对这两种情况,本文基于特征值分解提出了一种新的极化特征 G,该特征能够描述各种散射类型在统计意义上的不纯度与有序性,并利用两景 Radarsat-2 全极化数据分析了新特征的溢油检测能力。本研究得到以下结论:①提出的新极化特征 G 从不纯度、极化状态与特征值分解三个方面来解释其机理;②在溢油影像中,通常干净海水较溢油区域有一个较小的 G 值,且原油较生物膜有一个较大的 G 值,这是由于三者的散射机理不同所致;③为了证明新特征 G 区分不同目标的能力,将其与 span、 $\bar{\alpha}$ 、P、A、CPD 等 5 种经典的极化特征对比,发现新特征 G 在图像对比度,局部标准偏差以及概率密度曲线 3 种指标下均有良好的表现,且新特征 G 较其余 5 种特征具有良好的抑噪性。

虽然本文提出的新特征 G 在区分油膜与海水,生物膜(植物油模拟)与原油这两个方面均有很好

的表现,然而该特征无法区分原油与乳化油,并且由于数据的限制,该特征对其他种类的疑似油膜(低风速区,海洋内波等)的提取能力仍有待研究。

参考文献(References):

- [1] Chen Peng, Li Ying, Yu Xiaofeng, *et al.* Thermal Infrared Oil Spills Monitoring in “7.16” Dalian Xingang Oil Pipeline Explosion[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(2): 796-800.[陈澎, 李颖, 余小凤, 等. “7.16”大连新港石油管道爆炸事故中的热红外溢油监测[J]. 环境工程学报, 2013, 7(2): 796-800.]
- [2] Zhang Ting, Zhang Jie. Research on the Detecting Method of Oil Spill Based on Ultraviolet Sensor and SAR of UAV[J]. Marine Sciences, 2018, 42(6): 141-149.[张婷, 张杰. 基于无人机紫外与SAR的溢油遥感监测方法研究[J]. 海洋科学, 2018, 42(6): 141-149.]
- [3] Zhao Chaofang, Li Xiaolong, Ma Youjun. Multi-channel Ocean Fluorescence Lidar System for Oil Spill Monitoring[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1263-1269.[赵朝方, 李晓龙, 马佑军. 多通道海洋荧光激光雷达溢油监测系统[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1263-1269.]
- [4] Wang Shaobo, Yan Wei, Ai Weihua, *et al.* Oil Spill Detection with Brightness Temperature of the AMSR-E[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(1): 94-99.[王少波, 严卫, 艾未华, 等. 基于微波辐射计的海面溢油监测研究[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(1): 94-99.]
- [5] Li Ying, Li Guannan, Cui Can. Research Progress of Oil Spill Detection based on the Spaceborne SAR[J]. Marine Science Bulletin, 2017, 36(3): 241-249.[李颖, 李冠男, 崔璨. 基于星载SAR的海上溢油检测研究进展[J]. 海洋通报, 2017, 36(3): 241-249.]
- [6] Li Yu, Chen Jie, Zhang Yuanzhi. Progress in Research on Marine Oil Spills Detection Using Synthetic Aperture Radar[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2019, 41(3): 751-762.[李煜, 陈杰, 张渊智. 合成孔径雷达海面溢油探测研究进展[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(3): 751-762.]
- [7] Zou Yarong, Zou Bin, Liang Chao. Research on Progress of Oil Spill Detection Using Polarization SAR Data[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(9): 1-6.[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.]
- [8] 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.[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.]
- [9] Skrunes S, Brekke C, Jones C E, *et al.* Effect of Wind Direction and Incidence Angle on Polarimetric SAR Observations of Slicked and Unslicked Sea Surfaces[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 213: 73-91.
- [10] Skrunes S, Brekke C, Eltoft T. Characterization of Marine Surface Slicks by Radarsat-2 Multipolarization Features[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(9): 5302-5319.
- [11] Nunziata F, Gambardella A, Migliaccio M. On the Degree of Polarization for SAR Sea Oil Slick Observation[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 78: 41-49.
- [12] 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): L10602.doi: 10.1029/2011GL047013.
- [13] Velotto D, Migliaccio M, Nunziata F, *et al.* Dual-Polarized TerraSAR-X Data for Oil-Spill Observation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(12): 4751-4762.
- [14] Duan Bing, Chong Jinsong. An Algorithm based on Cross-polarization Ratio of SAR Image for Discriminating between Mineral Oil and Biogenic Oil[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(1): 103-107.[段冰, 种劲松. 基于交叉极化比的SAR图像矿物油膜与生物油膜的区分方法[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(1): 103-107.]
- [15] 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.
- [16] Nunziata F, Migliaccio M, Gambardella A. Pedestal Height for Sea Oil Slick Observation[J]. Radar Sonar and Navigation, 2011, 5(2): 103-110.
- [17] Zheng Honglei, Zhang Yanmin, Wang Yunhua. Oil Spill Detection based on Polarimetric Feature SERD[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2015(4): 173-180.[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.]
- [18] Kudryavtsev V, Kozlov I, Chapron B, *et al.* Quad-polarization SAR Features of Ocean Currents[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(9): 6046-6065.
- [19] Lee J S, Ainsworth T L, Wang Y. Polarization Orientation Angle and Polarimetric SAR Scattering Characteristics of Steep Terrain[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(12): 7272-7281.
- [20] Zhang S X, Xing M D, Zhang K. Characteristics Analysis and Image Processing for Full-polarization Synthetic Aperture Radar Based on Electromagnetic Scattering from Flat Horizontal Perfect Electric Conducting Reflector[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 56(1): 313-327.
- [21] Fulai W, Chao L, Chen P, *et al.* A Method for Estimating the Polarimetric Scattering Matrix of Moving Target for Simultaneous Fully Polarimetric Radar[J]. Sensors, 2018, 18(5): 1418.doi:10.3390/S18051418.
- [22] Vanzyl J J, Arii M, Kim Y. Model-Based Decomposition of Polarimetric SAR Covariance Matrices Constrained for Non-negative Eigenvalues[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(9): 3452-3459.

- [23] Lim Y X, Burgin M S, Vanzyl J J. An Optimal Nonnegative Eigenvalue Decomposition for the Freeman and Durden Three-Component Scattering Model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(4): 2167-2176.
- [24] He Lian, Qin Qiming, Ren Huazhong. An Adaptive Hybrid Freeman/Eigenvalue Polarimetric Decomposition Model [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29(2): 8-14. [何连, 秦其明, 任华忠. 一种自适应的混合 Freeman/Eigenvalue 极化分解模型[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(2): 8-14.]
- [25] Singh G, Yamaguchi Y, Park S E, *et al.* Hybrid Freeman/Eigenvalue Decomposition Method with Extended Volume Scattering Model [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(1): 81-85.
- [26] Zhang M, Wang R, Deng Y, *et al.* A Synchronization Algorithm for Spaceborne/Stationary BiSAR Imaging based on Contrast Optimization with Direct Signal from Radar Satellite [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(4): 1977-1989.
- [27] Gao Lianru, Zhang Bing, Zhang Xia, *et al.* Study on the Method for Estimating the Noise in Remote Sensing Images based on Local Standard Deviations [J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(2): 201-208. [高连如, 张兵, 张霞, 等. 基于局部标准差的遥感图像噪声评估方法研究[J]. 遥感学报, 2007, 11(2): 201-208.]

New Polarimetric Feature Parameter for Marine Oil Spill Detection in SAR Images

Ren Huimin^{1,2}, Song Dongmei^{1,3}, Wang Bin^{1,3}, Zhen Zongjin^{1,2}, Liu Bin⁴,
Zhang Ting⁵

(1.School of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2.College of Graduated, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

3.The Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China;

4.National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China;

5.The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Abstract: In order to improve the separability of oil film and other targets, a new polarization feature G based on eigenvalue and eigenvector decomposition is proposed. The new feature can not only reflect the polarization states between different targets in the corresponding set, but also has the ability to describe the statistical information impurities of the different scattering types. If the depolarization state was weaker, the impurities were smaller, then the value of the new polarimetric feature G in the specific region would be lower. Two sets of Radarsat-2 fully Pol-SAR (Polarimetric Synthetic Aperture Radar) data are used to verify the validity of the new feature G . The results show that there is a small eigenvalue in the seawater, a large eigenvalue in the oil film, the eigenvalue of the biofilm is between the oil film and seawater. In addition, the new feature G have better performance than span, $\bar{\alpha}$, P , A and CPD in the image contrast, local standard deviation and probability density curve, which proves that the new feature G not only can distinguish bio-film (simulated by plant oil) and crude oil, but also has a good noise suppression ability.

Key words: Radarsat-2 SAR; Polarization feature; Eigenvalue decomposition; Impurity; Oil spill detection