

# 合成孔径雷达海面溢油探测研究进展

李煜<sup>①</sup> 陈杰<sup>②</sup> 张渊智\*<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(北京工业大学信息学部 北京 100124)

<sup>②</sup>(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100037)

<sup>③</sup>(中国科学院国家天文台月球与深空探测重点实验室 北京 100101)

**摘要:** 海洋溢油污染不仅严重威胁海洋生态安全、破坏海岸带环境,而且直接和间接地影响着广大人民群众的生活和健康以及区域社会经济的发展。合成孔径雷达因其具有全天候和高灵敏度的观测能力而成为海面油膜探测的主要手段之一。该文从SAR海面油膜探测的基本原理出发,介绍了单极化、全极化和紧缩极化SAR海面油膜探测技术的国内外最新研究进展,对该技术手段在实际应用中遇到的主要困难和挑战做了深入分析,最后总结展望了该技术未来发展的广阔前景。

**关键词:** 合成孔径雷达;极化;溢油;分类

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)03-0751-12

DOI: 10.11999/JEIT180468

## Progress in Research on Marine Oil Spills Detection Using Synthetic Aperture Radar

LI Yu<sup>①</sup> CHEN Jie<sup>②</sup> ZHANG Yuanzhi<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

<sup>②</sup>(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100037, China)

<sup>③</sup>(National Astronomical Observatories, Key Laboratory of Lunar Science and Deep-Exploration, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Marine oil spill pollution is a serious threat to the marine ecological environment, human life and economic development. Synthetic Aperture Radar (SAR) becomes one of the main technologies for marine oil film detection because of its all-weather and high sensitivity observation capability. This article first introduces the research progress of oil film detection technology on single polarimetric, fully polarimetric and compact polarimetric SAR technologies, based on the basic principle of SAR oil slick detection. Then the main difficulties and challenges encountered in the current research are analyzed. Finally, the broad prospects for the future development of this technology are forecasted.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar (SAR); Polarimetry; Oil spill; Classification

### 1 引言

海洋溢油污染的来源有多种,主要包括海底油气藏烃的自然泄露、沿岸工业废水和生活污水的排放、海洋石油资源的开采、钻井平台的井喷事故、输油管道的破裂、载油船舶的泄露、事故碰撞和非

法排污等<sup>[1,2]</sup>。油品的泄漏对海洋环境和生态资源会造成严重破坏,这些溢油事故多发于近海海域,原油中含有大量的有毒化合物和重金属,一旦进入海洋生态循环,会迅速通过食物链影响低等海洋植物、鱼类、高等哺乳动物,乃至人类的健康和安全。如果大量的海面原油覆盖海面,会使水下动植物因缺乏光照和氧气而死亡。海鸟的羽毛一旦接触油污,将难以飞翔,最终沉入海底或者死在沙滩上。溢油污染对船舶进出港造成影响,也会使盐业、近海水上发电、海水淡化,以及海产养殖业蒙受巨大损失,从而严重威胁海岸带环境及居住地人民的生命财产安全。

历史上不乏造成严重损失的溢油事故<sup>[2]</sup>。2002

收稿日期: 2018-05-06; 改回日期: 2018-11-15; 网络出版: 2018-12-17

\*通信作者: 张渊智 zhangyz@nao.cas.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0501501), 国家自然科学基金(41706201)

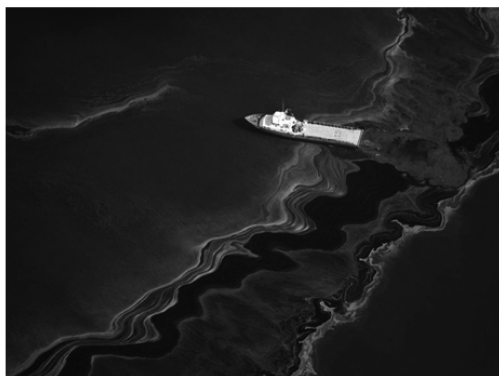
Foundation Items: The National key Research and Development Project of China (2016YFB0501501), The National Natural Science Foundation of China (41706201)

年11月13日,满载 $7.7 \times 10^4$  t重质燃料油的“威望”号油轮因遭遇暴风雨导致油箱爆裂,最终在欧洲海域沉没,造成约 $7.6 \times 10^4$  m<sup>3</sup>的石油倾泄到海上,清理费用高达120亿美元。1991年波斯湾战争时伊拉克军队为延缓美军军事行动,故意打开油井管道阀门,造成约 $9.08 \times 10^5$  m<sup>3</sup>原油流入波斯湾。2010年

位于墨西哥湾的“深水地平线”钻井平台(图1)发生爆炸并引发大火,随后沉没。海底漏油在事故发生后的87天才停止,最大每天漏油量达800 m<sup>3</sup>,原油漂浮带长200 km、宽100 km,导致墨西哥湾沿岸1600 km的湿地和海滩被毁。这些漏油事件都造成了巨大的生态环境污染和经济损失。



(a) 钻井平台事故现场



(b) 海面溢油现场

图1 墨西哥湾“深水地平线”溢油事故<sup>[3]</sup>

海洋溢油事故几乎遍布世界,统计数据表明,近50余年发生的溢油量排名前20的船只溢油事故中,只有一起发生于2000年以后,近几十年大于700 t的船只溢油事故显著减少。然而,近几年频繁发生的海面石油开采事故,以及船只故意排放的废油仍严重威胁着海洋生态安全。我国有绵长的海岸线,海岸带和周边海域长期受到溢油污染的威胁<sup>[4]</sup>,例如:1973年在大连港,“大庆36”油轮发生事故,造成约1400 t原油泄漏;1987年巴拿马籍油轮“东方大使”在青岛港触礁搁浅,造成约3300 t原油泄漏;2001年在福建平潭海域“隆伯6”油轮触礁倾覆,约2500 t柴油泄露<sup>[5]</sup>。2010年7月大连新港输油管道破裂,引发爆炸和火灾,造成部分原油流入附近海域,使超过50 km<sup>2</sup>的海面受到污染。2011年蓬莱“19-3”油田在生产中发生溢油事故,造成大量原油和钻井液基泥浆泄露到渤海湾,单日最大溢油覆盖面积达150 km<sup>2</sup>以上,对渤海湾的生态和渔业资源造成严重损害,预估生态损失超过16亿元人民币。

除事故造成的溢油外,还有大部分溢油污染来自于船只作业中船底废油的故意排放。由于监管困难,目前大部分的非法排放还未得到应有的处罚,使得故意排放的海面油污难以得到有效地控制。溢油漂浮在海面的时间,对其环境的影响取决于油品种类和泄漏油量,以及海面气象条件如温度、风场、洋流等。而对海面油膜演化起重要作用的过程主要包括蒸发、乳化和扩散。溢油中轻质油成分会

蒸发,但溢油的扩散速度常常受到海况等因素的制约。而乳化作用会改变海面油膜的粘滞系数,这些因素都直接影响了海面油膜的清理和探测难度<sup>[6]</sup>。

卫星遥感具有监测范围大、作业成本低的优点,被广泛用于海洋及陆地遥感<sup>[7-10]</sup>。合成孔径雷达卫星以其全天候和高灵敏度的观测能力成为了海面油膜探测的主要手段之一。目前可用于溢油海面探测的星载SAR平台主要有德国的TerraSAR-X、加拿大的RadarSAT-2、日本的Alos-2、意大利的Cosmo-SkyMed、欧盟的Sentinel-1和我国的高分3号等。然而,星载SAR观测受轨道参数影响,重访周期较长,信噪比受到信号收发距离的影响较航空遥感低,因此其应用受到一定限制。机载SAR系统分辨率较高,具有机动灵活的特点,能够对重点区域进行连续观测,可以提供溢油的验证信息,对污染源进行追责。但机载观测手段受飞机航程,气象等飞行条件影响较大,而且使用成本较高。例如,美国国家航空航天局(NASA)加州理工大学喷气推进实验室(JPL)研发的UAVSAR机载SAR系统,其搭载的L波段全极化SAR传感器具有22km的观测带宽和高达50 dB的信噪比。德国宇航局(DLR)运行着多波段多极化机载E-SAR系统。日本航天探索局(JAXA)也研发了机载极化SAR系统Pi-SAR和Pi-SAR-2。

世界各国的科研机构和政府部门相继开发了业务化运行的海面溢油监测系统。欧盟海事安全局(EMSA)开发的CleanSeaNet系统利用一系列

SAR和光学遥感影像以及海洋与气象数据等辅助信息, 实现准实时的海面溢油事故监测和报告。加拿大极冰局(CIS)开展了卫星污染综合跟踪(Integrated Satellite Tracking Of Pollution, ISTOP)项目, 利用RADARSAT-1数据监控海洋和湖泊的溢油污染, 对污染源进行跟踪和监控<sup>[1]</sup>。挪威孔思贝格卫星服务(KSS)研发了半监督的SAR海面油膜监测系统KSAT, 能够提供海面溢油的时间、面积、类型、造成污染程度以及溢油区域的风场等关键信息。法国Boost-Technologies公司开发了SAR-Tool系统, 基于梯度或区域分割对SAR图像中的溢油进行检测。中国国家海洋局也研发了基于星载SAR卫星图像的海面油膜监测系统, 并将其用于渤海海域的业务化监测。此外, 国内3大石油公司: 中石油、中海油、中石化都建造了搭载荷兰“SEADARQ”雷达溢油监视系统的溢油应急环保船, 国家海洋局北海分局在蓬莱“19-3”油田安装了雷达溢油监测系统, 可监测平台周围3.5 km半径范围内的溢油<sup>[2]</sup>。

本文拟通过对单极化、全极化和紧缩极化SAR海面油膜探测技术的介绍, 简要地回顾SAR海面溢油探测技术的发展历程, 并展示该技术的最新进展。同时, 对现阶段极化SAR海面油膜探测存在的问题和面临的困难与挑战进行讨论, 并提出可能的解决办法与思路, 期望能为从事SAR海面油膜探测研究的同行提供一些有价值的参考信息。

## 2 单极化合成孔径雷达海面油膜探测

### 2.1 合成孔径雷达海面油膜探测的基本原理

作为一种侧视成像雷达, 合成孔径雷达通过对回波信号的记录和处理, 在沿平台飞行航迹方向上形成一个天线阵列, 从而等效为一个大口径天线, 获得较高的方位向分辨率<sup>[3]</sup>, 其成像几何如图2所示。在成像机理上, SAR遥感与光学遥感有很大不同。因为其主动发射信号对地物进行探测, 所以不受光照影响。SAR信号可以穿透云雨, 不受恶劣天气影响。由于SAR通过对回波信号的相干处理进行成像, 因此存在比较严重的相干斑噪声<sup>[4]</sup>。

在中等入射角范围内, SAR海面回波信号主要来自于布拉格散射(Bragg scattering), 当雷达入射波的波长满足布拉格散射条件时, 海面各个等效小面元的回波相互加强, 获得较强的后向散射信号

$$\lambda_B = \frac{\lambda_r}{2 \sin \theta} \quad (1)$$

其中,  $\lambda_B$ 是布拉格散射波长,  $\lambda_r$ 是雷达信号波长,  $\theta$ 是是雷达信号的入射角。布拉格散射所产生的雷

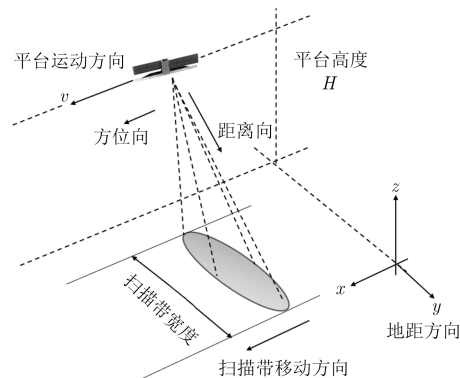


图2 SAR成像几何示意图

达后向散射截面可以由微小扰动模型(Small Perturbation Model, SPM)计算。

早在古希腊, 文献中就记载了油膜对海面波动的抑制效应<sup>[5]</sup>。在古代航海过程中, 有经验的水手都知道在风浪中可将油洒向海面, 利用油膜对海面波浪的衰减特性来防止船只倾覆。意大利科学家Maragoni<sup>[6]</sup>第1次从理论上解释了这种现象: 液体表面具有不同粘滞系数的物质会产生弹性抗力, 从而衰减表面波动的振幅, 因此这种海面油膜对海面波动的衰减被称为Maragoni衰减。在海面风场的作用下, 海面有着特有的波动模式。合成孔径雷达依赖于海面波动所造成的后向散射对海面进行成像, 如图3所示。海面油膜会在海面扩散, 形成具有不同粘滞系数的膜层, 衰减海面的短重力波和毛细波, 使海面粗糙度降低, 从而减弱海面的后向散射, 在SAR图像上形成暗区(黑斑), 如图4所示。因此, 海面油膜的可观测性与海面风场密切相关, 如果风速过低, 海面将不会产生波动, 导致后向散射极少; 而如果风速过高, 海面溢油会被吹散, 导致难以被探测。因此通常SAR海面溢油探测要求海面风速为3~14 m/s<sup>[16]</sup>。

SAR图像上灰度变化反映的是归一化后向散射截面(Normalized Radar Cross Section, NRCS)的变化, 对应经海面散射回传感器的雷达信号的强

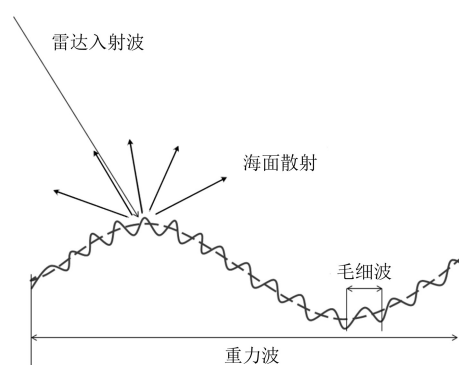


图3 雷达信号海面散射示意图

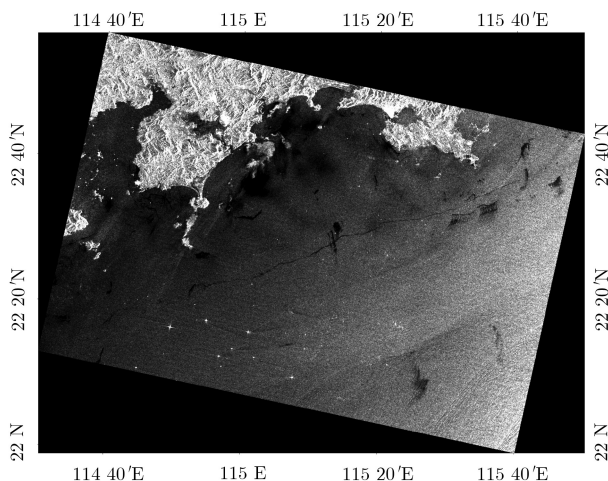


图4 包含溢油区域的油尾附近海域SAR后向散射VV通道图像(图像来自欧空局)

弱。然而，在海面上除了油膜会造成暗区之外，其他一些自然现象，如低风速区、生物油膜、降雨、上升流、内波、潮汐流等都能形成条带或斑块状暗区，从而导致虚警，这些被统称为“似然物(look-alikes)”。因此油膜和似然物的区分成为了SAR海面油膜识别的关键问题。

## 2.2 基于单极化后向散射强度图像的海面溢油检测

早期的SAR溢油监测主要依靠单极化SAR图像，通过提取海面的灰度，纹理和形状信息对海面油膜和似然物进行分类。因此，基于单极化SAR图像的海面油膜分类算法主要由黑斑检测，特征提取和分类这3个核心步骤构成<sup>[17]</sup>。在黑斑提取之前通常还要对SAR图像进行定标、滤波、地理编码等预处理，以便后续分析和处理。

在黑斑检测方面，最早采用的是基于阈值分割的方法。SAR图像不可避免存在斑点噪声，这给黑斑的提取带来了许多困难。Solberg等人<sup>[18]</sup>将阈值设定为滑动窗口中后向散射强度均值的 $k$  dB，并结

合多尺度金字塔和聚类算法对黑斑进行提取。Migliaccio等人<sup>[19]</sup>基于单视SAR图像的物理模型，利用恒虚警(Constant False Alarm Rate, CFAR)滤波器在不损失细节信息的条件下避免同质区域内噪声对黑斑提取的影响。Shu等人<sup>[20]</sup>利用空间密度特征来区分黑斑和海面背景区域。Barni等人<sup>[21]</sup>利用多尺度和模糊C-均值聚类法对油膜区域进行分割，Mercier等人<sup>[22]</sup>基于隐马尔科夫链结合小波变换法对海面溢油进行检测。Huang等人<sup>[23]</sup>利用水平集法从单极化SAR图像中提取出了较为完整的黑斑。因水平集法基于曲面演化理论，计算较耗时，因此Zhang等人<sup>[24]</sup>将小波变换与水平集法相结合，提高了海面分割算法的效率。

在分类特征方面，主要是提取油膜覆盖区域与周围海域后向散射强度的差异、油膜区域的形态学特征、海面、油膜与似然物的纹理特征以及油膜出现位置附近的环境特征。此外，海面风场、流场、温度等辅助信息也能够为溢油检测提供帮助。常用单极化SAR油膜特征如表1所示，包括强度特征、形态学特征、纹理特征和环境特征等。

在分类算法方面，国内外学者利用多种模式识别方法开展了研究。Solberg等人<sup>[25]</sup>利用贝叶斯(Bayes)分类器将环境特征与包括纹理特征在内的油膜特征相结合，对油膜和似然物进行了分类；Fiscella等人<sup>[26]</sup>采用马氏(Mahalanobis)分类器对油膜和海面及似然物进行分类，Frate等人<sup>[27]</sup>利用神经网络进行半监督油膜检测研究，Toupouzelis等人<sup>[28]</sup>利用RBF神经网络基于油膜特征集开展了溢油分类研究，Nirchio等人<sup>[29]</sup>基于多元线性方程构建分类器来区分油膜和似然物，Iphigenia等人<sup>[30]</sup>利用模糊逻辑识别算法得到样本为油膜的概率，同时利用大量相关信息来辅助决策。为解决油膜似然物种

表1 常用单极化SAR油膜特征

强度特征	形态学特征	纹理特征*	环境特征
油膜后向散射强度( $\mu_{obj}$ )	面积( $A$ )	同质性(Homogeneity)	距海岸距离
油膜后向散射方差( $\sigma_{obj}$ )	周长( $P$ )	对比度(Contrast)	距最近黑斑距离
油膜周围后向散射( $\mu_{sce}$ )	复杂度( $C$ )	差异度(Dissimilarity)	周围黑斑数量
灰度比( $\mu_{obj}/\mu_{sce}$ )	不对称性	熵(Entropy)	周围船只数量
方差比( $\sigma_{obj}/\sigma_{sce}$ )	欧拉数	均值(Mean)	...
ISRI( $\mu_{obj}/\sigma_{obj}$ )	形状指数	方差(Variance)	
ISRO( $\mu_{obj}/\sigma_{sce}$ )	轴线长度	相关性(Correlation)	
油膜最小灰度值(MSV)	紧致度		
最大对比度( $\sigma_{sce}$ -MSV)			
边缘梯度			

注：纹理特征通过灰度共生矩阵(Gray-Level Co-occurrence Matrix, GLCM)得到

类多样,样本获取难度大的困难,Gambardella等人<sup>[31]</sup>利用单类(one-class)分类器,基于特征优化选择算法获得了较为理想的分类结果。Marghany等人<sup>[32]</sup>提出了分形盒计数(factual box counting)方法,基于RADARSAT-1星载和AIRSAR机载数据开展了研究。Garcia-Pineda等人<sup>[33]</sup>提出了基于纹理特征的神经网络算法(Texture-Classifying Neural Network Algorithm, TCNNA),结合墨西哥湾溢油事故中获取的ENVISAT ASAR影像和风场模式数据开展了溢油探测实验。Marghany等人<sup>[34]</sup>利用遗传算法(genetic algorithm)对海面油膜特征进行优化,通过“杂交”过程和适应度函数的计算获得了对海面油膜特征较为准确的描述。

基于单极化SAR图像的海面油膜监测算法需要大量的训练样本以获取充足的先验知识,同时也离不开海面风场等辅助信息。海面溢油的形状与油品的种类和泄露时溢油源的静止或运动有关。由于海面溢油的状态,海况影响因素往往非常复杂,检测算法的准确率难以保证,应用也受到一定限制。此外,上述3个步骤每一步都会对后续步骤产生影响,为算法的优化和参数选择带来困难。较长的处理流程也使得算法的效率难以提高,很难做到数据的实时处理和分析。

### 3 全极化合成孔径雷达海面油膜探测

#### 3.1 极化SAR基础理论

早期的海面油膜探测主要基于单极化SAR图像,但由于在复杂环境下油膜和似然物的形态特征多变,油膜探测的准确性易受影响。研究表明,极化特征有助于区分海面油膜及其似然物,有效避免目标的错误分类<sup>[35,36]</sup>。随着新一代极化SAR观测系统的陆续投入使用,海面油膜探测研究进入了新的阶段。

近年海面溢油探测的研究主要围绕利用极化信息对矿物油和生物油膜似然物(海水表面一种常见的单分子油膜)的分类展开。利用极化SAR进行海面溢油检测的理论基础是矿物油覆盖海面与生物油膜或无油覆盖海面具有不同的散射机制:矿物油覆盖的海面布拉格散射减弱,非布拉格散射增强,去极化效应明显,而无油或生物油膜覆盖海面仍以布拉格散射为主,回波信号具有很高的极化度<sup>[36]</sup>。

四极化(quad-polarimetric)SAR通过在一个脉冲重复周期内交替发射水平(H)和垂直(V)极化信号,同时接收水平和垂直极化的回波信号,通过记录极化信号的相干信息,获取目标的极化散射特性。利用后向散射矩阵 $\mathbf{S}$ 可以联系散射电场与入射电场的复矢量

$$\mathbf{E}^s = \frac{e^{-jkr}}{r} \mathbf{S} \mathbf{E}^i \quad (2)$$

其中, $k$ 是电磁波的波数, $r$ 是天线与目标的距离。四极化SAR系统的后向散射矩阵是一个 $2 \times 2$ 的复矩阵

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中,下标H或V分别代表发射和接收的极化方式。全极化SAR系统可以得到HH/VH/HV/VV 4路极化信息,构成极化散射矩阵。利用四极化后向散射矩阵,可以得到任意极化接收/发射组合下目标的后向散射特性,因此四极化又通常被称为全极化(fully polarimetric)模式。

#### 3.2 极化SAR海面溢油探测研究

极化分解参数能够反映地物的极化散射特性,对极化相干矩阵 $\mathbf{T}$ 进行特征值分解,可以提取出极化熵 $H$ 、平均极化角 $\alpha$ 和各向异性系数 $A$ ,这些参数在极化SAR图像分析中有广泛应用。因此上述特征最早被用于海面溢油检测研究。生物油膜或无油膜覆盖海面以布拉格散射为主,极化熵 $H$ 和平均极化角 $\alpha$ 较小,而溢油覆盖区域的布拉格散射机制受到抑制,极化散射机制变得复杂,极化熵 $H$ 和平均极化角 $\alpha$ 较大。Migliaccio等人<sup>[37]</sup>基于SIR-C/X SAR数据证实了这些极化分解特征在海面油膜探测中的有效性,且基于这些特征提出了用于海面油膜检测的极化恒虚警滤波器<sup>[38]</sup>。Nunziata等人<sup>[39]</sup>首先提出鞍点高度能够反映地物的去极化程度,无油海面以布拉格散射为主,极化鞍点较低,而矿物油膜海面的散射机制复杂得多,造成极化鞍点升高,并利用多种波段的SAR图像开展了区分矿物油和生物油膜似然物的分类研究。

极化相位信息与地物的极化特性密切相关,是溢油检测的有效特征。Migliaccio等人<sup>[40]</sup>率先提出利用同极化相位差(Co-polarized Phase Difference, CPD)可有效区分溢油和生物油似然物。理论分析表明,无油或者生物油膜覆盖的海面HH和VV后向散射信号的相位相关性很高,相位差接近为0,而矿物油的存在会使HH和VV的相位相关性降低,相位差分布范围扩大。因此,CPD的方差可以作为一种有效的油膜分类特征。由于目前没有真正业务化运行的HH和VV双极化SAR系统(除TerraSAR-X实验模式),CPD信息主要从全极化SAR图像提取。Skrunes等人<sup>[41]</sup>在北海溢油实验中获取了C波段Radarsat-2影像和X波段TerraSAR-X影像,比较了极化熵 $H$ 、平均极化角 $\alpha$ 、CPD标准差、HH和VV通道相关系数的模值等特征对于矿物油和生物油膜似然物的区分能力。

不同极化通道的后向散射截面(RCS)可用于海面油膜探测的研究。在中等入射角范围内(约 $20^\circ \sim 60^\circ$ ), 后向散射截面可用布拉格散射理论建模。理论上雷达在海面的布拉格散射与电磁波波数、雷达入射角、菲涅尔(Fresnel)散射系数、海面2维波谱有关, 而不同极化后向散射截面的比值仅为当地入射角, 海面斜率和等效介电系数的函数。此外, 根据“Marangoni”衰减效应, 在波长较长的L波段, 油膜对海浪谱的抑制较小, 而在波长较短的C和X波段, 对海浪谱抑制较大, Alpers等人<sup>[42]</sup>在SIRC/X海面油膜现场实验中对L, C, X波段海面溢油影像开展研究, 证实了此结论。Minshew等人<sup>[43]</sup>利用倾斜调制的布拉格散射模型对海面及油、水混合物进行建模, 利用墨西哥湾溢油事故的UAVSAR图像进行油、水混合比例的反演, 估算出事故附近海域的油、水混合比例在65~90%之间。Nunziata等人<sup>[44]</sup>利用双尺度边界扰动法(Boundary Perturbation Method)分析了无油和生物油膜覆盖海面不同的RCS散射截面特性, 利用真实SAR数据的实验表明双尺度模型和Marangoni衰减模型能够更好地对大尺度海浪倾斜调制下的海面后向散射截面进行建模。当入射角范围较小时, 不同极化通道雷达后向散射截面以镜点散射分量为主, 而随着入射角的增大, 镜点散射分量迅速减小, 雷达后向散射截面逐渐以布拉格散射分量的贡献为主, 此时可利用微小扰动法建模。田维<sup>[45]</sup>基于海面波谱模型和电磁波散射模型, 分析了多种极化方式下油膜对雷达后向散射信号的衰减, 并研制了一套基于星载SAR图像的海面溢油检测软件。Li等人<sup>[46]</sup>提出了基于极化分解模型的海面后向散射截面分析方法, 更加符合油膜覆盖海面的后向散射截面特性, 提高了反演海面等效介电常数等参数的精度。基于RCS的分析方法仅需考虑极化SAR图像的幅值信息, 可以用于非相干的极化SAR工作模式, 如ENVISAT和COSMO-SKYMED, 这些平台的双极化模式中不同极化方式的信号是交替发射和接收的。然而, 海面SPM模型的有效范围受入射角的限制较大(入射角范围内镜点散射过强, 入射角过大则后向散射过于微弱), 而且菲涅尔系数会随着海面等效介电常数的变化达到饱和<sup>[47]</sup>, 影响油、水混合比例的精确反演。此外只有当油膜厚度达到与电磁波趋肤深度相近的数量级时, 油膜等效介电常数的变化才会影响海面后向散射系数, 而通常情况下海面油膜的厚度远远达不到上述条件。此外, RCS比值法没有充分利用海面油膜的去极化效应, 较大地限制了其对于海面油膜和似然物的区分能力。

此外, 学者们还提出了一系列组合极化特征, 取得了不错的溢油探测效果。Wang等人<sup>[48]</sup>利用极化熵 $H$ 、平均极化角 $\alpha$ 、各项异性度 $A$ 和同极化相关系数 $\rho$ 构成新的溢油探测特征 $F$ 。Zhang等人<sup>[49]</sup>提出通过极化参数 $P$ 来反映布拉格散射与镜点散射的比值, 并利用其对海面油膜进行提取。还利用了土壤湿度估计中采用的一致性系数 $\mu$ , 开展了海面溢油检测研究, 该特征能够反映面散射与体散射的相对关系, 实验证实海面区域 $\mu$ 为正, 而在溢油区域 $\mu$ 为负, 因此 $\mu$ 可以作为一种海面溢油检测的逻辑分类器。

值得注意的是, 在2015年的北欧海面溢油探测实验中却得到了不同于以往的结果。实验中利用RADARSAT-2, TerraSAR-X, UAVSAR联合观测了几种不同混合比例的矿物油与水的乳化物以及植物油膜, 在排除信噪比(SNR)影响的条件下, 通过对 $H$ - $\alpha$ 分解特征及其他常用极化特征的分析, Skrunes等人<sup>[50]</sup>发现不同类型油膜和海水之间并没有明显的散射机制差异, 极化特征也未能有效区分不同类型的油膜, 并将主要原因归结为获取SAR图像时的海况较大(风速大于12 m/s), 但该结论还需要通过进一步的实验证实。

多种特征的优化和综合利用是极化SAR海面溢油检测研究的热门方向。极化特征数量众多, 既包含互补信息, 也包含大量冗余信息。因此, 如何对特征进行选择和优化, 使得在有限的样本条件下分类器能够得到充分地训练, 避免“维数灾难”, 是值得深入研究的问题。

## 4 紧缩极化合成孔径雷达海面油膜探测

### 4.1 紧缩极化SAR基础

目前, 全极化星载SAR系统主要采用极化时分的工作方式, 即交替发射水平H和垂直V极化信号。因此, 全极化SAR线性调频信号的脉冲重复频率为单极化SAR系统的2倍, 导致扫描带(swath width)宽度减半, 产生难以克服的距离模糊效应和系统功率要求增大的问题<sup>[51]</sup>。此外, 较大的系统复杂度与数据量也使得全极化SAR系统具有较高的使用成本。为解决上述矛盾, 新的极化SAR工作体制——紧缩极化被提出。紧缩极化SAR系统能够在不减小扫描带宽度的同时获取被观测地物的部分极化特性<sup>[52]</sup>, 目前已经在土地利用分类, 生物量估算, 土壤湿度反演等应用上取得了一定的成果<sup>[53,54]</sup>。对于海事监测应用来说, 扫描带宽度是一项十分重要的技术指标, 因此紧缩极化SAR海面溢油探测成为了近期的热门研究方向。

目前, 海面溢油探测中常用的紧缩极化模式包

括 $\pi/2$ (又称为圆极化发射线性极化接收, CTRLR或混合极化模式)和 $\pi/4$ 模式,这两种模式分别发射圆极化或者 $45^\circ$ 线性极化的信号,同时接收水平和垂直极化的信号。紧缩极化SAR系统获取的是目标散射向量 $\mathbf{K}$

$$\mathbf{K}_{\pi/2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} S_{HH} - jS_{HV} \\ S_{VH} - jS_{VV} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{K}_{\pi/4} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} S_{HH} + S_{HV} \\ S_{VH} + S_{VV} \end{pmatrix} \quad (5)$$

## 4.2 紧缩极化SAR海面溢油探测

常用的处理紧缩极化SAR数据的方法之一是利用迭代算法从紧缩极化散射向量来重构伪四极化协方差矩阵<sup>[55,56]</sup>,然后再计算相应的极化特征。Yin等人<sup>[57]</sup>提出了一种基于极化分解的紧缩极化SAR图像重构算法,并将其用于海面船只的检测。Collins等人<sup>[58]</sup>利用经验模型估计入射角范围内的假设常数 $N$ ,用来提高海面区域的紧缩极化SAR图像重构精度。Zhang等人<sup>[59]</sup>对海面紧缩极化SAR图像重构算法进行了研究,并基于伪四极化重构协方差矩阵进行海面钻井平台和溢油的提取。基于重构的特征提取方法的优势是后续可以直接采用全极化特征的分析方法,但存在的问题是伪四极化重构需地物的后项散射特性满足一定的假设条件,而海面和油膜覆盖区域的散射机制往往不符合这些条件。因此,重构出的伪四极化协方差矩阵与真实数据存在较大偏差。Li等人<sup>[60]</sup>通过统计分析墨西哥湾溢油事故中的UAVSAR全极化数据,对海面后向散射特性进行分析,提出了改进的假设方程,获得了较好的伪四级化重构性能。紧缩极化SAR伪四极化重构的另一个问题是迭代算法参数的选取会影响最终的重构结果,从而对后续特征提取和油膜检测效果造成影响。

另一类方法是对紧缩极化散射向量进行分析,从中直接提取特征。从紧缩极化散射向量可得雷达信号的斯托克斯向量(Stokes vector),从而进一步计算出紧缩极化信号的极化度 $m$ 、相对相位(relative phase) $\delta$ 、(回波信号)极化熵 $H_w$ 、椭圆率 $\chi$ 、各向异性度 $A$ 、平均极化角 $\alpha$ 等参数<sup>[61,62]</sup>。Li等人<sup>[63]</sup>发现相对相位 $\delta$ 的正负号可以区分不同的海面散射机制:海面区域 $\delta$ 接近 $90^\circ$ ,而油膜覆盖区域 $\delta$ 为负,表征多次散射机制的增加。Li等人<sup>[64]</sup>还通过对RADARSAT-2海面自然渗漏的矿物油的图像分析发现,与洁净海面相比,油膜覆盖区域的极化度 $m$ 显著降低,表征去极化效应较为明显,而且椭圆率 $\chi$ 具有相反的符号,表征着散射机制不再是布拉

格散射。一致性系数(conformity coefficient) $\mu$ 最早被用于基于紧缩极化SAR的土壤湿度估计,该特征能够有效区分单次面散射,二面角散射与体散射<sup>[65]</sup>。从四极化和 $\pi/2$ 模式紧缩极化SAR图像中提取的一致性系数特征在研究中被证实具有非常好的区分矿物油膜和生物油膜似然物的能力。Yin等人<sup>[66]</sup>基于扩展的布拉格散射模型,提出从紧缩极化SAR信号的Stokes矩阵中提取特征的新方法,并通过实验证实了其在区分海面溢油与生物油膜和低速区这两种似然物中的性能。Nunziata等人<sup>[67]</sup>利用 $\pi/2$ 紧缩极化协方差矩阵提取出了相对相位 $\delta$ 、相关系数 $\mu$ 、极化度 $P$ 、极化熵 $H_w$ 和圆极化率 $\mu_c$ 等特征,并提出了同极化相位差 $\delta$ 的标准差 $\sigma$ 这一新特征。对于海面来说,HH和VV后向散射系数的相位差分布集中在零附近,而对于海面溢油区域,相位差分布范围扩大, $\delta$ 值明显增大,实验证实 $\pi/2$ 紧缩极化模式能够有效区分溢油和弱衰减似然物(生物油膜)。Li等人<sup>[68]</sup>利用伪四极化重构和极化散射向量直接提取特征的方法分别提取 $\pi/2$ 模式紧缩极化特征,通过分析发现两种特征提取方法在不同的特征上互有优势,同时证实了紧缩极化特征有接近于全极化特征的海面油膜分类性能。Zhang等人<sup>[69]</sup>对比分析了双极化、紧缩极化和全极化模式下不同监督分类算法对海面油膜探测下的性能,发现分类精度不会随着特征数量的增加而一直增加,说明特征之间存在大量的互补信息,表明了特征选择和优化的重要性。在挪威海域开展的溢油实验中,Kumar等人<sup>[70]</sup>利用RISAT-1卫星首次获取了真实的 $\pi/2$ 模式紧缩极化SAR海面溢油数据,证实了该模式在溢油探测中的实际性能。

对紧缩极化模式下的极化信息开展理论分析,有助于极化模式的选择和特征提取算法的研究。 $\pi/2$ 模式具有便于极化定标,极化通道功率平衡,不受地物排列方向影响,不易受电离层法拉第旋转效应影响等优势<sup>[54]</sup>。然而 $\pi/2$ 模式紧缩极化SAR在实际工作时难以保证发射一个理想的圆极化信号,这为地物极化特征的分析带来了挑战。 $\pi/4$ 模式能够获取非常接近于四极化模式下地物的极化散射特性,但是由于发射和接收信号极化方式的不匹配,存在3dB的接收功率损失。Buono等人<sup>[71]</sup>分析了不同入射角下极化熵,极化度和一致性系数等特征的变化规律。然后结合ALOS-1,ALOS-2和RADARSAT-2星载SAR数据,通过实验验证了紧缩极化体制下的极化SAR特征区分海面油膜和弱衰减似然物的能力,讨论了通过不同紧缩极化体制下获得的极化特征与全极化SAR特征的差异。

## 5 研究难点与挑战

目前,针对溢油导致海面非布拉格散射增加的机理还存在一些争议。Alpers等人<sup>[72]</sup>认为SAR图像在溢油区域非布拉格散射成分的增加很可能不是由于海面物理过程引起,而是雷达热噪声。因为对于星载SAR系统溢油区域的信号十分微弱,导致雷达后向散射信号的信噪比很低,有时已接近系统的噪声门限。特别是对于大入射角情况和HV极化通道,更容易受到噪声影响。其给出的证据是在墨西哥湾溢油事件中获得的UAVSAR图像中(信噪比可达-53 dB)油膜覆盖区域并没有发现明显的非布拉格散射效应。Buono等人<sup>[71]</sup>将海面油膜导致的CPD方差增加归因为非布拉格散射机制,而Alpers等人<sup>[71]</sup>提出了系统噪声影响之外的两个可能的原因:油膜内部散射介质的不均匀分布和极化雷达H与V信号时延产生的信号去相干。此结论存在的问题是,UAVSAR工作在波长较长的L波段,不同波段下,由于波长与海面波谱的关系不同,海面油膜的散射特性也不同。另外,墨西哥湾溢油事件的情况较为特殊,发生事故的钻井平台附近油层厚度很大,且由于大量分散剂的使用,溢油的乳化作用明显,使得溢油覆盖海面仍以削弱的布拉格散射为主,而没有表现出明显的去极化效应。因此,探究利用极化散射机制区分溢油和生物油膜似然物的理论机制的实验还有待进一步开展。

带有地面验证信息的溢油与似然物样本数据的匮乏一直制约着SAR海面油膜探测方法的研究。SAR海面油膜的散射机制受到油膜类型、海况等因素影响较大,溢油事故的种类多样,发生后溢油特性随时间变化较快,为获取实验数据造成了困难。由于经费和环保政策限制等原因,受控条件下的海面场外溢油探测实验开展较少。因此,目前海面溢油检测的研究大部分都是利用零星的样本数据,缺乏基于大量样本的验证和分析。要开展全面、深入的海面溢油探测方法研究,亟待建立包含大量数据和地面验证信息的海面溢油检测的样本库。当然,这还依赖于SAR数据的生产和管理机构在一定程度上放开对历史存档数据分享和使用方面的限制。

大入射角变化范围下海面散射特性的变化给油膜检测带来一定困难。由于海面布拉格散射强度和极化散射机制随入射角变化明显,因此对于宽幅SAR图像,图像入射角影响的补偿问题成为了一个重要研究内容。传感器噪声、系统误差等影响因素对油膜监测算法的影响也是需认真考虑的问题。由于海面溢油区域的后向散射信号通常极其微弱,雷达系统的热噪声、通道不平衡和串扰等干扰因素会

极大影响溢油探测的结果<sup>[73]</sup>。需要开展理论分析和实测数据相结合的研究方法,对SAR传感器所引发的上述问题开展研究,针对不同的海面油膜探测任务提出相关的技术指标,开发相对应的数据处理和特征提取方法。

对于紧缩极化SAR海面油膜检测的研究主要还是利用全极化SAR数据进行模拟。目前业务化运行的紧缩极化SAR对地观测卫星仅有印度和美国联合研制的RISAT,相关的实验数据也非常有限(此外印度Chandraayan-1月球探测器的Mini-SAR和美国月球轨道探测器的Mini-RF也具有紧缩极化模式<sup>[74]</sup>)。在实际中,由于硬件条件的限制, $\pi/2$ 紧缩极化模式下雷达往往难以发射完美的圆极化信号,从而对基于该模式下紧缩极化特征的海面溢油探测带来挑战。

海面溢油监测的方式各有优势,同时也存在各自的局限性。尽管SAR可作为海洋溢油监测的有力工具,但只有整合多种观测模式,建立包括海上平台、船舶、航空、航天卫星监测系统的立体协同观测网络,才能实现全天候、实时高效的海面溢油监测。

## 6 结束语

### 6.1 当前研究现状

现阶段业务化运行的SAR海面油膜探测系统主要是基于单极化图像,基于全极化和紧缩极化SAR的海面溢油探测技术还尚处于研究阶段。目前在轨运行的紧缩极化SAR卫星还较少,但不远的将来,具有紧缩极化工作模式的卫星将进一步增多。即将于2018年发射的RADARSAT星座系列卫星(RCM)由3颗卫星构成星座,可以在全极化和紧缩极化工作模式下提供C波段海洋溢油监测能力,具有较大观测带宽度和较短的重访时间。日本ALOS-2卫星上搭载的PALSAR-2也具有紧缩极化的实验模式。

目前极化SAR海面溢油探测的大部分研究都是通过个例实验数据,对某一或者某几个极化特征进行统计分析。因为缺乏对海面油膜的极化散射特性系统的理论研究,使得对不同海况和油膜特性条件下的海面溢油检测存在困难。因此,后续研究亟待对海面及油膜覆盖区域的后向散射特性开展系统研究,通过理论分析和仿真建模确定最佳的极化SAR工作模式和特征提取方法。

### 6.2 未来发展趋势

尽管SAR溢油探测技术的发展遇到一定挑战,但随着数据的增加,技术的进步也带来了前所未有的机遇。大量的可用数据为深度学习算法提供了丰富的训练样本,而后者能够综合并优化多种特征,

实现高准确度的海面油膜检测和分类。Chen等人<sup>[75]</sup>利用堆栈自编码器(SAE)和深度置信网络(DBN)对极化SAR特征进行提取和优化,实验表明基于非监督预训练的深度学习算法能够提高海面油膜探测的准确率,特别在训练样本有限时能够取得优于传统神经网络等油膜提取算法的性能。

综上所述,包含多种类型油膜和似然物的完善样本库的建立,极化SAR海面油膜探测机理的更深入研究,紧缩极化SAR新体制下海面油膜探测的新技术,及以深度学习为代表的性能模式识别算法的研究将是SAR海面油膜探测技术未来的研究热点领域。相信在电子工程、遥感、海洋等领域专家的不懈努力下,SAR海面油膜探测技术将会取得更大的进展,为保护和我们的生存息息相关的海洋生态环境做出重要贡献。

### 参 考 文 献

- [1] 刘鹏. SAR海面溢油检测与识别方法研究[D]. [博士学位文], 中国海洋大学, 2012.  
LIU Peng. Research on ocean oil spill detection and recognition[D]. [Ph.D. dissertation], Ocean University of China, 2012: 1-2.
- [2] 朱姝霖. 海上溢油事故的影响及处理分析[J]. 航海, 2011(4): 54-56.  
ZHU Shulin. The influence and treatment analysis of the marine oil spill accident[J]. *Navigation*, 2011(4): 54-56.
- [3] Deepwater Horizon oil spill[OL]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Deepwater\\_Horizon\\_oil\\_spill](https://en.wikipedia.org/wiki/Deepwater_Horizon_oil_spill).
- [4] 罗孝学, 许庭春. 海上溢油事故及其防范[J]. 中国水运: 理论版, 2006, 4(7): 18-19.  
LUO Xiaoxue and XU Tingchun. Marine oil spill accident at sea and its prevention[J]. *China Water Transport*, 2006, 4(7): 18-19.
- [5] 劳辉. 最近29年我国沿海船舶、码头溢油50吨以上事故统计[J]. 交通环保, 2003, 24(6): 47.  
LAO Hui. Statistics on accidents of over 50 tons of oil spills on ships and wharfs along the coast in recent 29 years[J]. *Environmental Protection in Transportation*, 2003, 24(6): 47.
- [6] NOAA. NOAA office of response and restoration, open water oil identification job aid for aerial observation. [OL]. <http://response.restoration.noaa.gov/jobaid/orderform>, 2016.
- [7] SUKAWATTANAVIJIT C, CHEN Jie, and ZHANG Hongsheng. GA-SVM algorithm for improving land-cover classification using SAR and optical remote sensing data[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2017, 14(3): 284-288. doi: 10.1109/LGRS.2016.2628406.
- [8] LIU Lin and ZHANG Yuanzhi. Urban heat island analysis using the landsat TM data and ASTER data: A case study in Hong Kong[J]. *Remote Sensing*, 2011, 3(7): 1535-1552. doi: 10.3390/rs3071535.
- [9] ZHANG Yuanzhi, PULLIAINEN J, KOPONEN S, et al. Application of an empirical neural network to surface water quality estimation in the Gulf of Finland using combined optical data and microwave data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2): 327-336. doi: 10.1016/S0034-4257(02)00009-3.
- [10] Jones C, Holt B. Experimental L-Band Airborne SAR for Oil Spill Response at Sea and in Coastal Waters[J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 641-106. doi: 10.3390/s18020641.
- [11] GAUTHIER M, WEIR L, OU Z, et al. Integrated satellite tracking of pollution: A new operational program[C]. IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, Barcelona, Spain, 2007: 967-970. doi: 10.1109/IGARSS.2007.4422960.
- [12] 刘康炜, 杨文玉. 海上溢油监测技术研究进展[J]. 安全、健康和环境, 2012, 12(7): 1-3. doi: 10.3969/j.issn.1672-7932.2012.07.002.
- [13] CHEN Jie, IQBAL M, YANG Wei, et al. Mitigation of azimuth ambiguities in spaceborne stripmap SAR images using selective restoration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2014, 52(7): 4038-4045. doi: 10.1109/TGRS.2013.2279109.
- [14] BAMLER R. Principles of synthetic aperture radar[J]. *Surveys in Geophysics*, 2001, 21(2-3): 147-157. doi: 10.1023/A:1006790026612.
- [15] ARISTOTLE. *Problematica Physica*[M]. Leiden, Koninklijke Brill NV, 2015.
- [16] MARANGONI C. Sul principio della viscosita superficiale dei liquidi stabili[J]. *Nuovo Cimento*, 1872, 5-6(1): 239-273. doi: 10.1007/BF02718643.
- [17] SOLBERG A H S. Remote sensing of ocean oil-spill pollution[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(10): 2931-2945. doi: 10.1109/JPROC.2012.2196250.
- [18] SOLBERG AHS, STORVIK G, SOLBERG R, et al. Automatic detection of oil spills in ERS SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(4): 1916-1924. doi: 10.1109/36.774704.
- [19] MIGLIACCIO M, FERRARA G, GAMBARDELLA A, et al. A new stochastic model for oil spill observation by means of single-look SAR data[J]. *Environmental Research, Engineering and Management*, 2007, 1(39): 24-29. doi: 10.1109/BALTIC.2006.7266181.
- [20] SHU Yuanming, LI J, and YOUSIF H. Dark-spot detection from SAR intensity imagery with spatial density thresholding for oil-spill monitoring[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(9): 2026-2035. doi: 10.1016/j.rse.

- 2010.04.009.
- [21] BARNI M, BETTI M, and MECOCCHI A. A fuzzy approach to oil spill detection on SAR images[J]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1995, 1(1): 157–159. doi: [10.1109/IGARSS.1995.519676](https://doi.org/10.1109/IGARSS.1995.519676).
- [22] MERCIER G, DERRODE S, PIECZYNSKI W, *et al.* Multiscale oil slick segmentation with Markov Chain Model[C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Toulouse, France, 2003: 3501–3503. doi: [10.1109/IGARSS.2003.1294834](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2003.1294834).
- [23] HUANG Bo, LI Hongga, and HUANG X. A level set method for oil slick segmentation in SAR images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(6): 1145–1156. doi: [10.1080/01431160512331326747](https://doi.org/10.1080/01431160512331326747).
- [24] ZHANG Yuanzhi, LIN Hui, LIU Qiang, *et al.* Oil-spill monitoring in the coastal waters of Hong Kong and vicinity[J]. *Marine Geodesy*, 2012, 35(1): 93–106. doi: [10.1080/01490419.2011.637872](https://doi.org/10.1080/01490419.2011.637872).
- [25] SOLBERG A, DOKKEN S T and SOLBERG R. Automatic detection of oil spills in ENVISAT, Radarsat and ERS SAR images[C]. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings, Toulouse, 2003, 4: 2747–2749. doi: [10.1109/IGARSS.2003.1294572](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2003.1294572).
- [26] FISCELLA B, GIANCASPRO A, NIRCHIO F, *et al.* Oil spill detection using marine SAR images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(18): 3561–3566. doi: [10.1080/014311600750037589](https://doi.org/10.1080/014311600750037589).
- [27] DEL FRATE F, PETROCCHI A, LICHTENEGGER J, *et al.* Neural networks for oil spill detection using ERS-SAR data[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2000, 38(5): 2282–2287. doi: [10.1109/IGARSS.1999.773451](https://doi.org/10.1109/IGARSS.1999.773451).
- [28] TOPOUZELIS K, KARATHANASSI V, PAVLAKIS P, *et al.* Detection and discrimination between oil spills and look-alike phenomena through neural networks[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(4): 264–270. doi: [10.1016/j.isprsjprs.2007.05.003](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.05.003).
- [29] NIRCHIO F, SORGENTE M, GIANCASPRO A, *et al.* Automatic detection of oil spills from SAR images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(6): 1157–1174. doi: [10.1080/01431160512331326558](https://doi.org/10.1080/01431160512331326558).
- [30] KERAMITSOGLUA I, CARTALISA C, and KIRANOUDIS C. Automatic identification of oil spills on satellite images[J]. *Environmental Modeling & Software*, 2006, 21(5): 640–652. doi: [10.1016/j.envsoft.2004.11.010](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.11.010).
- [31] GAMBARDELLA A, GIACINTO G, and MIGLIACCIO M. On the mathematical formulation of the SAR oil-spill observation problem[C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Boston, USA, 2008: 1382–1385. doi: [10.1109/IGARSS.2008.4779618](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2008.4779618).
- [32] MARGHANY M, CRACKNELL A, and HASHIM M. Modification of fractal algorithm for oil spill detection from RADARSAT-1 SAR data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2009, 11(2): 96–102. doi: [10.1016/j.jag.2008.09.002](https://doi.org/10.1016/j.jag.2008.09.002).
- [33] GARCIA-PINEDA O, MACDONALD I R, LI Xiaofeng, *et al.* Oil spill mapping and measurement in the gulf of mexico with textural classifier neural network algorithm (TCNNA)[J]. *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(6): 2517–2525. doi: [10.1109/JSTARS.2013.2244061](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2244061).
- [34] MARGHANY M. Genetic algorithm for oil spill automatic detection from Envisat satellite data[C]. *Computational Science and Its Applications - ICCSA*, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2013: 587–598. doi: [10.1007/978-3-642-39643-4\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-642-39643-4_42).
- [35] BROWN C E, and FINGAS M F. Synthetic Aperture Radar sensors: viable for marine oil spill response[C]. *Arctic and Marine Oil spill Program*, Canada, 2003: 299–310.
- [36] MIGLIACCIO M, GAMBARDELLA A, and TRANFAGLIA M. SAR polarimetry to observe oil spills[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2007, 45(2): 506–511. doi: [10.1109/TGRS.2006.888097](https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.888097).
- [37] MIGLIACCIO M, and TRANFAGLIA M. Study on the use of SAR polarimetric data to observe oil spills[C]. *Europe Oceans 2005*, Brest, France, 2005: 196–200. doi: [10.1109/MASS.1995.528223](https://doi.org/10.1109/MASS.1995.528223).
- [38] MIGLIACCIO M, FERRARA G, GAMBARDELLA A, *et al.* A new stochastic model for oil spill observation by means of single-look SAR data[J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2007, 1(39): 24–29. doi: [10.1109/BALTIC.2006.7266181](https://doi.org/10.1109/BALTIC.2006.7266181).
- [39] NUNZIATA F, MIGLIACCIO M, and GAMBARDELLA A. Pedestal height for sea oil slick observation[J]. *Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(2): 103–110. doi: [10.1049/iet-rsn.2010.0092](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2010.0092).
- [40] MIGLIACCIO M, NUNZIATA F, and GAMBARDELLA A. On the copolarized phase difference for oil spill observation[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(6): 1587–1602. doi: [10.1080/01431160802520741](https://doi.org/10.1080/01431160802520741).
- [41] SKRUNES S, BREKKE C, and ELTOFT T. An experimental study on oil spill characterization by multipolarization SAR[C]. *9th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Nuremberg, Germany, 2012: 139–142.
- [42] MELSHELMER C, ALPERS W, and GADE M. Investigation of multifrequency/multipolarization radar signatures of rain cells, derived from SIR-C/X-SAR data[C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Lincoln, USA

- 1996: 1370–1372. doi: [10.1109/IGARSS.1996.516666](https://doi.org/10.1109/IGARSS.1996.516666).
- [43] MINCHEW B, JONES C E, and HOLT B. Polarimetric analysis of backscatter from the deepwater Horizon oil spill using L-Band synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(10): 3812–3830. doi: [10.1109/TGRS.2012.2185804](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2185804).
- [44] NUNZIATA F, SOBIESKI P, and MIGLIACCIO M. The Two-Scale BPM scattering model for sea biogenic slicks contrast[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(7): 1949–1956. doi: [10.1109/TGRS.2009.2013135](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2013135).
- [45] 田维. 海面油膜雷达遥感检测机理与方法研究[D]. [博士学位文], 中国科学院遥感应用研究所, 2009.
- [46] LI Yu, ZHANG Yuanzhi, CHEN Jie, *et al.* Model-based sea surface scattering analysis for the DWH oil spill accident case[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, China, 2016: 7711–7714. doi: [10.1109/IGARSS.2016.7731011](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7731011).
- [47] HANJSEK I, POTTIER E, and CLOUDE S R. Inversion of surface parameters from polarimetric SAR[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2003, 41(4): 727–744. doi: [10.1109/TGRS.2003.810702](https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.810702).
- [48] WANG Wenguang, LU Fei, WU Peng, *et al.* Oil spill detection from polarimetric SAR image[J]. *Proc. Int. Conf. Signal Process*, 2010: 832–835. doi: [10.1109/ICOSP.2010.5655943](https://doi.org/10.1109/ICOSP.2010.5655943).
- [49] 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): 415–421. doi: [10.1029/2011GL047013](https://doi.org/10.1029/2011GL047013).
- [50] 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. doi: [10.1109/JSTARS.2016.2565063](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2565063).
- [51] CHEN Jie and QUEGAN S. Calibration of spaceborne CTLR compact polarimetric low-frequency SAR using mixed radar calibrators[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2011, 49(7): 2712–2723. doi: [10.1109/TGRS.2011.2109065](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2109065).
- [52] RANEY R K. Hybrid-Polarity SAR architecture[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3397–3404. doi: [10.1109/TGRS.2007.895883](https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.895883).
- [53] 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 & 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).
- [54] LAVALLE M, POTTIER E, SOLIMINI D, *et al.* Compact polarimetric SAR Interferometry: PALSAR observations and associated reconstruction algorithms[C]. Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric, Frascati, Italy, 2009: 26–30.
- [55] SOUYRIS JC, STACY N, AINSWORTH T, *et al.* SAR Compact Polarimetry (CP) for earth observation and planetology: Concept and challenges[C]. Proceedings of International Workshop on Science & Applications of Sar Polarimetry & Polarimetric Interferometry, Noordwijk, Netherlands, 2007: 22–26.
- [56] NORD M E, AINSWORTH T L, *et al.* Comparison of compact polarimetric synthetic aperture radar modes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2009, 47(1): 174–188. doi: [10.1109/TGRS.2008.20009](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.20009).
- [57] YIN Junjun, YANG Jian, and ZHANG Xinzhen. On the ship detection performance with compact polarimetry[C]. IEEE Radar Conference, Kansas City, USA, 2011: 675–680. doi: [10.1109/RADAR.2011.5960623](https://doi.org/10.1109/RADAR.2011.5960623).
- [58] 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 & Remote Sensing*, 2012, 51(1): 591–600. doi: [10.1109/TGRS.2012.2199760](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2199760).
- [59] 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 & Remote Sensing*, 2017, 55(3): 1407–1423. doi: [10.1109/TGRS.2016.2623809](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2623809).
- [60] LI Yu, ZHANG Yuanzhi, CHEN Jie, *et al.* Improved compact polarimetric SAR Quad-Pol reconstruction algorithm for oil spill detection[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2014, 11(6): 1139–1142. doi: [10.1109/LGRS.2013.2288336](https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2288336).
- [61] 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]. *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).
- [62] CLOUDE S R, GOODENOUGH D G, and CHEN H. Compact decomposition theory[J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 9(1): 28–32. doi: [10.1109/LGRS.2011.2158983](https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2158983).
- [63] 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 & Remote Sensing*, 2013, 51(6): 3299–3305. doi: [10.1109/TGRS.2012.2224119](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2224119).
- [64] 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 & Remote Sensing*, 2015, 8(8): 3751–3759. doi: [10.1109/JSTARS.2014.2348173](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2348173).
- [65] TRUONG-LOI M, DUBOIS-FERNANDEZ P, FREEMAN A and POTTIER E, The conformity coefficient or how to explore the scattering behaviour from compact polarimetry mode[C]. 2009 IEEE Radar Conference, Pasadena, CA, 2009: 1-6. doi: [10.1109/RADAR.2009.4977048](https://doi.org/10.1109/RADAR.2009.4977048).
- [66] 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 & Remote Sensing*, 2015, 8(8): 3760–3772. doi: [10.1109/JSTARS.2014.2359141](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2359141).
- [67] 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).
- [68] LI Yu, LIN Hui, ZHANG Yuanzhi, *et al.* Comparisons of circular transmit and linear receive compact polarimetric SAR features for oil slicks discrimination[J]. *Journal of Sensors*, 2015, 2015(99): 1–14. doi: [10.1155/2015/631561](https://doi.org/10.1155/2015/631561).
- [69] ZHANG Yuanzhi, LI Yu, LIANG X, *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).
- [70] KUMAR L J V, KISHORE J K, and RAO P K. Decomposition methods for detection of oil spills based on Risat-1 SAR images[J]. *Remote Sens. Geosci*, 2014, 3(4): 1–10.
- [71] 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. doi: [10.1109/TGRS.2016.2574561](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2574561).
- [72] ALPERS W, HOLT B, and ZENG K. Oil spill detection by imaging radars: Challenges and pitfalls[J]. *In Remote Sensing of Environment*, 2017, 201(2017): 133–147. doi: [10.1016/j.rse.2017.09.002](https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.002).
- [73] CHEN Jie and QUEGAN S. Improved estimators of faraday rotation in spaceborne polarimetric SAR data[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2010, 7(4): 846–850. doi: [10.1109/LGRS.2010.2047002](https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2047002).
- [74] RANEY R, Hybrid-Polarity SAR Architecture[C]. 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, Denver, CO, 2006: 3846-3848. doi: [10.1109/IGARSS.2006.986](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2006.986).
- [75] CHEN Guandong, LI Yu, SUN Guangmin, *et al.* Application of deep networks to oil spill detection using polarimetric Synthetic Aperture Radar Images[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(10): 968. doi: [10.3390/app7100968](https://doi.org/10.3390/app7100968).
- 李煜: 男, 1986年生, 讲师, 研究方向为遥感图像处理和模式识别.
- 陈杰: 男, 1973年生, 教授, 研究方向为合成孔径雷达系统建模和信号处理.
- 张渊智: 男, 1964年生, 研究员, 研究方向为微波和光学遥感.