

doi: 10.6046/gtzyyg.2020.03.01

引用格式: 刘玉芳, 邹亚荣, 梁超. 溢油阻尼散射机制遥感监测研究进展[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(3): 1-7. (Liu Y F, Zou Y R, Liang C. Progress in remote sensing detection of oil spill damping mechanism [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(3): 1-7.)

# 溢油阻尼散射机制遥感监测研究进展

刘玉芳<sup>1</sup>, 邹亚荣<sup>2,3</sup>, 梁超<sup>2,3</sup>

(1. 航天宏图信息技术股份有限公司, 北京 100195; 2. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 3. 自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 溢油是海洋环境的主要污染源之一, 及早监测与发现对保护海洋生态环境具有重要的价值与意义。针对溢油散射机制问题, 通过分析基于波浪谱溢油后向散射系数计算研究, 综合考虑水体特性、水分子张力、弹性模型及表面张力等因素的研究状况进行了分析, 对针对微扰近似解方程, 结合水体参数的阻尼作用的研究开展了综述, 阐述溢油遥感监测阻尼在与波浪谱结合不紧密以及阻尼的定量计算不够等研究不足问题, 并提出了今后溢油遥感监测阻尼的研究在针对海浪谱的阻尼特性、基于波浪谱后向散射系数计算的研究方向, 为定量分析溢油的阻尼特性提供技术支撑, 从而提高溢油遥感监测的精度。

**关键词:** 溢油; 阻尼机制; 遥感探测; 进展

**中图法分类号:** TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2020)03-0001-07

## 0 引言

海洋是地球的蓝色宝库, 孕育了丰富的资源, 是人类可持续发展的重要资源。随着社会经济的发展, 人类不断对海洋资源进行开发利用给海洋生态环境造成了不同程度的损害, 尤其是海洋石油勘探开发活动与海上运输业等活动的溢油污染对其生态环境造成了巨大的灾害。近年来, 发生过多起恶性溢油事故, 如2010年大连新港石油管道爆炸事故, 1 500余t原油流入海湾, 造成直接经济损失共近44.80亿元<sup>[1]</sup>; 美国墨西哥湾“深水地平线”石油钻井平台爆炸事故, 造成北美国家的直接经济损失约数千亿美元, 对全球生态环境损害无以量计<sup>[2]</sup>; 2011年蓬莱“19-3平台溢油事件”, 造成的生态损害价值共计16.83亿元<sup>[3]</sup>; 还有2018年“桑吉”轮碰撞事故等。溢油事故往往造成大面积海域污染, 造成严重的生态破坏, 带来巨大的经济损失, 因此已引起各国政府的高度重视。世界各国都积极参与海上溢油的监视和遥感监测。由于我国经济飞速发展和石油战略储备的需要, 海上石油运输量猛增, 油轮数量增加且呈大型化趋势,

这就增大了溢油事故尤其是大型溢油事故的可能性。需要采取及时、有效的应急反应行动, 以减少溢油的危害, 保护海洋生态环境。

溢油对波浪的阻尼作用会在合成孔径雷达(synthetic aperture Radar, SAR)图像上形成“黑斑”, 因此大多采用SAR数据开展溢油的遥感监测。但目前对溢油散射机制的揭示还不够, 而这是应用SAR数据监测溢油的根本。本文对学者们在溢油散射方面的研究成果进行了总结概括, 阐述目前溢油遥感监测散射机制存在的不足, 并指出今后的研究方向。

## 1 随机粗糙表面的雷达电磁波散射研究

### 1.1 随机粗糙表面的雷达电磁波散射

随机粗糙表面的雷达电磁波散射问题已被广泛开展研究, 先后发展了多种近似模型(表1)。Gill等<sup>[4]</sup>建立了海面雷达散射截面计算模型, 其模型中考虑了多普勒频率影响, 对低入射角下海面垂直极化散射计算有效。基尔霍夫近似(Kirchhoff approach, K-A)是较早的散射计算近似模型, 其假定

收稿日期: 2019-10-24; 修订日期: 2020-04-02

基金项目: 国家重点研发计划子课题“机器学习支持的复杂典型要素多层次融合技术研究”(编号: 2018YFB0505001-04)。

第一作者: 刘玉芳(1978-), 女, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为遥感图像处理和目标识别。Email: 13691093600@163.com。

通信作者: 邹亚荣(1967-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为海洋遥感应用。Email: zyr@mail.nsoas.org.cn。

空间任意一点的附近的表面等效于该位置的切平面,这一假定当表面平均曲率比入射电磁波波长更大时成立,因此 K - A 近似模型适用于海面粗糙度较大的海况。小扰动近似模型 (small perturbation method, SPM) 被用以计算较小粗糙度表面的雷达后向散射截面<sup>[5]</sup>,通过在小粗糙表面假定条件下,对非镜面散射部分表达式中的指数项进行泰勒展开替换,获取 SPM 模型估计局地尺度与入射波数、入射角、散射角、极化方式及海表面高度谱之间的定量公式,SPM 近似模型仅适用于粗糙度角较小的表面,K - A 模型与 SPA 模型应用最为广泛<sup>[6-9]</sup>,Chen 及 Thorsos 等学者先后使用高斯随机粗糙表面谱及 Pierson - Moskowitz (P - M) 谱研究了这两种近似模型的适用性限定条件<sup>[10-12]</sup>,这两种模型只能计算单一粗糙度表面的电磁波散射,然而现实海面常表现出多种尺度的粗糙度。为此,学者们提出了双尺度模型 (two scale method, TSM)<sup>[13]</sup>,TSM 模型是对前述模型的综合,将表面散射看作全局尺度与局地尺度的平均,适用设定的波数值  $K_d$  对表面粗糙度进行尺度划分,并利用 SPM 模型估计局地尺度,但 TSM 模型中  $K_d$  选取是任意的,不同学者划分参数不尽相同。小斜率近似模型 (small slop approximation, SSA)<sup>[14-17]</sup> 与 TSM 模型类似,同样结合 K - A 模型与 SPM 模型,以拓展模型使用范围而适应于多种粗糙度表面。SSA 模型可以在一种理论框架下适应长、中、小尺度波数区间海面粗糙度下的散射计算。

表 1 随机粗糙表面的雷达电磁波散射主要研究

Tab. 1 The main research of radom surface scattering calculation

作者及年份	采用的近似模型	比较评价
Gill 等,2002 年 <sup>[4]</sup>	建立了海面雷达散射截面计算模型	对低入射角下海面垂直极化散射计算有效
Hermansson 等,2003 年 <sup>[5]</sup>	SPM 近似模型	SPM 近似模型仅适用于粗糙度角较小的表面
Chen 等,1988 年 <sup>[10]</sup> Thorsos 等,1989 年 <sup>[11]</sup> Thorsos,1988 年 <sup>[12]</sup>	使用高斯随机粗糙表面谱及 P - M 谱研究了 K - A 模型与 SPA 模型的适用性	K - A 模型与 SPA 模型只能计算单一粗糙度表面的电磁波散射
Khenchaf,2000 年 <sup>[13]</sup>	基于 TSM 模型开展散射计算	TSM 模型尺度划分具有任意性
Voronovich,1985 年 <sup>[14]</sup> Broschat,1993 年 <sup>[15]</sup> Thorsos 等,1995 年 <sup>[16]</sup> Broschat 等,1997 年 <sup>[17]</sup>	基于 SSA 模型开展散射计算	SSA 模型可以在一种理论框架下适应长、中、小尺度波数区间海面粗糙度下的散射计算

## 1.2 海面雷达电磁散射模拟计算

通过近似模型计算海面电磁散射,需要已知目标表面物理和几何特性,物理特性包括目标磁导率及介电常数,几何特性包括海表面斜率概率分布或海表面高度谱。前文研究中使用的 P - M 谱近似模拟了海面波频率谱随表面风速的变化,P - M 谱对充分发展的海面具有较好的模拟<sup>[18-19]</sup>,这些模型将探测表面描述为一种具有已知概率密度分布及相关方程的稳定的二维随机过程。遥感研究中首要获取小尺度粗糙表面高度谱,然而海面波长较短的波往往与长波同时存在,且受到长波的调制,因此,学者们先后发展出了多种描述整个波数区间的海面高度谱<sup>[20-22]</sup>。Bjerkaas - Riede 谱将波谱分为 4 个区间,分别用 P - M 谱描述重力波,用 Pierson 谱描述重力 - 短重力毛细波,用 Kitaigorodskii 及 Leykin - Rosenber 谱描述小重力波及重力毛细波,最后用 Cox 测量的斜率谱描述毛细波区间。Bjerkaas - Riede 谱的缺点在于需要 5 个参数来调整波谱区间之间的连续性,并且只能用于描述充分发展的海面波浪。Fung 等<sup>[23]</sup>将该谱简化到 2 个区间,分别适用 P - M 谱和 Pierson 谱描述重力波与重力 - 毛细波。Donelan - Pierson 谱也分为 2 部分,其中重力波采用 JONSWAP 谱,更短尺度的表面波通过风输入及黏性阻尼及波浪引起的局地耗散之间的平衡来推导。Apel 发展了一种简单的描述整个波浪区间解析模型来进行电磁散射计算,Elfouhaily 等在总结和分析了已有海面高度谱模型的基础上,提出了一种统一的高度谱,它将海面谱写为各向同性的能量谱与角扩展函数的乘积,其结果与 Cox 和 Munk 试验测量结果及实际遥感数据吻合度均较好<sup>[24]</sup>。

## 2 溢油阻尼散射遥感机制研究

### 2.1 海面油膜阻尼比研究

为了定量研究油膜的阻尼作用,学者们通过建立理想的物理模型以描述油膜覆盖的海面与雷达电磁波的相互作用关系,在此基础上,通过选择适当的物理海洋学模型来描述油膜对海洋表面的调制效果,从而进一步揭示油膜层的电磁特性。

海上油膜对小尺度海面波具有阻尼效应<sup>[25]</sup>,因而可在 SAR 影像上形成暗斑。不同种类油膜因其黏弹特性的不同具有不同的阻尼特性,油膜对海面短重力 - 毛细波的阻尼作用可以用 Marangoni 理论解释<sup>[26-27]</sup>。阻尼比 (damping ratio) 定量描述油膜对海浪谱的阻尼效应,Lombardini 等给出了油膜阻尼比的解析表达式,从而油膜覆盖海面的波浪谱可

以通过阻尼比与干净海面波浪谱相联系(表 2),通过现场微波测量有无油膜覆盖海面的波浪谱,模型计算与实际测量结果具有较好的一致性<sup>[28]</sup>。为了研究油膜的阻尼效应,学者们先后开展了多项海上或室内实验<sup>[29-38]</sup>。Gade 等<sup>[39]</sup>基于 Marangoni 理论将阻尼比定义为油膜覆盖海面与无油膜覆盖海面黏性阻尼系数的比值,给出了阻尼比近似表达式,并计算了 3 种油膜(OLA, OLME 和 TOLG)的理论阻尼曲线。学者们利用执行 SIR - C/X - SAR 任务期间的多次海上油膜实验及其他机载雷达散射计测量数据分析油膜阻尼与环境风速的关系,结果表明并不总是存在理论计算中的最大阻尼区间,油膜阻尼特性与风速大小存在较大关联。为了解释这种现象, Gade 等<sup>[40]</sup>提出必须在阻尼计算中考虑波动平衡方程各作用项的影响,该方程将海面波的传播能量分

解为风场输入项、非线性波 - 波相互作用及耗散项,而耗散项又进一步分解为粘性耗散项及风浪破碎作用项。Gade 和 Hasselmann 等学者<sup>[41-42]</sup>基于 Plant 等研究中给出的风场输入及粘性耗散项表达式,将油膜的理论阻尼比写成油膜覆盖海面与无油膜海面雷达后向散射截面的比值的形式的形式,并基于该公式定性分析了前文所述多次海上油膜测量实验中实测的油膜阻尼比,提出了不同种类油膜在中(5 m/s)、低(3.5~4 m/s)、高(12 m/s)等不同风速条件下的阻尼变化情况的理论解释,并给出了高风速(大于 10 m/s)海况下油膜阻尼比近似计算公式<sup>[43]</sup>。Er-makov<sup>[43]</sup>进一步给出了公式中阻尼系数模型以描述弹性油膜对表面重力毛细波的作用。Gambardella 在此基础上得出了微风及中等风速条件下海面油膜阻尼模型。

表 2 海面油膜阻尼研究与散射模拟计算主要研究  
Tab. 2 Study on oil spill damping and scattering simulation

作者及年份	模型、方法与主要成果	比较评价
Alpers 等, 1988 年 <sup>[25]</sup> Hühnerfuss, 1986 年 <sup>[27]</sup> Lombardini 等, 1989 年 <sup>[28]</sup>	选择适当的物理海洋学模型来描述油膜对海洋表面的调制效果,揭示油膜层的电磁阻尼特性 给出了油膜阻尼比的解析表达式	采用 Marangoni 理论解释了油膜对海面短重力 - 毛细波的阻尼作用 模型计算与实际测量结果具有较好的一致性
Gade 等, 1998 年 <sup>[39]</sup>	基于 Marangoni 理论将阻尼比定义为油膜覆盖海面与无油膜覆盖海面黏性阻尼系数的比值,给出了阻尼比近似表达式	计算了 3 种油膜(OLA, OLME 和 TOLG)的理论阻尼曲线
Wei 等, 1992 年 <sup>[36]</sup> Onstott 等, 1992 年 <sup>[37]</sup> Cini 等, 1978 年 <sup>[38]</sup> Gade 等, 1998 年 <sup>[40-41]</sup>	利用 SIR - C/X - SAR 任务期间的多次海上油膜实验及其他机载雷达散射计测量数据分析油膜阻尼与环境风速的关系。在阻尼计算中考虑了波动平衡方程各作用项的影响,将油膜的理论阻尼比写成油膜覆盖海面与无油膜海面雷达后向散射截面的比值的形式的形式	Gade 等基于阻尼比公式定性分析了多次海上油膜测量实验中实测的油膜阻尼比,提出了不同种类油膜在中(5 m/s)、低(3.5~4 m/s)、高(12 m/s)等不同风速条件下的阻尼变化情况的理论解释,并给出了高风速(大于 10 m/s)海况下油膜阻尼比近似计算公式
Ermakov 等, 1986 年 <sup>[34]</sup>	对阻尼比公式进行了发展	Ermakov 描述了弹性油膜对表面重力毛细波的作用, Gambardella 在此基础上得出了微风及中等风速条件下海面油膜阻尼模型

## 2.2 海面溢油 SAR 信号模拟

基于油膜阻尼理论, Franceschetti 等<sup>[44]</sup>在前人研究基础上,开展了海洋环境下溢油 SAR 原始信号模拟研究,采用分布式表面模型(distributed surface, DS)进行 SAR 原始信号仿真,对海面建模采用多尺度模型,并采用 Pierson 对海面建模采用多尺度谱描述小尺度海表面波,基于 Marangoni 理论及非线性能量传输理论,构建模型以表达海面存在油膜时油膜物理化学特性及海面风场对海面波谱的综合调制作用,给出了阻尼比率的公式表达,从而定量描述了油膜物理属性对海面波浪谱的阻尼作用。Timchenko 等<sup>[45]</sup>考虑波长较长的表面波对海面粗糙度的调制作用,在 SPM 模型基础上,提出了一种扩展到整个海面波谱区间的模型,通过数值模拟了油膜覆盖海面雷达后向散射衰减。Nicolas 等<sup>[46]</sup>以 Elfouhaily 统一海浪谱作为干净海面,利用 Lombardini 阻尼比,

计算油膜覆盖海面高度谱,从而分析油膜对海面均方根斜率的影响,进一步采用 PILE 模型模拟海面雷达后向散射界面,并与几何光学近似模型进行对比分析。Nunziata 等<sup>[47]</sup>在双尺度边界扰动模型框架下计算海面生物油膜散射对比度,对比 SPM 模型,发现 TSM BPM 模型能很好地解释和预测表面生物膜散射对比度。Ayari 等<sup>[48]</sup>基于 Lombardini 等阻尼比公式计算分析结果,选取 Elfouhaily 建立的统一海浪谱,结合 TSM 模型,分别计算了前向、后向及双基站配置下油膜覆盖海面雷达后向散射截面。Minchew 等<sup>[49]</sup>利用 L 波段 SAR 开展了深水地平线油并溢油极化散射分析,给出了极化阻尼比计算公式,利用 2 个航次多视无人机载 SAR 数据计算了油膜极化阻尼比。Ermakov 等<sup>[50]</sup>通过实验和数值模拟手段研究了油膜对重力毛细波的阻尼作用,利用重力毛细波相对阻尼系数计算公式计算了 3 种波长下不同油

膜厚度的阻尼系数,发现最大阻尼的油膜厚度在 0.3 ~ 1 mm 之间。

Kim 等<sup>[51]</sup>在前述研究基础上,利用微波散射模型和 Monte - Carlo 模拟分析了溢油覆盖海洋表面的雷达后向散射。在该研究中,对于给定的风速,用海洋波谱数值生成一维粗糙海面。然后通过模拟的粗糙海面上添加薄油层来产生双层介质。利用矩量法计算出具有双层介质的海面反向散射电场,并使用蒙特卡洛技术针对表面粗糙度、油层厚度、频率、极化和入射角的各种条件,对每个溢油表面的  $N$  个独立样品统计地获得后向散射系数。数值模拟结果与 2007 年河北省 Spirit 油轮引起海面溢油 SAR 图像进行了比较。此外,该方法还通过仿真不同入射角、不同风速及油层厚度下后向散射系数的影响来探寻溢油检测的最佳条件。

Zheng 等<sup>[52]</sup>在小扰动模型和传统的 TSM 模型的框架下,建立了理论模型模拟海面微波回波的极化参数特性,并将数值模拟结果与无人机载 L 波段全极化 SAR 影像进行比较,表明其理论模型可以用

来估算 25 ~ 60 行入射角下海面微波散射的极化特征。

Kim 等<sup>[51]</sup>在研究中通过采用与海面风浪区相关的波谱模型提高了 X 波段 SAR 后向散射系数仿真精度,以 Elfouhaily 和 Durden - Vesecky 为特征波浪谱,其中, Durden - Vesecky 谱适用于充分发展的海面,而 Elfouhaily 谱考虑风浪区尺度。基于这 2 个波浪谱,采用 Monte - Carlo 方法仿真产生一维随机粗糙表面,结合矩量法计算 SAR 后向散射系数,对比 2007 年河北(河北省) Spirit 油轮溢油 TerraSAR - X 影像,对充分发展海面与风浪区相关的 Elfouhaily 谱具有比 Durden - Vesecky 谱更好的一致性,研究表明该方法还可进一步发展以用于估算溢油量。

在考虑水深因素条件下,有学者提出了一种适合于浅海环境下溢油海面的仿真方法。该方法基于 Lombardini 建立的溢油海面海浪谱,使用 TMA 谱模型和 Marangoni 溢油理论模型,可用于浅海环境下海面溢油电磁散射计算及分析溢油对电磁散射的影响<sup>[53]</sup>。

表 3 海面溢油阻尼模拟计算主要研究

Tab. 3 Study on oil spill damping scattering simulation

作者及年代	模型方法	海面谱	成果比较
Franceschetti 等, 2002 年 <sup>[44]</sup>	分布式表面模型	P - M 谱	给出了阻尼比率的公式表达,定量描述了油膜物理属性对海面波浪谱的阻尼作用
Nicolas 等, 2006 年 <sup>[46]</sup>	PILE 模型	统一海浪谱	模拟了海面雷达后向散射截面,并与几何光学近似模型进行对比分析
Nunziata 等, 2009 年 <sup>[47]</sup>	双尺度边界扰动模型	全区间海面谱	能很好地解释和预测表面生物膜散射对比度
Timchenko 等, 2002 年 <sup>[45]</sup>	SPM 模型	扩展到整个海面波谱区间的模型	通过数值模拟了油膜覆盖海面雷达后向散射衰减
Ayari 等, 2010 年 <sup>[48]</sup>	TSM 模型	Elfouhaily 统一海浪谱	计算了前向、后向及双基站配置下油膜覆盖海面雷达后向散射截面
Kim 等, 2016 年 <sup>[51]</sup>	微波散射模型和 Monte - Carlo 模拟	一维粗糙海面	将数值模拟结果与 2007 年河北 Spirit 油轮引起海面溢油 SAR 图像进行了比较
Zheng 等, 2016 年 <sup>[52]</sup>	小扰动模型和传统的双尺度模型	理论模型模拟海面	数值模拟结果与无人机载 L 波段全极化 SAR 影像进行比较,表明其理论模型可以用来估算 25° ~ 60° 入射角下海面微波散射的极化特征
Kim 等, 2016 年 <sup>[51]</sup>	Mont - Carlo 方法和矩量法	Elfouhaily 谱、Durden - Vesecky 谱	对比 2007 年河北 Spirit 油轮溢油 TerraSAR - X 影像,对充分发展海面,Elfouhaily 谱具有比 Durden - Vesecky 谱更好的一致性
杨永红等, 2012 年 <sup>[53]</sup>	TMA 谱模型和 Marangoni 溢油理论模型	Lombardini (1989 年) 建立的溢油海面海浪谱	可用于浅海环境下海面溢油电磁散射计算及分析溢油对电磁散射的影响

### 3 目前研究的不足

对于溢油遥感监测,大多学者应用 SAR 卫星数据,在图像处理、极化分解等方面进行了溢油遥感信息提取的极化参数、分解等多种方法研究<sup>[54-56]</sup>,取得了一定的效果。在溢油的散射的小散射面研究方

面,利用小扰动模型对溢油与海水开展了定量研究,但方法均存在一定的局限性,难以满足应急业务的需要。溢油遥感监测机制在于溢油对海面的阻尼作用,上述研究在溢油阻尼等方面研究还不够深入,主要表现为以下 3 个方面:

1) 与实际海面波浪谱结合不紧密。通过后向散射来揭示溢油对于波浪的阻尼作用研究不够,针

对溢油与海水的后向散射,在后向散射的计算方面研究较多,但阻尼机制研究不多。

2) 阻尼的定量计算不够,基于后向散射开展溢油阻尼研究,获得了溢油与海水等后向散射,未能与现场结合,通过仿真来揭示溢油的阻尼特性,但溢油阻尼的定量关系揭示不够,尤其是阻尼随着油膜存在时间而发生的持续物理相态变化时阻尼水平相应变化的定量研究很少,现有方法并没有揭示溢油阻尼的定量特性,在溢油阻尼的定量关系方面急需深入研究。

3) 理论与业务应用的结合不足。目前研究溢油阻尼特性多针对理论或经验的海面谱模型,理论模型研究的溢油阻尼特性如何真实反映在 SAR 获取的实时海面谱上,油膜类型、厚度、生命期等造成的阻尼特性的变化对海面波浪谱和 SAR 探测配置条件有哪些定量化限定尚没有得到充分研究。

## 4 结论与建议

溢油散射为 Bragg 散射,以此为基础发展的算法已成为目前的主要算法,解决了溢油遥感探测问题,一定程度上满足了溢油遥感监测要求,但由于存在较多虚警,因而业务化程度不高。本文通过对近年来溢油散射研究的总结,认为采用极化分解与实验方法,建立极化分解模型进一步提高溢油的监测精度,需要在以下 4 方面做深入研究。

1) 理论海浪谱与实际海面分布相结合的阻尼特性研究。考虑溢油发生的不同时相状态,研究溢油与海水的物理特征,研究溢油作用下不同海洋环境场的海浪谱方程以及能满足 Bragg 散射的海浪谱表达式;以纯海水为阻尼基础,开展溢油对海洋毛细波阻尼的分子间脉冲作用力、弹性力、表面张力及粘滞系数等因素的分析,建立阻尼作用因子与阻尼之间的定量关系,进行实际波浪谱下溢油阻尼机制研究。

2) 开展有效介电常数的定量估算和散射模型的有效介质理论是研究溢油阻尼作用的一个重要基础。需要掌握模型的理论基础,被观测表面复介电常数的能力是改进和更好地理解散射模型和过程的有效工具。由于水(空气/水乳液)的物理变化,其应具有不同的介电性能,通过对介电常数的研究,结合海洋现场环境参数,可以更好地区分粗糙度效应和非偏振效应。同时为了全面地分析问题,必须进一步研究具有可变参数(采集几何、电磁频率)的采集数量,以进行从介电常数到溢油阻尼特征的研究。

3) 开展实际海况条件下 SAR 对溢油阻尼响应

机制的研究。开展小散射面微波散射特性的研究,从理论和数值模拟方面研究不同海况下海面风浪谱下 SAR 对溢油阻尼的定量响应水平,从而确定探测海洋表面溢油的最佳海况,考虑雷达波长、方位角、入射角、海面倾斜及倾斜海面纹波变化率等要素,研究不同参数下的海面微尺度散射特性。

4) 不同波段对溢油的阻尼作用存在不同,利用不同波段信息,获取多种极化与物理参数开展溢油阻尼研究是未来的一个重要研究方向。

## 参考文献(References):

- [1] 温艳萍,吴传雯.大连新港“连·16 溢油事故”直接经济损失评估[J].中国渔业经济,2013,31(4):91-96.  
Wen Y P, Wu C W. Direct economic loss assessment of “Lian 16 oil spill accident” in Dalian new port[J]. China Fisheries Economy, 2013, 31(4): 91-96.
- [2] 郭永峰,纪少君,唐长全.从美国政府墨西哥湾事故调查委员会组成得到的启示[J].石油知识,2011(4):58-59.  
Guo Y F, Ji S J, Tang C Q. Enlightenment from the composition of the Gulf accident investigation committee of the US government [J]. Petroleum knowledge, 2011(4): 58-59.
- [3] 国家海洋局.蓬莱 19-3 油田溢油事故联合调查组关于事故调查处理报告[R].2012.  
State Oceanic Administration. Report on accident investigation and handling by joint investigation group of oil spill accident in Penglai 19-3 oilfield [R]. 2012.
- [4] Gill E W, Walsh J. A perspective on two decades of fundamental and applied research in electromagnetic scattering and high frequency ground wave radar on the Canadian East Coast [C]//IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium. IEEE, 2002.
- [5] Hermansson P, Forssell G, Fagerström J. A review of models for scattering from rough surfaces [R]. Swedish Defence Research Agency Sensor Technology, 2003.
- [6] Rice O S. Reflection of electromagnetic waves from slightly rough surfaces [J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 2010, 4(2-3): 351-378.
- [7] Beckmann P, Spizzichino A. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces [M]. Norwood, MA, Artech House, Inc., 1987: 511.
- [8] Andre S. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces [M]. New York: Pergamon Press, 1963.
- [9] Ishimaru A. Wave propagation and scattering in random media [M]. New York: Academic Press, 1978.
- [10] Chen M F, Fung A K. A numerical study of the regions of validity of the Kirchhoff and small; Perturbation rough surface scattering models [J]. Radio Science, 1988, 23(2): 163-170.
- [11] Thorsos E I, Jackson D R. The validity of the perturbation approximation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1989, 86(1): 261-277.
- [12] Thorsos E I. The validity of the Kirchhoff approximation for rough

- surface scattering using a Gaussian roughness spectrum [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1988, 83 (1): 78 - 92.
- [13] Khenchaf A. Bistatic scattering and depolarization by randomly rough surfaces; Application to the natural rough surfaces in X - band [J]. Waves in Random and Complex Media, 2000, 11 (2): 61 - 89.
- [14] Voronovich A G. Small slope approximation in wave scattering by rough surfaces [J]. Sou Phys JETP, 1985, 62: 65 - 70.
- [15] Broschat S L. The small slope approximation reflection coefficient for scattering from a "Pierson - Moskowitz" sea surface [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31 (5): 1112 - 1114.
- [16] Thorsos E I, Broschat S L. An investigation of the small slope approximation for scattering from rough surfaces. Part I. Theory [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1995, 97 (4): 2082 - 2093.
- [17] Broschat S L, Thorsos E I. An investigation of the small slope approximation for scattering from rough surfaces. Part II. Numerical studies [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 101 (5): 2615 - 2625.
- [18] Pierson W J, Moskowitz L. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii [J]. Journal of geophysical research, 1964, 69 (24): 5181 - 5190.
- [19] Thorsos E I. Acoustic scattering from a "Pierson - Moskowitz" sea surface [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1990, 88 (1): 335 - 349.
- [20] Donelan M A, Pierson W J P. Radar scattering and equilibrium ranges in wind - generated waves with application to scatterometry [J]. J Geophys Res, 1987, 92: 4971 - 5029.
- [21] Bjerkaas A W, Riedel F W. Proposed model for the elevation spectrum of a wind - roughened sea surface [J]. Appl Phys Lab, 1979: 31.
- [22] Apel J R. An improved model of the ocean surface wave vector spectrum and its effects on radar backscatter [J]. Journal of Geophysical Geophys Research (Oceans), 1994, 99 (8): 16289.
- [23] Fung A K, Lee K K. A semi - empirical sea - spectrum model for scattering coefficient estimation [J]. IEEE J Oceanic Eng, 1982, 7 (4): 166 - 176.
- [24] Elfouhaily T, Charpon B, Katsaros K: A unified directional spectrum for long and short wind - driven waves [J]. JGR, 1997, 102: 15781 - 15796.
- [25] Alpers W, Hühnerfuss H. Radar signatures of oil films floating on the sea and the Marangoni effect [J]. J Geophys Res, 1988, 93: 3642 - 3648.
- [26] Alpers W, Hühnerfuss H, The damping of ocean waves by surface films: A new look at an old problem [J]. J Geophys Res, 1989, 94: 6251 - 6265.
- [27] Hühnerfuss H. The molecular structure of the system water/monomolecular surface film and its influence on water wave damping, Habilitationsschr., Fachbereich 13 (Chem.), Univ. Hamburg, Hamburg, Germany, 1986: 245.
- [28] Lombardini P, Fiscella B, Trivero P, etc. Modulation of the spectra of short gravity waves by sea surface films; slick detection and characterization with a microwave probe [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1989, 6: 882 - 90.
- [29] Garrett W D, Damping of capillary waves at the air - sea interface by oceanic surface - active material [J]. J Mar Res, 1968, 25: 279 - 291.
- [30] Hühnerfuss H, Alpers W, Cross A, et al. The modification of X and L band radar signals by monomolecular sea slicks [J]. J Geophys Res, 1983, 88: 9817 - 9822.
- [31] Hühnerfuss H, Alpers W, Garrett W D, et al. Attenuation of capillary and gravity waves at sea by monomolecular organic surface films [J]. J Geophys. Res, 1983, 88: 9809 - 9816.
- [32] Hühnerfuss H, Gericke A, Alpers W, et al. Classification of sea slicks by multi - frequency radar techniques: New chemical insights and their geophysical implications [J]. J Geophys Res, 1994, 99: 9835 - 9845.
- [33] Hühnerfuss H, Alpers W, Dannhauer H, et al. Natural and man - made sea slicks in the North Sea investigated by a helicopter - borne 5 - frequency radar scatterometer [J]. Int J Remote Sens, 1996, 17: 1567 - 1582.
- [34] Ermakov S A, Zujkova E M, Panchenko A R, et al. Surface film effect on short wind waves [J]. Dyn Atmos Oceans, 1986, 10: 31 - 50.
- [35] Wu J. Suppression of oceanic ripples by surfactant - spectral effects deduced from sun - glitter, wave - staff and microwave measurements [J]. J Phys Oceanogr, 1989, 19: 238 - 245.
- [36] Wei Y, Wu J. In situ measurements of surface tension, wave damping, and wind properties modified by natural films [J]. J Geophys Res, 1992, 97: 5307 - 5313.
- [37] Onstott R, Rufenach C. Shipboard active and passive microwave measurement of ocean surface slicks off the southern California coast [J]. J Geophys Res, 1992, 97: 5315 - 5323.
- [38] Cini R, Lombardini P P. Damping effect of monolayers on surface wave motion in a liquid [J]. J Colloid Interface Sci, 1978, 65: 387 - 389.
- [39] Gade M, Alpers W, Hühnerfuss H, et al. Wind wave tank measurements of wave damping and radar cross sections in the presence of monomolecular surface films [J]. J Geophys Res, 1998, 103: 3167 - 3178.
- [40] Gade M, Alpers W, Hühnerfuss H, et al. On the reduction of the radar backscatter by oceanic surface films: Scatterometer measurements and their theoretical interpretation [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 70 (66): 52 - 70.
- [41] 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.
- [42] Hasselmann K. Grundgleichungen der Seegangsvorhersage, Schiffstechnol [J]. 1960, 1: 191 - 195.
- [43] Gade M, Alpers W, Hühnerfuss H, et al. On the reduction of the radar backscatter by oceanic surface films: Scatterometer measurements and their theoretical interpretation [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 70 (66): 52 - 70.
- [44] Franceschetti G, Fellow L, et al. SAR raw signal simulation of oil slicks in ocean environments [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2002, 40 (9): 1935 - 1949.
- [45] Timchenko A I, Serebryannikov A E, Schuenemann K F. Model of

- electromagnetic wave scattering from sea surface with and without oil slicks [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2002, 37: 319 – 343.
- [46] Nicolas D, Beaucoudrey N D, Bourlier C, et al. Fast numerical method for electromagnetic scattering by rough layered interfaces: Propagation – inside – layer expansion method [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2006, 23(2): 359 – 369.
- [47] Nunziata F, Sobieski P, 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.
- [48] Ayari M, Coatanhay A, Khenchaf A. The influence of ripple damping on electromagnetic bistatic scattering by sea surface [J]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2010, 2: 1345 – 1348.
- [49] Minchew B, Jones C E, 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.
- [50] Ermakov S A, Sergievskaya I A, Gushchin L A. Damping of gravity – capillary waves in the presence of oil slicks according to data from laboratory and numerical experiments [J]. *Izvestiya Atmospheric & Oceanic Physics*, 2012, 48(5): 565 – 572.
- [51] Kim T H, Yang C S, Ouchi K. Accuracy improvement of the radar backscatter simulation from sea surface covered by oil slick using fetch – dependent waveheight spectrum: Comparison with the 2007 Heibei Spirit Case in the Yellow Sea [J]. *Ocean Science Journal*, 2016, 51(2): 235 – 249.
- [52] Zheng H, Zhang Y, Wang Y, et al. Theoretical study on polarimetric features of microwave scattering from sea surface [C] // 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), IEEE, 2016.
- [53] 杨永红, 徐平, 林明. 浅海环境下溢油海面的仿真 [J]. *海洋通报*, 2012, 31(6): 636 – 639.  
Yang Y H, Xu P, Lin M. Simulation of sea surface with oil slick in the shallow sea environment [J]. *Marine Science Bulletin*, 2012, 31(6): 636 – 639.
- [54] Zou Y R, Shi L J, Zhang S L, et al. Oil spill detection by a support vector machine based on polarization decomposition characteristics [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(9): 86 – 90.
- [55] Ivanov A Y, Filimonova N A, Kucheiko A Y, et al. Oil spills in the Barents Sea based on satellite monitoring using SAR; Spatial distribution and main sources [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017: 1 – 15.
- [56] Dutta S, Joseph M, Kumari E V S S. Automated approach for extraction of oil spill from SAR imagery [J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2018(5): 1 – 7.

## Progress in remote sensing detection of oil spill damping mechanism

LIU Yufang<sup>1</sup>, ZOU Yarong<sup>2,3</sup>, LIANG Chao<sup>2,3</sup>

(1. *PIESAT Information Technology Company, Beijing 100195, China*; 2. *National Ocean Satellite Application Center, MNR, Beijing 100081, China*; 3. *Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China*)

**Abstract:** Oil spill is one of the main sources of pollution to the marine environment. Early monitoring of oil spill is very important for marine environment protecting. In this paper, the calculation of radar backscattering based on the wave spectrum was carried out, and a review of the study of the damping ratio of wave spectrum in consideration of the films characteristics, water molecular tension, elastic model and surface tension was carried out. The problem of insufficient research on the damping of the oil spill remote sensing monitoring with the wave spectrum and the quantitative calculation of the damping was discussed. The research on the damping of the oil spill for remote sensing monitoring in the future may be based on the backscattering characteristics of the real ocean wave spectrum under the cover with oil slicks. The research on radar coefficient calculation can provide support for quantitative analysis of the damping characteristics of oil spills, thus improving the accuracy of oil spill remote sensing monitoring.

**Keywords:** oil spill; damping mechanism; remote sensing detection; progress

(责任编辑: 李瑜)