DOI:10.19789/j.1004-9398.2016.04.013

基于 SAR 影像的海洋溢油监测方法适用性分析*

姚 骐[1] 常占强[1] 付茂新[2] 敖祖锐[1] 赵 超[1]

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院三维信息获取与应用教育部重点实验室,北京 100048;
2. 北京华油鑫业工程技术有限公司,北京 100011)

摘 要

随着微波遥感技术的迅猛发展,利用 SAR 影像提取海洋溢油区域已成为监测海洋溢油的重要手段之一. 首先介绍了利用 SAR 影像监测海洋溢油的基本原理并对主要监测方法进行适用性分析. 在此基础上,利用 SAR 影像对珠江口担杆岛附近海面进行了海洋溢油的提取实验,并从提取精度与算法的消耗时间两个方面对各种监测方法对比分析. 实验结果表明: 人工神经网络法和最大类间方差法的提取结果较为接近,适用于大范围溢油监测. 而马尔柯夫链法算法消耗时间长,但精度较高,更适用于实时监测溢油扩散这样的随机过程.

关键词: SAR 影像,海洋溢油,人工神经网络法,最大类间方差法,马尔柯夫链模型法.
中图分类号: X834

0 引 言

海洋是生命的摇篮,海洋环境对人类的生存和发展具有重要的意义. 然而,近年来随着海洋环境的开发,海洋污染愈发严重,其中,海洋溢油污染无论在发生频率、分布广度,还是在危害程度上均居首位. 海洋溢油通常由各类事故引起,如轮船的碰撞、翻船、海上油井和输油管道的破裂、海底油田泄漏等. 随着世界海洋运输业的发展和海上油田不断投入生产,溢油事故不断增加,这往往会造成大面积海洋溢油污染. 不但使自然环境、生态资源受到损害,造成海洋生物大量死亡,而且严重危害人体健康. 同时,溢油事故引发的火灾,还可能会导致海上和沿岸设施、船舶等的损坏,使经济蒙受巨大损失[1-3].

在合成孔径雷达技术(Sythentic Aperture Radar,SAR)出现之前,可见光与热红外波段被广泛应用于海洋溢油监测,但是这两种波段容易受到恶劣天气环境的影响,监测的效果往往并不理想[4-7]. 随着微波技术的出现以及成熟,海洋监测拥有了一条更为广阔的出路. 微波以其波长较长,穿透力较好,受天气干扰较弱等优势获得了广泛关注,并有学者从探测的物理方法和原理上证明了利用其探测海面油膜,进行海洋溢油监测的可能性[8].

1 利用 SAR 影像监测海洋溢油基本原理及主要方法

海洋溢油区域在 SAR 影像上的成像机制是: 附着在海面上的油膜对海面波产生阻尼,减少了被油膜覆盖的海洋表面粗糙度,抑制了海洋表面风产生的短重力毛细波,从而减弱了雷达接收后向散射回波信号强度,在 SAR 影像上形成相对周边背景较暗的低散射区. 在形状上主要以较暗或黑色的斑块状和条带形式出现. 条带状油膜一般较细,受风或潮流等影响有时会出现轻微弯曲或者不连续的现象,但少有分支,在油膜附近通常可以看到亮点.

对于入射角在 20° ~ 70°之间的雷达入射波,传感器接收的海面雷达后向散射以 Bragg 散射为主. 由于表面油膜的厚度小于雷达在海水中的穿透深度,Bragg 系数不受表面油膜存在的影响. 因此,表面油膜对海洋表面波的衰减作用可以通过无油膜覆盖海面的雷达后向散射系数 O^0_{sea} 与油膜覆盖海面的雷达后向散射系数 O^0_{oil} 的比值来衡量,表面油膜对雷达后向散射系数的衰减作用随 Bragg 系数、油粘性和油层厚度的增加而相对增加. 在相同海况条件下,轻质油油膜在 C 波段对海面波产生约 4 dB 的衰减作用,而重质油油膜产生约 10 dB 的衰减作用. 因

收稿日期: 2014-06-01
* 北京市自然科学基金(No. 8142009)与首都师范大学教改重点项目(20141012)联合资助

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

此,在相同海况、相同油种情况下,同次成因形成的表面油膜的雷达后向散射特征变化可以反映油膜厚度的相对变化趋势,油膜越厚,对海面波的衰减作用越强.

SAR 对表面油膜的监测能力与海面风速密切相关. 海洋表面需要具有一定粗糙度,使表面油膜对海洋表面波的抑制作用得以体现. 风速过低时,海洋表面不能形成短重力毛细波,在雷达图像上呈暗区反映,无法监测到表面油膜. 风速过大时,一方面海洋表面短波获得足够能量克服表面油膜的抑制作用;但另一方面,海洋上层湍流作用使油膜破碎或下沉. 同样监测不到表面油膜. 3 ~ 6 m/s 的风速是比较理想的监测条件. 利用 SAR 影像监测海洋表面油膜的风场上限在 10 ~ 14 m/s 之间. 因此在日常研究中需要结合风场数据分析溢油的发生与扩散.

基于前文所述的溢油监测原理,各国科学工作者开展了大量研究,提出了多种溢油监测方法[9-11],其中最具有代表性的有:人工神经网络算法、最大类间方差法及马尔柯夫链模型法. 这三种方法各具特色,应用条件不尽相同,为了进一步分析其适用性,有必要进行深入研究.

2 监测海洋溢油主要方法的适用性分析

2.1 人工神经网络算法

人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)是一种旨在模仿人脑结构及功能的信息处理系统,反映了人脑功能的若干基本特征. 人工神经网络是由大量具有简单信息处理功能的节点(神经元)所组成. 每个节点能向邻近的节点发出激活或抑制信号,通过节点间的相互作用,实现整个网络的信息处理. 人工神经网络在解决复杂的或是非线性问题时,具有独到的功效. 在众多的神经网络结构中应用最普遍,并且效果也较好的是 BP 神经网络模型(反向传播学习算法人工神经网络). 其原理过程如下:

1) 随机给定隐层神经元和输入层神经元的初始权值.

2) 由给定样本输入 $X_i^{(p)}$,确定隐层实际输出 $a_j^{(p)}$,令隐层阈值 $\theta_j = W_{nj}, X_n = -1$. 则有:

$$a_j^{(p)} = f\sum_{i=0}^{p} W_{ij}(n)\, y_i(n) \tag{1}$$

计算输出层与隐层间的权值 V_{jr},以输出层的第 r 个神经元为对象. 由给定输出目标值 $t_r^{(p)}$ 作为等式结果建立方程. 该方程可表示为:

$$\begin{cases} a_0^{(1)} V_{1r} + a_1^{(1)} V_{2r} + \cdots + a_m^{(1)} V_{mr} = t_r^{(1)} \\ a_0^{(2)} V_{1r} + a_1^{(2)} V_{2r} + \cdots + a_m^{(2)} V_{mr} = t_r^{(2)} \\ \vdots \\ a_0^{(p)} V_{1r} + a_1^{(p)} V_{2r} + \cdots + a_m^{(p)} V_{mr} = t_r^{(p)} \end{cases} \tag{2}$$

3) 重复步骤 2 获得权矩阵

人工神经网络算法的优势在于评估时间短,时效性强,可以避免人为干扰;而其劣势在于收敛速度慢,不能保证收敛到全局最小点,及网络学习、记忆的不稳定性.

2.2 最大类间方差法

最大类间方差法是由日本学者大津于 1979 年提出的. 其基本思想是对像素进行分类. 通过分类使得类与类之间的方差达到最大,而本类内的像素的方差最小,进而来确定分割两类物质合适的阈值. 假设一幅灰度级总数为 M 的原始图像,像素总数为 N,灰度级为 i 的像素点的个数为 n_i. 则各灰度出现概率为:

$$p_i = \frac{n_i}{N} \tag{3}$$

设分割阈值为 t,将图像按灰度值分为两类. 一类是取值范围在 $0 \sim t$ 之间的 A 类. 一类是取值范围在 $(t+1) \sim (M-1)$ 之间的 B 类. 则 A、B 出现概率分别为 $\omega_A = \sum_{i=0}^{t} p_i$、$\omega_B = \sum_{i=t+1}^{M-1} p_i$. 它们的平均灰度为:

$$\mu_A = \frac{1}{\omega_A}\sum_{i=0}^{t} i p_i \tag{4}$$

$$\mu_B = \frac{1}{\omega_{Bi}}\sum_{i=i+1}^{M-1} p_i \tag{5}$$

全图平均灰度为:

$$\mu = \sum_{i=0}^{M-1} i p_i = \omega_A \mu_A + \omega_B \mu_B \tag{6}$$

此时类间方差为:

$$\begin{aligned} \sigma_t^2 &= \omega_A(\mu_A - \mu)^2 + \omega_B(\mu_B - \mu)^2 \\ &= \omega_A^* \omega_B^* (\mu_A - \mu_B) \end{aligned} \tag{7}$$

由此可以推断出,当灰度为 t 时,类间方差值最大,以此为阈值进行分割可取得比较理想的结果.

2.3 马尔柯夫链法

马尔柯夫过程(Markov processes)是这样一类随机过程:t 时刻研究事物的状态转移只和前一时刻 $t-1$ 的状态有关,而与过去 $t-2$,$t-3$,…时的状态无关. 这种状态转移过程是无后效性的. 而马尔柯夫链就是时间离散、状态离散的马尔柯夫过程. 在实际应用中,马尔柯夫链算法既适用于时间序列,也适

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

用于空间序列. 在一个马尔柯夫链中,系统从 t 时刻的一种状态 E_i,发展变化到 $t+1$ 时刻的另一种状态 E_j,这种状态变化的可能性称为状态转移概率,从状态 E_i 到状态 E_j 的转移概率 $P(E_i \rightarrow E_j)$ 等同于在状态 E_i 下 E_j 发生的概率,即条件概率 $P(E_i/E_j)$. 表示如下:

$$P(E_i \rightarrow E_j) = P(E_i/E_j) = P_{ij} \tag{8}$$

某一被研究对象的状态转移概率矩阵可表示如下:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11}^{(m)} & p_{12}^{(m)} & \cdots & p_{1j}^{(m)} \\ p_{21}^{(m)} & p_{22}^{(m)} & \cdots & p_{2j}^{(m)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{i1}^{(m)} & p_{i2}^{(m)} & \cdots & p_{ij}^{(m)} \end{bmatrix} \tag{9}$$

其中,$P_{ij}^{(m)}$ 表示从状态 E_i 经过 m 次转移最终转换为状态 E_j 的状态转移概率.

若已知转移概率矩阵 P 和初始状态 E_i,则可建立马尔柯夫链. 进而对溢油进行监测,获得溢油区域信息.

综上所述,最大类间方差法是较为便捷的方法,不需要像人工神经网络法和马尔柯夫链法一样分别建立权矩阵和转移矩阵,只需要依据出现概率计算方差即可进行分类提取,较其它两种方法更为便捷. 人工神经网络法需要先训练样本,在得到权矩阵和方差之后再进行分类,这会增加算法的消耗时间. 而马尔柯夫链需要建立转移矩阵,再通过转移矩阵对研究区域进行分类提取,因此算法消耗时间较长,但同时能更加精确的提取溢油边界,以获得更好的监测提取结果.

3　溢油提取实例及对比分析

2004 年 12 月 7 日晚 21 点 35 分,两艘外籍万吨级集装箱船在珠江口担杆岛东北约 8 海里处发生强烈碰撞,造成大量石油泄漏. 本文选取该地区 2005 年 1 月 19 日的 ENVISATASAR 影像. 分别利用上文所述的三种方法对影像进行处理,提取海洋溢油信息,并从提取精度与算法的消耗时间两个方面对方法进行了对比,得到原图及结果图如图 1 – 4 所示. 图 1 是经过几何校正与增强型 Lee 滤波处理过的原始图像. 图 2 是使用了人工神经网络算法后得到的溢油区域图像,图中黑色部分是溢油区域,白色部分为非溢油区域. 可以看出溢油区域基本被提取出来,白色部分是非溢油区,但中间仍存在误分类的部分,该部分是原图的陆地区域. 而该部分的误分类也是其分类不准确的原因所在. 图 3 是使用最大类间方差法得到的结果图,图中纯黑色部分为溢油区域,黑色部分为陆地,白色部分为非溢油区域. 图中可以明显看出陆地区域、海洋非溢油区域和溢油区域,分类效果明显,与原图较为吻合. 图 4 是使用马尔柯夫链法得到的结果图,图中白色部分为溢油区域,黑色部分为非溢油区域,中间的灰色部分为陆地. 图中可以明显看出溢油与非溢油区域的分界线,即白色与黑色、灰色的边界. 这体现了马尔柯夫链边界提取的优势. 图中灰色部分也较为准确的反映了陆地区域的边界. 分类效果良好,而准确提取各部分边界也为溢油提取的精确性提供了保证.

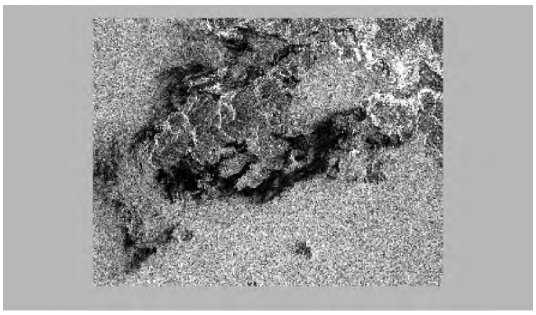


图 1　经过几何校正及滤波的原始图像

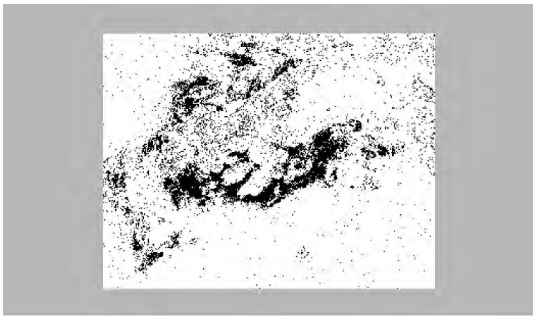


图 2　人工神经网络方法结果图

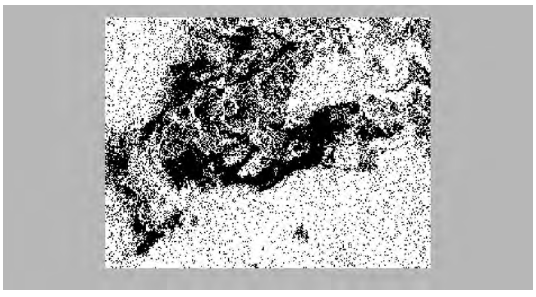


图 3　OTSU 方法结果图

各个分类方法对应的提取精度及算法消耗时间的对比情况见表 1 所示.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

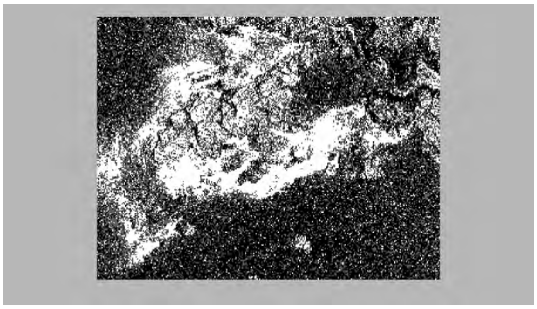


图 4 马尔柯夫链法结果图

表 1 不同方法性能对比

监测方法	提取精度 /%	算法消耗时间 /s
人工神经网络法	74	22.8
最大类间方差法	78	2.5
马尔柯夫链法	80	135.2

由上表可见,人工神经网络法速度较慢,这主要是由于建立神经网络所消耗的时间较多导致的,其精确度也相对较低. 最大类间方差法相较于人工神经网络法,在精度与算法消耗时间上都占据优势. 马尔柯夫链法消耗时间最长,但精确度也最高,这是由于马尔柯夫链需要建立转移矩阵,确保边界选择的精确性而导致的. 由此可见,选择适当的方法对溢油区域进行提取十分重要. 在实际应用中,应综合考虑研究区的环境条件以及算法消耗的时间,提取精度等,确定最佳的提取方法.

4 讨论与结论

本文在介绍了目前用于海洋溢油的三种主要监测方法并对其适应性进行了系统分析. 在此基础上,利用 ASAR 影像对珠江口担杆岛附近海面进行了海洋溢油的提取实验,进而从提取精度与算法消耗时间两个方面对各种监测方法进行对比分析. 主要结论如下:

1) 最大类间方差法以其提取时间较短的优势,在前期大面积溢油区域判定时,可为决策者提供帮助,但需要考虑其提取精度不高的缺陷;

2) 马尔柯夫链法以其在边界提取方面的精确性,可以在后期进行搜救和实时监测、处理溢油污染时发挥重要的作用,但同时还需要考虑到其消耗时间较长的劣势.

尽管当前理论和模型在海洋溢油的监测方面发挥了重要的作用,但仍存在许多不足之处,今后应考虑在以下几个方面有所进展:

1) 多源多时相遥感数据融合,提高监测的正确性,同时可以发挥各自的优势,对溢油污染监测的不同指标进行实时动态的监测.

2) 改进与完善溢油监测算法,集中目前各个算法的优势,使溢油提取的过程和结果更加高效准确.

3) 完善海上溢油监测系统,实现溢油监测所有环节的系统集成以及遥感数据的实时融合,进而提高溢油监测的时效性.

相信随着观测手段的完善,海洋溢油监测将会朝着更快速、更精确的方向迈进,以应对日益增大的海洋溢油事故风险,保护脆弱的海洋生态环境和我们人类赖以生存的家园.

参 考 文 献

[1] Marghany M. RADARSAT automatic algorithms for detecting coastal oil spill pollution [J]. Asian Journal of Geoinformatics,2001,3(2):191 – 196.

[2] Trivero P,Fiscella B,Gomez F,et al. SAR detection and characterization of sea surface slicks [J]. International Journal of Remote Sensing,1998,19(3):543 – 548.

[3] 李树华. “威望”号油轮溢油事故及其在国际社会引起的强烈反响 [J]. 交通环保,2003,24(1): 36 – 42.

[4] 安居白,张永宁. 发达国家海上溢油遥感监测现状分析 [J]. 交通环保,2002,23(3):28 – 30.

[5] 张永良,褚绍喜,富国. 溢油污染数学模型及其应用研究 [J]. 环境科学研究,1991,4(3): 8 – 9.

[6] Sebastiao P,Guedes-Soares C. Modeling the fate of oil spill at sea [J]. Spill Science & Technology Bulletin,1995,2(2): 121 – 131.

[7] 杨红,洪波,陈莎. 海洋溢油模型及其应用研究进展 [J]. 海洋湖沼通报,2007,2(2): 157 – 160.

[8] 李栖筠,陈维英,肖乾广. 老铁山水道漏油事故卫星监测 [J]. 环境遥感,1994,9(4):256 – 262.

[9] 张永宁,丁倩,高超,等. 油膜波谱特征分析与遥感监测溢油 [J]. 海洋环境科学,2000,19(3):5 – 10.

[10] 严志宇,熊德琪,段佩海. 海上溢油风化模型评述 [J]. 大连海事大学学报,2001,27(4): 36 – 38.

[11] Daniel P. AEGEAN SEA 号油轮溢油的数值模拟 [J]. 交通环保,1995,16(6): 45 – 46.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Analysis on Adaptability of Monitoring Methods for Oil Spill by Using SAR Imagery

Yao Qi[1]　Chang Zhanqiang[1]　Fu Maoxin[2]　Ao Zurui[1]　Zhao Chao[1]

(1. Key Lab of 3D Information Acquisition and Application, MOE, College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing　100048; 2. Beijing Huayou Senior Engineering Supprvision CO., LTD, Beijing　100011)

Abstract

With the rapid development of microwave remote sensing, SAR technology has provided an effective way for monitoring oil spill. In this paper, we introduced the basic principle of monitoring oil spill by using SAR images. On the basis of that, we systematically analyzed the applicability of various methods for monitoring oil spill by using SAR images. The conclusion shows that the artificial neural network and the threshold method have the advantages of timeliness and efficiency in oil spill monitoring, while Markov Chain method has great development potential due to its capability in reducing the effect of internal ocean wave.

Key words: SAR imagery, marine oil spill, ANN method, OTSU method, Markov Chain method.

作者简介　姚骐(1990 –),男,首都师范大学资源环境与旅游学院,硕士研究生,主要研究方向为微波遥感. E-mail: 642493570@qq.com.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net