

引用格式: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):-.
[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):-.]

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

段 冰^{1,2}, 种劲松¹

(1. 中国科学院电子学研究所微波成像技术重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:海洋表面矿物油膜、生物油膜等在 SAR 图像上都呈现为暗色特征,使得单极化 SAR 图像对矿物油膜和生物油膜的区分存在困难。分析了矿物油膜和生物油膜后向散射系数的极化比,提出一种基于交叉极化比的多极化 SAR 图像矿物油膜和生物油膜的区分方法,并用 SIR-C 多极化数据验证了该方法的有效性。

关 键 词:极化;合成孔径雷达;油膜

中图分类号:TN 958; TP 75 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2013)01-0-05

1 引 言

每年海洋水体都遭受着大量来自轮船排污、运油船只泄漏等污染,人类生存的最后一片净土正受到威胁。因此,及时获取海洋表面油膜信息,对保护海洋环境、降低打捞成本以及保护全球生态环境具有重要意义^[1]。合成孔径雷达(SAR)由于其全天时、全天候、覆盖面积大等优点,应用于海洋表面油膜监测,利于及时发现溢油,对保护海洋环境、全球生态环境具有重要意义。油膜对海洋表面波具有抑制和平滑作用,导致 SAR 接收到的后向散射回波减弱,反映在 SAR 图像上油膜区域表现为暗色斑块特征。星载 SAR 已经广泛应用于油膜污染的信息获取。如挪威的 KSAT 成功地应用 ERS、RADARSAT、ENVISAT 等卫星数据找到可能存在溢油的地点。

SAR 图像油膜应用一般包括油膜检测、油膜特征提取以及油膜目标的区分^[2]。其中,油膜目标区分的目的是区分矿物油膜和似油膜。产生矿物油膜的来源包括船只、精炼厂、油港、工业工厂、石油平台

的排放和泄露以及海底渗漏的石油等^[3]。似油膜指在 SAR 图像上与矿物油膜同样表现为暗色区域,但实际不是矿物油膜造成的一些现象,如生物油膜(由鱼类和一些藻类植物分泌的有机物质形成的表面油膜)^[1]、低风速区等。本文的主要目的是区分矿物油膜和生物油膜。基于单极化 SAR 灰度图像的强度信息和暗区的形状进行油膜区分存在许多困难,而使用多极化信息进行区分,则提供了较好的可能^[4]。

1998 年, Gade 等^[5]进行了多波段多极化 SAR 的油膜区分研究,但只是得到了多波段区分油膜的结论,并未研究如何利用多极化进行油膜区分。2007 年, Migliaccio 等^[4]认为在某些情况下可以用极化分解的方法区分矿物油膜和生物油膜。此后,学者们提出基于 Mueller 矩阵^[6]、基于共极化相位差^[7]、基于极化度^[8]等方法区分矿物油膜和生物油膜。但是基于 Mueller 矩阵的方法受噪声影响太大,基于共极化相位差的方法对于已有的 SIR-C 油膜数据不完全适用,而基于极化度的方法比较复杂。

本文分析了 SIR-C 数据矿物油膜和生物油膜

收稿日期:2011-10-22;修订日期:2012-06-08

基金项目:微波成像技术国家重点实验室基金支持(9140C1901030901)。

作者简介:段 冰(1987—),男,河南平顶山人,硕士研究生,主要从事极化 SAR 在海洋中的应用研究。E-mail:gloryeagle@163.com。

通讯作者:种劲松(1969—),女,北京人,博士,研究员,主要从事遥感图像信息处理、合成孔径雷达图像应用等方面的研究。

E-mail:lily@mail.ie.ac.cn。

后向散射系数的极化比,提出一种基于交叉极化比的油膜区分方法,并用 SIR-C 多极化数据验证了该方法的有效性。本文是第一次提出用基于极化比的方法区分油膜的,此方法是极化 SAR 在海洋的一个应用。

2 基于交叉极化比的矿物油膜和生物油膜的区分方法

SAR 海洋表面后向散射系数由 Bragg 波(σ_b)和非 Bragg 波(σ_{nb})引起。因此,总的海面后向散射系数可以表示为^[9]:

$$\sigma^p = \sigma_{obr}^p (1 + j^p \overline{\xi^2}) + \sigma_{nb} \quad (1)$$

其中:

$$\sigma_{obr}^p = B(k_b) T^p(\theta) \quad (2)$$

$$T_p = \pi \sin^{-4} \theta G^p(\theta) \quad (3)$$

$$B(k_b) = k_b^4 S(k_b, \varphi) \quad (4)$$

$$j^p = \frac{\sigma_{obr}^p}{2} \frac{\partial^2 \sigma_{obr}^p}{\partial \theta^2} \quad (5)$$

其中: p 表示极化方式(HH、HV、VH或VV), σ_{obr} 表示 Bragg 散射, θ 为雷达入射角, k_b 为 Bragg 波数, $G^p(\theta)$ 为依赖于入射角的系数, $S(k_b, \varphi)$ 为海面波高的波数谱, φ 为雷达方位向和风向的夹角, j^p 为几何系数, ξ^2 为调制 Bragg 波长波斜率的平方均值^[10]。非 Bragg 波分量 σ_{nb} 由镜面反射 σ_{sp} 和破碎波浪反射 σ_{wc} 组成^[10]。

在海面后向散射系数表达式中,海洋表面油膜对 $B(k_b)$ 具有强烈的抑制作用;系数 T^p 和 G^p 仅仅依赖于入射角的变化;矿物油膜和生物油膜对长波的斜率 ξ^2 和非 Bragg 波分量的镜面反射 σ_{sp} 以及破碎波浪反射 σ_{wc} 影响很小,在这里可以忽略,从而海洋表面油膜对后向散射系数的影响体现为对 Bragg 波分量 $B(k_b)$ 的抑制^[10]。海洋表面油膜抑制后向散射的 Bragg 波分量而非 Bragg 波分量保持不变,以及矿物油膜和生物油膜的 Bragg 波分量的抑制大小不同,由此分析 HH 极化和 HV 极化海洋表面油膜对海洋表面后向散射系数的影响,找到区分矿物油膜和生物油膜的特征量。

定义油膜对海面的衰减为:

$$d^p = \frac{\sigma_f^p}{\sigma_{ocean}^p} \quad (6)$$

其中: p 表示极化方式, σ_f 为油膜(矿物油膜或生物油膜)区域的海面后向散射系数, σ_{ocean} 为无油膜区域的海面后向散射系数。

定义 HH 对 HV 的极化比为:

$$d = \frac{d^{HH}}{d^{HV}} = \frac{\sigma_f^{HH}/\sigma_{ocean}^{HH}}{\sigma_f^{HV}/\sigma_{ocean}^{HV}} \quad (7)$$

定义基于交叉极化比的特征量 C_f (油膜区域的极化比)和 C_o (无油膜区域的极化比)为:

$$C_f = \frac{\sigma_f^{HH}}{\sigma_f^{HV}} \quad (8)$$

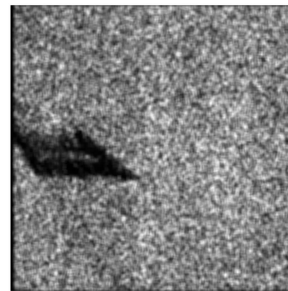
$$C_o = \frac{\sigma_{ocean}^{HH}}{\sigma_{ocean}^{HV}} \quad (9)$$

则:

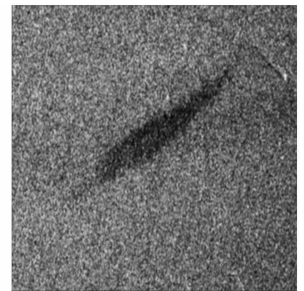
$$d = \frac{C_f}{C_o} \quad (10)$$

本节列举了 4 幅 SIR-C 油膜图像(图 1 和图 2)对 C_f 和 C_o 进行分析。其中,图 1(a) 和 1(b) 中的暗色区域是矿物油膜,图 2(a) 和 2(b) 中的暗色区域是油醇膜(OLA,其为油醇所形成的单分子表面膜,可以模拟生物油膜),这些油膜数据的详细信息如表 1 所示^[5]。

表 1 给出了 2 幅矿物油膜和 2 幅油醇膜图像 C_f 和 C_o 的值(从油膜区域和非油膜区域各选择一块数据进行计算)。其中,矿物油膜 C_f 均值分别为 0.92 和 1.12, C_o 均值分别为 0.95 和 1.08;油醇膜 C_f 均值分别为 1.42 和 1.64, C_o 均值分别为 0.88 和 0.96。通过比较得出:矿物油膜和油醇膜 C_f 和 C_o 差的绝对值相差较大(表 1),因而可以通过比较 C_f 和 C_o 区分矿物油膜和生物油膜。



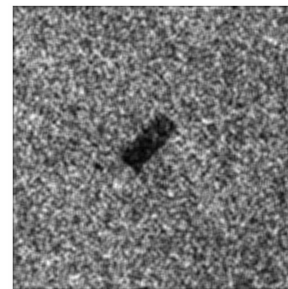
(a) 矿物油膜区域1



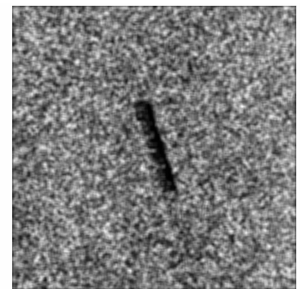
(b) 矿物油膜区域2

图 1 矿物油膜的 HV 极化 SAR 图像

Fig. 1 SAR HV-pol image of mineral oil



(a) 油醇膜区域1



(b) 油醇膜区域2

图 2 油醇膜(OLA)的 HV 极化 SAR 图像

Fig. 2 SAR HV-pol image of OLA

表 1 L 波段 SIR-C 数据表
Table 1 L-band SIR-C data set

文中编号	SIR-C 编号	时间	波段	地区	油膜类型	C_f 均值	C_o 均值	$ C_f - C_o $
图 1(a)	PR49936	1994/10/02	L 波段	阿尔及利亚	矿物油膜	0.92	0.95	0.03
图 1(b)	PR49938	1994/10/08	L 波段	英吉利海峡	矿物油膜	1.12	1.08	0.04
图 2(a)	PR41369	1994/10/01	L 波段	太平洋(日本)	油醇膜	1.42	0.88	0.54
图 2(b)	PR11585	1994/04/09	L 波段	太平洋(日本)	油醇膜	1.64	0.96	0.68

根据表 1 的分析结果,当 f 表示矿物油膜时($f = \text{mineral oil}$) C_f 的值接近 C_o ,当 f 表示油醇膜时($f = \text{OLA}$) C_f 的值高于 C_o 。因此,给出矿物油膜与生物油膜的区分方法:

$$C = \begin{cases} 0 & C_f \leqslant kC_o \\ 1 & C_f > kC_o \end{cases} \quad (11)$$

当 C 值为 0 时,判定为矿物油膜, k 为常数($1 < k < 2$)。此时可利用已有数据求出 k 值,定义判定准则如式(12)所示:

$$J = \left| \sum ((-1)^i |C_f - kC_o|) \right| \quad (12)$$

当 $f = \text{mineral oil}$ 时, i 取值为 0,当 $f = \text{OLA}$ 时, i 取值为 1, k 值的选取准则为使得式(12)的值最小。把表 1 中相应的 C_f 和 C_o 的值代入式(12),得到 J 随 k 值的变化如图 3 所示,当 J 值最小时 k 值大约为 1.3,因此式(12)中 k 取为 1.3。

图 4 给出了油膜检测的流程图,其中油膜检测算法和油膜特征提取在文献[1]中已有详细的介绍,这里不再赘述。

3 实验验证

在本节中选取另外 4 幅 SIR-C 多极化数据(包括 2 幅矿物油膜和 2 幅 OLA 数据)对本文提出的油膜区分方法进行验证分析,实验结果如表 2 所示。

表 2 方法验证数据表

Table 2 Algorithm validating data set

编号	时间	类型和波段	油膜类型	C_f 均值	C_o 均值	区分结果($k=1.3$)
PR17040	1994/04/11	MLC L 波段	矿物油膜	1.08	1.06	$C_f \leqslant kC_o$, 矿物油膜
PR44326	1994/10/01	MLC L 波段	矿物油膜	1.37	1.32	$C_f \leqslant kC_o$, 矿物油膜
PR11438	1994/04/16	MLC L 波段	油醇膜	1.78	0.91	$C_f > kC_o$, 生物油膜
PR11587	1994/04/15	MLC L 波段	油醇膜	1.43	0.94	$C_f > kC_o$, 生物油膜

3.1 矿物油膜实验

实验 1 中 SAR 数据获取的时间为 1994 年 4 月 11 日,10:49:28 UTC(编号 PR17040),地点为德国北海,风速为低到中等。如图 5(a)所示,可以看到 HV 极化图中存在 2 块油膜,分别在每块油膜的左

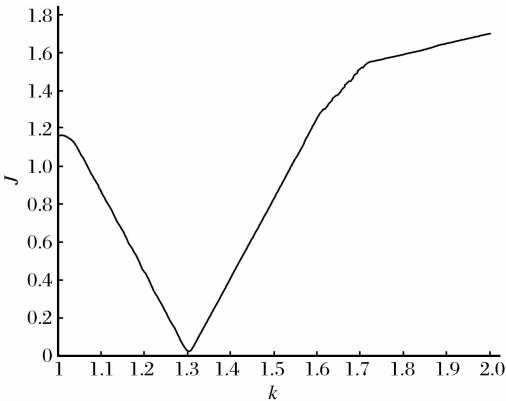


图 3 J 值随 k 变化曲线
Fig. 3 J-value variation curve with k

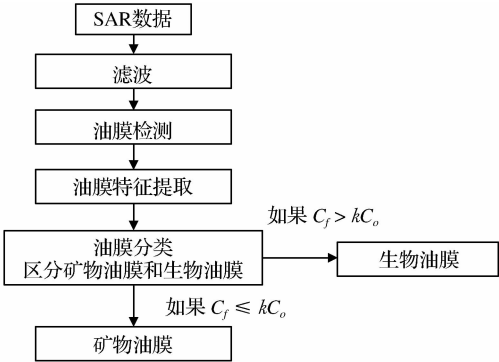


图 4 油膜检测流程图
Fig. 4 Flow chart of oil detection

方存在一个亮点,这 2 个亮点即为排放废油的船只。用图 5(a)的多极化数据进行式(11)所示的油膜区分,计算得到 C_f 和 C_o 的均值,并对整幅图进行极化比的处理(σ_{HH}/σ_{HV}),结果如图 5(b)所示。对比发现已经无法分辨出油膜与周围海面的差别,即油膜

区域 C_f 的值(直接计算得到的平均值为 1.08,对整幅图进行处理后的平均灰度值为 89.51)接近周围海面(无油膜区域) C_o 的值(直接计算得到的平均值为 1.06,对整幅图进行处理后的平均灰度值为 88.06)。此时, $C_f \leq kC_o$, 所以 $C=0$, 判定为矿物油膜。图 5(b)白色矩形框中的舰船在此处理结果图像中表现为暗色,其值要低于周围海面。

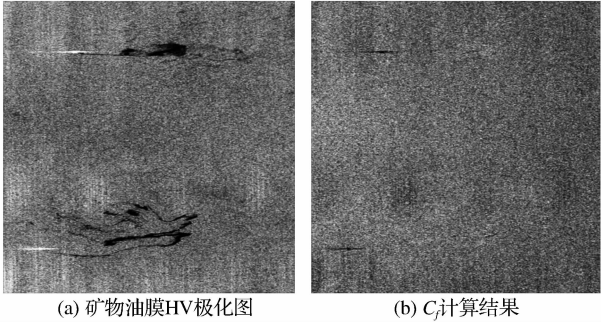


图 5 矿物油膜和计算结果图像

Fig. 5 Image of mineral oil and calculate result

实验 2 中 SAR 数据获取的时间为 1994 年 10 月 1 日,08:14:28 UTC(编号 PR44326),地点为德国北海,当时风速为低到中等风速。如图 6(a)所示,在 SIR-C 的 HV 极化图中可以清楚地看到一块油膜。对图 6(a)的多极化数据进行油膜区分,得到结果如图 6(b)所示(与实验 1 处理方法一致)。可以看到处理结果与图 5(b)相同,即油膜区域 C_f 的值(平均灰度值为 83.29)接近周围海面 C_o 的值(平均灰度值为 80.28)。此时, $C_f \leq kC_o$, 所以 $C=0$, 判定为矿物油膜。

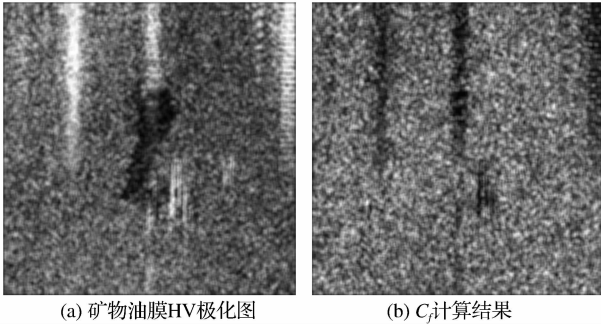


图 6 矿物油膜和计算结果图像

Fig. 6 Image of mineral oil and calculate result

3.2 生物油膜实验

实验 3 中 SAR 数据获取的时间为 1994 年 4 月 16 日,01:53:10 UTC(编号 PR11438),地点为日本附近海域,风速为 6.8 m/s。如图 7(a)所示,在 SIR-C 的 HV 极化图中可以看到一块暗色区域:OLA

(油醇膜)。对图 7(a)的多极化数据进行油膜区分,得到结果如图 7(b)所示(与实验 1 处理方法一致)。可以看到处理结果与矿物油膜的两个结果都不相同,在 OLA 区域 C_f 的值(平均灰度值为 157.31)明显高于周围海面 C_o 的值(平均灰度值为 80.20)。此时, $C_f > kC_o$, 所以 $C=1$, 判定为生物油膜。

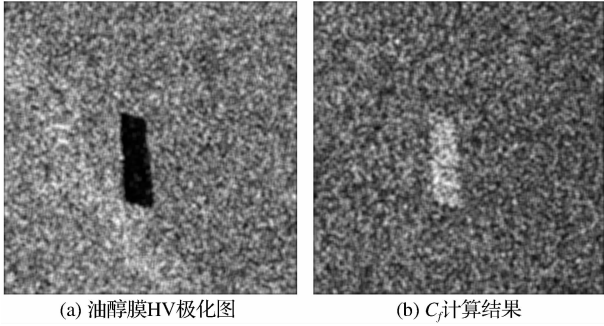


图 7 油醇膜和计算结果图像

Fig. 7 Image of OLA and calculate result

实验 4 中 SAR 数据获取的时间为 1994 年 4 月 15 日,02:13:44 UTC(编号 PR11587),地点为日本附近海域,风速为 8.8 m/s。如图 8(a)所示,在 SIR-C 的 HV 极化图中可以看到一块暗色区域:OLA。对图 8(a)的多极化数据进行油膜区分,得到结果如图 8(b)所示(与实验 1 处理方法一致)。可以看到在 OLA 区域 C_f 的值(平均灰度值为 134.65)明显高于周围海面 C_o 的值(平均灰度值为 88.21)。此时, $C_f > kC_o$, 所以 $C=1$, 判定为生物油膜。

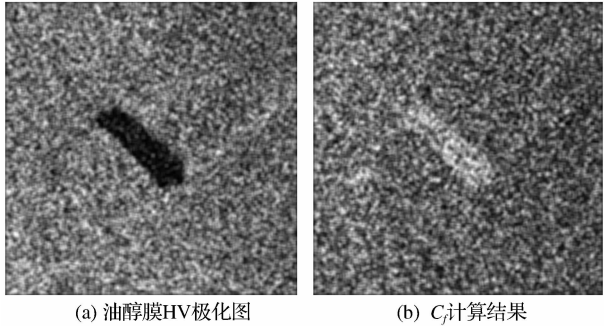


图 8 油醇膜和计算结果图像

Fig. 8 Image of OLA and calculate result

4 结 语

海洋表面矿物油膜、生物油膜都会导致 SAR 图像上出现暗区,利用后向散射系数的差异可以检测暗区,但是仅仅用单极化灰度图像的强度信息和暗区的形状无法分辨其是油膜还是似油膜。本文提出一种基于交叉极化比的区分矿物油膜和生物油膜的

方法,并用 SIR-C 多极化 SAR 数据验证所提出的方法能够应用于区分油膜和生物油膜。基于极化比区分油膜的方法是极化 SAR 在海洋中的一个应用,与已有的区分方法相比本文方法简单有效。由于数据集的限制,本文只验证了该方法对 SIR-C L 波段数据的有效性,未来将基于其他数据源(如 ALOS 和 Terra SAR 的全极化数据)验证此方法的有效性,以及进一步区分矿物油膜和低风速区。

参考文献(References):

- [1] Xue Haojie, Chong Jinsong. Oil Spill Detection Methods in SAR Images[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(4): 290-294. [薛浩洁, 种劲松. SAR 图像海洋表面油膜检测方法[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(4): 290-294.]
- [2] Brekke C, Solberg A H S. Oil Spill Detection by Satellite Remote Sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(1): 1-13.
- [3] Jackson C R, Apel J R. Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual[S]. Washington, DC: NOAA, 2004.
- [4] 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.
- [5] Gade M, Alpers W, Huhnerfuss H, *et al.* Imaging of Biogenic and Anthropogenic Ocean Surface Films by the Multi-frequency/multi-polarization SIR-C/X-SAR[J]. Journal of Geophysical Research-Oceans, 1998, 103(C9): 18851-18866.
- [6] 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.
- [7] Migliaccio M, Nunziata F, Gambardella A. On the Co-polarized Phase Difference for Oil Spill Observation[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(6): 1587-1602.
- [8] Nunziata F, Gambardella A, Migliaccio M. A Unified Polarimetric Approach for SAR Sea Oil Slick Observation[C]// IEEE International Geo Science and Remote Sensing Symposium Hawaii, 2009.
- [9] Kudryavtsev V, Akimov D, Johannessen J, *et al.* On Radar Imaging of Current Features; 1. Model and Comparison with Observations[J]. Journal of Geophysical Research Vol: 110, C07016. Doi: 10. 102912004JC002505, 2005.
- [10] Malinovsky V V, Sandven S, Mironov A S, *et al.* Identification of Oil Spills based on Ratio of Alternating Polarization Images from ENVISAT[C]// IEEE International Geo Science and Remote Sensing Symposium Barcelona, 2007.

An Algorithm based on Cross-polarization Ratio of SAR Image for Discriminating between Mineral Oil and Biogenic Oil

Duan Bing^{1,2}, Chong Jinsong¹

(1. *Science and Technology on Microwave Imaging Laboratory, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Ocean surface mineral oil and biogenic oil are both presented as dark features in synthetic aperture radar (SAR) image, so it is difficult to discriminate between mineral oil and biogenic oil by the single polarimetric SAR image. This paper analyzes the polarization ratio of ocean surface backscattering coefficient of the mineral oil films and biogenic oil films, and then proposes a method based on cross-polarization ratio of multi-polarization SAR images to distinguish mineral oil with biogenic oil. At last, SIR-C multi-polarimetric SAR data are used to prove the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: Polarization; Synthetic Aperture Radar (SAR); Oil Slick