

文章编号: 1007-4619 (2002)02-0113-04

星载 SAR 海浪遥感中波向确定的一种新方法

杨劲松^{1,2}, 黄韦良¹, 周长宝¹

(1. 国家海洋局 第二海洋研究所, 国家海洋局海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室, 浙江 杭州 310012;

2. 中国科学院 地理科学与资源研究所资源环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

摘 要: 海浪传播方向的 180° 不确定性是海浪遥感的固有问题。根据海浪传播理论, 提出了解决该问题的一种新方法。利用该方法可直接由合成孔径雷达(SAR)图像确定海浪的传播方向, 消除波向 180° 不确定性。实例研究表明, 利用该方法确定的海浪传播方向与同步海浪数据有很好的 consistency。

关键词: 合成孔径雷达; 海浪; 波向确定

中图分类号: TP79/P71 **文献标识码:** A

1 引 言

海浪是海洋环境的一重要要素, 与人类的海上和海岸带活动息息相关。常规的海浪观测方法只能获得有限的点的资料, 不能满足海洋资料开发、海洋环境保护、海洋防灾减灾和海浪预报等对海浪观测资料的需要, 而且, 大多数海域没有常规观测资料。因此, 迫切需要探索新的海浪探测方法和技术。

1978 年美国发射的 Seasat 卫星显示了星载合成孔径雷达具有观测海浪的能力^[1]。20 世纪 90 年代发射的欧空局 ERS 系列卫星和加拿大 Radarsat 卫星进一步证实星载 SAR 能对海浪的波高、波长和波向进行有效的测量^[2,3]。目前, 星载 SAR 遥感技术已成为全天候、全天时、高分辨率探测全球海浪的新的技术手段。但是, 星载 SAR 海浪遥感技术还存在着不少问题。海浪传播方向的 180° 不确定性就是其中之一。目前只能使用其它资料例如单视复图像、常规观测资料等才能确定海浪的传播方向^[4-9]。

采用单视复图像确定海浪方向的诸多方法中, 有对单视复图像的每个个视(individual-look)图像进行时间序列分析的^[4], 有对个视图像作图像谱相位移动处理的^[5], 也有计算个视图像间的交叉谱, 用交叉谱的虚部确定海浪方向的^[6]。以上方法中, 交叉谱方法是用得较多的, 也是较为成功的一种。对该

方法的研究表明, 约有 5% 的情形不能确定海浪方向^[7]。而且, 所有这些方法均需要对图像进行分视(split-look)处理, 获得 2-3 个个视图像。但由于星载 SAR 的相干积分时间较短(如 ERS-1/2 和 Radarsat SAR 的名义积分时间约为 0.6s, JERS-1 SAR 的名义积分时间小于 1.7s, 而其实际相干积分时间比名义积分时间还要短), 分视处理非常困难^[8]。此外, 由于在单视复图像中无法直观地观察到海浪条纹, 需要将它转化为一般实图像才能确定该幅图像是否含有海浪信息及其所处位置。这些都不利于海浪探测的业务化运作。在 Mastenbroek 和 de Valk 的参数化方法中, 风浪谱的传播方向由风向确定, 是一种新的思路, 不过其中涌浪谱 180° 方向模糊问题仍然无法解决^[9]。为此, 开发一种简便易行的波向确定技术非常必要。本文从海浪传播理论入手, 利用海浪的弥散关系, 给出了一种直接由 SAR 图像(指一般实图像, 下同)确定海浪传播方向的方法。

2 原 理

由经典海浪传播理论可知, 有限深水域的海面重力波的弥散关系为^[10,11],

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (1)$$

其中 d 为水深。利用角频率 ω 与周期 T 的关系 $\omega = 2\pi/T$ 以及波数 k 与波长 L 之间的关系 $k = 2\pi/L$, 则

收稿日期: 2000-08-07; 修订日期: 2001-07-21

基金项目: 由国家自然科学基金项目(49876028)、卫星应用重点项目(Y9606)和国家海洋局第二海洋研究所青年科学基金(9706)资助。

作者简介: 杨劲松(1969—)男, 湖南宁远人, 副研究员, 青岛海洋大学物理海洋学博士, 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室博士后。主要研究领域为海洋微波遥感, 发表论文数十篇。

(1) 式可写为

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (2)$$

以下分深水水域和有限深水域两种情形进行讨论。

2.1 深水水域

在水深 $d \geq L$ 的深水水域, 由于 $\tanh \frac{2\pi d}{L} = 1$,

(2) 式可以简化为

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (3)$$

于是, 对于充分成长的风浪和涌浪而言, 在其传播过程中, 由于高频(周期短)部分能量衰减较快, 低频(周期长)部分能量衰减较慢, 海浪各组分中低频部分的能量所占的比重逐渐增大, 从而导致海浪的有效周期不断增加。由(3)式可知, 随着海浪的传播, 由于周期逐渐增加, 其波长也将不断增大。

另外, 由于海浪的相速度 C_p 和群速度 C_g 分别为,

$$C_p = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{g}{k}} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} \quad (4)$$

$$C_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{k}} = \frac{C_p}{2} \quad (5)$$

上两式表明, 海浪中波长较大的组分, 其传播速度也较快, 因而海面上前面的波浪比后面的波浪波长要长。

综上所述, 可以得出这样的结论: 深中海浪波长增加的方向就是海浪传播的方向。本文就是根据上述原理通过 SAR 图像中测量的海浪波长的变化来确定海浪传播方向的。

2.2 有限深水域

对于有限深水域中传播的海浪而言, 情况要复杂一些, 虽然随着海浪的传播, 其周期也会增加, 但由于水深变浅会使得因子 $\beta \equiv \tanh \frac{2\pi d}{L} < 1$, 由(2)式可知, 海浪波长 L 不一定增加。不过, 只要 $\beta \approx 1$, 则 $L \approx \frac{gT^2}{2\pi}$, T 增加仍会导致 L 增加。同样, 此时(4)式和(5)式也近似成立。

图 1 显示了因子 β 随水深波长比 $\delta \equiv d/L$ 的变化, 可见, δ 从 0.2 增加到 0.4 的过程中, β 只从 0.85 变到 0.99, 在 $\delta \geq 0.4$ 的区域, β 的变化更为微小, 因此, 对于在 $\delta \geq 0.4$ 的水域中传播的海浪而言, $\beta \approx 1$, 地形引起的波长变化最多只有 1%, 完全可以忽

略不计。例如, 对本文中波长约 200—300m 的海浪而言, 水深超过 80—120m 时 ($\delta \geq 0.4$), 地形引起的波长变化只有 2—3m 左右。此时, 从深中海浪得出的结论同样适用于 $\delta \geq 0.4$ 的有限深水域情形。

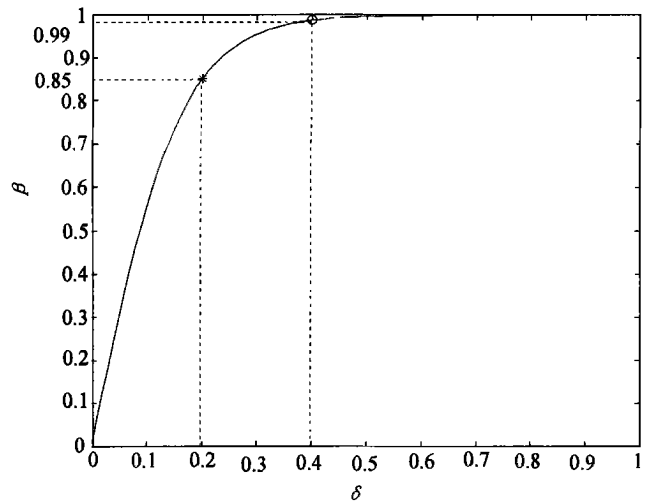


图 1 β 随 δ 的变化

Fig.1 β versus δ

3 步 骤

依据上述原理, 由 SAR 图像确定海浪传播方向包括以下 3 个步骤:

(1) 沿可能的海浪传播方向 (180° 不确定方向), 从 SAR 图像中选取一组 (不少于 2 幅) 子图像, 子图像的大小一般为 256×256 个像元或 512×512 个像元;

(2) 分别计算各子图像的主波波长;

(3) 比较各子图像中海浪主波波长的长短, 根据波长不断增大的方向就是海浪传播方向的原则, 确定海浪的传播方向, 消除 180° 不确定性。

4 实 例

4.1 图像

以中心位置为北纬 $26^\circ 13' 26''$, 东经 $122^\circ 07' 04''$, 成像时间为 1994-07-23 10 时 26 分的 ERS-1 SAR 图像为例, 说明该方法的具体实现过程。该图像位于中国台湾省东北部海域, 该海域水深在 190—200m 左右, 图像幅宽为 100km, 像元间隔为 12.5m, 如图 2。

4.2 结果

由图 2 沿海浪可能的传播方向选择 4 幅 $512 \times$

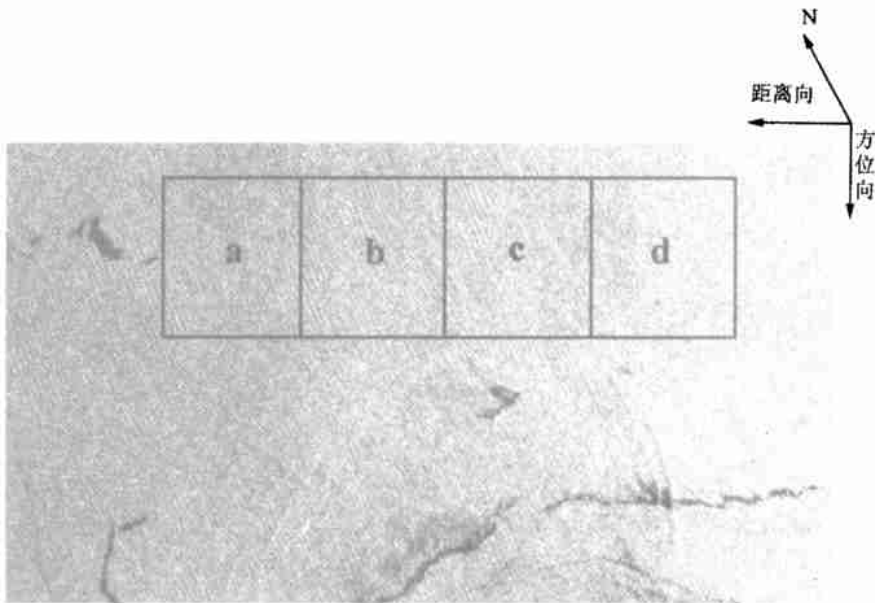


图2 1994-07-23 10时26分中国台湾省东北部海域ERS-1 SAR图像(图中方框a-d为用于计算主波波长的子图像位置)

Fig.2 ERS-1 SAR image on July 23, 1994

512像元大小(约 $6.4\text{km} \times 6.4\text{km}$)的子图像,并左右分别记为a-d(见图2)。计算得到的4幅子图像的主波长列于表1。

表1 子图像中海浪的主波长

Table 1 Significant wavelength in each subimage

子图像	主波长/m
a	309.8
b	279.6
c	254.7
d	213.2

由表1看出,子图像中海浪波长由d向a递增,因此可确定该海区海浪由东北向西南传播。这与国家海洋局海洋环境预报中心提供的同步海浪数据是一致的。

5 结论与讨论

本文根据海浪传播理论,给出了直接由星载SAR图像确定海浪传播方向的一种新方法。实例研究表明,该方法是可行的,而且简单方便,特别适用于业务化的海浪探测。

由表1可知,在大约 6.4km 的传播距离中,各子图像中海浪的波长差最小值为 24.9m ,最大值达 41.5m 。由于该例中 $\beta \geq 0.999$,地形引起的波长变

化最多只有 0.1% ,即 $0.2-0.3\text{m}$ 左右。可见,只要选择适当间距的子图像,波浪传播过程中表现出的波长的变化是相当明显的,足以用来消除 180° 的波向模糊。

同步资料还显示,该海域有风速为 9m/s 的偏西风,与海浪传播方向正好相反。因此利用风向来确定波向是不可靠的。实际上,本文所选图像中的海浪为外海传来的涌浪,并不是由局地风产生的风浪。

由于 180° 方向不确定性在任何海浪瞬时测量系统中都存在,本文提出的方法对船载海洋雷达(ship marine radar)、侧视机载雷达(Side-Looking Airborne Radar, SLAR)和立体摄影测量中的海浪方向确定均同样适用。

致谢 本研究所用的ERS-1 SAR图像和海浪资料分别由中国台湾海洋大学和国家海洋局海洋环境预报中心提供,特此致谢。

参考文献 (References)

- [1] Fu L L, Holt B. Seasat Views Oceans and Sea Ice with Synthetic Aperture Radar [R]. JPL publications 81-120, 1982.
- [2] Hasselmann K, Hasselmann S. On the Nonlinear Mapping of an Ocean Wave Spectrum into a Synthetic Aperture Radar image Spectrum and its Inversion [J]. J. Geophys. Res., 1991, 96 (c6): 10713-10729.
- [3] Plant W J., Zurk L M. Dominant Wave Directions and Significant

- Wave Heights from Synthetic Aperture Radar Imagery of the Ocean [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(c2): 3473—3482.
- [4] Vachon P W, Raney R K. Resolution of Ocean Wave Propagation Direction in SAR Imagery [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1991, 29(1): 105—112.
- [5] Vachon P W, West J C. Spectral Estimation Techniques for Multilook SAR Images of Ocean Waves [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1992, 30(3): 568—577.
- [6] Engen G, Johnsen H. SAR-ocean Inversion Using Image Cross Spectra [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1995, 33(4): 1047—1056.
- [7] Johnsen H, Y. Desnos. Expected Performance of ENVISAT ASAR Wave Mode Cross Spectra Product [A]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) [C]. Hamburg, Germany, 1999.
- [8] Ouchi K, S Maedoi, Mitsuyasu H. Determination of Ocean Wave Propagation Direction by Split-look Processing Using JERS-1 SAR Data [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1999, 37(2): 849—855.
- [9] Mastenbroed C, Valk C F de. A New Algorithm for the Retrieval of Wave Spectra from the ERS SAR [A] CEOS Wind and Wave Validation Workshop [C]. Noordwijk, The Netherlands, 1997.
- [10] Phillips O M. The Dynamics of the Upper Ocean [M]. London: Syndics of the Cambridge University Press, 1997.
- [11] Wen Shengchang, Yu Zhouwen. Theory of Ocean Wave and its Calculation [M]. Beijing: Science Press, 1984. [文圣常, 余宙文. 海浪理论与计算原理[M]. 北京: 科学出版社, 1984.]

A New Method on Wave Propagation Direction Determination from SAR Imagery

YANG Jing-song^{1,2}, HUANG Wei-gen¹, ZHOU Chang-bao¹

(1. Lab of Ocean Dynamic Processes and Satellite Oceanography Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China;

2. State Lab of Resources and Environment Information System Institute of Geographical Science and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Synthetic aperture radar(SAR)is an instantaneous imaging system which gives a snapshot of the sea surface. There exists a 180° propagation direction ambiguity problem when ocean waves are imaged by a SAR. Complex SAR imagery must be used to resolve the problem in addition to *in situ* measurements at present. A new method is developed based on the propagation theory of gravity waves in this paper. By using this method, only a single frame of real SAR image is needed. The processing procedure is simple and especially suitable for operational use. The results from a case study show good agreement with *in situ* measurements.

Key words: SAR; ocean waves; 180° direction ambiguity