

# 基于 TerraSAR-X 图像的北部湾海浪要素提取方法研究\*

## Research of the Wave Parameters Extraction Method in Beibu Gulf by TerraSAR-X Images

周 圆<sup>1</sup>,邵伟增<sup>1,2\*\*</sup>,邓一兵<sup>1</sup>

ZHOU Yuan<sup>1</sup>,SHAO Wei-zeng<sup>1,2</sup>,DENG Yi-bing<sup>1</sup>

(1. 浙江海洋学院海洋科学与技术学院,浙江舟山 316000;2. 国家海洋局第二研究所卫星海洋环境动力学国家重点实验室,浙江杭州 310000)

(1. Zhejiang Ocean University, Institute of Marine Science and Technology, Zhoushan, Zhejiang, 316000, China; 2. The Second Institute of Oceanography, State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Hangzhou, Zhejiang, 310000, China)

**摘要:**【目的】研究如何从 TerraSAR-X 图像中获取实时、准确的海浪信息。【方法】基于海面风场反演的地球物理模型和海浪的参数化初猜谱反演模式来获取海浪要素信息,并使用 HH 极化方式在北部湾海域成像的 TerraSAR-X 进行实例验证,再把反演结果与 WaveWatch III 模式运算结果进行对比。【结果】有效波高的绝对误差为 0.8m,平均周期的绝对误差为 1.9s。【结论】本文的方法能有效的从 TerraSAR-X 中提取海浪要素的信息。

**关键词:** TerraSAR-X 海面风场 海浪要素

**中图分类号:** P731.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2014)04-0338-07

**Abstract:**【Objective】The wave is one of the important marine dynamic environment parameters. Up to now, TerraSAR-X is the X-band synthetic aperture radar sensor that the only way to obtain the high resolution image. Researching how to get real-time and accurate wave information from TerraSAR-X image, and use it to monitor Beibu Gulf information has important significance.【Methods】This thesis gets the information of ocean wave based on the Geophysical Model Function(GMF) for sea surface wind field and the wave parameterized early speculate spectrum retrieval model, uses HH-polarization model verifying the TerraSAR-X image in Beibu Gulf with practical examples, and compares the retrieval results with the operation results obtained from Wave Watch III model.【Results】The absolute error of significant wave height is 0.8m, and the absolute error of average period is 1.9s.【Conclusion】This method can effectively extract the wave parameters from TerraSAR-X images.

**Key words:** TerraSAR-X, wind field, wave parameters

收稿日期:2014-05-20

修回日期:2014-06-02

作者简介:周 圆(1991-),女,硕士研究生,主要从事海洋遥感研究。

\* 浙江省自然科学基金项目(编号:LQ14D060001),卫星海洋环境动力学国家重点实验室开放基金项目(编号:SOED1409)资助。

\*\* 通讯作者:邵伟增(1986-),男,讲师,博士,主要从事物理海洋学、海洋遥感方面的研究。

**【研究意义】**北部湾位于南海西北部,北纬 17°00'~21°30',东经 105°40'~110°00',北临广西壮族自治区,东靠海南岛和广东省的雷州半岛,西靠越南民主共和国,南连南海,以海南岛莺歌嘴与越南来角之间的连线为界。研究该海湾潮汐、潮流的报道不少<sup>[1,2]</sup>,但是针对海浪的研究报道不多。因此,利用合成孔径雷达来分析北部湾的海浪要素提取方法对其进一步的研究有重要意义。合成孔径雷达(Syne-

thetic Aperture Radar, SAR)作为一种主动式卫星微波探测器,具有不受光照和气候条件等限制,实现全天时、全天候地提供高分辨率的雷达图像的特点,且其分辨率与距离无关,其高分辨率意味着高精度的风场和海浪信息。德国发射的 TerraSAR-X 是国际上第一颗具有全极化、高空间分辨率、沿轨干涉工作模式的 X 波段合成孔径雷达业务化卫星。TerraSAR-X 雷达卫星具有多极化、多入射角和精确的姿态和轨道控制能力,可以进行全天时、全天候的对地观测,并具有一定地表穿透能力,同时还可进行干涉测量和动态目标的检测,因此开展 TerraSAR-X 的数据应用研究具有十分广阔的发展前景。【前人研究进展】目前, SAR 已发展出单一提取海面风场<sup>[3]</sup>或海浪信息<sup>[4]</sup>的方法,但事实上两者的反演密不可分,例如风场的反演需要提供外部的风向信息,海浪的提取则需要同时刻的风场资料。现有的单一反演海面风场和海浪的方法,不仅需要重复地输入外部的风场信息耗费多余的运算时间,外部风场的信息与 SAR 的空间上的不匹配性也会导致了反演结果不准确性。【本研究切入点】本文基于海面风场反演的地球物理模型和海浪的参数化初猜谱反演模式,构建两者共同反演的方法。旨在从 TerraSAR-X 卫星提取北部湾海浪要素的信息,以期对 TerraSAR-X 海洋信息提取方面的业务化应用提供一定的参考。【拟解决的关键问题】从 TerraSAR-X 图像中获取高分辨率的风场是本研究的基础。使用从 TerraSAR-X 获取的风场作为输入,在没有其他外部输入的情况下,如何利用已有的算法反演海浪要素,并给出其有效性,是本研究需要解决的关键问题。

## 1 SAR 反演风场和海浪要素的方法

### 1.1 SAR 海面风场的反演算法

经验地球物理模型(Geophysical Model Function, GMF)起初是为散射计所设计,后来被证明用于 SAR 反演风速也切实可行<sup>[5]</sup>。针对 C 波段 SAR 海面风场反演,已经建立了地球物理模型 CMOD4<sup>[6,7]</sup>和 CMOD5<sup>[8,9]</sup>,随着 TerraSAR-X 的投入使用,又建立了 X 波段 SAR 海面风场反演的地球物理模型 XMOD1<sup>[10]</sup>和 XMOD2<sup>[11]</sup>。

CMOD 和 XMOD 都遵循反演风场的基本函数形式:

$$\sigma^{\circ} = B_0(\theta)U_{10}^{\alpha(\theta)}(1 + B_1(\theta)\cos\varphi + B_2(\theta)\cos 2\varphi), \quad (1)$$

其中  $\sigma^{\circ}$  为雷达的后向散射界面,  $U_{10}$  为海面 10m 的风速,  $\varphi$  为海面 10m 的风向,  $\alpha$ ,  $B_0$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  为入射

角  $\theta$  的函数。

由于 CMOD 与 XMOD 模型是由 VV 极化 SAR 图像发展而来的,并不能直接应用于 HH 极化 SAR 图像的风场反演。因此,本文使用极化率模型 X-PR<sup>[12]</sup>和 XMOD2 来反演 HH 极化 TerraSAR-X 图像的海面风场。X-PR 函数为

$$PR = x_0 \exp(x_1 \theta), \quad (2)$$

其中  $x_0 = 0.61$ ,  $x_1 = 0.02$ 。

### 1.2 SAR 提取海浪要素的算法

SAR 的图像强度与海面粗糙度具有直接的联系,而海面粗糙度则被海面微尺度波影响。海浪是由长波浪(长波)以及叠加其上的均匀高度短波浪(即微尺度波)组成。长波通过对海面微尺度波的调制而成像的,这些调制作用包括倾斜调制、水动力调制和速度聚束<sup>[13]</sup>。3 种调制函数把 SAR 图像的图像谱与海浪谱联系起来,但是由于速度聚束的非线性,并不能直接进行逆运算直接得到海浪谱。因此,国际上有两种利用海浪在 SAR 图像成像关系反演海浪谱的方法:一种被称为 MPI<sup>[14]</sup>,其原理来源数据同化,需要提供一个初猜测谱,然后通过代价函数进行迭代运算,直到代价函数最小。第二种被称为 SPRA<sup>[15]</sup>,该算法与 MPI 的物理基础一样,都是采用调制函数逆推海浪谱。不同的是,SPRA 用经验含有参数的风浪谱来替代模式的初猜测谱,利用离散搜索最佳的参数,使得仿真的 SAR 图像谱与实际的 SAR 图像谱之间差距最小。

在 SPRA 和 MPI 的基础上,最近发展一种新的反演模式:参数化初猜谱模式<sup>[16,17]</sup>。参数化初猜谱模式采用类似 SPRA 反演海浪谱的方法,离散搜索最佳风场、谱峰波速等必要信息,利用经验型海浪谱模型,例如 Jonswap, PM(Pierson-Moscowitz)或文氏谱,构造最优的参数化初猜测谱,再采用 MPI 反演算法,构造代价函数进行迭代运算,若干步后最小化代价函数,从而反演得到海浪谱。

本文使用 XMOD2 和 X-PR 反演得到的 TerraSAR-X 海面风场,再基于海浪的参数化初猜谱反演模式反演对应的海浪谱,依据海浪谱与海浪要素之间的关系,得到各个海浪要素。

## 2 SAR 反演风场和海浪的流程

使用 2012 年 1 月 8 日,由 HH 极化方式在北部湾海域成像的 TerraSAR-X 图像,进行风场与海浪要素的提取,具体的实施步骤(如图 1)如下:

步骤 1 收集欧洲中长期天气预报中心(ECM-WF)40 年再分析的模式历史风场数据,分辨率为

0.75°×0.75°;

步骤2 读取 SAR 数据,并进行辐射定标,即把每个像素点的值转变成后向散射截面(NRCS);

TerraSAR-X 条带/聚束模式的定标公式为

$$\sigma^0 = F \times DN^2 \times \sin\theta, \quad (3)$$

DN 为从 SAR 图像上读取的原始像素值, F 为绝对定标参数,  $\theta$  为波束在像素点的当地入射角。

步骤3 把 SAR 图像按照 3km×3km 切割成若干个子图像,计算每个子图像的中心点入射角和平均后向散射截面;

步骤4 对子图像进行快速的 Fourier 变换,得到图像谱的谱峰向,即是具有 180°模糊度的风向。再使用 ECMWF 信息作为外部参考风向,最终获取到全部子图像的风向;

步骤5 使用步骤4的结果,把子图像的平均后散射界面、风向和子图像的中心点入射角带入反演 SAR 海面风场的地球物理模型 XMOD2 和 X-PR 中,得到子图像中的海面风速,从而反演出整幅 SAR 图像的风场;

步骤6 使用反演得到的风场与子图像的图像谱,输入风浪谱采用 Jonswap 形式并基于参数化初猜谱模式,反演得到海浪的方向谱。

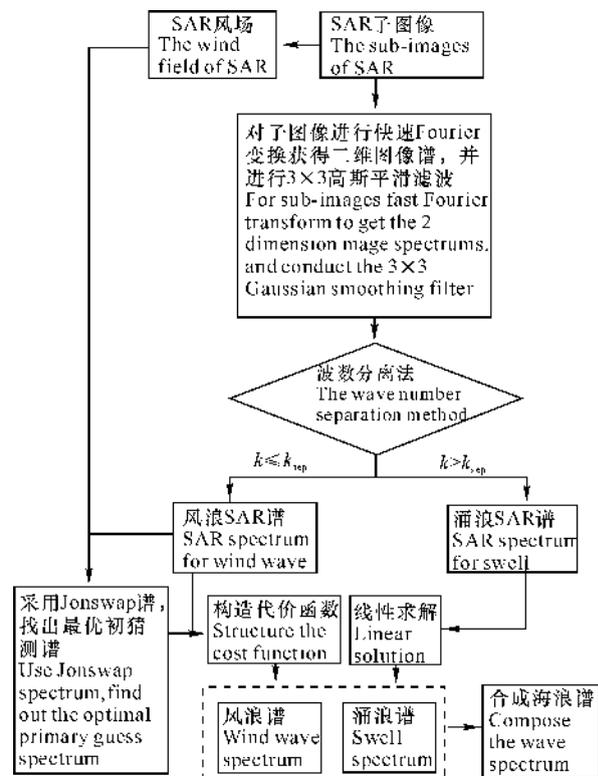


图1 TerraSAR-X 反演海浪谱的具体实施步骤

Fig. 1 The specific implementation steps of retrieving wave spectrum by TerraSAR-X

需要说明的是,在某种特定的海浪参数以及卫星

参数的条件下,非线性的速度聚束作用减弱以致于可以退化为线性的变换,意味着,在某种条件下,非线性作用在海浪到 SAR 的变换中是弱的并且可以被忽略。

在确定的雷达参数下,如果可以认为海面上的海浪在 SAR 上成像是一种线性关系,那么海面波动的波数(分离波数  $k_{sep}$ )所应满足的条件<sup>[18]</sup>是

$$|k| \leq (2.87g \frac{V^2}{R^2} \cdot$$

$$\frac{1}{U^2 \cos^2 \Phi (\sin^2 \theta \sin^2 \Phi + \cos^2 \Phi)})^{1/3}, \quad (4)$$

其中, V 为卫星平台飞行速度, R 为卫星平台高度, U 为海面风速,  $\Phi$  为波束的方向角。波数小于分离波数的波浪,其 SAR 的成像关系是线性的,可近似认为是涌浪,反之波数大于分离波数的是风浪。

### 3 反演实例及对比较验证

图2 为步骤2 辐射定标之后的快视图,其中红色框 A 为本文需要反演海浪要素的区域。图3、图4 则为本文使用的 ECMWF 外部风场以及步骤5 之后获取的 SAR 风场。从图3 和图4 可以看出,ECMWF 风场在 SAR 图像远海点的风速为 9m/s; SAR 图像对应点的风速为 7m/s,两者较为接近,但 SAR 海风场更能体现近海海域局部的细节。

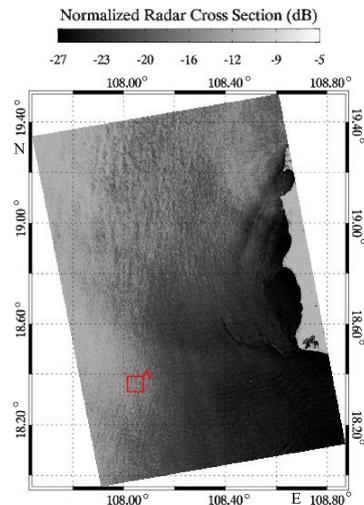


图2 HH极化方式在北部湾海域成像的 TerraSAR-X 辐射定标之后的快视图

Fig. 2 The TerraSAR-X quicklook in HH-polarization in Beibu Gulf after calibration

步骤6 中使用 Jonswap 风浪谱模型,通过参数化初猜测谱模式反演风浪谱。海浪方向谱的基本形式可以表示为频谱  $S(\omega)$  与方向函数  $G(\omega, \theta)$  相乘的形式,

$$S(\omega, \theta) = S(\omega) \times G(\omega, \theta), \quad (5)$$

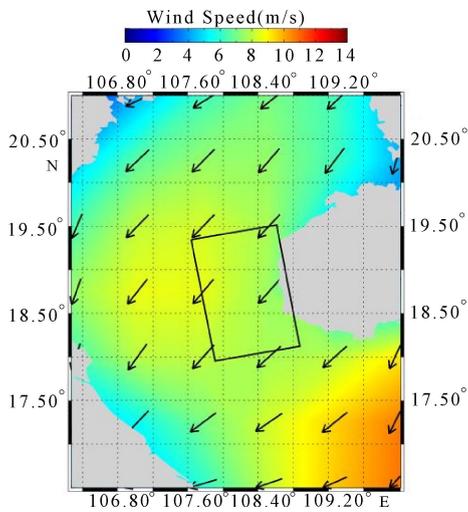


图3 TerraSAR-X 图像对应 ECMWF 的风场快视图,其中黑色边框为 TerraSAR-X 图像覆盖的区域

Fig. 3 The ECMWF wind field quick-look corresponding with TerraSAR-X images and the black border is TerraSAR-X image coverage area

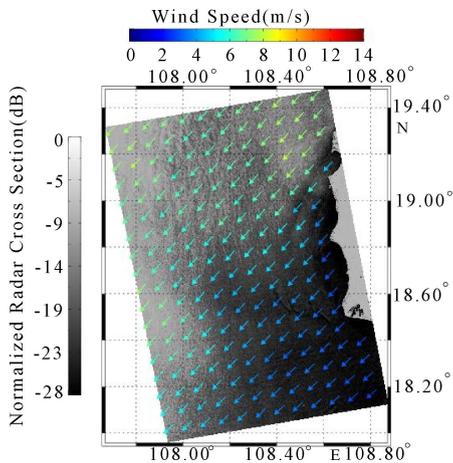


图4 TerraSAR-X 图像使用 XMOD2 和 X-PR 反演得到的海面风场

Fig. 4 The retrieval sea surface wind field using XMOD2 model and X-PR model by TerraSAR-X image

其中,

$$S(\omega) = \alpha \frac{g^2}{\omega^5} \exp\left(-1.25\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^4\right) \gamma \exp\left(-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{2\sigma^2\omega_0^2}\right), \quad (6)$$

$\omega_0$  为谱峰频率,  $\gamma$  为峰升因子,  $\sigma$  为峰形参量,  $\alpha = 0.006(U/c_0)0.55$ ,  $\omega_0$  是依赖于风速的参量, 根据风浪频散关系  $\omega = gk$ , 可得  $\omega_0 = g/c_0$ . 峰升因子  $\gamma$  定义为同一风速下谱峰值  $E_{\max}$  与 PM 谱的谱峰值  $E_{(PM)\max}$  的比值, 本文取  $\gamma = 3.3$ , 峰形参量  $\sigma$  的值为

$$\sigma = \begin{cases} 0.07, & \omega \leq \omega_0, \\ 0.09, & \omega > \omega_0. \end{cases}$$

对于计算中方向函数的选取, 将使用 Donelan 等<sup>[19]</sup> 提出的方法(简称‘ $\text{sech}^2$ ’型):

$$S(\omega, \theta) = \frac{1}{2} S(\omega) \beta (\text{sech}^2 \beta [\theta - \theta_m]), \quad (7)$$

$$\text{其中, } \beta = \begin{cases} 2.61(\omega/\omega_0)^{1.3}, & 0.56 < \omega/\omega_0 < 0.95 \\ 2.28(\omega/\omega_0)^{-1.3}, & 0.96 < \omega/\omega_0 < 1.6 \\ 1.24, & \text{其他} \end{cases}.$$

综上所述, 只要输入风速  $U$  和具有谱峰频率的波所具有的相速  $c_0$ , 海浪的频率方向谱就可以确定。

把 SAR 获得的 10m 处风速, 在  $0.8U < U < 1.3U$  的区间内以  $0.2\text{m/s}$  进行离散, 再从风浪 SAR 图像谱中获得谱峰波速  $c_0(\omega_0 = 9.8/c_0)$ , 以  $0.1\text{m/s}$  进行在  $0.9c_0 < c_0 < 1.2c_0$  的区间进行离散。又把离散化的风速与谱峰波速带入 Jonswap 谱中得到一组海浪谱组  $\tilde{S}(\omega, \theta)$ , 通过海浪谱与 SAR 图像谱的非线性转换关系  $\tilde{P}_{\text{wind}}(\omega, \theta) = M\{\tilde{S}(\omega, \theta)\}$  得到仿真的一组风浪图像谱, 构造代价函数  $J_1$ :

$$J_1 = \iint \{[\tilde{P}_{\text{wind}}(\omega, \theta) - P_{\text{wind}}(\omega,$$

$$\theta)]^2\} / \{[\tilde{P}_{\text{wind}}(\omega, \theta) + \min([\tilde{P}_{\text{wind}}(\omega, \theta), P_{\text{wind}}(\omega, \theta)])]\} d\theta d\omega, \quad (8)$$

风浪图像谱中与真实的 SAR 图像谱  $J_1$  最小对应的风浪谱, 便是最优的初猜测海浪谱。

再构造代价函数  $J_2$ :

$$J_2 = \iint [\tilde{P}_{\text{wind}}(\omega, \theta) - P_{\text{wind}}(\omega, \theta)]^2 d\theta d\omega + \iint \frac{[\tilde{S}_{\text{wind}}(\omega, \theta) - S_{\text{wind}}(\omega, \theta)]^2}{[\tilde{S}_{\text{wind}}(\omega, \theta) + \min([\tilde{S}_{\text{wind}}(\omega, \theta), S_{\text{wind}}(\omega, \theta)])]} d\theta d\omega, \quad (9)$$

把得到的初猜测谱迭代, 若干步后代价函数  $J_2$  最小, 求得最优的风浪方向谱  $S(\omega, \theta)$ 。反演得到的海浪谱具有两个谱峰, 即有  $180^\circ$  的模糊性, 因此无法获得海浪的传播方向。有效波高  $H_s$  (SWH)、平均周期  $T$  (MWP) 与反演得到的二维海浪谱关系  $S(\omega, \theta)$  如下:

$$H_s = 4.0 \sqrt{\int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi \frac{S(\omega, \theta)}{2} d\theta d\omega}. \quad (10)$$

海浪的平均周期由(11)式获得:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi \frac{S(\omega, \theta)}{2} d\theta d\omega}{\int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi \omega^2 \frac{S(\omega, \theta)}{2} d\theta d\omega}}. \quad (11)$$

使用 Ifremer 团队提供的第三代海浪模式 WaveWatch III 运算结果(见图 5)与本文反演得到的海浪要素进行对比验证。图 1 中红色框 A 内部为接近 WaveWatch III 格点数据的区域, 图 6(a) 为 TerraSAR-X 的图像谱, 滤去图像谱中波长大于 600m 的其他海洋信息并计算分离波数, 计算所得的

$k_{sep}$  为 0.002。因此,此 TerraSAR-X 图像中非线性成像海浪以风浪为主,大于分离波数的涌浪信息可以忽略。图 6(b)为反演得到的二维海浪谱,图 6(c)为一维海浪谱。通过式(10)~(11),反演得到的 SWH 为 1.2m, MWP 为 4.2s, WaveWatch III 结果中 SWH 为 1.3m, MWP 为 3.7s。另外,从图 3、4 与图 6 可以发现,波浪的传播方向(尽管有  $180^\circ$  模糊性)与风向几乎垂直,这可能是由于波浪的反射引起的。

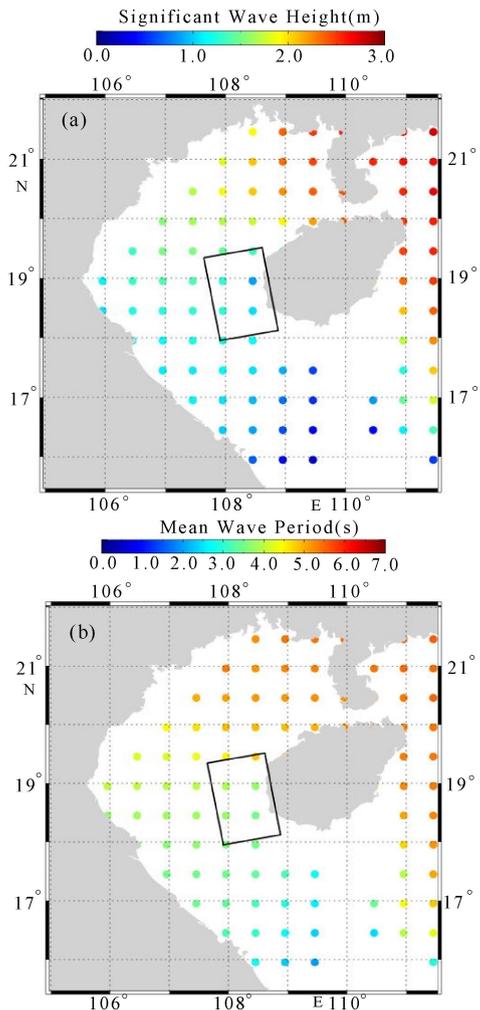


图 5 第三代海浪模式 WaveWatch III 运算结果,其中黑色框内为 TerraSAR-X 图像覆盖的区域,(a)为有效波高,(b)为平均周期

Fig. 5 The third Wave Watch III model operation results and the black border is the TerraSAR-X image coverage area, (a) is the significant wave height; (b) is the mean wave period

从表 1 可以看出,有效波高的绝对误差为 0.8m,平均周期的绝对误差为 1.9s。说明,本文使用的方法能有效的从 TerraSAR-X 中提取海浪要素的信息。另外,误差较大两点属于近海区域,本文所使用的算法依赖于 SAR 反演得到海面风场,因此,较大的误差或因为 SAR 风场本身的误差导致,这需要收集更多的实例进行分析才能验证。

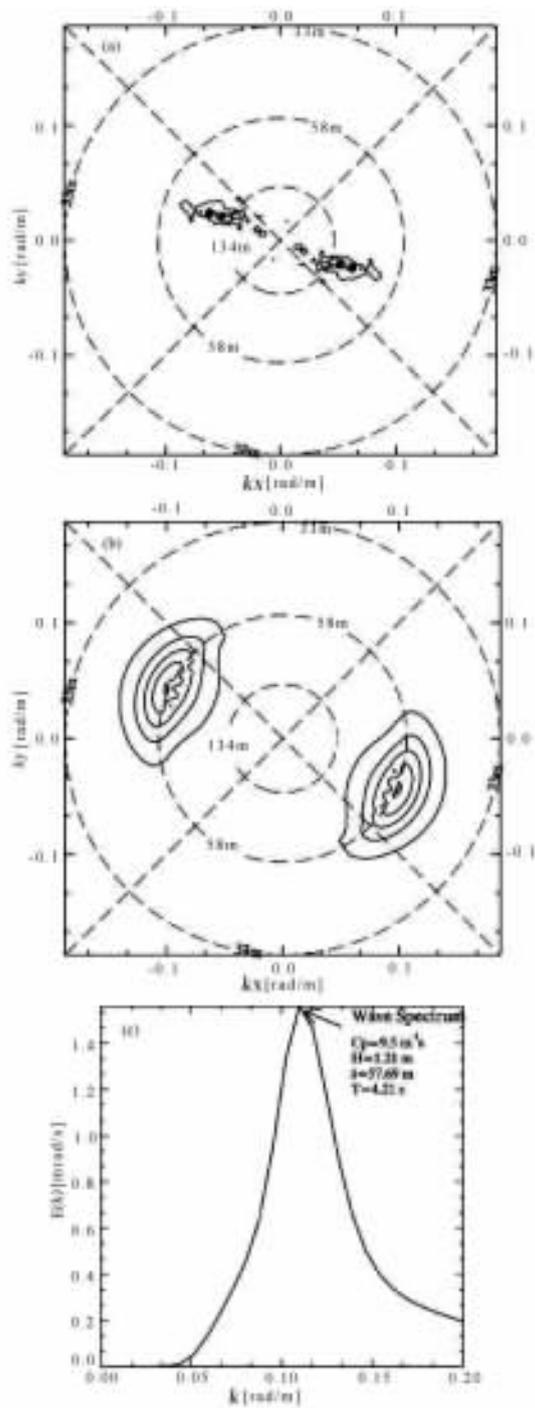


图 6 区域 A 反演得到的海浪谱(a)区域 A 对应 TerraSAR-X 的图像谱,(b)区域 A 反演得到的二维海浪谱,(c)区域 A 反演得到的一维海浪谱

Fig. 6 The retrieval wave spectrum in area A (a) the image spectrum corresponding with TerraSAR-X; (b) the two-dimensional retrieval wave spectrum in area A; (c) the one-dimensional retrieval wave spectrum in area A

表 1 Wave Watch III 4 个格点数据与 TerraSAR-X 反演结果的对比

Table 1 The comparison about the four grid data with Wave Watch III model with the retrieval results from TerraSAR-X image

| 项目 Item                 | 位置 (Location)                   | SWH(m) | MWP(s) |
|-------------------------|---------------------------------|--------|--------|
| TerraSAR-X              | 经度 lon:180.03°<br>纬度 lat:19.02° | 1.2    | 4.2    |
| WaveWatch III           | 经度 lon:180.05°<br>纬度 lat:19.00° | 1.3    | 3.7    |
| 绝对误差<br>Absolute Errors |                                 | 0.1    | 0.5    |
| TerraSAR-X              | 经度 lon:180.03°<br>纬度 lat:18.32° | 1.8    | 5.1    |
| WaveWatch III           | 经度 lon:180.05°<br>纬度 lat:18.50° | 1.4    | 3.9    |
| 绝对误差<br>Absolute Errors |                                 | 0.4    | 1.2    |
| TerraSAR-X              | 经度 lon:108.30°<br>纬度 lat:19.02° | 1.6    | 4.9    |
| WaveWatch III           | 经度 lon:108.50°<br>纬度 lat:19.00° | 0.8    | 3.5    |
| 绝对误差<br>Absolute Errors |                                 | 0.8    | 1.4    |
| TerraSAR-X              | 经度 lon:108.30°<br>纬度 lat:18.32° | 1.2    | 5.2    |
| WaveWatch III           | 经度 lon:108.50°<br>纬度 lat:18.50° | 1.0    | 3.3    |
| 绝对误差<br>Absolute Errors |                                 | 0.2    | 1.9    |

## 4 结论

本文首先使用海面风场反演的地球物理模型 XMOD2 和 X 波段极化率模型 X-PR, 获得海面风场, 然后基于 SAR 海面风场和海浪的参数化初猜谱反演模式, 从 HH 极化 TerraSAR-X 卫星提取北部湾海浪要素的信息, 反演结果与 WaveWatch III 运算结果进行对比, 得到以下结论:

1) 使用 HH 极化的 TerraSAR-X 图像获取的海面风场与 ECMWF 海面风场在图像远海方向较为接近, 说明 XMOD2 和 X-PR 能有效的获取到 TerraSAR-X 的海面风场, 而且 SAR 海面风场更能体现近海海域局部的细节。

2) WaveWatch III 4 个格点数据与 SAR 个例反演结果的对比显示: 有效波高的绝对误差为 0.8m, 平均周期的绝对误差为 1.9s。由于本文所使用的算法依赖于 SAR 反演得到海面风场, 因此, 获得的有效波高和平均周期的误差可能是由于风场的不准确导致。

下一步, 我们将继续收集北部湾海域内的 Ter-

raSAR-X 图像, 来验证本文提取海浪要素方法的有效性, 进一步分析误差来源, 以满足业务化应用的需求。

## 致谢:

本文使用的 TerraSAR-X 图像由德国宇航中心 (DLR) AO: No. OCE1656 和 OCE2256 提供, ECMWF 风场数据由欧洲宇航局提供 ([http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim\\_full\\_daily/](http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_full_daily/)), WaveWatch III 模式结果由 Ifremer 团队提供 (<ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/gridded/wave-watch3>), 在此表示衷心的感谢!

## 参考文献:

- [1] 高劲松, 陈波. 北部湾冬半年环流特征及驱动机制分析[J]. 广西科学, 2014(1): 64-72.  
Gao J S, Chen B. Modeling the winter boreal circulation in Beibu Gulf[J]. Guangxi Sciences, 2014(1): 64-72.
- [2] 陈波, 侍茂崇, 郭佩芳, 等. 北部湾北部潮流谱分析和余流特征研究[J]. 广西科学, 2014(1): 54-63.  
Chen B, Shi M C, Guo P F, et al. Analysis of tidal current spectrum and study of residual current in Northern Beibu Gulf of SCS[J]. Guangxi Sciences, 2014(1): 54-63.
- [3] 杨劲松, 黄韦良, 周长宝. 合成孔径雷达图像的近岸海面风场反演[J]. 遥感学报, 2001, 4(1): 512-514.  
Yang J S, Huang W L, Zhou C B. SAR image of along-shore sea surface wind field retrieval[J]. Journal of Remote Sensing, 2001, 4(1): 512-514.
- [4] 杨劲松, 黄韦良, 周长宝. 星载合成孔径雷达海浪图像谱仿真研究[J]. 东海海洋, 1999, 17(4): 39-46.  
Yang J S, Huang W L, Zhou C B. Research of spaceborne SAR wave image spectrum simulation[J]. Donghai Marine Science, 1999, 17(4): 39-46.
- [5] 陈艳萍, 黄斌, 丁晓莉, 等. ERS-2 SAR 反演海洋风矢量的研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1688-1694.  
Chen Y P, Huang C, Ding X L, et al. Research of ERS-2 SAR retrieve wind vector[J]. Journal of Geophysics, 2007, 50(6): 1688-1694.
- [6] Stoffelen A, Anderson D. Scatterometer data interpretation: estimation and validation of the transfer function-CMOD4[J]. Journal of Geophysical Research, 1997a, 102(C3): 5767-5780.
- [7] Stoffelen A, Anderson D. Scatterometer data interpretation: measurement space and inversion[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1997b, 14(6): 1298-1313.
- [8] Hersbach H, Stoffelen A, de Haan S. An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function;

- CMOD5[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112 (C3): 3006-3024.
- [9] Zhang B, Perrie W, He Y J. Wind speed retrieval from RADARSAT-2 quad-polarization images using a new polarization ratio model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011. DOI: 10.1029/2010JC006522.
- [10] Ren Y Z, Lehner S, Brusch S, et al. An algorithm for the retrieval of sea surface wind fields using X-Band TerraSAR-X Data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012. DOI: 10.1080/01431161.2012.685977.
- [11] Li X M, Lehner S. Algorithm for sea surface wind retrieval from TerraSAR-X and Tandem-X Data [J]. *IEEE Transaction on Geo-science and Remote Sensing*, 2013. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2267780.
- [12] Shao W Z, Li X M, Lehner S, et al. Development of polarization ratio model for sea surface wind field retrieval from TerraSAR-X HH polarization data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014. DOI: 10.1080/01431161.2014.916059.
- [13] Alpers W. Monte Carlo simulations for studying the relationship ocean wave and synthetic aperture radar image spectra[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, 88(C3): 1745-1759.
- [14] Hasselmann K, Hasselmann S. On the nonlinear mapping of an ocean wave spectrum into a synthetic aperture radar image spectrum and its inversion[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96: 10713-10729.
- [15] Mastenbroek C, de Valk F. A semi-parametric algorithm to retrieve ocean wave spectra from synthetic aperture radar [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 3497-3516.
- [16] Sun J, Kawamura H. Modification of SAR spectra associated with surface wind fields in the sea off the Kii Peninsula: A case study [J]. *Journal of Oceanography*, 2009, 65: 45-52.
- [17] Sun J, Kawamura H. Retrieval of surface wave parameters from SAR images and their validation in the coastal seas around Japan [J]. *Journal of Oceanography*, 2009, 65: 567-577.
- [18] Sun J, Guan C L. Parameterized first-guess spectrum method for retrieving directional spectrum of swell-dominated waves and huge waves from SAR images [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2006, 24: 12-20.
- [19] Donelan M A, Hamilton J, Hui W H. Directional spectra of wind generated waves [J]. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London*, 1985, 315: 509-562.

(责任编辑:尹 闯)