

基于 SWOT 卫星数据的海浪谱反演研究

姜肖宇^{1,2}, 孟俊敏¹, 罗 偲²

(1 自然资源部第一海洋研究所 青岛 266061;

2 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院 青岛 266580)

摘要: SWOT (Surface Water and Ocean Topography, 地表水和海洋地形) 卫星是新一代海洋观测卫星, 其采用了小入射角下的合成孔径雷达 (SAR) 观测体制, 为海浪探测提供了一种新的手段。本研究在前人 SAR 海浪谱反演研究的基础上, 针对 SWOT 卫星数据开展了海浪谱反演算法的适用性研究, 讨论了风速、风向、主波波向对海浪谱反演的影响。利用欧洲中期天气预报中心 (ECMWF, European Center for Medium-range Weather Forecasts) 的 ERA5 (第五代再分析数据集) 对反演的有效波高进行了验证。结果表明: 在风速为 7 m/s~9 m/s、9 m/s~11 m/s、>11 m/s 时, 反演的有效波高均方根误差 (RMSE) 分别为 0.30 m、0.19 m、0.64 m, 散度指数 (SI) 分别为 16.74%、7.03%、19.61%, 可以证明 SWOT 卫星作为小入射角 SAR 具有反演海浪谱与海浪参数的潜力。

关键词: SWOT 卫星; 海浪谱反演; MPI 方法

中图分类号: TP75; TP722.6

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2024)06-0048-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20241010001

引用格式: 姜肖宇, 孟俊敏, 罗偲. 基于 SWOT 卫星数据的海浪谱反演研究[J]. 遥测遥控, 2024, 45(6): 48-54.

Wave Spectrum Inversion Research Based on SWOT Satellite Data

JIANG Xiaoyu^{1,2}, MENG Junmin¹, LUO Cai²

(1. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China;

2. College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: The Surface Water and Ocean Topography (SWOT) satellite is a new generation ocean observation satellite. It is used to provide a new method for wave detection by adopting the synthetic aperture radar (SAR) observation system at a small incidence angle. Based on previous studies on SAR wave spectrum inversion, the applicability of the wave spectrum inversion algorithm for SWOT satellite data is studied. The effects of wind speed, wind direction, and main wave direction on wave spectrum inversion are discussed. The effective wave height of the inversion is verified using the ERA5 dataset from the European Center for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF). The results show that the root mean square errors (RMSE) of the effective wave height inversion are 0.30 m, 0.19 m, and 0.64 m at wind speeds of 7-9 m/s, 9-11 m/s, and >11 m/s, respectively. The scatter indices (SI) are 16.74%, 7.03%, and 19.61%, respectively. It can be proven that the SWOT satellite, as a small incidence angle SAR, has the potential to invert wave spectra and wave parameters.

Keywords: SWOT Satellite; Wave spectrum inversion; MPI method

Citation: JIANG Xiaoyu, MENG Junmin, LUO Cai. Wave Spectrum Inversion Research Based on SWOT Satellite Data[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(6): 48-54.

0 引言

海洋覆盖了地球表面 71% 的面积, 它对自然界有巨大的影响, 同时又为人类提供了丰富的资源, 因此对海洋进行全面深入的了解具有重要的

意义^[1]。海浪是海洋动力学的重要组成部分, 海浪信息对于海洋工程、近海结构设计和航海, 以及理解和预测恶劣的海洋天气都是至关重要的^[2]。海浪的参数包括有效波高、主波向、波周期、波长、波速等。其中, 有效波高是将一段时间内测得的

所有波高按大小排列,取其中最高的1/3波高的平均值。对有效波高的准确反演估计,可以为沿海工程、环境监测、海岸保护和海洋运输等方面的实际应用提供有用的信息^[3]。

目前,常用于有效波高的获取方式包括现场浮标直接观测和遥感观测间接反演。现场浮标观测具有长期连续、复杂海洋环境适应性强、观测数据准确度高等优点^[4],但是布放成本高,且无法实现全海域探测。采用卫星遥感可以实现全球范围内的观测。遥感观测分为光学遥感和微波遥感。光学遥感受天气影响较大,容易被云雾遮挡观测。微波遥感能够穿透云层,不受日照条件限制,能在任何气候条件下进行观测,提供连续的海浪观测数据,从而能够更准确地掌握海浪的能量分布和传播特性。

微波遥感观测主要包括高度计、波谱仪、合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)等。卫星高度计是一种重要的海洋微波遥感器,它能够测量海面高度、有效波高和海面向后散射系数。但高度计只能获取星下点的有效波高等数据,并且无法获得二维海浪谱。波谱仪和合成孔径雷达都可以提供二维的海浪谱信息,其中波谱仪对海浪波长的观测范围更大,海浪谱反演在70 m~500 m海浪波长范围内表现良好^[5],而合成孔径雷达只能观测150 m以上的海浪波长^[6]。随着SWOT卫星的发射,其小入射角SAR观测体制为海浪谱探测提供了一种全新手段。

针对通过SAR图像反演海浪参数通常利用Hasselmann推导出的海浪谱与SAR图像谱非线性映射关系,由SAR图像谱转换得到海浪谱从而进行海浪参数的反演。基于该非线性关系衍生出多个求解海浪参数的迭代算法如:MPI(Max-Planck Institute, 马克斯-普朗克研究所)反演方法^[7]、半参数反演法(Semi-Parametric Retrieval Algorithm, SPRA)^[8]的改进非线性反演方法(Partition Rescale and Shift Algorithm, PARSAR)^[9]、参数化初猜谱方法(Parametrized First-Guess Spectra, PFSM)方法^[10]等,通过SAR图像谱迭代求解海浪谱。本文选用MPI反演方法进行研究。

当前,利用MPI方法反演海浪谱的应用多基于中等入射角卫星数据,如哨兵一号(Sentinel-1)卫星、高分三号(GF-3)卫星。万勇等人于2020年基于Sentinel-1和RADARSAT-2 SAR卫星数据,研究

了Elfouhaily谱(E谱)和Pierson Moscowitz谱(PM谱)作为初猜谱输入MPI方法分别对反演结果的影响^[11],2023年对比了哨兵1号卫星SAR IW(Interferometric Wide swath, 干涉宽幅)模式和GF-3卫星SAR条带模式数据海浪谱反演的精度^[12]。目前,尚未有小入射角条件下对MPI海浪反演方法的适用性验证。随着多极化多视角新体制微波传感器的研制,研究小入射角下的有效波高反演方法具有重要的科学意义及业务化指导作用。

SWOT卫星的成功发射,提供了小入射角下的SAR数据,其入射角度约在4°以内。在小入射角条件下雷达信号以海面对电磁波的准镜面散射为主。一般认为在10°左右时,散射信号由准镜面散射为主转向Bragg(布拉格)散射为主。本文利用SWOT卫星数据作为输入,验证小入射角条件下利用MPI方法反演有效波高的适用性,研究分析在不同风速条件下利用SWOT卫星反演有效波高的精度,将反演结果与ERA5数据集的有效波高数据进行比较。

1 数据介绍

1.1 SWOT卫星数据

SWOT卫星主要由美国国家航空航天局(NASA)和法国国家太空研究中心(CNES)联合研制。SWOT卫星轨道高度为890 km,轨道倾角为77.6°^[13]。

本文选用2023年4月~7月的SWOT L1B_HR_SLC的HH极化一级数据进行海浪谱反演。L1B_HR_SLC产品提供了高速率(HR)单视复图像(SLC)。该产品采用NetCDF-4文件格式并作为一个单独的NetCDF文件提供,数据的幅宽约64 km×64 km,入射角范围大约是0°~4°。方位向分辨率约为4.8米,距离向分辨率随着入射角的变化而变化,入射角最大时距离向分辨率约为10 m^[14]。

本文选取图像的地理位置为西北太平洋附近。由于海浪在卫星方位向的成像是强非线性的,所以沿方位向传播的海浪会损失一些有价值的信息^[15]。该区域4月到7月的风向大部分在北偏东90°左右,与卫星距离向相近,所以该区域适合用MPI海浪反演方法进行反演。图1展示了本文的研究区域。

1.2 ECMWF ERA5数据

本文中使用了欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的ECMWF ERA5数据集作为先验信

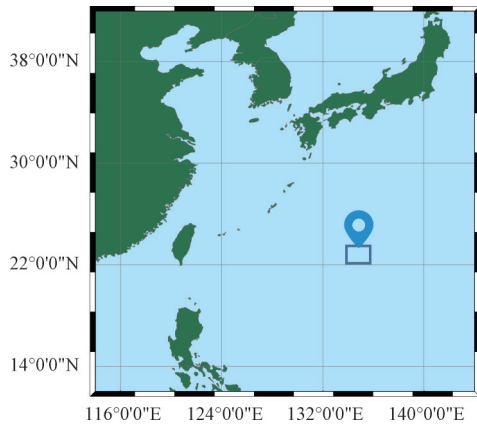


图1 研究区域的地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

息。欧洲中期天气预报中心提供从1979年开始的不同分辨率的全球风场、海浪等的格点数据。ECMWF ERA5数据集通过结合全球观测数据、数值模型和物理参数化方案, 生成了高时空分辨率的大气和地表变量数据。ERA5数据为网格化数据, 其时间分辨率可达1小时, 空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 。本文主要使用了ERA5数据的10 m风向、10 m风速、有效波高数据。有效波高用于验证从SWOT卫星数据反演得到的海浪参数的精度, 海面10 m高度风场用于构建MPI方法所需的初猜谱。

2 MPI方法

2.1 简介

由于海浪运动与卫星运动之间的多普勒效应导致SAR图像谱与海浪谱之间的关系是非线性的, 所以无法直接从图像谱计算得到海浪谱^[16], 并且在SAR的成像过程中会由于截断效应使沿方位向传播的浪丢失高频信息。MPI算法则是利用现有的经验海浪谱模型(即初猜海浪谱)弥补丢失的高频信息。

MPI方法的主要原理是先将初猜海浪谱输入至海浪谱与SAR图像谱非线性映射关系, 得到前向模拟的SAR图像谱, 并计算观测SAR图像谱与前向模拟的SAR图像谱的代价函数, 若差别较大, 则修改初猜海浪谱继续迭代求解图像谱, 直到代价函数减小到可接受范围, 结束迭代求解过程。

代价函数表达式为:

$$J = \int [P(k) - \hat{P}(k)]^2 \hat{P}(k) dk + \mu \int \left\{ \frac{[F(k) - \hat{F}(k)]^2}{[B + \hat{F}(k)]} \right\} dk \quad (1)$$

其中, $\hat{F}(k)$ 、 $F(k)$ 、 $\hat{P}(k)$ 、 $P(k)$ 分别代表初猜海浪

谱、修改海浪谱、观测SAR图像谱和仿真SAR图像谱。 μ 为权重参数, 通常设置为 $\mu = 0.1 \hat{P}_{\max}^2$ 。为了避免分式分子部分过小而导致失去意义, 通常设置参数 $B = 0.01 \hat{F}_{\max}^\circ$ 。

MPI方法反演流程如图2所示。

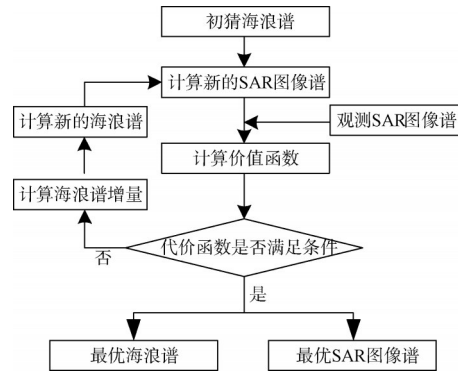


图2 MPI方法反演流程图

Fig. 2 Flowchart of the inversion process using the MPI method

2.2 初猜谱谱型选择

MPI方法的输入为初猜海浪谱与SAR图像谱, SAR图像谱通过对SAR图像做傅里叶变换得到, 初猜海浪谱则需要利用现有的经验海浪谱模型。Wan等人提出: 与PM谱相比, E谱更适合作为SAR波谱反演的第一猜测谱^[12]。故本文选用的是E谱。E谱是用于描述海浪能量分布的一个重要谱模型。它是由Elfouhaily等人综合PM谱、JONSWAP (Joint North Sea Wave Project, 联合北海波浪计划)谱等海浪谱提出的联合谱函数^[17]。

海浪谱可以体现海浪的外部特征和内部结构, 可分为一维频率谱和二维频率方向谱^[18]。

一维E谱的表达式为:

$$S(k) = (B_L + B_H) / k^4 \quad (2)$$

式中, B_L 代表重力波对应的低频无方向谱, B_H 代表高频无方向谱。

$$B_L(k) = \frac{\alpha_p}{2} \frac{c(k_p)}{c(k)} F_p \quad (3)$$

$$c(k) = [g(1 + k^2/k_m^2)/k]^{1/2} \quad (4)$$

式中, α_p 是长波(低频)范围内的平衡范围参数, $c(k)$ 表示海浪相速度, $c(k_p)$ 表示海浪谱峰值处的波对应的相速度。 F_p 为长波边缘效应函数, $k_m \approx 370 \text{ rad/m}$ 。

$$B_H(k) = \frac{\alpha_m}{2} \frac{c(k_m)}{c(k)} F_m \quad (5)$$

式中, a_m 是短波(高频)范围内的平衡范围参数, F_m 为短波边缘效应函数, $c(k_m) \approx 0.23 \text{ m/s}$ 。

一维海浪谱仅表示一个方向的能量分布, 而二维海浪谱表示了不同频率和方向的海浪能量分布。若要将一维海浪谱扩展到整个面, 需要方向函数。E谱常用的方向函数为:

$$\Phi(k, \Phi) = [1 + \Delta(k)\cos(2(\Phi - \Phi_w))]/(2\pi) \quad (6)$$

$$\Delta(k) = \tan h \left\{ a_0 + a_p [c(k)/c(k_p)]^{2.5} + a_m [c(k_m)/c(k)]^{2.5} \right\} \quad (7)$$

$\Delta(k)$ 是代表扩散性的方程, $a_0 = \frac{\ln 2}{4} \approx 0.173$, $a_p = 4$, $a_m = 0.13u_r/c(k_m)$ 。 u_r 为在稳定大气条件下的摩擦风速。

二维海浪谱可由一维海浪谱 $S(k)$ 和方向函数 $\Phi(k, \Phi)$ 的乘积表示:

$$S_k(k, \Phi) = S(k) \cdot \Phi(k, \Phi) \quad (8)$$

具体的参数可参考文献[17]。

由于初猜谱是现场数据分析得到的经验谱, 且为风浪谱, 通过输入同步的ERA5数据提供的风速和风向计算得到。故对该初猜谱的应用上有一些限制, 即适用于以风浪为主导的海面。

2.3 有效波高计算

有效波高 H_s 是指按一定规则统计的实际波高值。由于海面波浪是各种不同波高、周期和方向的无规则组合, 因此单个波浪的波高值没有代表性。有效波高通常被定义为波列中最高的三分之一波的平均波高, 可用海浪谱的0阶距 m_0 表示, 公式为^[19]:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (9)$$

各阶距可以表示为:

$$m_k = \iint f^k F_{f,\phi} d\Phi df \quad k=1, 2, \dots \quad (10)$$

式中, f 为海浪频率, $F_{f,\phi}$ 为海浪频率方向谱。

3 结果

本文对SWOT卫星数据进行了处理并反演得到海浪谱, 从中提取了有效波高, 共收集了78景大小为 256×256 像素的SWOT图像。其中风速位于 $7 \text{ m/s} \sim 9 \text{ m/s}$ 的有47景, $9 \text{ m/s} \sim 11 \text{ m/s}$ 的有21景, 11 m/s 以上的有11景。将处理完的SAR图像经过傅里叶变换得到图像谱, 并与由ERA5风场数据得到的E谱一起输入到MPI海浪反演方法中, 通过迭代计算得到最优海浪谱进而得到有效波高。

3.1 海浪谱反演

图3是MPI海浪反演方法个例, 该图像为2023年5月3日UTC时间20:59:10过境的SWOT卫星数据。截取图像 (256×256 像素) 的中心经纬度为 $22^\circ 55' \text{N}$, $135^\circ 08' \text{E}$ 。图3(a)是通过ERA5风场数据得到的初猜谱, 图3(b)是经过傅里叶变换得到的SAR图像谱, 图3(c)和图3(d)是经过迭代之后最优海浪谱和最优图像谱。

SWOT卫星轨道倾角为 77.6° , 故认为方位向与北向的夹角为 12.4° 。因为该区域为降轨轨道, 所以距离向角度为北偏东 77.6° 。SAR图像谱显示了该处的海浪方向是北偏东 75.26° , 海浪主峰的波长约为 98 m 。该处ERA5匹配的风向为北偏东 90.92° , 波向为北偏东 78.93° , 10 m 处风速为 9.50 m/s 。海浪主波向与观测SAR图像计算得到的海浪主波向都接近于距离向方向, 损失的高频信息相对较少。故该处的反演效果较好, 反演有效波高值为 2.23 m , ERA5匹配有效波高值为 2.30 m 。

图4为2023年6月2日UTC时间16:18:04过境的SWOT卫星数据。截取图像的中心经纬度为 $22^\circ 48' \text{N}$, $135^\circ 10' \text{E}$ 。SAR图像谱显示了该处的海浪方向是沿北向顺时针方向 259.38° (距离向方向为沿北向顺时针方向 77.6°), 海浪主峰的波长约为 160 m 。该处ERA5匹配的风向为 211.04° , 波向为 225.75° (均为沿北向顺时针方向), 10 m 处的风速为 10.07 m/s 。对于该景图像可以看到SAR图像中主波向高频信息的丢失, 反演有效波高值为 2.44 m , ERA5匹配有效波高值为 2.64 m 。因为MPI的反演仅仅针对于SAR图像有值区域进行迭代修改, 故方位向高频信息只能依赖于初猜谱, 所以反演精度有所降低。

以上两处反演海域风速相当, 而波向与距离向的夹角不同, 第一幅图像的SAR图像反演波向与距离向的夹角为 2.34° , 第二幅图像匹配的ERA5波向与距离向的夹角为 31.85° , 且第一幅图像反演得更加精确。由以上分析可知: 要想实现更精确的反演, 应尽量更多地保留海浪主波的高频信息, 减少方位向截断的影响。故对于MPI海浪反演方法的应用应该考虑更多地选择主波向靠近距离向传播的海浪。

3.2 不同风速反演结果分析

为了评估不同风速下利用SWOT卫星数据反演有效波高的适用性, 本小节根据3.1节得到的最

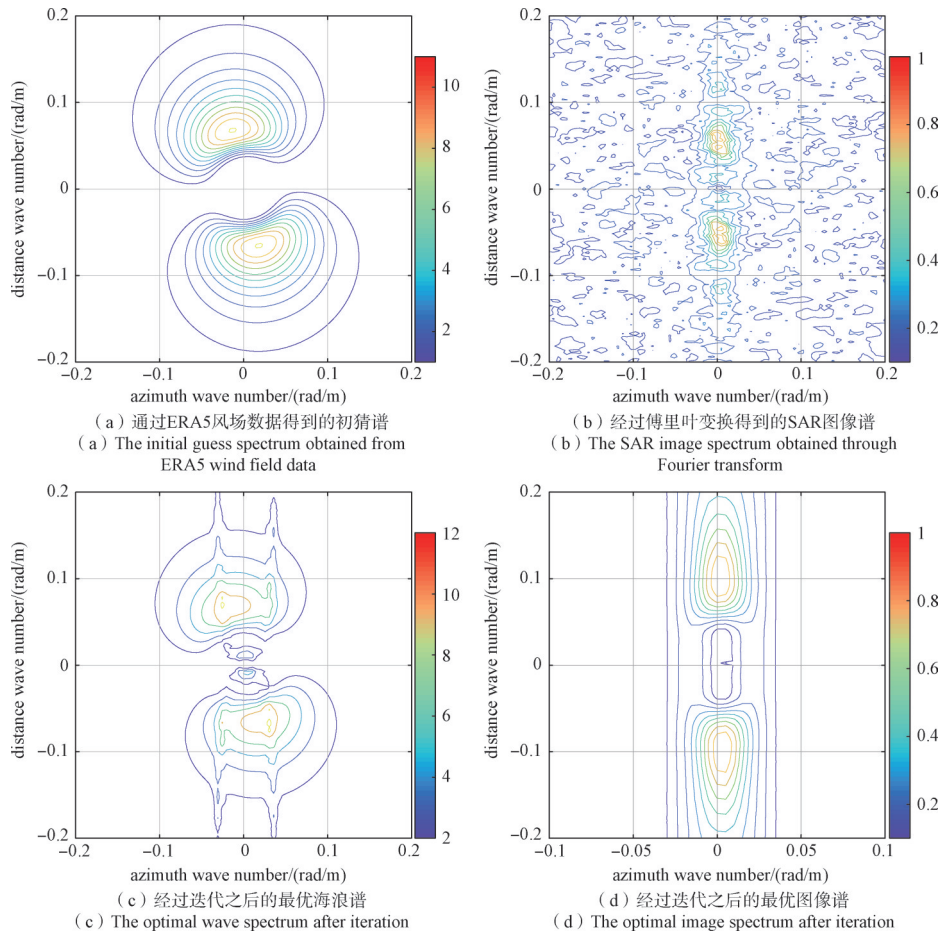


图3 2023-05-03 T 20:59:10(UTC)数据海浪谱反演结果

Fig. 3 Wave spectrum inversion results of 2023-05-03 T 20:59:10 (UTC)

优海浪谱, 通过谱距公式计算得到有效波高, 利用均方根误差、散度指数两种指标与匹配的ERA5有效波高数据进行定量比较, 均方根误差和散度指数越小, 反演越准确。

散度指数公式为^[20]:

$$SI = \frac{1}{\bar{X}} \sqrt{\frac{\sum((Y_i - \bar{Y}) - (X_i - \bar{X}))^2}{N}} \quad (11)$$

对于风速的选择, 在匹配数据的时候为了尽量选择以风浪为主导的海面, 通过对比海浪主波向与风向, 认为当两者方向接近时该处海域以风浪为主导。通过匹配分析小于7 m/s风速的ERA5再分析数据, 发现满足条件的数据占比极少, 并且风速太小构不成以风浪为主导并且接近完全发育的海面, 此时反演误差会更大。所以本文仅对大于7 m/s风速的数据进行分析。

如图5所示, 菱形标注为ERA5匹配风速7 m/s~9 m/s时反演的有效波高, 该风速下有效波高的范围约为1 m~2.5 m。与匹配的ERA5有效波

高数据进行比较, 得到均方根误差和散度指数分别为0.30 m和16.74%。反演精度相对较低是因为风速过小时无法保证海面是以风浪为主导的, 但误差仍在可接受范围内。

正方形标注为ERA5匹配风速9 m/s~11 m/s时反演的有效波高, 该风速下有效波高的有效波高范围约为2 m~3 m。与匹配的ERA5有效波高数据比较, 得到均方根误差和散度指数分别为0.19 m和7.03%。该风速下反演有效波高的精度对比风速为7 m/s~9 m/s时的精度有所提升, 这是因为在此风速下海面发育的程度较高, 风浪主导的海面占比较高。

圆形标注为ERA5匹配风速11 m/s以上时反演的有效波高, 该风速下有效波高的有效波高范围为2.5 m~4 m。与匹配的有效波高数据比较, 得到均方根误差和散度指数分别为0.64 m和19.61%。该风速时反演误差变大, 是因为处于高海况时风的能量不断地输入海洋, 时刻存在海面未完全发育的情况。而初猜谱E谱是对充分发展海况的描

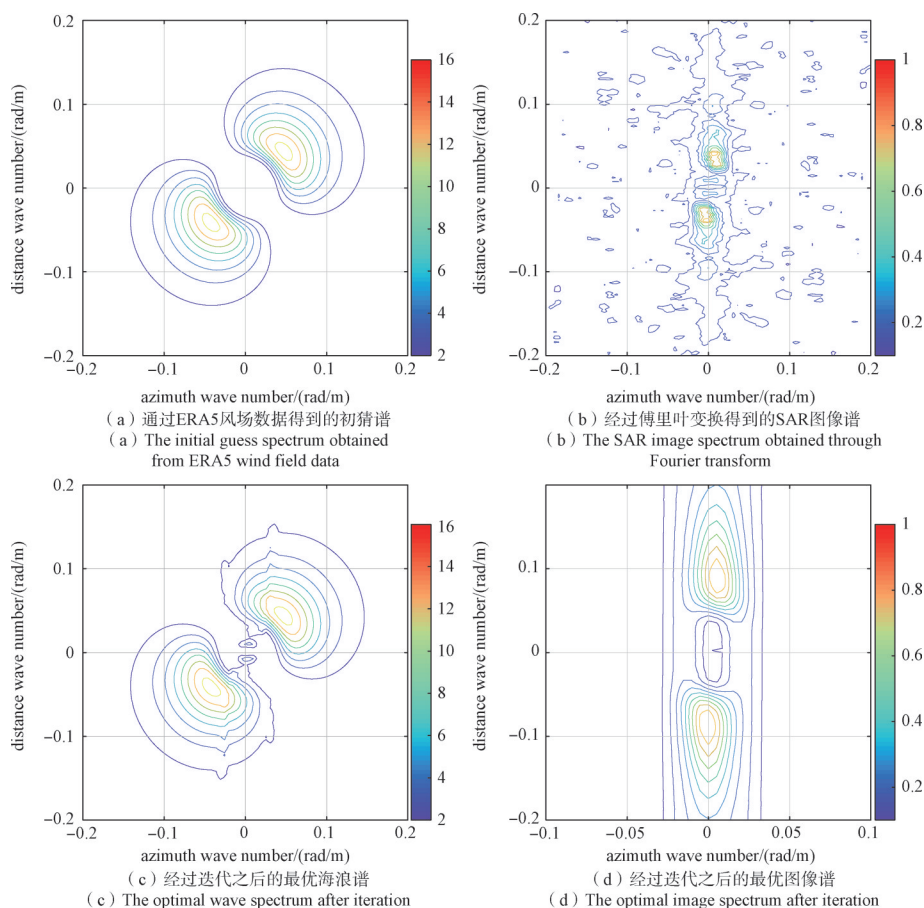


图4 2023-06-02 T 16:18:04(UTC)数据海浪谱反演结果

Fig 4 Wave spectrum inversion results of 2023-06-02 T 16:18:04 (UTC)

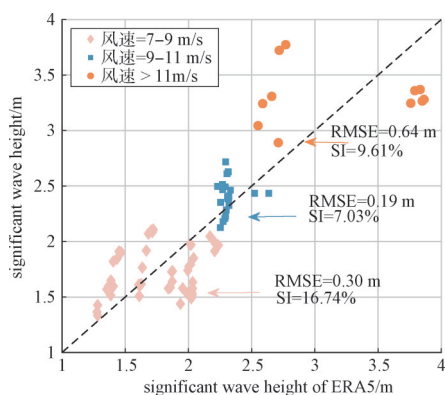


图5 SWOT数据反演的有效波高与ERA5有效波高对比图

Fig. 5 The comparison of the significant wave height retrieved from SWOT data with the ERA5 significant wave height

述，所以对有效波高高估的情况较多，导致产生较高的误差。

4 结束语

本文基于SWOT卫星数据，通过MPI海浪反

演方法反演了不同风速下有效海浪波高。可以证明SWOT卫星作为小入射角SAR具有反演海浪谱与海浪参数的潜力。尽管MPI方法在应用方面依然存在一些限制，即需要准确的先验信息，但是该方法仍然是目前可以得到高分辨率海浪方向特征参数的有效方法^[20]。对于有效波高的反演，在海面上方10 m处的风速为7 m/s~9 m/s、9 m/s~11 m/s、>11 m/s时，均方根误差分别为0.30 m、0.19 m、0.64 m，散度指数分别为16.74%、7.03%、19.61%，精度基本符合本领域的要求。但在反演过程中需要注意的是：因为初猜谱是风浪谱，所以在应用MPI方法时，应尽量保证海面是风浪主导的且充分发育的。对于充分成长的风浪，通常认为主波波向与风向一致^[21]，即反演区域主波波向与风向之间的夹角应尽量小。最后MPI方法的反演精度依赖于初猜谱的准确性，有效波高反演结果也需要考虑更多的因素，比如本地风向和雷达观测方向与海浪主波向的夹角、海面的发育程度以

及海面是否为风浪主导, 这些因素都对有效波高的反演产生影响。

参考文献

- [1] 王磊. 高精度卫星雷达高度计数据处理技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心), 2015.
- [2] 许莽晖, 张彦敏, 王运华. 基于 SAR 图像速度聚束调制的海浪反演研究[J]. 海洋学报, 2021, 43(12): 111-121. XU Qiaohui, ZHANG Yanmin, WANG Yunhua. Ocean wave inversion based on the velocity bunching modulation of SAR image[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2021, 43(12): 111-121.
- [3] SHAMSHIRBAND S, MOSAVI A, RABCZUK T, et al. Prediction of significant wave height; comparison between nested grid numerical model, and machine learning models of artificial neural networks, extreme learning and support vector machines[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2020, 14(1): 805-817.
- [4] 王军成, 厉运周. 我国海洋资料浮标技术的发展与应用[J]. 山东科学, 2019, 32(5): 1-20. WANG Juncheng, LI Yunzhou. Development and application of ocean data buoy technology in China[J]. Shandong Science, 2019, 32(5): 1-20.
- [5] HAUSER D, TOURAIN C, HERMOZO L, et al. New observations from the SWIM radar on-board CFOSAT: Instrument validation and ocean wave measurement assessment[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 59(1): 5-26.
- [6] JACKSON C R, APEL J R. Synthetic aperture radar: Marine user's manual[EB/OL]. (2004-09-01) [2024-10-10]. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/1118>.
- [7] 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: Oceans, 1991, 96(C6): 10713-10729.
- [8] MASTENBROEK C D, DE VALK C F. A semiparametric algorithm to retrieve ocean wave spectra from synthetic aperture radar[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2000, 105(C2): 3497-3516.
- [9] SCHULZ-STELLENFLETH J, LEHNER S, HOJA D. A parametric scheme for the retrieval of two-dimensional ocean wave spectra from synthetic aperture radar look cross spectra[J/OL]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2005, 110(C5): 1-17[2024-10-10]. <https://doi.org/10.1029/2004JC002822>.
- [10] 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(1): 12-20.
- [11] 万勇, 马恩男, 曲若钊, 等. 哨兵 1 号和高分三号 SAR 数据海浪谱反演精度评估[J]. 遥感学报, 2023, 27(4): 891-904. WAN Y, MA E N, QU R Z, et al. Accuracy evaluation of wave spectrum inversion based on Sentinel-1 and GF-3 SAR data[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(4): 891-904.
- [12] WAN Y, QU R, DAI Y, et al. Research on the applicability of the E spectrum and PM spectrum as the first guess spectrum of SAR wave spectrum inversion[J]. IEEE Access, 2020(8): 169082-169095.
- [13] 王丽华, 肖潇, 李国忠, 等. SWOT 卫星的发展及其在内陆水体的应用展望[C]//中国水利学会. 2023 中国水利学术大会论文集(第二分册). 2023: 343-348. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2023.088159.
- [14] WU X Q, DESROCHES D. Surface water and ocean topography (SWOT) project—SWOT product description: Level 1B KaRIn high rate single look complex data product[EB/OL]. (2023-10-26) [2024-10-10]. <https://podaac.jpl.nasa.gov/SWOT?tab=datasets-information§ions=about>.
- [15] CHAPRON B, JOHNSEN H, GARELLO R. Wave and wind retrieval from SAR images of the ocean[J]//Annales des Telecommunications, 2001, 56: 682-699.
- [16] 何宜军, 邱仲锋, 张彪. 海浪观测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [17] ELFOUHAILY T, CHAPRON B, KATSAROS K, et al. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1997, 102(C7): 15781-15796.
- [18] 文圣常, 余宙文. 海浪理论与计算原理[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [19] LONGUET-HIGGINS M S. The statistical analysis of a random, moving surface[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1957, 249(966): 321-387.
- [20] 黄冰清, 李晓明, 蔡琼琼. 北极海域 SAR 海浪方向谱反演及其与中法海洋卫星 CFOSAT/SWIM 数据的比较[J]. 遥感学报, 2023, 27(4): 881-890. HUANG B Q, LI X M, CAI Q Q. Retrieval of ocean wave spectra from Sentinel-1 SAR data and comparison with the CFOSAT/SWIM data in the Arctic ocean[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(4): 881-890.
- [21] 张晓宇. 基于多星 SAR 同步数据的海浪谱截断波长补偿方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.

[作者简介]

姜肖宇 1998 年生, 硕士研究生。
孟俊敏 1973 年生, 博士, 研究员。
罗 偲 1983 年生, 博士, 副教授。

(本文编辑: 傅 杰)

(英文编辑: 赵尹默)