

哨兵1号和高分三号SAR数据海浪谱反演精度评估

万勇¹, 马恩男², 曲若钊², 戴永寿¹

1. 中国石油大学(华东) 海洋与空间信息学院, 青岛 266580;

2. 中国石油大学(华东) 控制科学与工程学院, 青岛 266580

摘要: 合成孔径雷达SAR (Synthetic Aperture Radar) 是一种重要的海浪观测手段, 研究其SAR图像海浪谱反演结果的精度, 是其广泛应用于海浪观测的前提。欧洲航天局ESA (European Space Agency) 的哨兵1号卫星 (Sentinel-1) 和中国自主研发的高分三号卫星 (GF-3) 是目前在轨运行的两颗SAR卫星, 利用两颗卫星的SAR数据反演海浪和风场参数是目前国内外研究团队最为关注的问题之一。本文重点研究并对比了哨兵1号卫星SAR IW模式 (Interferometric Wide swath) 和GF-3卫星SAR条带模式数据海浪谱反演的精度。选取印度洋海上丝绸之路海域和太平洋、大西洋近岸海域不同海况下的两卫星SAR数据进行海浪参数反演, 将反演结果分别与欧洲天气预报中心ECMWF (European Center for Medium-range Weather Forecasts) 的ERA-5数据和浮标海浪数据进行了对比, 结果显示, 与ERA-5数据对比, Sentinel-1卫星反演有效波高和平均波周期的均方根误差RMSE (Root Mean Squared Error) 分别为0.30 m、0.63 s, GF-3卫星反演有效波高和平均波周期的均方根误差分别为0.37 m、0.99 s; 与浮标数据对比, 哨兵1号卫星反演有效波高和平均波周期的均方根误差分别为0.40 m、0.91 s, GF-3卫星反演有效波高和平均波周期的均方根误差分别为0.42 m、0.94 s。结果表明, 基于海浪谱反演的GF-3卫星与Sentinel-1卫星SAR海浪参数反演精度满足海洋遥感领域的要求, 二者海浪谱反演结果精度相当。

关键词: SAR, 高分三号 (GF-3), 哨兵1号 (Sentinel-1), 海浪谱反演, 精度对比

中图分类号: P2

引用格式: 万勇, 马恩男, 曲若钊, 戴永寿. 2023. 哨兵1号和高分三号SAR数据海浪谱反演精度评估. 遥感学报, 27(4): 891-904

Wan Y, Ma E N, Qu R Z and Dai Y S. 2023. Accuracy evaluation of wave spectrum inversion based on Sentinel-1 and GF-3 SAR data. National Remote Sensing Bulletin, 27(4): 891-904 [DOI:10.11834/jrs.20221503]

1 引言

海浪是由海面风场、海底地形、洋流等多方因素共同作用产生的海面不规则起伏的海洋现象, 是一种重要的海洋动力过程要素, 是与人类活动最直接相关的海洋现象之一。海浪的监测研究对航运、船舶设计、国防等都有重要意义。

海上丝绸之路是关乎全球未来经济发展的重要航线, 美国东西海岸也分布着北大西洋航线、南北美航线等全球重要航线; 沿线海域的海上航行、港口运营等都对海洋环境安全有着严格要求, 因此对相关海域进行海浪信息监测具有重大意义。

对于海洋的观测, 目前公认最可靠的观测方式为浮标观测 (Wang等, 2019), 但由于浮标观

测为单点观测, 主要分布于近岸区域, 且布放之后的维护比较困难。因此, 浮标并不是实现大范围空间域、长时间域海浪观测的理想手段。另外, 海浪数值预报模式也是一种常见的海浪观测方式。海浪数值预报是根据一段时间内的海况观测资料, 通过海浪统计特性和物理建模从而建立的海浪预报方法 (闻斌和刘俊, 2006), 但不是现场观测结果 (许富祥, 1988)。因此, 海浪数值预报模式也不是获取实测海洋信息的理想手段。

微波遥感有效地弥补了上述观测手段的不足 (张政, 2017)。SAR、雷达高度计、波谱仪均可实现大范围长时间的海浪观测。而SAR可以提供海面二维信息, 且其分辨率要高于高度计和波谱仪, SAR成像不依赖于天气、光照等因素。利用SAR

收稿日期: 2021-07-28; 预印本: 2022-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(编号:61931025); 国家重点研发计划(编号:2017YFC1405600)

第一作者简介: 万勇, 研究方向为海洋微波遥感。E-mail: wanyong@upc.edu.cn

通信作者简介: 马恩男, 研究方向为SAR海浪探测。E-mail: 1284914612@qq.com

对海面的成像, 通过傅里叶变换得到海面二维海浪谱, 进而获得海浪频谱, 则可计算出有效波高、平均波周期等重要参数 (Li 等, 2002)。因此 SAR 是实现大范围长时间海浪观测的重要手段。

在过去的几十年里, 从 SAR 图像中反演得到海浪参数的技术迅速发展, 目前海浪参数的反演方法可以分为两大类。第一类是理论算法: 1991 年 Hasselmann 和 Hasselmann (1991) 提出了 Max-Planck Institute Algorithm (MPI) 反演方法, 推导出 SAR 图像谱到 SAR 海浪方向谱的非线性映射关系, 通过 SAR 海浪方向谱反演得到海浪参数, 并于 1996 年对该算法提出改进 (Hasselmann 等, 1996); Mastenbroek 和 de Valk (2000) 基于 MPI 方法提出了半参数反演法 SPRA (Semi-Parametric Retrieval Algorithm), 该方法针对 ERS 卫星波模式数据, 其初猜谱由同步散射计的信息计算得到; Schulz-Stellenfleth 等 (2005) 提出了一种改进的非线性反演方法 PARS (Partition Rescale and Shift Algorithm), 该方法由 MPI 方法和交叉谱法 (Engen 和 Johnsen, 1995) 结合而成, 解决了反演海浪传播方向 180° 模糊的问题, 但其同样需要输入初猜谱。同年孙建针对 MPI 和 SPRA 的缺点, 提出了一种改进的海浪谱反演方法——参数化初猜谱方法 PFSM (Parametrized First-Guess Spectra Method) (Sun 和 Guan, 2006; Sun 和 Kawamura, 2009), 利用该方法得到的最优 SAR 谱与 SAR 图像谱最为一致。这些算法在反演过程中都需要输入初猜谱。

海浪参数反演的第二类方法是经验算法: Schulz-Stellenfleth 等 (2007) 提出一种可以直接从 ERS-2 的 SAR 图像提取海浪参数的算法 CWAVE-ERS, 该方法直接从 ERS-2 SAR 波模式数据中提取海浪参数, 不需要计算海浪谱, 该算法在中低海况条件下反演结果比较理想。后续该经验算法被扩展应用到其他卫星, 陆续开发出 CWAVE-ENV (Li 等, 2011)、CWAVE-S1 (Stopa 和 Mouche, 2017) 及基于同极化 GF-3 卫星 SAR 数据的 CSAR_WAVE2 (Sheng 等, 2018) 等。但这类方法也存在缺点: 首先, 经验方法的建立依赖于外部数据提供准确的海浪信息, 方法的反演精度受外部数据的制约。其次, 经验方法往往都是针对特定的 SAR 卫星数据拟合得到的, 其普适性有限。最后, 经验方法提供的海浪信息不如谱方法提供

的信息完备。因此, 经验算法存在一定的局限性。

当前, 欧空局发射的哨兵 1 号卫星 (Sentinel-1) 和中国自主研发并发射的高分三号 (GF-3) 卫星现在轨运行。基于 GF-3 卫星和 Sentinel-1 卫星 SAR 图像的海浪参数反演方法都在被陆续开发 (王婧, 2019; Zhu 等, 2018)。尽管当前已有很多针对两卫星 SAR 的海浪参数反演方法, 但是缺少针对二者 SAR 不同海况下海浪谱反演结果的分析。

综上所述, 传统的海浪反演方法通常基于 MPI 反演方法发展而来, 经验算法需对不同卫星分别训练反演模型。本文利用 GF-3 卫星 SAR 图像和 Sentinel-1 卫星 SAR 图像, 使用 MPI 方法反演海浪有效波高和平均波周期, 反演结果分别与 ERA-5 的海浪数据和美国国家浮标数据中心的浮标海浪数据进行比较, 研究分析两卫星 SAR 图像在不同海况下基于海浪谱方法的海浪参数反演结果, 为后续海洋研究提供数据选择上的参考。

2 研究区域及数据集

2.1 区域选择

海上丝绸之路和南北美洲航线等是世界经济文化交流的重要通道, 本文选取了海上丝绸之路沿线印度洋海域的马六甲海峡和霍尔木兹海峡区域、太平洋东岸及大西洋西岸近岸区域作为研究区域, 如图 1 所示。图 1 中红色小方框为 Sentinel-1 卫星 SAR 成像区域, 蓝色小方框为 GF-3 卫星 SAR 成像区域。图 1 (a) 中黑色线为印度洋海域丝绸之路的一段, 棕色框区域为霍尔木兹海峡, 绿色框区域为马六甲海峡; 图 1 (b) 中黑色框区域为太平洋东岸, 橙色框区域大西洋西岸。本文选用所有 SAR 数据成像时间均为 2020 年。

2.2 数据来源

2.2.1 哨兵 1 号卫星

欧州航天局研发的 Sentinel-1 系列卫星包括 Sentinel-1A 和 Sentinel-1B 两颗卫星, 分别于 2014 年和 2016 年发射, 它们搭载了 C 波段可编程极化 SAR 系统, 具有重访周期短、覆盖面积广、分辨率高等特点, 且其可全天时、全天候成像。Sentinel-1 卫星有 4 种成像模式, 包括 IW (Stripmap)、WV (Wave) 和 EW (Extra Wide

swath)。目前 WV 模式 SAR 数据被广泛应用于台风监测 (Li 等, 2002)、海面风速反演 (Monaldo 等,

2016)、海浪参数反演等领域。哨兵1号卫星 SAR 图像可从官网免费获取。

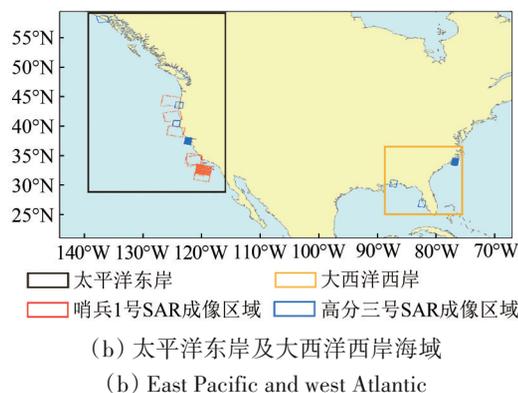
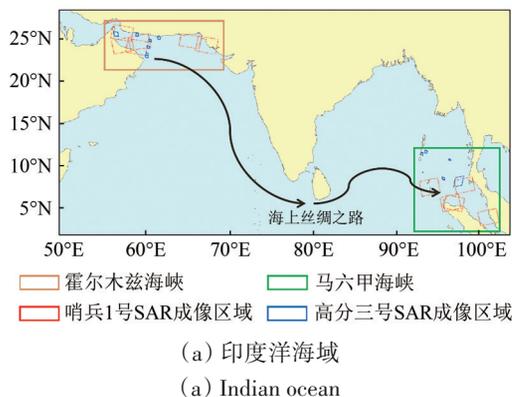


图1 研究区域示意图
Fig. 1 Research area

本文选用其 2020 年 IW 模式、VV 极化下单视复图像 SLC (Single Look Complex) 进行海浪参数反演, SLC 数据包含每个像素点的强度和相位信息。IW 模式的刈幅宽度为 250 km, 分辨率为 5 m×20 m, 入射角在 29.1°—46° 范围内。图 2 为 Sentinel-1 卫星 2020-01-07 14:29:57 (UTC) SAR 海浪成像图像, 其像素大小为 13671×71746。

分辨率最高可达 3 m, 刈幅宽度最高可达 130 km。图 3 为 GF-3 卫星 2020-01-16 T 14:10:48 (UTC) SAR 海浪成像图像, 其像素大小为 32840×28626。



图2 哨兵1号卫星 2020-01-07 T 14:29:57(UTC) SAR 海面成像图像

Fig. 2 The sea surface image of the Sentinel-1 SAR acquired on 2020-01-07 T 14:29:57 (UTC)

2.2.2 高分三号卫星

高分三号卫星是中国 2016 年 8 月发射的一颗搭载 C 波段多极化合成孔径雷达的卫星, 轨道高度为 755 km, 重访周期为 26 天。高分三号是中国“天眼工程”的重要组成部分, 也是“高分家族”中唯一一颗合成孔径雷达卫星, 更是迄今为止世界上已有星载合成孔径雷达中成像模式最多的卫星—有 12 种成像模式。高分三号卫星具有高空间分辨率、高时间分辨率的优点, 而且也可以全天时、全天候的对海观测, 其 SAR 图像数据也可通过中国海洋卫星服务系统申请获取。

本文选用其 2020 年 VV 极化和 HH 极化下条带模式的 SAR 图像进行海浪参数反演, 条带模式的

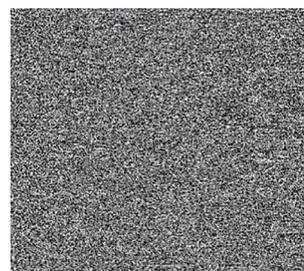


图3 高分三号卫星 2020-01-16 T 14:10:48(UTC) SAR 海面成像图像

Fig. 3 The sea surface image of the GF-3 SAR acquired on 2020-01-16 T 14:10:48 (UTC)

2.2.3 NDBC 浮标数据

美国国家浮标数据中心 (NDBC) 主要提供美国东西海岸和太平洋海域的海浪浮标观测数据, 可全天时全天候的观测海洋状况。浮标观测是目前公认的最准确的海浪观测方式。

本文选取了美国东西海岸区域与 SAR 图像匹配的浮标数据, 用以验证 Sentinel-1 卫星和 GF-3 卫星反演结果的准确性, 并选取部分浮标数据对 ERA-5 数据的精度进行验证。图 4 给出了本文所用浮标的位置信息。

2.2.4 ECMWF 数据

欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 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。本文选用 ECMWF ERA-5 数据, 是 ECMWF 对全球气候的第五代再分析数据, 于 2019 年取代了其前身 ERA-Interim 再分析数据 (Sreelakshmi 和 Bhaskaran, 2020)。与 ERA-Interim 数据相比, ERA-5 数据具有更高的时间分辨率: 其时间分辨率可达 1 小时, 空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 。

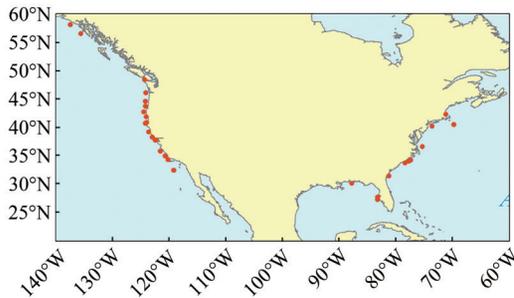


图4 浮标位置示意图

Fig. 4 Buoy location used in this paper

本文主要使用了 ECMWF ERA-5 与 SAR 数据时空匹配的 10 m 风向、10 m 风速、有效波高和平

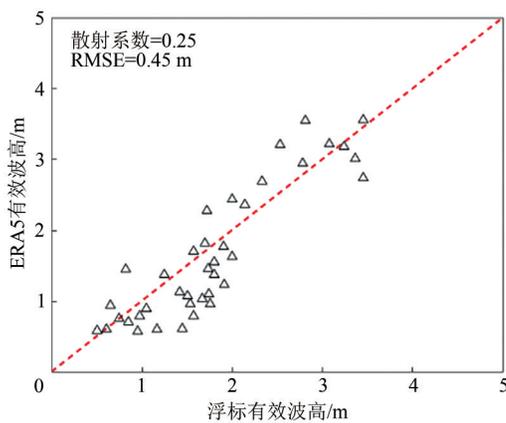
均波周期数据, 与 SAR 数据匹配的时间窗口为 1 h, 空间窗口为 12.5 km。其中, 10 m 风向、10 m 风速信息用于生成初猜谱, 有效波高与平均波周期数据用于验证反演得到的海浪参数的准确性。

为了验证 ECMWF ERA-5 数据的准确性, 本文在美国东西海岸选取了部分 NDBC 浮标数据, 提取其有效波高和平均波周期数据对 ECMWF ERA-5 数据进行了验证, 计算均方根误差、散射系数 SI (Scatter Index), 验证 ERA-5 数据精度。

共选用 40 组与 ERA-5 数据匹配的浮标数据, 根据浮标数据观测时间匹配 ERA-5 数据的时间, 时间分辨率为 30 min; 空间匹配时根据式 (1) 计算二者的最小距离 d , 确定 ERA-5 数据与浮标数据匹配的最近点, 获取对应的 ERA-5 有效波高和平均波周期。

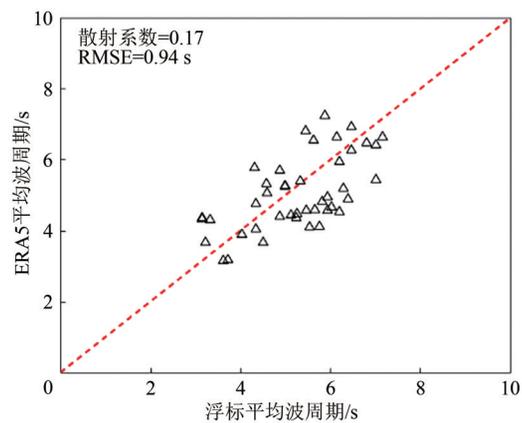
$$d = \sqrt{(x_{\text{buoy}} - x_{\text{ERA5}})^2 + (y_{\text{buoy}} - y_{\text{ERA5}})^2} \quad (1)$$

式中, x_{buoy} 和 y_{buoy} 表示浮标的经纬度, x_{ERA5} 和 y_{ERA5} 分别表示 ERA-5 数据的经纬度。结果如图 5 所示。



(a) 有效波高

(a) Significant wave height



(b) 平均波周期

(b) Mean wave period

图5 ERA-5 数据与浮标数据匹配验证结果图

Fig. 5 Comparison results of ERA-5 and buoy data

由结果可见, 与浮标数据相比, ERA-5 数据有效波高的 RMSE 和 SI 分别为 0.45 m 和 0.25, 平均波周期的 RMSE 和 SI 分别为 0.94 s 和 0.17。结果可见 ERA-5 数据与浮标数据具有较好的一致性, 因此本文将使用 ERA-5 数据作为参考验证海浪参数的反演精度。

3 SAR 海浪参数反演方法简介

SAR 对海面的成像是个复杂的过程, SAR

对海浪的成像过程中存在长波对短波的调制, 调制作用主要包括倾斜调制、水动力调制和速度聚束调制。前两种属于线性调制, 而速度聚束调制为非线性调制。由于 SAR 图像谱与海浪谱之间的非线性映射关系, 直接进行 SAR 图像谱到海浪谱的运算很困难, Hasselmann 和 Hasselmann (1991) 推导并提出从 SAR 图像到海浪谱非线性运算关系, 开发了一种基于初猜谱的反演方法——MPI 方法 (Hasselmann 等, 1996)。

MPI 方法需要先确定一个初猜谱，Wan 等 (2020) 提出相比于 PM 谱，E 谱作为初猜谱反演海浪参数适用性更好。本文利用 ERA-5 的风速及风向信息生成初猜谱 E 谱，根据非线性前向变换获得对应的 SAR 图像谱，将其与观测得到的 SAR 图像谱进行比较，计算代价函数，进行迭代处理，直至代价函数小于所设定的值。Hasselmann 和 Hasselmann (1991) 指出通常经过 3 到 4 次迭代即可，本文迭代次数为 4。

波数方向谱 E 谱可由全波数谱与方向函数表示

$$E(k, \varphi) = S \cdot f(k, \varphi) / k \quad (2)$$

式中， k 为海浪波数； S 为全波数谱， $f(k, \varphi)$ 为方向函数，公式如下：

$$S = k^{-3} \left(\left(\frac{\alpha_p}{2} \cdot \frac{c_p}{c} \cdot F_p \right) + \left(\frac{\alpha_m}{2} \cdot \frac{c_m}{c} \cdot F_m \right) \right) \quad (3)$$

$$f(k, \varphi) = \frac{1}{2\pi} (1 + \Delta(k) \cos(2\varphi)) \quad (4)$$

式中， φ 为相对于风的海浪传播方向； α_p 和 α_m 分别为长波的平衡范围参数和短波的平衡范围参数； c_p 表示与峰值波数对应的相速度， c_m 表示小波相速度； F_p 和 F_m 分别是长波和短波副作用函数 (Elfouhaily 等, 1997)。

MPI 反演方法的代价函数如下：

$$J = \int (P(k) - \hat{P}(k))^2 \hat{P}(k) dk + \mu \int \left(\frac{F(k) - \hat{F}(k)}{B + \hat{F}(k)} \right)^2 dk \quad (5)$$

式中， $P(k)$ 和 $\hat{P}(k)$ 分别表示最优 SAR 谱和观测 SAR 谱， $\hat{F}(k)$ 表示初猜谱， $F(k)$ 表示代价函数最小时对应的海浪谱， μ 为权重系数， $\mu = 0.1\hat{P}_{\max}^2$ ，本文根据 Hasselmann 等 (1996) 论文设置参 μ 为 0.5， B 是为了确保即使 $\hat{F}(k) = 0$ 代价函数依然有意义， $B = \hat{F}_{\max}$ ，其中 \hat{P}_{\max} 和 \hat{F}_{\max} 分别表示观测 SAR 谱和初猜谱的最大值。MPI 反演流程如图 6 所示。

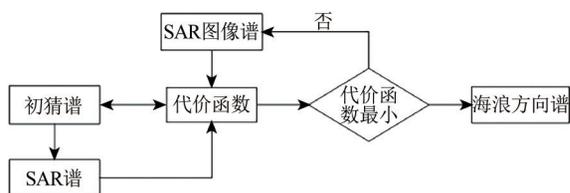


图6 MPI反演流程示意图

Fig. 6 Flowchart of MPI inversion method

输入 SAR 图像谱和初猜谱——E 谱，利用前向映射从初猜谱计算得到仿真 SAR 谱，再利用仿真的 SAR 谱与观测的 SAR 图像谱来计算代价函数，最后用代价函数来判断迭代过程是否收敛。当价值函数最小时反演得到的海浪谱和初猜谱最接近，此时得到的即为最优海浪谱。

利用 MPI 方法反演得到的最优海浪谱可以计算有效波高和平均波周期等海浪参数。将海浪谱 $F(\omega, \theta)$ 对方向进行积分可以获得海浪频谱 $S(\omega)$ 。海浪参数可以由频谱的一阶矩、二阶矩及更高阶矩计算得到。

反演有效波高的计算公式如下：

$$H_s = 4 \sqrt{m_0} = 4 \sqrt{\int S(\omega) d\omega} \quad (6)$$

反演平均波周期的计算公式如下，是由零阶矩和二阶矩计算得到的。

$$T_{m0} = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} = 2\pi \sqrt{\int \frac{S(\omega)}{\omega^2 S(\omega)} d\omega} \quad (7)$$

4 结果与讨论

4.1 海浪谱反演

本文对 Sentinel-1 和 GF-3 卫星 SAR 数据进行了处理并反演得到海浪谱，从中提取了海浪参数。

在 SAR 成像过程中，具有较高多普勒频率的数据是来自天线波束前端的成像区域目标，而相同目标处于波束后端时产生具有较低多普勒频率的回波数据 (戴乐和高梅国, 2006)。所以本文对 Sentinel-1 和 GF-3 卫星 SAR 图像进行多视处理——用滤波器将图像的多普勒谱分割为 L 个条带，图像强度不变，方差变小，去除斑点噪声。提取了两卫星 SAR 图像的强度数据。然后将提取到的单景 SAR 图像的强度数据分割成 25×25 的子图像，将每个子图像的强度数据以 128×128 像素为单位进行傅里叶变换，得到对应子图像的 SAR 图像谱。

本文使用 E 谱作为初猜谱，并输入 ERA-5 的同步风场数据构建初猜谱，利用 MPI 方法计算得到最适海浪谱和最适 SAR 谱 (MPI 方法所得的海浪方向谱)。

图 7、图 8 分别为从 Sentinel-1 卫星 2020-01-07 T 14:29:57 (UTC) 数据和 GF-3 卫星 2020-01-16 T 14:10:48 (UTC) 数据中各选取一个子图像以 E 谱作为初猜谱时反演所得的海浪谱结果。

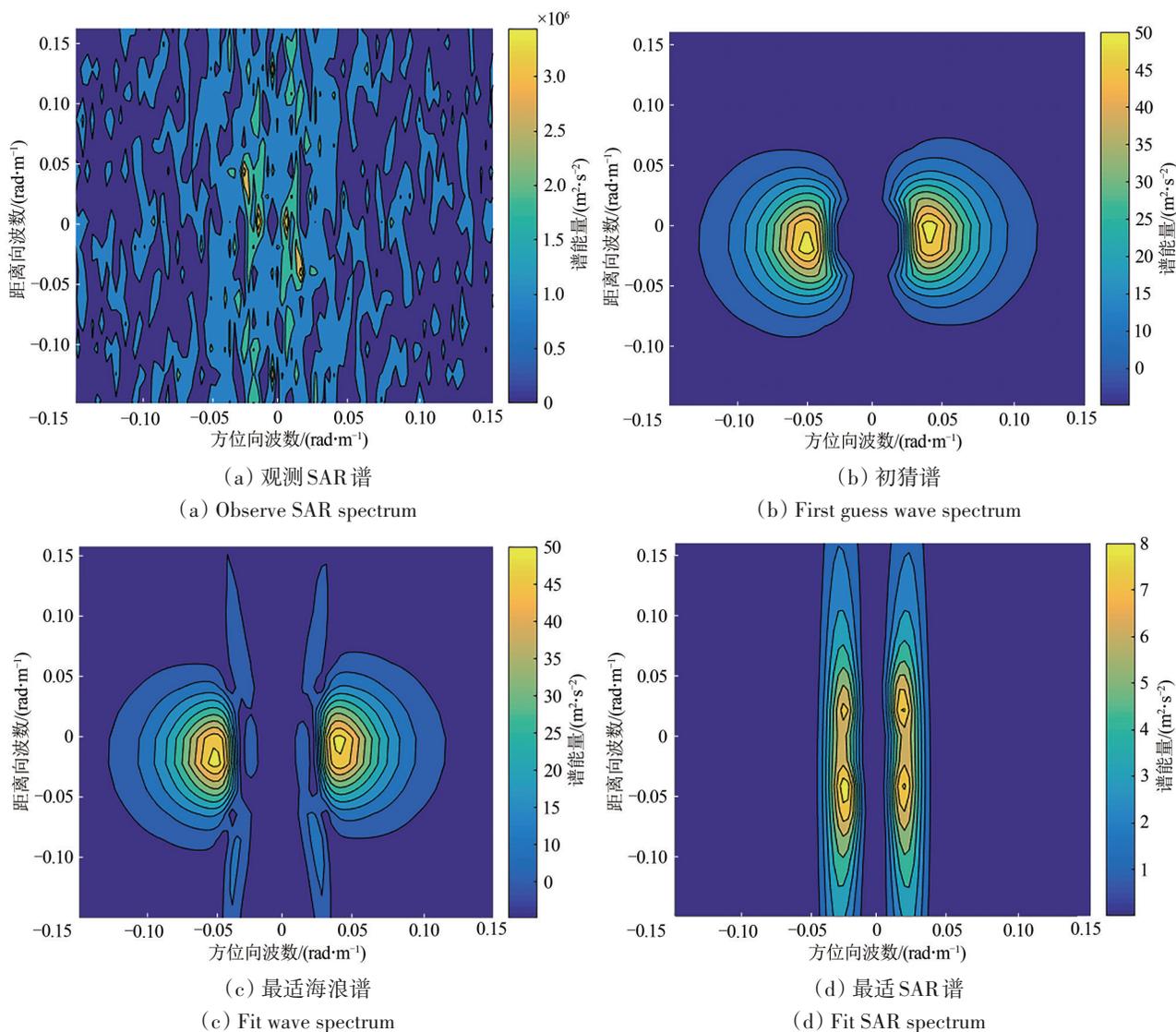
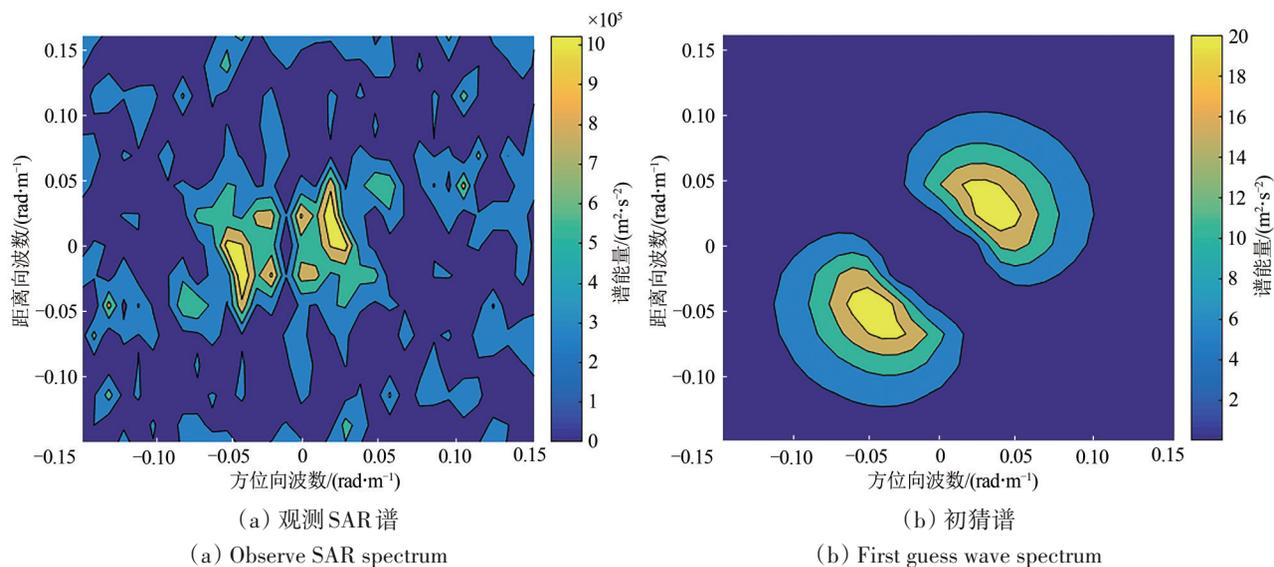


图7 E谱作为初猜谱时2020-01-07 T 14:29:57(UTC)哨兵1号数据海浪谱反演结果

Fig. 7 Wave spectrum inversion results of 2020-01-07 T 14:29:57(UTC) Sentinel-1 SAR data when the E spectrum was used as the first guess spectrum



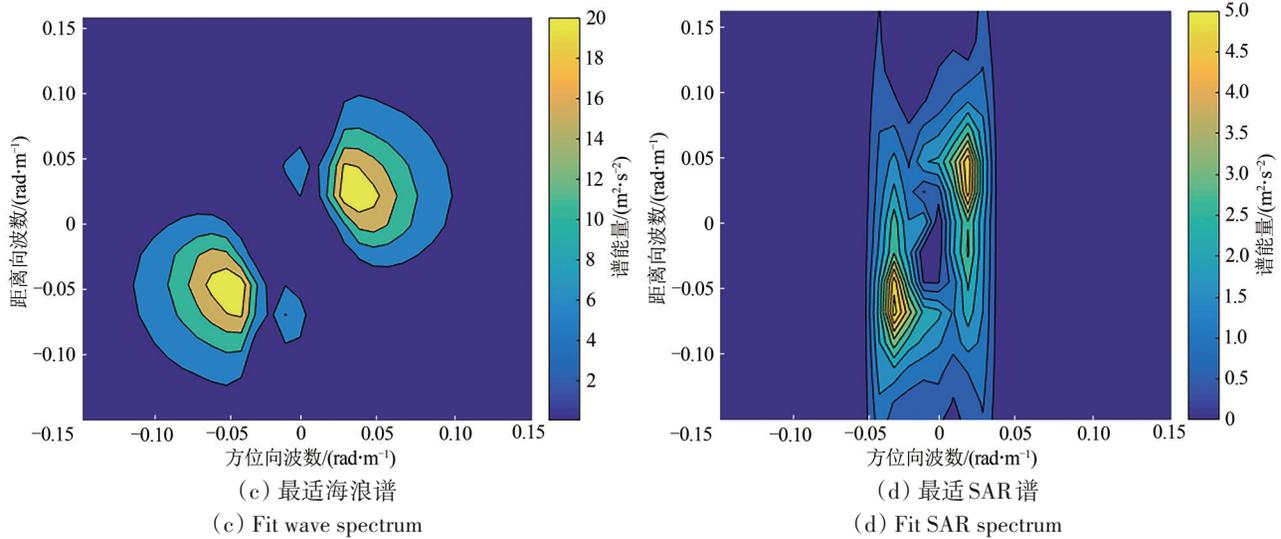


图8 E谱作为初猜谱时2020-01-16 T 14:10:48(UTC) 高分三号数据海浪谱反演结果

Fig. 8 Wave spectrum inversion results of 2020-01-16 T 14:29:57(UTC) GF-3 SAR data when the E spectrum was used as the first guess spectrum

4.2 不同海况下反演结果与 ERA-5 数据验证分析

根据4.1节反演得到的海浪谱，通过谱矩公式计算得到海浪参数，每景数据可分别得到625个有效波高和平均波周期。

利用ERA-5提供的有效波高数据按照国家海况表，将SAR数据的海况分为低 ($H_s < 1.25$ m)、中 ($1.25 \text{ m} \leq H_s < 2.5$ m)、高 ($2.5 \text{ m} \leq H_s$) 3种海况，选取相近海况下哨兵1号卫星和高分三号卫星SAR数据分别进行海浪参数反演，将反演结果分别与ERA-5数据进行对比，求取均方根误差、散射系数，验证海浪参数反演精度，评估不同海况下两卫星海浪参数的反演质量。

4.2.1 低海况下反演结果分析

分别选取了马六甲海峡两卫星SAR数据各4景；霍尔木兹海峡Sentinel-1 SAR数据4景、GF-3 SAR数据2景；大西洋西岸GF-3 SAR数据2景。去除陆地部分后，共有Sentinel-1卫星有效数据对3484组，GF-3卫星有效数据对3353组。分别对其进行海浪参数反演，将反演结果与ERA-5数据进行对比，计算其均方根误差及散射系数，均方根误差和散射系数越小，反演精度越高。低海况下两卫星反演结果与ERA-5数据的对比结果如图9、图10所示，图9、10中色标表示对应数据数量。

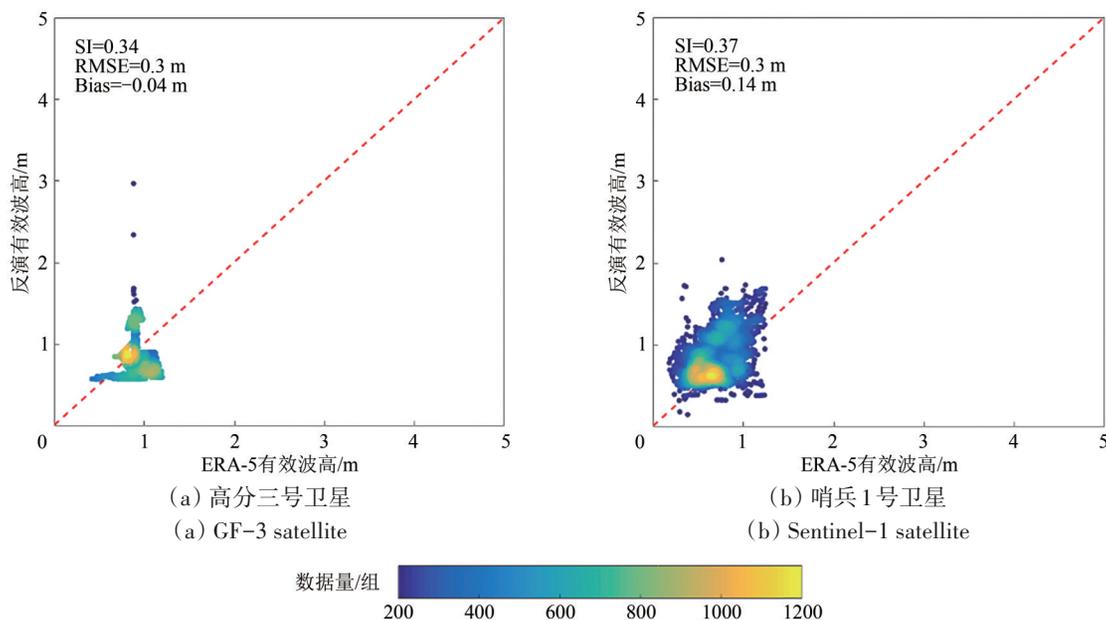


图9 低海况下高分三号卫星和哨兵1号卫星有效波高反演精度

Fig. 9 The SWH inversion results of GF-3 and Sentinel-1 SAR were compared with ERA-5 data under low sea states

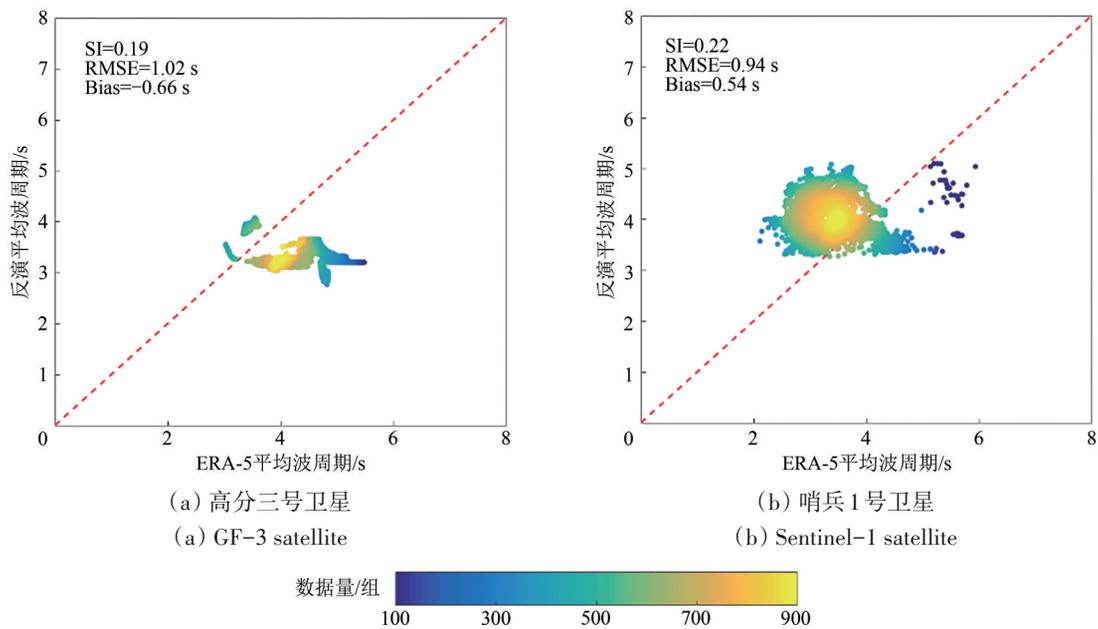


图 10 低海况下高分三号卫星和哨兵 1 号卫星平均波周期反演精度

Fig. 10 The T_m inversion results of GF-3 and Sentinel-1 SAR were compared with ERA-5 data under low sea states

从图 9、10 中可看出，低海况下，Sentinel-1 卫星有效波高和平均波周期反演结果与 ERA-5 数据相比均有高估。这是因为低海况所选取的 SAR 成像区域大多为马六甲海峡，受地理位置影响，风浪在此处未充分发展，且海峡深处较狭窄不利于涌浪传播，而初猜谱 E 谱是对充分发展海况的描述，所以 Sentinel-1 卫星反演结果与 ERA-5 数据相比有所高估；而高分三号低海况下所选取的区域除霍尔木兹海峡和马六甲开阔处外还存在大西洋西岸的 SAR 数据，受地理环境影响，存在涌浪传播的情况，且初猜谱 E 谱属于风浪谱，对涌浪的信息涵盖不全，且由初猜谱到对应的 SAR 图像谱的非线性变换会忽视部分涌浪信息，反演过程中会对涌浪信息有损失，故而反演平均波周期有所低估。

此外，低海况下 ECMWF 等海洋观测方式效果都不理想：ECMWF 的风场数据是同化了卫星遥感设备数据和现场实测数据，在风速 3—20 m/s 的范围内同化数据对风速预估的一致性较好 (Abdalla 等, 2019)，而本文的海浪谱反演方法以 ECMWF 数据的风场信息为输入生成初猜谱进而反演海浪参数；且有效波高在 1.5—6.5 m 时 ECMWF 数据的精度更好 (Wang 等, 2019)。所以在低海况下，反演结果与 ECMWF 数据会出现较大偏差。

由表 1 可知两卫星 SAR 数据对海浪参数的反演精度都符合海洋遥感领域公认的指标要求，即与现场实测或浮标数据比对，有效波高的 RMSE < 0.5 m，平均波周期的 RMSE < 1.2 s (张丽婷, 2014)。对海浪有效波高的反演 GF-3 卫星 SAR 数据反演精度要优于 Sentinel-1 卫星，但其对平均波周期的反演精度稍逊于 Sentinel-1 卫星。

表 1 低海况下高分三号和哨兵 1 号卫星反演结果对比
Table 1 Comparison of inversion results of GF-3 and Sentinel-1 SAR under low sea states

卫星	有效波高		平均波周期	
	RMSE/m	SI	RMSE/s	SI
高分三号	0.30	0.34	1.02	0.19
哨兵 1 号	0.30	0.37	0.94	0.22

4.2.2 中海况下反演结果分析

分别选取了马六甲海峡两卫星 SAR 数据各 1 景；霍尔木兹海峡 Sentinel-1 SAR 数据 2 景、GF-3 SAR 数据 5 景；大西洋西岸和太平洋东岸 Sentinel-1 SAR 数据 5 景、GF-3 SAR 数据 2 景。去除陆地部分后，共有 Sentinel-1 卫星有效数据对 4277 组，GF-3 卫星有效数据对 3478 组。分别对其进行海浪参数反演，将反演结果与 ERA-5 数据进行对比，其结果如图 11、图 12 所示。

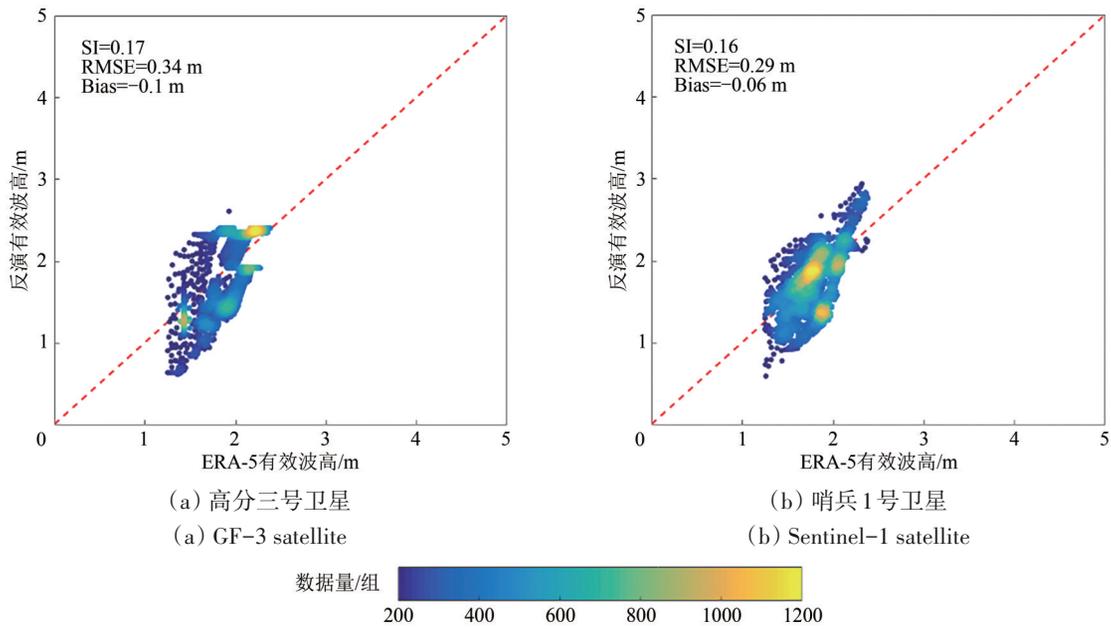


图 11 中海况下高分三号卫星和哨兵1号卫星有效波高反演精度

Fig. 11 The SWH inversion results of GF-3 and Sentinel-1 SAR were compared with ERA-5 data under moderate sea states

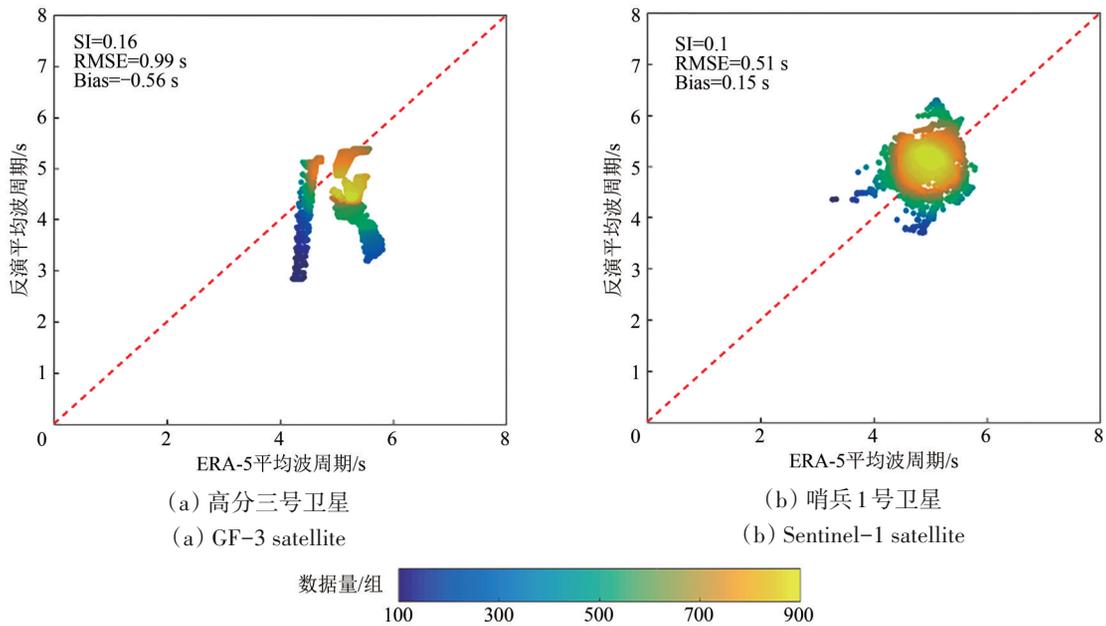


图 12 中海况下高分三号卫星和哨兵1号卫星平均波周期反演精度

Fig. 12 The T_m inversion results of GF-3 and Sentinel-1 SAR were compared with ERA-5 data under moderate sea states

从图 12 中可以看出，高分三号卫星 SAR 数据平均波周期反演结果与 ERA-5 数据相比略有低估，这是因为此处选取数据多为霍尔木兹海峡数据，受印度洋上涌浪传播影响，此处多为涌浪信息，且 E 谱属于风浪谱，对涌浪的信息涵盖不全，反演过程中对涌浪信息有损失，故而对平均波周期有所低估。

由表 2 可知中等海况下，无论对海浪有效波高还是平均波周期的反演，高分三号卫星 SAR 数据反演结果的精度稍逊色于 Sentinel-1 卫星 SAR 数据

反演结果的精度。但二者 SAR 数据对海浪参数的反演结果均满足精度要求。

表 2 中海况下高分三号和哨兵1号卫星反演结果对比
Table 2 Comparison of inversion results of GF-3 and Sentinel-1 SAR under moderate sea states

卫星	有效波高		平均波周期	
	RMSE/m	SI	RMSE/s	SI
高分三号	0.34	0.17	0.99	0.16
哨兵1号	0.29	0.16	0.51	0.10

4.2.3 高海况下反演结果分析

分别选取了大西洋西岸和太平洋东岸两卫星 SAR 数据各 3 景。去除陆地部分后, 共有哨兵 1 号

卫星有效数据对 1077 组, 高分三号卫星有效数据对 749 组。对其进行海浪参数反演, 将反演结果与 ERA-5 数据进行对比, 其结果如图 13、图 14 所示。

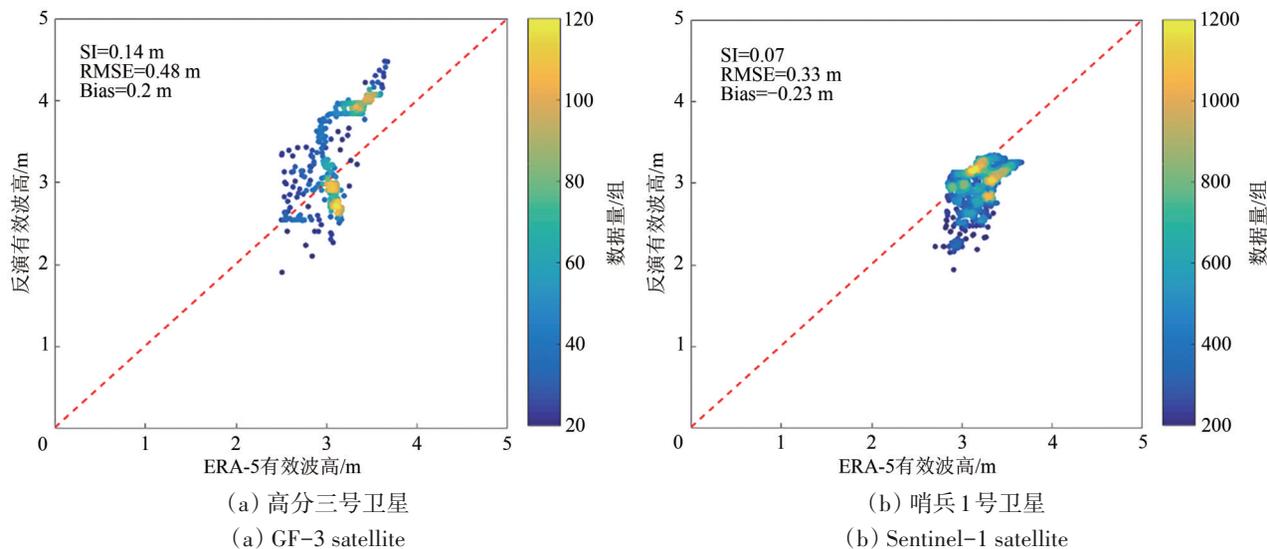


图 13 高海况下高分三号卫星和哨兵 1 号卫星有效波高反演精度

Fig. 13 The SWH inversion results of GF-3 and Sentinel-1 SAR were compared with ERA-5 data under high sea states

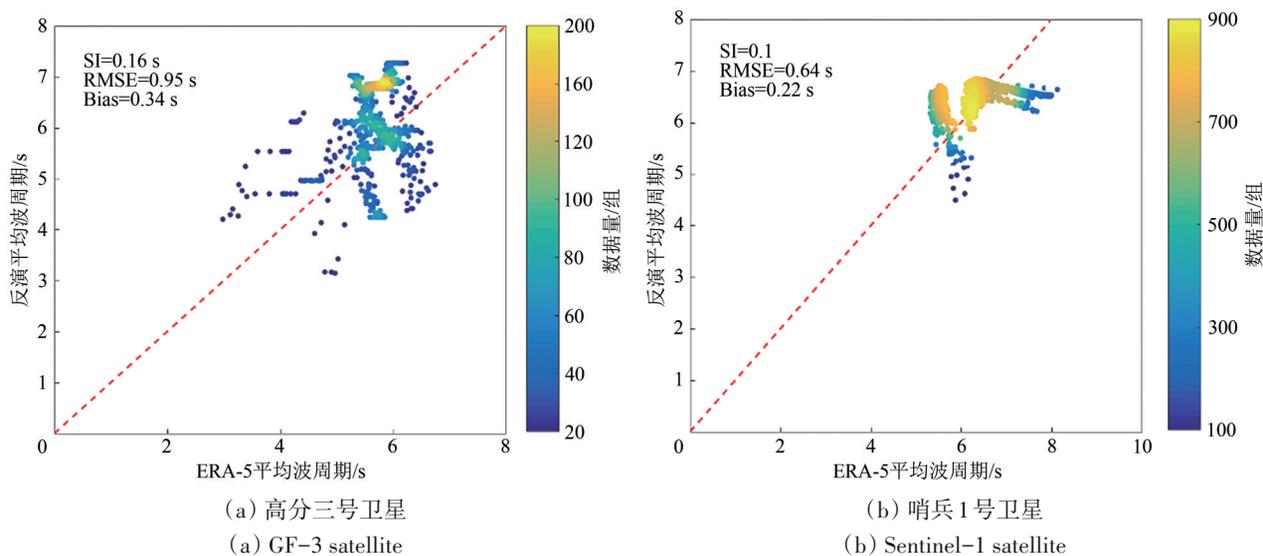


图 14 高海况下高分三号卫星和哨兵 1 号卫星平均波周期反演精度

Fig. 14 The T_m inversion results of GF-3 and Sentinel-1 SAR were compared with ERA-5 data under high sea states

由图 14 可以看出, 尤其对于高分三号卫星, 反演有效波高和平均波周期与 ERA-5 数据相比均有高估, 此处所用的高分三号和哨兵 1 号卫星 SAR 数据均位于美国东西海岸, 且在高海况下, 风浪占据主导, 涌浪的影响相对减少, 选取 SAR 成像时刻存在风浪未充分发展的情况, 而初猜谱 E 谱是

对充分发展海况的描述, 所以对有效波高和平均波周期有所高估。

由表 3 可知高海况下, 对海浪有效波高和平均波周期的反演, 高分三号卫星 SAR 数据反演精度都稍逊色于哨兵 1 号卫星。但二者 SAR 数据对海浪参数的反演结果均满足精度要求。

表3 高海况下高分三号和哨兵1号卫星反演结果对比
Table 3 Comparison of inversion results of GF-3 satellite and Sentinel-1 satellite under high sea states

卫星	有效波高		平均波周期	
	RMSE/m	SI	RMSE/s	SI
高分三号	0.48	0.14	0.95	0.16
哨兵1号	0.33	0.07	0.64	0.10

4.2.4 全海况下反演结果分析

对不同海况下所有数据点求取其有效波高和平均波周期的平均值，两卫星海浪参数反演结果的偏

差随ERA-5的有效波高、平均波周期变化的关系如图15、图16所示。可以简单看出，哨兵1号卫星反演结果与ERA-5数据相比有效波高随着海况的升高，两卫星反演结果的偏差增大，这与MPI反演方法本身适用情况有关：更适用于中低海况的海浪参数反演。对于有效波高的反演哨兵1号卫星的标准差的变化趋势要小于高分三号卫星；对于平均波周期的反演，高分三号卫星高海况下的平均波周期要小于中海况的平均波周期，印证上文推测高海况下风浪可能未充分发展。

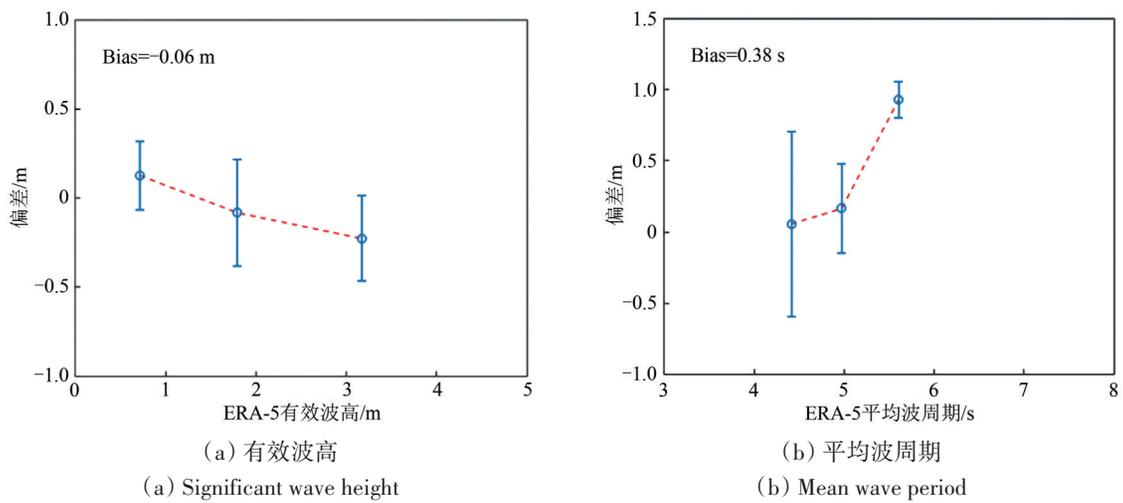


图15 不同海况下哨兵1号卫星海浪反演参数误差棒图

Fig. 15 Error bar image of wave inversion parameters of Sentinel-1 satellite under different sea states

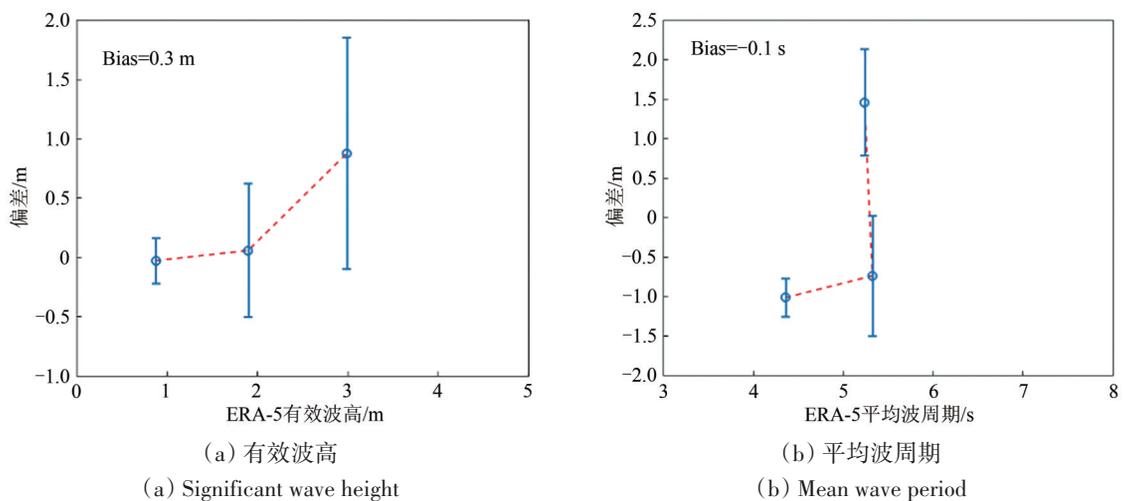


图16 不同海况下高分三号卫星海浪反演参数误差棒图

Fig. 16 Error bar image of wave inversion parameters of GF-3 satellite under different sea states

综上所述，不同海况下哨兵1号卫星和高分三号卫星海浪参数反演结果与ERA-5数据相比，有效波高的RMSE分别为0.31 m、0.38 m，平均波周

期的RMSE分别为0.70 s、0.99 s。总体而言，基于海浪谱的两卫星SAR海浪参数的反演结果均满足精度要求。甚至在低海况下高分三号卫星有效波

高的反演精度可与哨兵1号卫星的反演精度相媲美。

4.3 海浪参数反演结果与浮标数据验证

浮标观测是海浪参数观测中最为精确的一种现场观测方法，浮标数据对海浪反演结果的印证具有极其重要的作用，是比较理想和可靠的现场测量结果。本小节将使用美国国家浮标数据中心提供的浮标数据与高分三号、哨兵1号卫星SAR数据反演结果进行对比分析，进一步验证两卫星SAR数据质量的优劣性。

查找太平洋和大西洋近岸海域覆盖浮标位置点的SAR图像，提取浮标数据的有效波高和平均波周期，根据SAR成像时间与浮标数据进行时间匹配，浮标数据的最小时间分辨率为30 min。对于单景SAR图像已经划分并提取了子图像的经纬度，计算子图像经纬度与浮标距离，读取与浮标距离最近点的子图像的有效波高和平均波周期。共处理30景SAR数据进行海浪参数反演，其中，哨兵1号卫星20景，高分三号卫星10景。将SAR反演的海浪参数与NDBC浮标观测的海浪参数进行对比，结果如图17、图18所示。

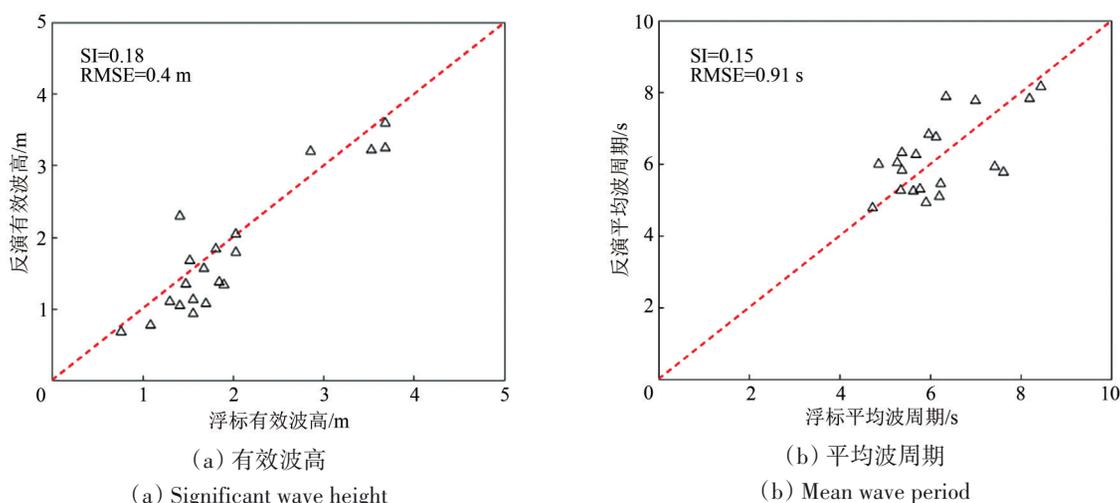


图17 哨兵1号SAR反演的海浪参数与浮标观测的海浪参数比对

Fig. 17 Comparison of wave parameters retrieved by Sentinel-1 SAR and buoys

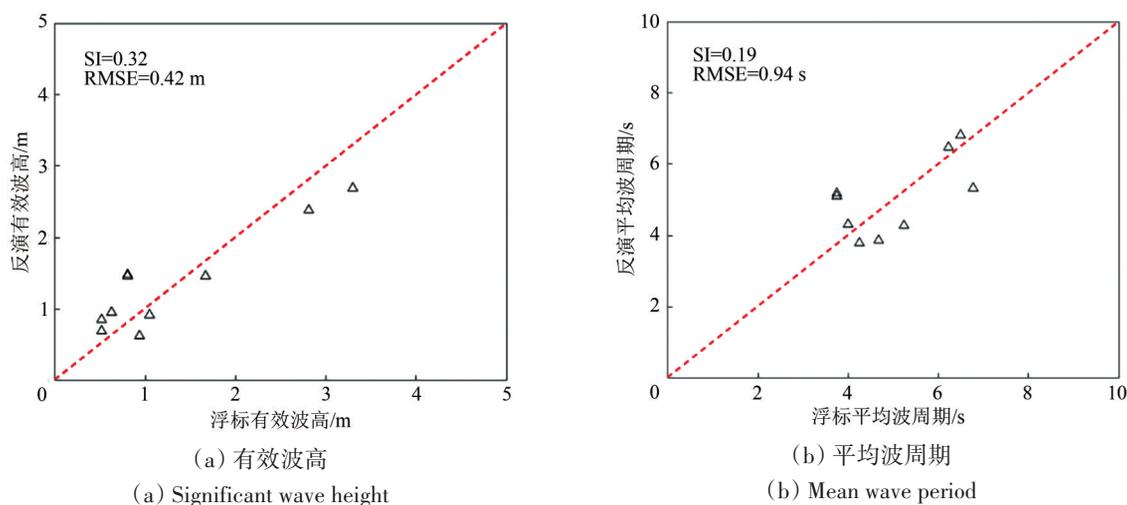


图18 高分三号SAR反演的海浪参数与NDBC浮标观测的海浪参数比对

Fig. 18 Comparison of wave parameters retrieved by GF-3 SAR and buoys

由结果可见，与NDBC浮标数据对比，两卫星SAR数据反演有效波高的RMSE为0.41 m，平均波

周期的RMSE为0.93 s。其中，Sentinel-1卫星SAR数据反演有效波高和平均波周期的RMSE分别为

0.40 m、91 s; GF-3 卫星 SAR 数据反演有效波高和平均波周期的 RMSE 分别为 0.42 m、0.94 s。

可见, 两颗卫星 SAR 数据海浪参数反演结果均满足精度要求; MPI 方法适用于两卫星的海浪参数反演。

5 结 论

本文基于哨兵 1 号和高分三号卫星 SAR 数据, 通过海浪谱法反演了不同海况下海浪信息, 系统地对比评估了基于谱方法的两卫星 SAR 数据海浪信息反演精度, 将 SAR 反演得到的有效波高和平均波周期分别与 ERA-5 和浮标海浪数据进行了对比, 分析对比了哨兵 1 号和高分三号卫星 SAR 数据海浪谱和海浪参数反演的精度, 为高分三号卫星 SAR 数据在海况监测、船舶航行、国防等领域的应用提供了重要的参考, 得到的结论如下:

(1) 与 ERA-5 数据相比, 哨兵 1 号卫星 SAR 数据对于海浪参数反演的精度优于高分三号卫星的 SAR 数据, 反演得到的海浪参数与 ERA-5 数据相比有更好的一致性。

(2) 高分三号卫星 SAR 数据可以满足不同海况下海浪参数反演的精度要求, 且低海况下, 高分三号卫星 SAR 数据有效波高的反演精度优于哨兵 1 号卫星 SAR 数据。

(3) 与 NDBC 浮标数据相比, 高分三号卫星的 SAR 数据海浪有效波高反演的精度与哨兵 1 号卫星 SAR 数据海浪有效波高反演的精度相当。

总体而言, 基于海浪谱的哨兵 1 号卫星与高分三号卫星 SAR 海浪参数反演, 两卫星的反演结果均符合本领域的指标要求, 二者海浪谱反演结果精度相当。作为中国首颗自主研发的 SAR 卫星, 高分三号卫星条带模式 SAR 数据在海洋研究等领域具有广阔的前景。

志 谢 感谢 National Data Buoy Center 提供浮标数据, 感谢中国海洋卫星数据卫星服务系统提供高分三号卫星 SAR 数据, 感谢欧空局提供哨兵 1 号卫星 SAR 数据, 感谢欧洲天气预报中心提供 ECMWF ERA-5 数据。

参考文献 (References)

Abdalla S, De Chiara G, Bidlot J and Isaksen L. 2019. Use of satellite

data to support ocean wind and wave forecasting: a review.

Dai L and Gao M G. 2006. A high-efficient realization algorithm of multi-look processing. *Modern Radar*, 28(5): 30-33 (戴乐, 高梅国. 2006. 一种高效的多视处理实现算法. *现代雷达*, 28(5): 30-33) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-7859.2006.05.009]

Elfouhaily T, Chapron B, Katsaros K and Vandemark D. 1997. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102(C7): 15781-15796 [DOI: 10.1029/97JC00467]

Engen G and Johnsen H. 1995. SAR-ocean wave inversion using image cross spectra. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(4): 1047-1056 [DOI: 10.1109/36.406690]

Hasselmann K and Hasselmann S. 1991. On the nonlinear mapping of an ocean wave spectrum into a synthetic aperture radar image spectrum and its inversion. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(C6): 10713-10729 [DOI: 10.1029/91JC00302]

Hasselmann S, Brüning C, Hasselmann K and Heimbach P. 1996. An improved algorithm for the retrieval of ocean wave spectra from synthetic aperture radar image spectra. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C7): 16615-16629 [DOI: 10.1029/96jc00798]

Li X F, Pichel W G, He M X, et al. 2002. Observation of hurricane-generated ocean swell refraction at the Gulf Stream north wall with the RADARSAT-1 synthetic aperture radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(10): 2131-2142 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.802474]

Li X M. 2010. Study of Algorithms for Ocean Wave Retrieval Using ENVISAT Advanced Synthetic Aperture Radar Wave Mode Data. Qingdao: Ocean University of China (李晓明. 2010. ENVISAT 卫星 ASAR 波模式数据海浪反演算法研究. 青岛: 中国海洋大学)

Li X M, Lehner S and Bruns T. 2011. Ocean wave integral parameter measurements using envisat ASAR wave mode data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(1): 155-174 [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2052364]

Mastenbroek C and de Valk C F. 2000. A semiparametric algorithm to retrieve ocean wave spectra from synthetic aperture radar. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C2): 3497-3516 [DOI: 10.1029/1999JC900282]

Monaldo F, Jackson C, Li X F and Pichel W G. 2016. Preliminary evaluation of sentinel-1A wind speed retrievals. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(6): 2638-2642 [DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2504324]

Schulz-Stellenfleth J, König T and Lehner S. 2007. An empirical approach for the retrieval of integral ocean wave parameters from synthetic aperture radar data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C3): C03019 [DOI: 10.1029/2006JC003970]

Schulz-Stellenfleth J, Lehner S and Hoja D. 2005. A parametric scheme for the retrieval of two-dimensional ocean wave spectra from synthetic aperture radar look cross spectra. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C5): C05004 [DOI: 10.1029/2004JC002822]

Sheng Y X, Shao W Z, Zhu S, Sun J, Yuan X Z, Li S Q, Shi J and Zuo J C. 2018. Validation of significant wave height retrieval from co-polarization Chinese Gaofen-3 SAR imagery by using an improved algorithm. *Acta Oceanologica Sinica*, 37(6): 1-10. [DOI: 10.1007/s13131-018-1217-1]

Sreelakshmi S and Bhaskaran P K. 2020. Wind-generated wave climate variability in the Indian Ocean using ERA-5 dataset. *Ocean Engineering*, 209: 107486 [DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107486]

Stopa J E and Mouche A. 2017. Significant wave heights from Sentinel-1

- SAR: validation and applications. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(3): 1827-1848 [DOI: 10.1002/2016JC012364]
- Sun J and Guan G L. 2006. Parameterized first-guess spectrum method for retrieving directional spectrum of swell-dominated waves and huge waves from SAR images. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 24(1): 12-20 [DOI: 10.1007/BF02842769]
- Sun J and Kawamura H. 2009. Retrieval of surface wave parameters from SAR images and their validation in the coastal seas around Japan. *Journal of Oceanography*, 65(4): 567-577 [DOI: 10.1007/s10872-009-0048-2]
- Wan Y, Qu R Z, Dai Y S and Zhang X Y. 2020. Research on the applicability of the E spectrum and PM spectrum as the first guess spectrum of SAR wave spectrum inversion. *IEEE Access*, 8: 169082-169095 [DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3023012]
- Wang J. 2019. The Research of Retrieving Wave Information from GF-3 SAR Wave Mode Images. Zhoushan: Zhejiang Ocean University (王婧. 2019. 高分三号(GF-3)卫星波模式SAR海浪信息反演研究. 舟山: 浙江海洋大学)
- Wang J J, Li B X, Gao Z Y and Wang J K. 2019. Comparison of ECMWF significant wave height forecasts in the China Sea with Buoy Data. *Weather and Forecasting*, 34(6): 1693-1704 [DOI: 10.1175/WAF-D-19-0043.1]
- Wen B and Liu J. 2006. Review of history and prospect for study of sea wave numerical modeling. *Marine Forecasts*, 23(4): 76-81 (闻斌, 刘俊. 2006. 海浪数值模式研究回顾与进展. 海洋预报, 23(4): 76-81) [DOI: 10.3969/j.issn.1003-0239.2006.04.010]
- Xu F X. 1988. Numerical forecasting experiment on sea waves of the north pacific. *Marine Forecasts*, 5(2): 29-34 (许富祥. 1988. 北太平洋海浪数值预报试验. 海洋预报, 5(2): 29-34)
- Zhang L T. 2014. The Influence of Parameter and Operating Mode of Synthetic Aperture Radar on Sea Wave Retrieval. Qingdao: Ocean University of China (张丽婷. 2014. SAR雷达参数及工作模式对海浪反演的影响研究. 青岛: 中国海洋大学)
- Zhang Z. 2017. The Research of Retrieving Sea Surface Wind and Ocean Wave Parameters from Synthetic Aperture Radar. Zhoushan: Zhejiang Ocean University (张政. 2017. 合成孔径雷达提取海面风、浪参数的研究. 舟山: 浙江海洋大学)
- Zhu S, Shao W Z, Armando M, Shi J, Sun J, Yuan X Z, Hu J C and Yang D K. 2018. Evaluation of Chinese quad-polarization gaofen-3 SAR wave mode data for significant wave height retrieval. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 44(6): 588-600 [DOI: 10.1080/07038992.2019.1573136]

Accuracy evaluation of wave spectrum inversion based on Sentinel-1 and GF-3 SAR data

WAN Yong¹, MA Ennan², QU Ruozhao², DAI Yongshou¹

1. College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. College of Control Science and Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China

Abstract: Ocean wave is one of the important marine dynamic phenomenon that affect human activities. At present, the main observation means include buoy observation, marine numerical prediction model, and microwave remote sensing observation. However, we cannot conduct large-scale observation by buoy, and the marine numerical prediction model's result is not measured data. Spectrometers and altimeters in microwave remote sensing instruments can also measure spectral parameters. However, SAR, which has a higher resolution, can provide 2D sea surface information. The Sentinel-1 satellite of ESA and GF-3 satellite independently developed by China are now in orbit, and numerous teams are working to retrieve wave parameters from SAR data of these two satellites. In this work, we compared the wave parameter inversion accuracy of Sentinel-1 SAR Interferometric Wide Swath model and GF-3 SAR strip model based on wave spectrum, which provides a reference for the wide application of GF-3 SAR data.

The sea states according to the ERA-5 data of ECMWF are divided into three categories: low, moderate, and high sea states. The sea areas of Hormuz and Malacca Straits of the maritime Silk Road in the Indian Ocean and the coastal waters of the Pacific and Atlantic Ocean are selected as the study areas. Meanwhile, the SAR data of Sentinel-1 and GF-3 satellites under different sea states are selected as the data source. The MPI method is used to retrieve the wave spectrum and wave parameters using the E spectrum as the initial guess. Subsequently, the SAR data inversion results of the two satellites under different sea states are compared with the ERA-5 and buoy wave data. The inversion accuracy of the wave parameters can be verified by calculating the values of the Root Mean Square Error (RMSE) and Scatter Index (SI), and the inversion accuracy of the wave parameters of the two satellites under different sea conditions can be compared.

The RMSEs of significant wave height (H_s) retrieved by GF-3 SAR under low, moderate, and high sea conditions are 0.30, 0.34, and 0.48 m, and those of mean wave period (T_m) are 1.02, 0.99, and 0.95 s, respectively, compared with the ERA-5 data. In addition, the RMSE of H_s retrieved by Sentinel-1 SAR under low, moderate, and high sea conditions are 0.30, 0.29, and 0.33 m, respectively, and the RMSEs of T_m are 0.94, 0.51, and 0.64 s, respectively. The RMSEs of H_s and T_m under different sea conditions retrieved by GF-3 SAR are 0.38 m and 0.99 s, and those of H_s and T_m retrieved by Sentinel-1 SAR are 0.31 m and 0.70 s, respectively, compared with the ERA-5 data. The RMSEs of the retrieved H_s and T_m of GF-3 satellite are 0.42 m and 0.94 s, and those of the retrieved H_s and T_m of Sentinel-1 are 0.40 m and 0.91 s, respectively, compared with the buoy data.

The SAR wave parameter inversion of Sentinel-1 and GF-3 SAR based on the wave spectrum shows that the inversion results of the two satellites meet the index requirements in this field, and the accuracy of the inversion results of wave spectrum is the same. The strip mode SAR data of GF-3 satellite, China's first self-developed SAR satellite, has broad prospects in marine research fields.

Key words: SAR, GF-3, Sentinel-1, wave spectrum inversion, accuracy comparison

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 6191925); National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFC1405600)