

多源卫星有效波高产品的时空等效融合方法

谢航¹, 李秀仲^{1,3}, 徐莹^{2,3}, 胡晔平¹, 朱东¹

1. 南京信息工程大学 海洋科学学院, 南京 210044;

2. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081;

3. 自然资源部 空间海洋遥感与应用重点实验室, 北京 100081

摘要: 有效波高SWH (Significant Wave Height) 的融合是随着海洋卫星数量的增加而产生的必然需求, 融合产品的质量对有效波高的应用具有重要影响。卫星数量、融合时空窗口、结果时空分辨率及其准确度之间存在相互制约关系。本文基于时空反距离加权法, 通过研究时空维度变化对误差水平的影响, 提出了一种新的有效波高融合方法。使用9颗卫星观测的SWH数据进行了融合试验, 并与哥白尼海洋环境监测服务CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) 提供的网格化L4级产品以及美国国家数据浮标中心NDBC (National Data Buoy Center) 浮标进行比对与验证; 通过系统研究, 确定了不同卫星个数对应的最佳时空窗口配置, 给出了时间和空间反距离加权时对误差影响的等效关系。结果表明, 新的融合方法在充分获取无缝隙SWH的基础上, 也得到了更准确的SWH融合产品。本文的研究不仅为有效波高的全球应用提供了新的方法, 也为多源遥感数据的处理和融合提供了重要参考。

关键词: 微波遥感, 卫星高度计, 有效波高, EMD滤波, 遥感数据融合, 时空插值方法, 浮标验证

中图分类号: P2

引用格式: 谢航, 李秀仲, 徐莹, 胡晔平, 朱东. 2025. 多源卫星有效波高产品的时空等效融合方法. 遥感学报, 29(5): 1245–1259

Xie H, Li X Z, Xu Y, Hu W P and Zhu D. 2025. Research on spatiotemporal equivalent fusion method for significant wave height products of multi-source satellite. National Remote Sensing Bulletin, 29(5): 1245–1259 [DOI: 10.11834/jrs.20254320]

1 引言

有效波高SWH (Significant Wave Height) 是海洋波浪场中的一个重要参数。自1985年GEOSAT (Geodetic/Geophysical Satellite) 发射以来, 卫星高度计一直提供全球范围内的有效波高的观测数据 (Ribal和Young, 2019)。这些数据被用于海洋工程设计、数值模型验证、风和波浪气候学以及海洋风速和波浪高度的长期变化趋势等研究 (Young, 1999; Challenor等, 1990; Vinoth和Young, 2011; Alves和Young, 2003; Young等, 2011), 也为波浪能开发等应用提供了重要支撑 (Wan等, 2016)。受限于卫星之间的轨道间隔较大以及运行周期不等的特点, 单颗卫星无法满足对中尺度海浪场研究的需求 (Fu等, 1994, 2010; Chelton等, 2011)。

有效波高融合将多源卫星的观测数据合并到网格化的融合场中, 不仅是克服沿轨数据局限性的有效方法 (刘磊等, 2020), 而且能够实现对全球范围波浪场的研究。

近年来, 国内外学者对多源卫星SWH数据的融合进行了广泛研究, 并取得了显著成果。国内学者的研究方向主要集中在不同融合方法对结果的影响, 而国外学者在融合产品的生成以及应用研究更为广泛 (刘磊等, 2022)。国外学者与机构已经建立了多种时空分辨率的长时间序列有效波高融合产品数据集, 包括欧洲航天局ESA (European Space Agency) 倡议的GlobWave项目, 法国空间研究中心CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) 与法国海洋和水圈地形研究中心CTOH (Centre for Topographic studies of the Ocean and Hydrosphere)

收稿日期: 2024-08-14; 预印本: 2025-01-19

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42176184, 41706202); 海风海浪探测卫星波谱仪数据处理软件研制

第一作者简介: 谢航, 研究方向为小入射角微波遥感。E-mail: 1011438398@qq.com

通信作者简介: 李秀仲, 研究方向为卫星海洋遥感与应用。E-mail: lixiuzhong@nuist.edu.cn

的 AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic) 产品数据集。欧洲航天局海况气候变化倡议 CCI (Climate Change Initiative) 项目扩展和改进 GlobWave 产品, 它将 GlobWave 数据集 (1985 年—2016 年) 扩展到 2018 年, CCI 数据集是一个跨越 1992 年—2018 年的多任务月平均网格化 (空间分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$) 产品 (Bohlmann 和 Koller, 2020; Dodet 等, 2020)。CCI 使用了受小波阈值 (Kopsinis 和 McLaughlin, 2009) 启发的经验模式分解 (Huang 等, 1998) 滤波后的 1 Hz 沿轨有效波高数据。自从 AVISO 网格化 L4 NRT 波产品在 2019 年 12 月 3 日停产后, 哥白尼海洋环境监测服务 CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) 负责网格化 L4 NRT 波产品的处理和分发。CMEMS 使用了目前仍在运行的 9 颗高度计任务提供的观测数据, 在 $2^\circ \times 2^\circ$ 的网格内分别对空间距离和时间距离采用反距离加权法, 得到了全球范围内日平均有效波高以及每日 12 UTC 瞬时有效波高分布产品。在国内方面, Yang 等 (2008) 使用 GEOSat Follow-on (GFO)、Jason-1 和 Envisat (Environmental Satellite) 有效波高数据, 以中国海域及附近海域为研究区域, 对不同融合方法、滤波器窗口和卫星个数等影响融合结果的因素进行了分析。徐广珺等 (2013) 利用反距离加权法融合了多个卫星高度计 10 d 的平均有效波高, 表明 HY-2 数据的加入提高了融合精度。Su 等 (2017) 利用 Aviso 融合产品, 研究了中国南海有效波高的季节变化。为满足海浪精细化特征研究的需求, 韩伟孝 (2017) 将日平均融合产品的空间分辨率提高到了 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。满富康 (2020) 使用时空扩展的反距离加权法生成特定时间点的海浪融合产品, 研究发现该方法能够较好地再现海浪场的瞬时变化。

目前针对特定时刻的有效波高融合方法包括时空反距离加权法和 CMEMS L4 产品所采用的网格内时间加权平均法。然而这两种方法都有很大的局限性。首先, 时空反距离加权法简单的将时间和空间参数整合到权重公式中, 没有考虑时间、空间两个维度的变化对于结果影响程度的统一, 无法客观准确的赋予时间和空间在反距离加权公式中的权重。其次, CMEMS 的 L4 级产品使用的时

间加权平均法无法满足高空间分辨率下密集网格的融合需求。这是因为在密集网格中, 很多网格缺乏观测数据, 导致大量空白网格的出现, 无法满足全球融合的要求。

因此, 本文在时空反距离加权法的基础上, 通过探究时间和空间两个维度变化对结果的影响, 统一其在相同误差水平下的权重分配, 提出一种更加准确的瞬时有效波高融合方法。此外, 本文更加细化地研究融合过程中各参数 (卫星个数, 空间尺度, 时间尺度, 产品准确度) 之间的制约关系。如何搭配这些参数能够使融合产品的准确度达到最佳是本文研究的重点。

2 数据

2.1 卫星数据

近年来, 随着运行中的卫星数量的增加, 观测密度显著提高。本文使用了来自 Jason-3、Cryosat-2、SARAL/Altika、中法海洋卫星 CFOSAT (China France Oceanography Satellite)、海洋二号 B 卫星 HY-2B (HaiYang-2B)、海洋二号 C 卫星 HY-2C (HaiYang-2C)、Sentinel-3A、Sentinel-3B 和 Sentinel-6A 卫星的 2022 年 7 月和 2023 年 1 月 Level-2 级产品沿轨 1 Hz (~ 7 km) 数据。除了中法海洋卫星使用其搭载的波谱仪 SWIM (Surface Wave Investigation and Monitoring) 星下点观测得到的有效波高数据外, 其他卫星的有效波高数据均来自于卫星搭载的高度计的观测结果。本文以 Jason-3、Cryosat-2 和 SARAL/Altika 为基础, 依次分别加入 CFOSAT、HY-2B、HY-2C、Sentinel-3A、Sentinel-3B 以及 Sentinel-6A 卫星观测数据, 旨在分析不同卫星个数下有效波高的融合特性。

2.2 浮标数据

为了确保多源卫星有效波高数据的一致性, 需要依赖高质量的浮标波高原位测量数据库进行校准。其次, 本文探讨的时间和空间两个维度变化引起的误差水平, 也需要通过与浮标数据对比来验证。最后, 将融合结果与浮标数据进行比较, 以评估产品的准确性。本文参考 CMEMS L4 级产品

的数据手册信息，使用了 2022 年 7 月和 2023 年 1 月美国国家数据中心 NDBC (National Data Buoy Center) 54 个浮标的现场数据集。表 1 列出了这些浮标的编号及其对应的经纬度信息，其沿岸距离均大于 50 km。

表 1 本研究使用的 54 个 NDBC 浮标编号及经纬度信息
Table 1 The buoy IDs and coordinates (latitude and longitude) of the 54 NDBC buoys used in this study

浮标编号(纬度/(°),经度/(°))		
41001(34.703°, -72.242°)	42040(29.207°, -88.237°)	46047(32.388°, -119.525°)
41002(31.759°, -74.936°)	42055(22.140°, -94.112°)	46050(44.669°, -124.546°)
41004(32.502°, -79.099°)	42056(19.820°, -84.945°)	46054(34.274°, -120.468°)
41009(28.508°, -80.185°)	42059(15.300°, -67.483°)	46066(52.765°, -155.009°)
41010(28.878°, -78.485°)	42060(16.434°, -63.329°)	46069(33.677°, -120.213°)
41043(21.026°, -64.793°)	44005(43.201°, -69.127°)	46073(55.008°, -172.012°)
41044(21.582°, -58.630°)	44008(40.496°, -69.250°)	46075(53.969°, -160.794°)
41046(23.822°, -68.393°)	44011(41.093°, -66.562°)	46078(55.561°, -152.599°)
41047(27.465°, -71.452°)	44017(40.693°, -72.049°)	46080(57.916°, -150.133°)
41048(31.831°, -69.573°)	44018(42.203°, -70.154°)	46082(59.670°, -143.353°)
41049(27.545°, -63.012°)	44027(44.283°, -67.300°)	46083(58.270°, -138.019°)
42001(25.926°, -89.662°)	44066(39.618°, -72.644°)	46084(56.614°, -136.093°)
42002(26.055°, -93.646°)	46002(42.662°, -130.507°)	46089(45.936°, -125.793°)
42012(30.060°, -87.548°)	46005(46.134°, -131.079°)	51000(23.528°, -153.792°)
42019(27.910°, -95.345°)	46006(40.764°, -137.377°)	51002(17.042°, -157.746°)
42020(26.955°, -96.687°)	46011(34.936°, -120.998°)	51003(19.196°, -160.639°)
42036(28.501°, -84.508°)	46028(35.770°, -121.903°)	51004(17.538°, -152.230°)
42039(28.787°, -86.007°)	46035(57.016°, -177.703°)	51101(24.359°, -162.081°)

2.3 CMEMS 融合产品

与 AVISO 相比，2°×2° 网格的 CMEMS L4 波产品采用了包括 Sentinel-6A 在内的多个最新卫星高度计任务。该产品提供了估计的每日 12 UTC 全球瞬时有效波高分布产品，该产品利用生成日前后 3—36 h 不等的时间窗口对 2°×2° 网格内的有效波高值进行加权平均，时间越接近该日 12 UTC 的测量值越相关。同时，通过插值填充空白网格，确保全球范围内的海浪场估计。本文使用了 2022 年 7 月和 2023 年 1 月的产品与本文的融合结果进行比较。

3 方 法

图 1 展示了本文的有效波高融合流程。本研究利用 Jason-3、Cryosat-2、Saral、CFOSAT、HY-2B、HY-2C、Sentinel-3A、Sentinel-3B 和 Sentinel-6A 这 9 颗卫星观测的有效波高沿轨 1 Hz 数据，结合美国国家数据中心的 54 个浮标进行匹配校准，

并应用基于经验模态分解 EMD (Empirical Mode Decomposition) 的滤波方法。经过校正的 Jason-3 卫星的 SWH 数据的偏差以及均方根误差的统计结果良好 (表 2)，同时根据以往学者的研究 (Yang 等, 2020; Liang 等, 2021)，Jason-3 高度计测量的 SWH 结果稳定，精度较高，能够满足研究使用的需求。因此，本文使用经校正的 Jason-3 卫星的 SWH 数据，通过分析 2023 年 1 月 Jason-3 卫星与 NDBC 浮标数据在短时间窗口和小空间窗口下的匹配结果，探索空间距离和时间距离在相同误差水平下的等效关系，从而统一时空维度对融合结果的影响，得到一种新的有效波高时空融合方法。最后，应用该融合方法，并探讨融合过程中各参数 (卫星个数、时间窗口、空间窗口) 对融合结果准确性的影响特性。时间窗口定义为以生成时刻为中心的时间范围。空间窗口定义为以网格中心点为圆心的空间半径。

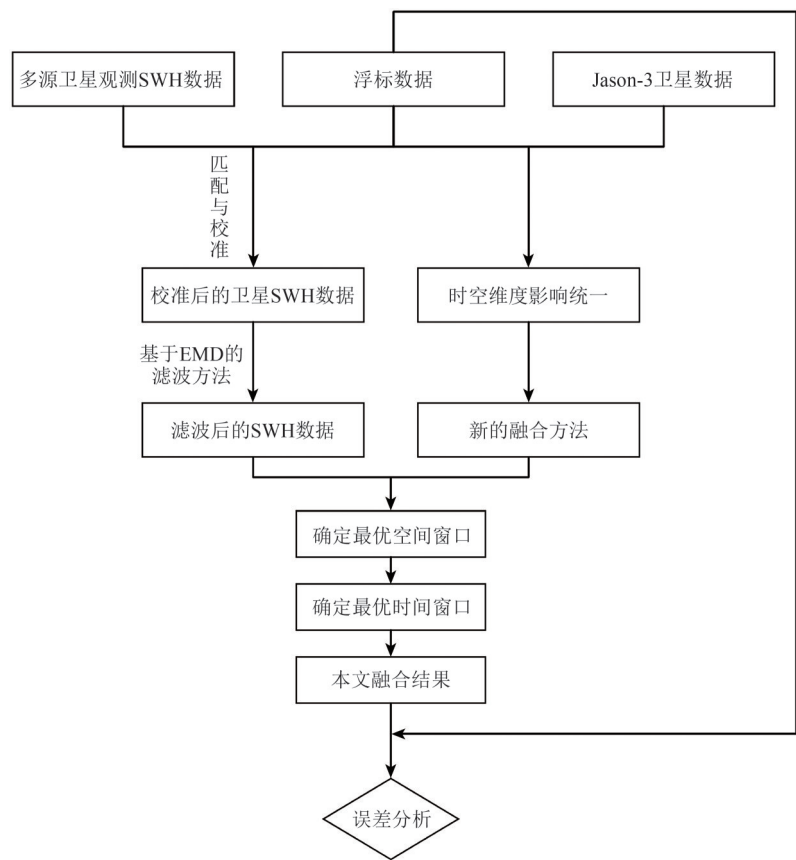


图1 有效波高融合特性分析流程图

Fig. 1 Flow chart of fusion characteristic analysis of significant wave height

表2 多源卫星有效波高校正系数和统计参数

Table 2 Calibration coefficients and statistical parameters of multi-source satellite significant wave height

卫星	α	β	校准前		校准后	
			BIAS /m	RMSE /m	BIAS /m	RMSE /m
Jason-3	1.0069	-0.0403	0.0274	0.2797	<0.0001	0.2785
Saral	0.9538	0.0154	0.0191	0.2944	<0.0001	0.2858
Cyosat-2	0.9847	0.0358	0.0056	0.3516	<0.0001	0.3489
CFOSAT	0.9818	0.0268	0.1267	0.3896	<0.0001	0.3859
HY-2B	1.0493	-0.1704	-0.0091	0.2785	<0.0001	0.2739
HY-2C	0.9872	-0.2277	0.2753	0.4353	<0.0001	0.3529
Sentinel-3A	0.9540	0.0601	0.0416	0.3799	<0.0001	0.3786
Sentinel-3B	0.9467	0.0726	0.0839	0.3332	<0.0001	0.3298
Sentinel-6A	0.9777	0.0677	-0.0209	0.3113	<0.0001	0.3066

3.1 卫星和浮标数据的匹配与校准

为了确保不同卫星高度计测量数据的一致性，我们需要将这些数据与浮标现场测量数据进行校准。在进行校准之前，需要对数据进行严格的质量控制，以避免受到陆地、海冰或降雨等因素的影响。根据 Jason-3、HY-2B 和 Saral 等卫星的 L2 级产品用户手册，SWH 的有效数据范围通常被设置为 0—11 m。此阈值旨在筛除异常数据，同时保

留大部分具有物理意义的有效数据。此外，研究表明，随着波高的增加，卫星测高数据的精度呈逐渐下降趋势（Timmermans 等，2020）。在极端海况下，波高估算受限于数据采样、反演算法以及空间分辨率等问题，通常存在低估现象，这些误差使得卫星观测数据在极端波高场景中的可靠性受到显著限制（Yang 和 Zhang，2019）。因此，本文排除了观测值超过 11 m 的有效波高数据，以减

少误差并提高融合产品的准确性和可靠性。在此基础上, 根据RMS参数 (swh_rms) 以及有效点数量 (swh_numval) 等的阈值进一步筛选数据。

浮标数据利用其观测的连续性特点来剔除异常数据, 采用阈值判断和时间差异判断以进一步筛选数据。0—25 m通常是浮标测量的正常波高范围 (韩伟孝 等, 2016)。因此, 剔除大于25 m的波高异常值, 并确保在两小时内的观测数据中, 相邻两个波高之间的差值不超过10 m, 以增加浮标记录的准确性。

本文选择30 min的时间窗口和50 km的空间窗口 (Monaldo和Lyzenga, 1988) 进行高度计与浮标测量值的匹配。首先, 对高度计和浮标数据进行时间匹配, 选择时间差绝对值小于等于30 min的点, 然后根据浮标位置与高度计记录的经纬度信息进行空间匹配, 选择距离小于等于50 km的观测信息, 得到时空窗口限制后的匹配结果。

由于系统误差的存在, 高度计SWH数据与浮标实测SWH数据间存在观测偏差。浮标实测数据可认为参考值, 因此用于校正卫星SWH。通过最小二乘回归分析, 得到高度计SWH数据的回归系数, 并进行线性校正, 以确保多源卫星SWH数据精度一致。校准公式如下所示:

$$y_i = \alpha x_i + \beta \quad (1)$$

式中, α 和 β 是回归系数, x_i 为待校正的高度计SWH值, y_i 为校正过的高度计SWH值。使用偏差 (Bias)、均方根误差 (RMSE)、相关系数 (Corr) 和散度 (SI) 等统计参数作为精度评价参数, 参数具体定义如下:

$$\text{Bias} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i - B_i) \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i - B_i)^2} \quad (3)$$

$$\text{Corr} = \frac{\sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A}) - (B_i - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A})^2 (B_i - \bar{B})^2}} \quad (4)$$

$$\text{SI} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((A_i - \bar{A}) - (B_i - \bar{A}))^2}}{\bar{B}} \quad (5)$$

式中, A 代表卫星有效波高, B 代表NDBC测量的SWH, N 为匹配数据对的个数, A 、 B 上方的横线

表示绝对值。

3.2 基于经验模态分解的滤波方法

卫星雷达高度计观测在海洋动力学研究中具有关键作用, 特别是在研究中尺度过程时。为了应对高度计测量中100 km以下尺度的低信噪比问题 (Quilfen和Chapron, 2019), 通常在分析之前会应用低通滤波或最小二乘曲线拟合来平滑数据。Quilfen和Chapron (2021) 提出了一种替代方法, 即基于经验模态分解 (EMD) 来分析非平稳和非线性过程。EMD基于本征模态函数IMF (Intrinsic Mode Function) 的经验调幅AM (Amplitude Modulation)、调频FM (Frequency Modulation) 函数自适应地投射信号, 是一种不需要预先设定任何基函数的方法, 更适合处理非平稳或非线性数据。

在应用此滤波方法前, 需要将有效波高数据序列划分为满足以下条件的若干段: 时间间隔不超过2 s, 以确保有效波高测量的连续性; 短于8个点的段无法进行稳健的IMF分解, 不进行滤波处理; 每个分段的长度必须为二进制长度 (即 2^n 的形式, 其中 n 为整数)。为此, 在通过左右对称扩展进行滤波之前, 将线段设置为 2^n 的长度。这些片段在处理后会截断回其原始长度。

图2展示了我们挑选的一段应用EMD滤波方法的950个有效波高数据序列。最上方的图为这一段SWH的数值大小。EMD分解之后共有6个IMF分量, 分别为IMF1至IMF6, 这里只展示IMF1到IMF3。利用局部极大值和极小值, 构建并计算上限包络线和下限包络线, 得到信号的局部均值函数。将局部均值函数从原始信号中减去, 得到一维的第一次分量, 即为一个IMF。每一个IMF分量代表了原始信号中的一种内涵模态分量。IMF1代表了信号中最高频的部分。Quilfen和Chapron (2019) 指出, IMF2和IMF3在70 km尺度上显示出显著能量, 低于70 km尺度时, IMF2能量占主导地位。平均而言, IMF2在30 km尺度上主要是噪声, 而在50 km尺度上信噪比增加到约0.5, 这意味着在信噪比较大的条件下, IMF2保留了该尺度的能量。在本研究中, 我们从原始信号中分离出了最高频的分量IMF1, 并使用IMF2至IMF6以及残差来构建滤波后的有效波高数据序列。

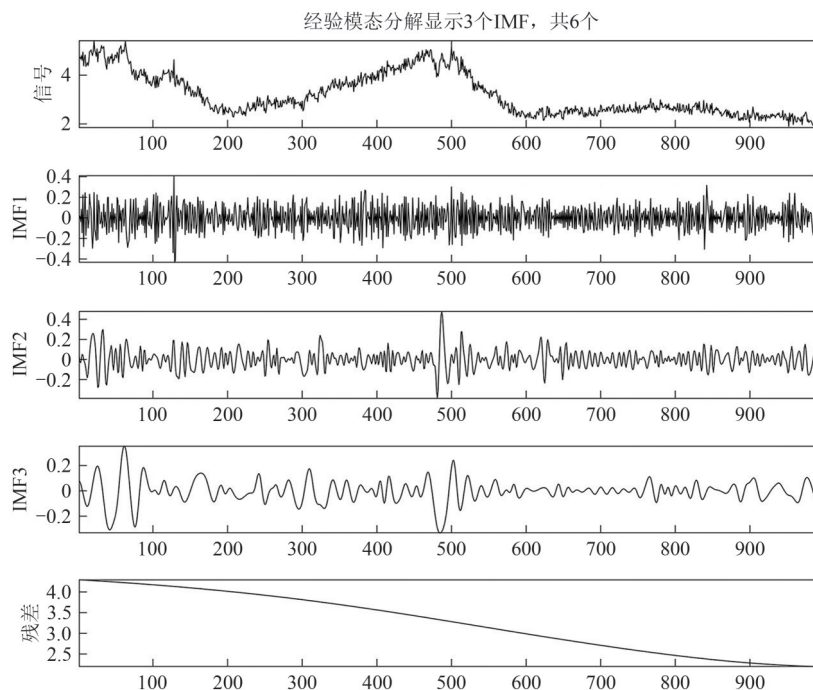


图2 EMD经验模态分解迭代过程

Fig. 2 EMD empirical mode decomposition iterative process

3.3 基于时空反距离加权法的SWH融合方法

在以往的研究中,时间扩展的反距离加权法(Li等, 2016)不仅具有很好的全球适应性,而且联系了SWH时间和空间的属性,可以反映特定时间的SWH全球分布特征。其公式为

$$z(x, y, t) = \sum_{i=1}^N \gamma_i z_i \quad (6)$$

$$\gamma_i = \frac{\left(\frac{1}{d_i}\right)^p}{\sum_{k=1}^N \left(\frac{1}{d_k}\right)^p} \quad (7)$$

$$d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (t_i - t)^2} \quad (8)$$

式中, z 为待插值的计算值; z_i 为第 i 个有效波高实测值; N 为参与计算的实测值的个数; p 为幂指数, p 越大, 则较近的观测值赋予更大的权重; d_i 为第 i 个测量值与待插值点之间的时空距离。

然而, 该方法简单地将时间视为与空间相同的第三维, 而未考虑到根据时间和空间变化动态调整权重的必要性, 导致时间和空间变化对融合产品精度影响程度不同。因此, 本文通过研究时空维度差异引起的典型误差, 更客观地确定融合过程中单位时间和空间对反距离权重的贡献。研究使用23年1月份54个NDBC浮标的数据以及Jason-3高度计测量的数据。首先, 针对每个浮标的观测值, 选择了10 min的时间窗口和500 km的空间窗口进行匹配, 旨在验证在相同时刻下相对于

中心点空间距离增加时, 匹配结果的均方根误差的变化。同样地, 选择了15 km的空间窗口和12 h的时间窗口进行匹配, 以便研究在相同位置相对于中心时刻时间增加时, 匹配结果RMSE的变化。通常, 在研究卫星与浮标SWH的校准与验证时, 研究者们通常使用30 min以及50 km的时空窗口以确保匹配数据的一致性(Ribal和Young, 2019)。本文进一步缩小了时空窗口, 选择10 min的时间窗口和15 km的空间窗口, 有助于进一步减少匹配数据的系统性误差, 从而使匹配结果的时空特征更加准确, 同时将数据误差归因于时间或空间距离的单一因素。此外, 10 min和15 km的窗口大小也符合浮标和卫星的观测分辨率。对于时空窗口的变化范围, 选取0—12 h是因为该窗口范围能涵盖潮汐、风速等影响波高变化的典型周期(Timmermans等, 2020), 有助于分析时间维度的误差, 而空间窗口选取0—500 km则依据波高在该范围内的空间相关性能满足波传播特性的研究(Jiang, 2020)。通过固定一个变量仅改变另一个变量, 我们能够明确时间距离和空间距离对融合误差的独立作用, 从而为误差分析和方法优化提供依据。通过这些研究, 我们可以确定在融合结果误差水平相同的情况下, 空间距离和时间距离之间的等效关系。

图3展示了使用不同空间窗口进行匹配时, Jason-3与浮标的匹配点数量(虚线)和均方根误差

差(实线)的变化情况。随着空间窗口的增大,匹配点数量呈指数型增长,如图3(a)所示。在100 km时, RMSE 达到了0.45 m左右,并在超过100 km后近似线性增长。图3(b)展示了在固定

空间窗口为15 km时,随着时间窗口增加,匹配点数量的线性增加趋势,同时匹配数据的 RMSE 随时间窗口增加而波动增加的情况。

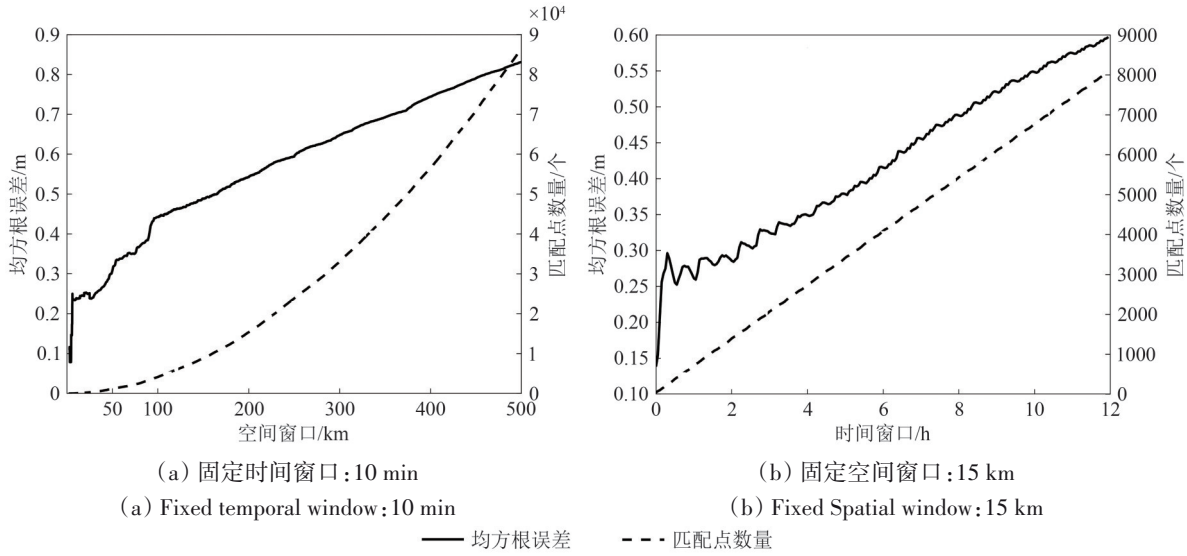


图3 Jason-3与浮标SWH匹配结果图

Fig. 3 Jason-3 and buoy SWH matching results

图4展示了拟合后的匹配数据均方根误差随时空窗口的变化,图4中的拟合公式为RMSE对应的时空距离。 $rmse_hour$ 和 $rmse_km$ 分别为时间和空间窗口变化对应的均方根误差。匹配数据RMSE的变化对于空间窗口的选择更加敏感,因为空间距离的增加导致整体误差水平的增加更显著。

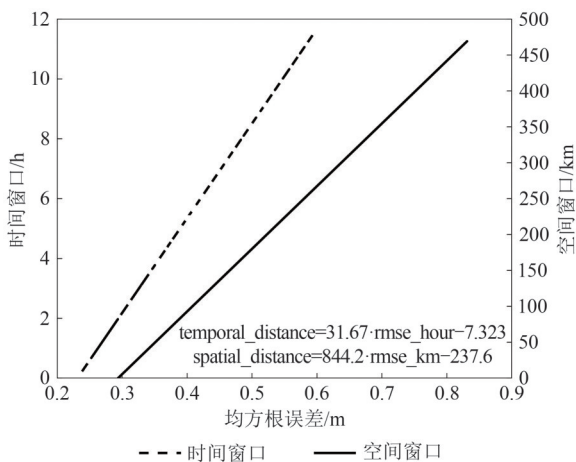


图4 匹配数据均方根误差随时空窗口的变化拟合图

Fig. 4 A fitting plot of root mean square error variation of the matched data in different spatiotemporal windows

将图4得到的两个公式合并计算,将时空窗口转换成距离,可以确定在相同RMSE水平下,空间距离与时间距离的对应关系。具体的公式如下所示:

$$Spatial_{distance} = 27.1341 \times Temporal_{distance} - 49.5645 \quad (9)$$

式中, $Spatial_{distance}$ 代表空间距离,单位为 km, $Temporal_{distance}$ 代表时间距离,单位为 h。值得注意的是,当时间距离小于1.83 h,对应的空间距离小于零。由于时间上的强相关性,当实测值的时间距离小于1.83 h,时空距离公式调整为空间距离公式,应赋予该测量值最高的时间权重。

最后,我们将时间维度对融合结果的影响转换到空间维度,并将其纳入权重公式中,得到新融合方法的公式:

$$z(x, y, t) = \sum_{i=1}^N \gamma_i z_i \quad (10)$$

$$\gamma_i = \frac{(\frac{1}{d_i})^p}{\sum_{i=1}^N (\frac{1}{d_i})^p} \quad (11)$$

$$d_i = \begin{cases} \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (27.1341 \times |t_i - t| - 49.5645)^2}, & dt > 1.83 \\ \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}, & dt \leq 1.83 \end{cases} \quad (12)$$

式中, dt 代表测量值距离中心时刻的时间距离, 单位为 h。在本文中, 均以生成日当天 12 UTC 时间作为研究全球瞬时 SWH 融合的中心时刻。

4 结果

4.1 卫星数据校准结果

将 2022 年 7 月以及 2023 年 1 月多源卫星的有

效波高数据与浮标数据进行匹配, 并基于最小二乘法进行回归分析。图 5 展示了 Jason-3H 和 HY-2B 与浮标匹配结果的等值线图。国产卫星 HY-2B 的偏差小于 1 cm, 均方根误差小于 30 cm, 具有较高的精度。最终的校准结果中的系数如表 2 所示。经过校正后, 卫星观测的 SWH 数值与匹配数据集的偏差显著降低, 均方根误差也略微减少, 能够满足数据精度和一致性的要求。

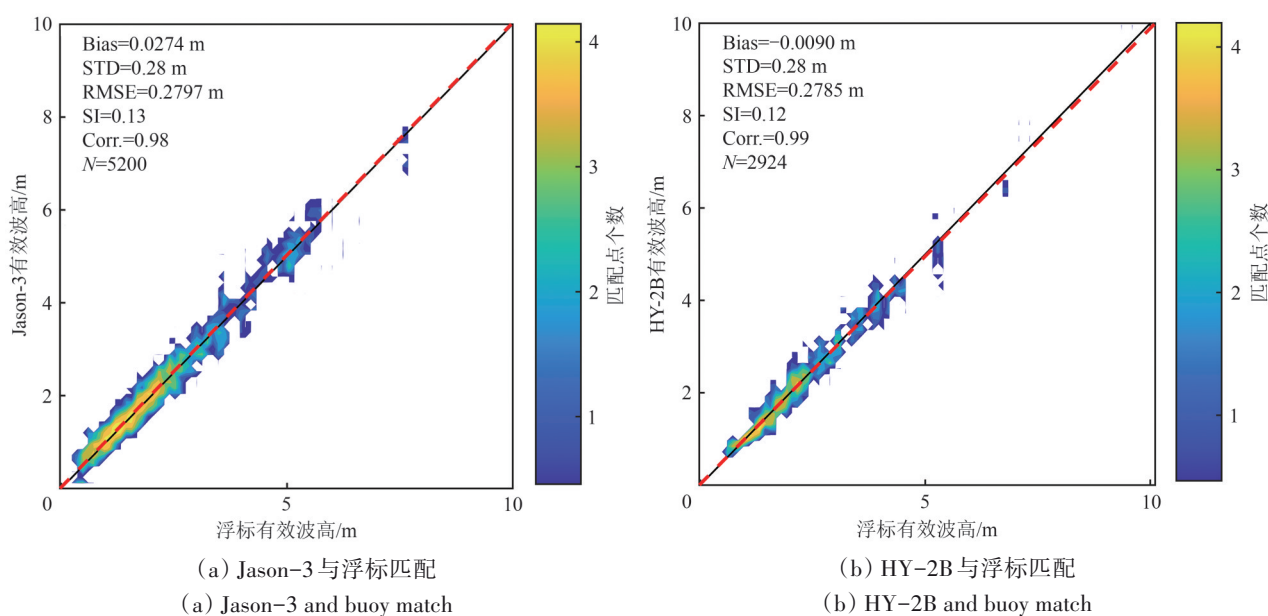


图 5 Jason-3 和 HY-2B 与浮标匹配结果的散点密度图

Fig. 5 The scatter density of Jason-3 and HY-2B matching buoys

4.2 EMD 滤波方法的应用

本文使用 9 颗卫星连续 7 天校准后的有效波高沿轨数据, 并对其应用基于经验模态分解 (EMD) 的滤波方法。将数据分割成满足连续观测条件的 N 段后, 通过 pwelch 函数分别计算了空间尺度大于 700 km 的滤波前后连续观测的 SWH 数据段的功率谱密度, 并对其进行了平均。图 6 展示了滤波前后 Jason-3 和 HY-2B 沿轨有效波高的功率谱密度图。原始数据谱在 <100 km 的尺度上变平, 该尺度的测量明显的受到噪声污染。在 100 km 以下尺度滤波前 HY-2B 的噪声水平低于 Jason-3。对于所有滤波后的 SWH 功率谱的曲线几乎一致, 这很好的证实了 EMD 滤波方法的优越性。九颗卫星滤波后 SWH 的功率谱都 25 km 以下尺度出现了缓变, 这一部分基本上对应于仪器高斯白噪声 (Dibarboure 等, 2014)。IMF1 对应了 25 km 以下尺度的高频高斯噪声部分。由此可见, EMD 方法允许将 SWH 去噪到

25 km 量级的尺度。

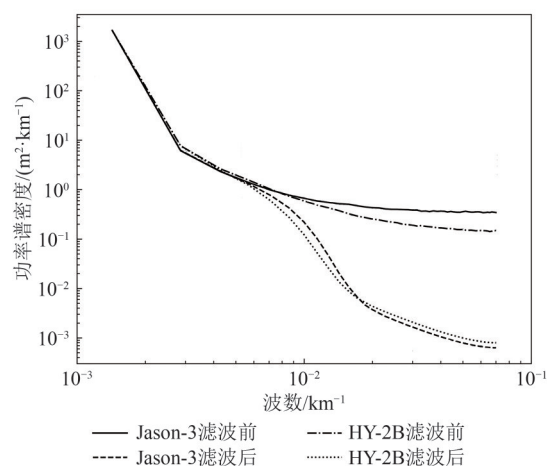


Fig. 6 Along track SWH power spectral density

4.3 对融合过程中空间窗口的研究分析

卫星个数、时间窗口、空间窗口的选择决定

了融合过程中使用的有效波高观测点数量,进而影响融合结果中海洋空白网格的比例。当卫星个数和时间窗口固定时,不同的空间窗口大小决定了融合结果中空白网格的数量。如果空间窗口太小,每个网格所使用的有效波高观测点较少,导致海洋中的空白网格比例增加,无法满足全球范围SWH的融合需求。

由于卫星轨道在赤道附近的间隔较大,观测点的分布密度显著降低,导致融合过程中该区域内的空白网格比例较高。在 40°S — 40°N 的区域内,我们将海洋划分为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的网格,共计21286个。为了定量评估空白网格的比例,我们统计融合产品在该区域海洋中的空白网格数量,即计算每个网格实际卫星观测点的数量。某一网格在时空窗口下的观测点数量为零,则该网格被视为空白网格。空白网格比例 P_{blank} 通过以下公式计算:

$$P_{\text{blank}} = \frac{N_{\text{blank}}}{N_{\text{total}}} \times 100\% \quad (13)$$

式中, P_{blank} 表示空白网格比例,用于评估融合结果的覆盖情况, N_{blank} 表示空白网格数量, N_{total} 表示总网格数量。本研究认为,融合产品中海洋区域内空白网格比例小于0.1%即满足融合标准。这是因为当空白网格比例超过0.1%时,融合结果中会出现明显的无有效值区域,影响融合产品的完整性和适用性。

我们首先以8颗卫星和24 h的时间窗口为例,研究了2023年1月5日—15日不同空间窗口的情况下,融合结果中 40°S — 40°N 海洋空白网格占比(图7)。研究发现,在200 km的空间窗口下,用于融合的卫星观测数量明显较少,空白网格的比例约为7%。随着空间窗口的不断增加,空白网格比例也在逐渐减少。当空间窗口扩展至400 km时,日平均空白网格占比为0.25%,未能达到融合要求。而当空间窗口增至500 km时,日平均空白网格比例降至0.03%,因此认为8颗卫星和24 h时间窗口的条件下,融合所需的最小空间窗口为500 km。类似的,在8颗卫星的情况下,我们分别采用12 h, 18 h, 24 h, 30 h, 36 h的时间窗口进行融合探究,并得出了不同时间窗口下所需的最小空间窗口(表3)。

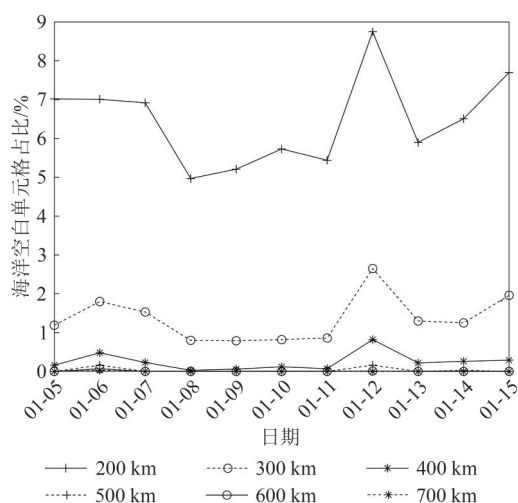


图7 8颗卫星在24 h时间窗口下不同空间窗口的融合结果中空白网格比例(2023年1月5日—15日)

Fig. 7 The proportion of blank grid in the fusion of different spatial windows of eight satellites under 24 h temporal window (January 5–15, 2023)

表3 8颗卫星在不同时间窗口下融合所需的最小空间窗口
Table 3 The minimum spatial window required for the fusion of eight satellites with different temporal windows

时间窗口/h	最小空间窗口/km
12	800
18	600
24	500
30	400
36	300

在确定了每个时间窗口对应的最小空间窗口后,我们进一步增加了空间窗口大小。本文将每日12 UTC (± 3 h) 浮标数据平均值与距离浮标最近的网格点处的SWH融合数据进行匹配,若单个网格匹配了多个浮标值,则对浮标测量值进行平均。本文将匹配数据的RMSE作为准确度的研究特征。如图8所示,在达到满足融合标准的最小空间窗口后,继续增大空间窗口会导致融合结果的误差持续增加。这是因为随着空间窗口的增大,融合过程中的空间相关性减弱,更多的远距离观测点会在融合中被赋予权重,从而影响融合结果的准确度。因此,我们得出结论认为,满足融合空白网格比例小于0.1%的最小空间窗口即为融合的最优选择。

基于前述分析,我们分别得到了3—9颗卫星在不同时间窗口下最优的空间窗口选择(表4)。

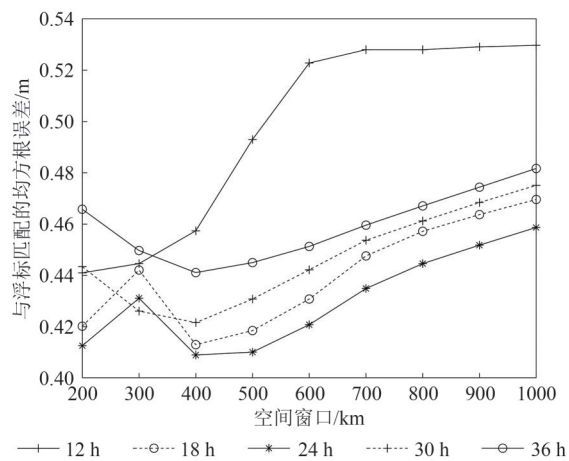


图8 8颗卫星在不同空间窗口下的融合结果与浮标对比的均方根误差

Fig. 8 Root mean square error of the fusion of eight satellites in different spatial windows compared with the buoys

表4 不同卫星个数以及时间窗口下的最优空间窗口
Table 4 The optimal spatial window under different satellite number and temporal window

卫星 个数/颗	时间 窗口/h	最优空间 窗口/km	卫星 个数/颗	时间 窗口/h	最优空间 窗口/km
9	12	700	8	12	800
	18	500		18	600
	24	400		24	500
	30	400		30	400
	36	300		36	300
7	12	1000	6	12	1200
	18	800		18	900
	24	600		24	600
	30	500		30	500
	36	400		36	400
5	12	1300	4	12	1400
	18	1000		18	1100
	24	700		24	800
	30	500		30	700
	36	400		36	600
3	12	1500			
	18	1200			
	24	1000			
	30	900			
	36	700			

4.4 对融合过程中时间窗口的研究分析

在确定最优空间窗口的选择后，进而需要通过研究试验确定最优的时间窗口。对3—9颗卫星在不同的时间尺度下准确度最高的融合结果与浮

标 12 UTC (± 3 h) 平均值进行比较，最终结果如图9所示。当时间窗口增加，不同卫星个数的融合结果与浮标匹配的 RMSE 都显示了先减后增的趋势。对于 12 UTC 瞬时海浪分布的融合过程来说，尽管 12 h 的时间窗口对于融合具有更好的时间相关性，但是需要选择更大的空间窗口才能使海洋中有效网格数量达到研究要求。然而，更大的空间窗口导致融合的空间相关性下降，有更多距离网格中心点更远的观测值污染了整体的时空权重，导致融合结果误差 RMSE 升高。随着时间窗口的增加，卫星观测点数量也会增加，因此融合所需的时空窗口是递减的。此时，虽然时间相关性减少了，但是空间相关性增加了，整体的时空权重的配置更好，融合结果误差下降。研究显示，在选择4—9颗卫星进行融合时，时间窗口为24 h是融合结果最佳的配置。随着时间窗口的进一步增加，融合所需的时空窗口减小，虽然此时所用的卫星观测点在空间上十分接近网格中心点，但是过大的时间窗口无法满足本研究中反映 12 UTC 特定时间 SWH 分布的研究要求，从而导致融合结果的误差继续增加。

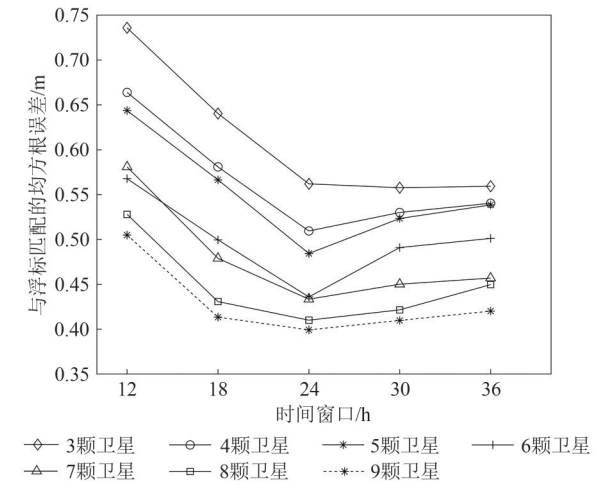


图9 不同卫星个数在不同时间窗口下的融合结果与浮标对比的均方根误差

Fig. 9 The root mean square error of the comparison between the fusion of different satellite numbers and the buoy under different temporal window

最终，可以得到不同卫星数量融合准确度最高的时空窗口的组合配置。结果在表5中呈现。

表5 不同卫星数量下最佳时空窗口选择
Table 5 Optimal spatio-temporal window selection under different number of satellites

卫星个数/颗	时间窗口/h	空间窗口/km
3	30	900
4	24	800
5	24	700
6	24	600
7	24	600
8	24	500
9	24	400

4.5 融合结果准确度分析

2022年7月份哥白尼海洋环境监测服务 CMEMS 的 L4 级网格化产品采用了除 HY-2C 外本文使用的其余 8 颗卫星, 而其 2023 年 1 月份的产品使用了本文提到的 9 颗卫星。因此, 为了与哥白尼海洋环境

监测服务的网格化产品进行对比, 我们使用了与 CMEMS 完全一致的卫星进行融合, 生成了 22 年 7 月和 23 年 1 月网格化的产品。

由于高纬度地区受到海冰的影响, 我们采用了生成日前后共 3 天的多源卫星高度计 L2 级产品中的海冰标志参数 (ice_flag)。当 ice_flag 等于 1 时, 表示存在海冰。若网格中心 150 km 范围内标记为海冰的 ice_flag 数量超过 80 个, 则该网格被视为被海冰覆盖。图 10 展示了 2023 年 1 月 18 日 12 UTC 时 3 种不同融合结果的全球 SWH 分布图。图 10 中的白色部分表示无融合结果的空白网格, 包括陆地区域、海冰覆盖区域或没有有效 SWH 值的网格。SWH 的全球时空分布特征表现出良好的一致性, 特别是在海浪高值区域的分布几乎完全相同。此外, 我们所采用的融合方法在高空间分辨率下 ($1/4^{\circ} \times 1/4^{\circ}$) 也表现出了良好的全球适应性。

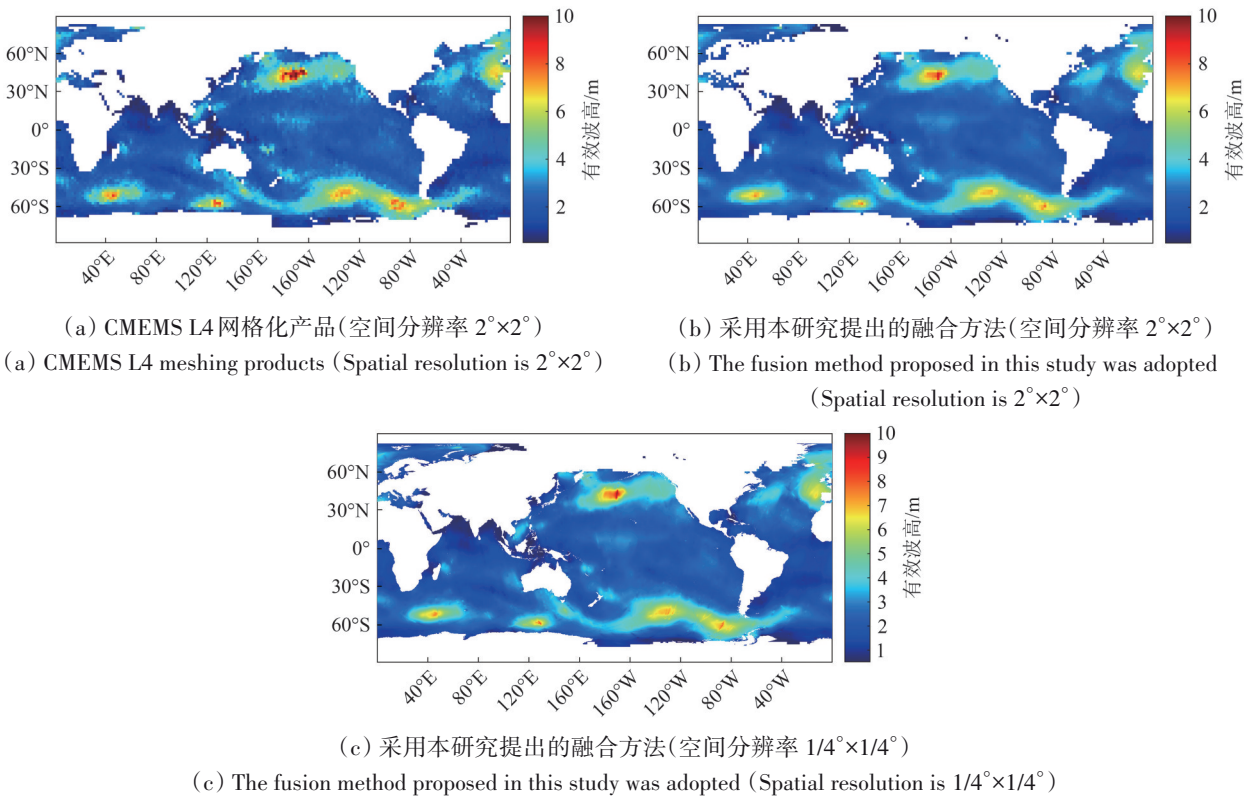


图 10 2023 年 1 月 18 日 12 UTC SWH 融合结果示例

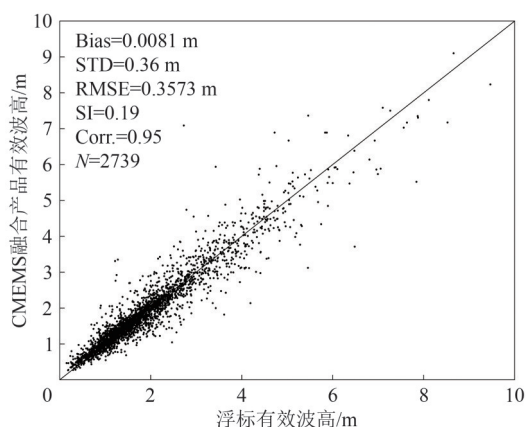
Fig. 10 12 UTC SWH fusion result sample on January 18, 2023

图 11 展示了 2022 年 7 月和 2023 年 1 月 4 种不同的融合结果浮标的对比结果。结果显示, 对比 CMEMS 的产品, 时空反距离加权法的均方根误差降低了 1.55 cm。相比之下, 本文提出的新 SWH 融

合方法在各项指标上整体表现更优, 其均方根误差降低至 31.63 cm, 比 CMEMS 产品降低了约 4.1 cm。此外, 采用本研究校准公式的两种融合结果 (图 11 (b), 图 11 (c)) 的整体偏差小于 1 cm, 与

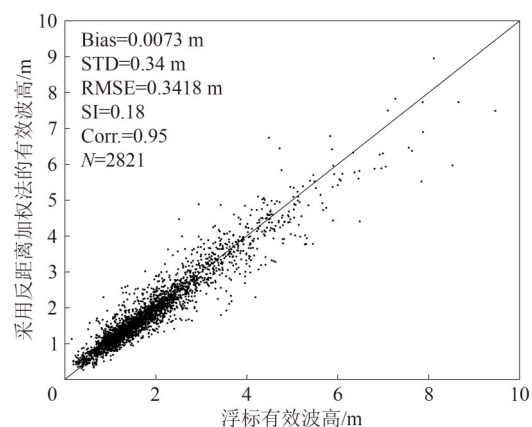
CMEMS的校准水平相仿,与浮标的现场观测结果具有良好的一致性。同时,采用本研究提出的融合方法生成的 $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ 空间分辨率的融合产品也具有较高的准确性。尽管相较于本研究 $2^\circ \times 2^\circ$ 空间分辨率的融合结果偏差和均方根误差略有增大,

但其在均方根误差的表现仍优于图 11 (a), 图 11 (b) 两种融合结果。这表明,本文的方法不仅在精度上优于现有的融合方法,还在减少系统偏差方面表现出色,同时也具有高空间分辨率的融合能力,显著提升了融合产品的可靠性和准确性。



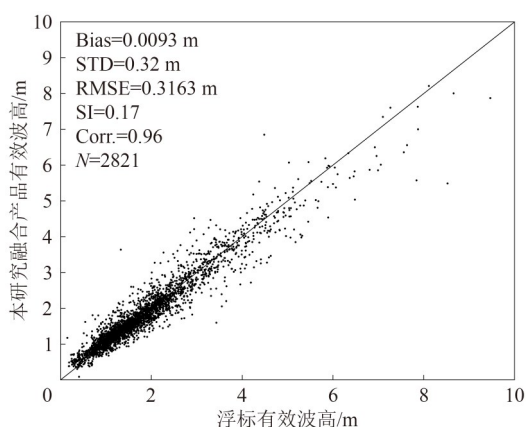
(a) CMEMS 融合产品($2^\circ \times 2^\circ$)

(a) CMEMS fusion products($2^\circ \times 2^\circ$)



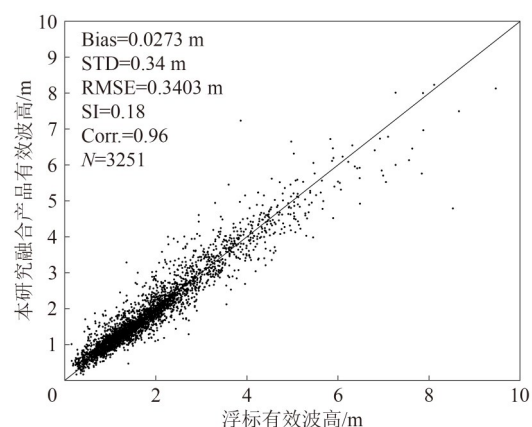
(b) 时空反距离加权法($2^\circ \times 2^\circ$)

(b) Spatiotemporal inverse distance weighting method($2^\circ \times 2^\circ$)



(c) 本研究提出的融合方法($2^\circ \times 2^\circ$)

(c) The fusion method proposed in this study($2^\circ \times 2^\circ$)



(d) 本研究提出的融合方法($1/4^\circ \times 1/4^\circ$)

(d) The fusion method proposed in this study($1/4^\circ \times 1/4^\circ$)

图 11 4种不同融合结果与浮标比较的散点图(2022年7月和2023年1月)

Fig. 11 Scatter plot of four different fusion results compared with buoys(July 2022 and January 2023)

5 结 论

目前可用于SWH融合的在轨卫星数量丰富,为SWH的融合研究提供了充分的研究资料。融合产品不仅能够克服SWH沿轨资料的时空局限性,而且对于全球SWH分布的研究有重要的研究意义。研究特定时间SWH融合产品的准确度能否进一步提高,是目前有效波高融合研究中一个备受关注的问题。此外,在具体融合过程中,各参数之间(如时间窗口、空间窗口、卫星数量和融合准确度)存在何种制约关系,以及如何选择参数以达

到最佳融合效果,尚缺乏系统的研究。本研究基于时空反距离加权法发展了一种新融合算法。通过研究时空窗口的变化对整体融合结果的误差影响,我们得到了更为客观的时间和空间权重分配方法,进一步提高了特定时间融合产品的准确性。研究显示,相较于传统的时空反距离加权法,新的融合方法降低了2.55 cm的均方根误差,对比CMEMS的L4级产品均方根误差降低了4.1 cm。同时本研究校准后融合产品整体偏差小于1 cm,表明本文卫星与浮标的校准结果良好。此外,本研究提出的融合方法在高分辨率($1/4^\circ$)下的融合结

果也表现出良好的准确度。

在融合过程中, 空间窗口主要影响融合结果中空白网格的数量, 满足全球融合需求的最小空间窗口是最佳选择。确定了最优空间窗口后, 使用不同数量的卫星进行融合, 融合产品的准确度会随着时间窗口的增加先提高后降低。研究表明, 在4—9颗卫星的组合中, 选择24 h的时间窗口, 而在3颗卫星的组合中选择30 h的时间窗口, 同时选择本文给出的最佳空间窗口(表5), 可以使得最终融合结果的准确度达到最高。

本研究提出了一种新的有效波高融合方法, 并详细研究了在该方法下的参数选择。这些改进不仅表现了新方法在提高SWH融合产品精度方面的潜力, 提升SWH产品在各种海洋应用中的实用性和准确度, 还为未来在海洋波浪观测与预测中的应用提供了重要的参考依据。本研究也存在一些地方需要完善, 在接下来的研究中应当采用更详细准确的海冰数据集, 考虑海冰浓度、海冰边缘、海冰类型等对高纬度地区网格掩膜的影响。同时, 随着SWOT (Surface Water and Ocean Topography) 卫星的数据可用, 越来越多的厘米级经度的测高设备投入运行, 这能够更好地捕捉局部波高变化, 为精细化的海洋预报和研究提供更加可靠的数据支持。

志 谢 感谢国家海洋卫星中心NSOAS、美国宇航局NASA、法国国家空间研究中心CNES、欧洲航天局ESA的卫星数据支持以及美国国家浮标中心NDBC浮标数据!

参考文献(References)

- Alves J H G M and Young I R. 2003. On estimating extreme wave heights using combined Geosat, Topex/Poseidon and ERS-1 altimeter data. *Applied Ocean Research*, 25(4): 167-186 [DOI: 10.1016/j.apor.2004.01.002]
- Bohlmann U M and Koller V F. 2020. ESA and the Arctic-The European Space Agency's contributions to a sustainable Arctic. *Acta Astronautica*, 176: 33-39 [DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.05.030]
- Challenor P G, Foale S and Webb D J. 1990. Seasonal changes in the global wave climate measured by the Geosat altimeter. *International Journal of Remote Sensing*, 11(12): 2205-2213 [DOI: 10.1080/01431169008955170]
- Chelton D B, Schlax M G and Samelson R M. 2011. Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in Oceanography*, 91(2): 167-216 [DOI: 10.1016/j.pocean.2011.01.002]
- Dibarboure G, Boy F, Desjonqueres J D, Labroue S, Lasne Y, Picot N, Poisson J C and Thibaut P. 2014. Investigating short-wavelength correlated errors on low-resolution mode altimetry. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31(6): 1337-1362 [DOI: 10.1175/JTECH-D-13-00081.1]
- Dodet G, Piolle J F, Quilfen Y, Abdalla S, Accensi M, Arduin F, Ash E, Bidlot J R, Gommenginger C, Marechal G, Passaro M, Quartly G, Stopa J, Timmermans B, Young I, Cipollini P and Donlon C. 2020. The Sea State CCI dataset v1: towards a sea state climate data record based on satellite observations. *Earth System Science Data*, 12(3): 1929-1951 [DOI: 10.5194/essd-12-1929-2020]
- Fu L L, Chelton D B, Le Traon P Y and Morrow R. 2010. Eddy dynamics from satellite altimetry. *Oceanography*, 23(4): 14-25 [DOI: 10.5670/oceanog.2010.02]
- Fu L L, Christensen E J, Yamarone Jr C A, Lefebvre M, Ménard Y, Dorrer M and Escudier P. 1994. TOPEX/POSEIDON mission overview. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C12): 24369-24381 [DOI: 10.1029/94JC01761]
- Huang N E, Shen Z, Long S R, Wu M C, Shih H H, Zheng Q N, Yen N C, Tung C C and Liu H H. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454(1971): 903-995 [DOI: 10.1098/rspa.1998.0193]
- Han W X. 2017. Research and Application of Global Ocean Wave Products Based on Multi-Source Satellite Remote Sensing Data. Laoshan: First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration (韩伟孝. 2017. 基于多源卫星遥感数据的全球海浪产品研究及应用. 崂山: 国家海洋局第一海洋研究所)
- Han W X, Yang J G and Wang J C. 2016. Calibration and evaluation of satellite radar altimeter wave heights with *in situ* buoy data. *Haiyang Xuebao*, 36(11): 73-89 (韩伟孝, 杨俊钢, 王际朝. 2016. 基于浮标数据的卫星雷达高度计海浪波高数据评价与校正. *海洋学报*, 38(11): 73-89) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4193.2016.11.007]
- Jiang H Y. 2020. Indirect validation of ocean remote sensing data via numerical model: an example of wave heights from altimeter. *Remote Sensing*, 12(16): 2627 [DOI: 10.3390/rs12162627]
- Kopsinis Y and McLaughlin S. 2009. Development of EMD-based denoising methods inspired by wavelet thresholding. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 57(4): 1351-1362 [DOI: 10.1109/TSP.2009.2013885]
- Li L X, Zhou X L, Kalo M and Piltner R. 2016. Spatiotemporal interpolation methods for the application of estimating population exposure to fine particulate matter in the contiguous U.S. and a real-time web application. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(8): 749 [DOI: 10.3390/ijerph13080749]
- Liang G Z, Yang J G and Wang J C. 2021. Accuracy evaluation of CFOSAT SWIM L2 products based on NDBC buoy and Jason-3 altimeter data. *Remote Sensing*, 13(5): 887 [DOI: 10.3390/rs13050887]
- Liu L, Jiang X L, Fei J F and Li Z J. 2020. Development and evalua-

- tion of a new merged sea surface height product from multi-satellite altimeters. Chinese Science Bulletin, 65(18): 1888-1897 (刘磊, 蒋星亮, 费建芳, Li Z J. 2020. 多源卫星高度计新融合产品的研发与评估. 科学通报, 65(18): 1888-1897) [DOI: 10.1360/TB-2020-0097]
- Liu L, Jiang X L, Li Z J, Fei J F, Wu X R, Wang H Z, Ye F, Zhang F Y and Shi W L. 2022. Review on the research and development of merged satellite altimeter products. National Remote Sensing Bulletin, 26(12): 2473-2485 (刘磊, 蒋星亮, 李志锦, 费建芳, 吴新荣, 王辉赞, 叶芳, 张福颖, 史文丽. 2022. 卫星高度计融合产品的研发综述. 遥感学报, 26(12): 2473-2485) [DOI: 10.11834/jrs.20210241]
- Man F K. 2020. Wave Fusion Methods Based on Multi-Source Altimeter Data. Nanjing: Nanjing University. (满富康. 2020. 基于多源高度计数据的海浪融合方法研究. 南京: 南京大学) [DOI: 10.27235/d.cnki.gnjju.2020.000642]
- Monaldo F M and Lyzenga D R. 1988. Comparison of Shuttle Imaging Radar-B ocean wave image spectra with linear model predictions based on aircraft measurements. Journal of Geophysical Research: Oceans, 93(C12): 15374-15388 [DOI: 10.1029/JC093iC12p15374]
- Quilfen Y and Chapron B. 2019. Ocean surface wave-current signatures from satellite altimeter measurements. Geophysical Research Letters, 46(1): 253-261 [DOI: 10.1029/2018GL081029]
- Quilfen Y and Chapron B. 2021. On denoising satellite altimeter measurements for high-resolution geophysical signal analysis. Advances in Space Research, 68(2): 875-891 [DOI: 10.1016/j.asr.2020.01.005]
- Ribal A and Young I R. 2019. 33 years of globally calibrated wave height and wind speed data based on altimeter observations. Scientific Data, 6(1): 77 [DOI: 10.1038/s41597-019-0083-9]
- Su H, Wei C L, Jiang S C, Li P L and Zhai F G. 2017. Revisiting the seasonal wave height variability in the South China Sea with merged satellite altimetry observations. Acta Oceanologica Sinica, 36(11): 38-50 [DOI: 10.1007/s13131-017-1073-4]
- Timmermans B, Shaw A G P and Gommenginger C. 2020. Reliability of extreme significant wave height estimation from satellite altimetry and in situ measurements in the coastal zone. Journal of Marine Science and Engineering, 8(12): 1039 [DOI: 10.3390/jmse8121039]
- Vinoth J and Young I R. 2011. Global estimates of extreme wind speed and wave height. Journal of Climate, 24(6): 1647-1665 [DOI: 10.1175/2010JCLI3680.1]
- Wan Y, Zhang J, Meng J M, Wang J and Dai Y S. 2016. Study on wave energy resource assessing method based on altimeter data—a case study in Northwest Pacific. Acta Oceanologica Sinica, 35(3): 117-129 [DOI: 10.1007/s13131-016-0804-2]
- Xu G J, Yang J S, Xu Y, Pan Y F and Chen X Y. 2013. The data fusion of the significant wave height measured with "HY-2" satellite altimeter. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(4): 208-213. (徐广珺, 杨劲松, 徐圆, 潘玉方, 陈小燕. 2013. “海洋二号”有效波高数据在多源卫星高度计数据融合中的应用. 海洋学报, 35(4): 208-213) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4193.2013.04.024]
- Yang J G and Zhang J. 2019. Validation of Sentinel-3A/3B satellite altimetry wave heights with buoy and Jason-3 data. Sensors, 19(13): 2914 [DOI: 10.3390/s19132914]
- Yang J G, Zhang J, Jia Y J, Fan C Q and Cui W. 2020. Validation of Sentinel-3A/3B and Jason-3 altimeter wind speeds and significant wave heights using buoy and ASCAT data. Remote Sensing, 12(13): 2079 [DOI: 10.3390/rs12132079]
- Yang J S, Chen X, Wang J, Zhang R and Huang W G. 2008. Data fusion of significant wave height from multiple satellite altimeters// Proceedings Volume 7154, Microwave Remote Sensing of the Atmosphere and Environment VI. Noumea: SPIE: 715408 [DOI: 10.1117/12.804859]
- Young I R. 1999. Seasonal variability of the global ocean wind and wave climate. International Journal of Climatology, 19(9): 931-950 [DOI: 10.1002/(SICI)1097-0088(199907)19:9<931::AID-JOC412>3.0.CO;2-O]
- Young I R, Zieger S and Babanin A V. 2011. Global trends in wind speed and wave height. Science, 332(6028): 451-455 [DOI: 10.1126/science.1197219]

Research on spatiotemporal equivalent fusion method for significant wave height products of multi-source satellite

XIE Hang¹, LI Xiuzhong^{1,3}, XU Ying^{2,3}, HU Weiping¹, ZHU Dong¹

1. School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China;

3. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, Beijing 100081, China

Abstract: Significant Wave Height (SWH) is a crucial parameter in the study of ocean wave fields. Since the launch of GEOSAT in 1985, satellite altimeters have been providing global observations of SWH. However, the limitations of individual satellite orbit intervals and operation cycles mean that only the fusion of multi-satellite observation data can meet the needs of mesoscale wave field research. Currently, methods for fusing SWH data at specific times include the spatiotemporal inverse distance weighting method and the time-weighted averaging method used in CMEMS L4 products. However, the spatiotemporal inverse distance weighting method does not objectively

allocate weights for temporal and spatial distances. Additionally, the time-weighted averaging method employed in CMEMS L4 products cannot meet the fusion requirements for dense grids at high spatial resolutions.

This study utilized along-track 1 Hz SWH data from nine satellite observations. Initially, the multi-source satellite observation data were matched with buoy data from the National Data Buoy Center (NDBC). Calibration was then performed using least squares regression analysis. A filtering method based on Empirical Mode Decomposition (EMD) was applied to the calibrated SWH data. By exploring the equivalence between spatial and temporal distances at the same error level, the influence of spatial and temporal dimensions on the fusion results was unified, leading to the development of a novel spatiotemporal fusion method for SWH.

Through a systematic study of the fusion process, we found that the spatial window size affects the proportion of blank grids. The error of the fusion results decreases initially and then increases with the enlargement of the temporal window. Compared with the CMEMS L4 products and traditional spatiotemporal weighting fusion methods, our fusion method demonstrates good consistency in global spatiotemporal distribution characteristics and reduces errors by 4.1 and 1.55 cm, respectively. Additionally, the proposed fusion method exhibits high-resolution fusion capabilities.

This study proposes a new method for SWH fusion and conducts a detailed investigation into parameter selection within this method. The improvements not only demonstrate the potential of the new method in enhancing the accuracy of SWH fusion products but also increase the practicality and precision of SWH products in various ocean applications. Furthermore, this study provides valuable reference points for future applications in ocean wave observation and prediction. The combination of 4—9 satellites within a 24-hour temporal window and three satellites within a 30-hour temporal window, along with the optimal spatial window provided in this study, yields the highest accuracy in the final fusion results. However, several areas need improvement. Future research should incorporate detailed and accurate sea ice datasets, considering factors such as sea ice concentration, ice edge, and ice type, to assess the impact on grid masking in high-latitude regions.

Key words: microwave remote sensing, satellite altimeter, significant wave height, EMD filtering, remote sensing data fusion, spatiotemporal interpolation method, buoy validation

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42176184, 41706202); Development of Data Processing Software for Sea Wind and Wave Satellite Spectrometer