

刘治中, 杨俊钢, 张杰, 等. 基于与 Jason-2 数据比对的 Jason-3 卫星高度计全球数据质量评估[J]. 海洋学报, 2020, 42(3): 129–139, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.03.012

Liu Zhizhong, Yang Jungang, Zhang Jie, et al. Jason-3 global statistical assessment based on Jason-2[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(3): 129–139, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.03.012

基于与 Jason-2 数据比对的 Jason-3 卫星高度计全球数据质量评估

刘治中¹, 杨俊钢², 张杰^{2*}, 崔伟²

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266510; 2. 自然资源部第一海洋研究所 遥感室, 山东 青岛 266061)

摘要: Jason-3 卫星高度计于 2016 年 1 月 17 日成功发射, 2016 年 2 月 12 日进入预定轨道, 与 Jason-2 高度计同轨进入编队飞行阶段, 并落后 Jason-2 高度计约 1 分 20 秒, 两者相距约 560 km。2016 年 9 月 1 日, Jason-2 高度计变换轨道, 编队飞行阶段结束, 两高度计进入平行轨道, 以增加卫星高度计对地观测的空间覆盖。本研究主要开展了 Jason-3 高度计的数据质量的评估与检验, 包括 Jason-3 高度计数据可用性和有效性的验证, 以及 Jason-3 高度计和校正辐射计各参数的数据质量监测。重点开展了 Jason-2 与 Jason-3 高度计各项参数的综合比较, 利用 Jason-2 与 Jason-3 高度计编队飞行阶段的数据精确评估了两高度计参数的一致性, 并从全球数据角度分析了 Jason-3 高度计获取各参数的能力以及稳定性; 通过与 Jason-2 互交叉点比较分析评估 Jason-3 高度计海面高度数据质量情况, 验证 Jason-3 高度计数据精度。结果表明, Jason-3 高度计的数据质量满足高度计测高的要求, 具有与 Jason-1、Jason-2、T/P 等高度计相同或更高的测高精度以监测全球海平面变化, 此外, Jason-3 有效波高参数数据质量明显优于 Jason-2 高度计。

关键词: Jason-3 高度计; Jason-2 高度计; 数据质量; 评估

中图分类号: P228.3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2020)03-0129-11

1 引言

Jason-3 卫星高度计是 Jason-2 高度计的后继卫星高度计, 该任务由 NOAA(美国国家海洋和大气管理局)、EUMETSAT(欧洲气象卫星开发组织)和 CNES(法国宇航局)合作开发。Jason-3 高度计采用了与 Jason-2 高度计相同的轨道设计, 其轨道高度为 1 336 km, 倾角为 66°, 轨道重访周期为 10 d。Jason-3 高度计的任务目标是继 TOPEX/Poseidon、Jason-1 和 Jason-2 高度计之后提供连续的具有相同精度和空间覆盖的卫星测高数据。卫星测高数据可应用于中尺度涡^[1]、

大洋环流^[2]、海洋潮汐^[3]、台风^[4]、海啸动力学^[5]和厄尔尼诺现象^[6]等的研究。由于卫星高度计数据的稳定性、连续性和一致性对于数据在气候变化预测、海平面上升和海洋环流等方面有关研究至关重要, 因此开展卫星高度计数据质量评估检验尤为重要。已有的卫星高度计均开展了相关的数据质量评估工作。例如, 基于 Jason-2 数据对 SARAL 高度计的全球质量评估^[7-8]; Jason-1 高度计全球轨道的残差校准和验证^[9]; HY-2A 高度计的全球数据质量评估^[10]; 法国 CNES 针对 Jason-1、Jason-2、Jason-3 和 ENVISAT 等高度计均按周期提供了高度计数据质量报告, 为用户使用数据

收稿日期: 2019-04-22; 修订日期: 2019-09-06。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0600102); 国家自然科学基金(41576176)。

作者简介: 刘治中(1994—), 男, 山东省莒县人, 主要从事高度计数据应用研究。E-mail: 1710772374@qq.com

* 通信作者: 张杰, 男, 研究员, 主要从事海洋遥感研究。E-mail: zhangjie@fio.org.cn

提供参考; Jason-1 高度计和 Jason-2 高度计也已完成全球数据质量评估^[11-12]。截至目前,自 Jason-3 高度计发射以来,还未见到有关 Jason-3 高度计数据质量的报道。

本研究主要针对 Jason-3 卫星高度计数据,通过 Jason-3 高度计数据可用性和有效性分析、高度计编队飞行阶段的共线分析、Jason-3 和 Jason-2 高度计的全球比较分析、Jason-3 高度计自交叉点分析和两高度计互交叉点分析,对 Jason-3 高度计较长时间段内的湿对流层、电离层、偏指向角、后向散射系数、风速、有效波高、海面高度和海面高度异常等参数进行较全面的质量分析。

2 数据和研究方法

本研究使用的 Jason-3 高度计数据是 CNES 提供的 *gdr_d* 格式数据产品,该产品以 10 d 为 1 周期发布,每个周期包含 254 个沿轨数据文件。本研究采用 Jason-3 高度计 0~80 周期的数据用于 Jason-3 高度计全球数据质量评估(其中第 0 周期数据仅做参考),数据时间范围为 2016 年 2 月 12 日至 2018 年 4 月 20 日。使用的 Jason-2 高度计数据为 280~528 周期的 *gdr_d* 格式数据。其中,Jason-2 高度计第 281 周期对应 Jason-3 高度计第 1 周期,Jason-2 高度计调整周期编号后,第 500 周期对应 Jason-3 高度计第 52 周期。在进行 Jason-3 高度计数据质量评估时将数据分为两个部分进行分析,第 1~23 周期作为第一部分,此部分 Jason-3 和 Jason-2 高度计处于编队飞行阶段,可进行较为精确的共线比较;另一部分为 23 周期以后部分,此部分 Jason-2 高度计变换轨道,两高度计处于不同飞行轨道,无法进行共线比较,此部分将采用全球统计比较的方法对 Jason-3 高度计数据质量进行评估,为更为直观展现变化情况,将 1~23 周期数据一并处理加入第二部分的比较。由于 Jason-2 高度计轨道调整前有时处于休眠待机状态,因此 Jason-2 与 Jason-3 高度计周期对应时间会出现空缺。其中,编队飞行阶段第 3 周期由于 Jason-3 高度计更新 GPS 软件导致 2016 年 3 月 15-17 日的数据缺失。

本研究在 Jason-3 数据可用性和有效性分析时,统计每个周期的缺失测量数和编辑准则剔除数据数占总体的比例。在 Jason-2 与 Jason-3 高度计编队飞行阶段,采用最邻近方法匹配对应观测点(匹配点平均距离差小于 189 m),逐一计算匹配点各参数的差值,分析差值的全球空间分布特征,按沿轨分别计算差值的平均值及其标准偏差,并计算所有匹配数据的

总体差值及其标准偏差的平均值。在 Jason-2 变轨后的全球统计比较时,按周期计算各参数的平均值及其标准偏差,逐周期比较 Jason-3 和 Jason-2 高度计参数的一致性。参考快速收缩法等^[13-15]多种计算交叉点的方法,开展 Jason-3 自交叉点和 Jason-3 与 Jason-2 互交叉点比较分析。分析交叉点差值的全球分布图特征,并按周期计算交叉点不符值及其均方根值(RMS),并计算总体交叉点不符值及其 RMS 的平均值。

3 Jason-3 高度计观测能力分析

通过与 Jason-2 高度计数据逐周期比较,分析 Jason-3 卫星高度计测量系统正确采集数据的能力,包括全球采样和海洋表面采样能力。主要包括几种跟踪模式下的不可用数据所占比例以及数据编辑剔除的无效测量数据所占比例。

3.1 数据可用性分析

确定相对于理论轨道地面轨迹的缺失测量数量是监测数据丢失信息或卫星事件的重要工具。对于高度计不同的跟踪模式所得到的观测数据略有不同^[16]。本研究主要针对分离门跟踪和中值跟踪两种模式进行缺失测量值的比较。

依据两种跟踪模式的综合观测结果,对全球范围的缺失测量值的比例和海洋表面范围的缺失测量值的比例进行了比较,结果如图 1 所示。由图 1 可以很明显地看出 Jason-3 高度计在全球范围内的缺失测量所占比例相对于同时期的 Jason-2 高度计平均要高 1%~2%。在不考虑 Jason-3 高度计第 1~8 周期、第 10 周期和第 20 周期的异常值的前提下,对于海洋表面范围内的剔除数据所占百分比,Jason-3 高度计相对于 Jason-2 高度计低 0.01%~0.02%。因此 Jason-3 高度计在全球范围内采集数据的能力略低于 Jason-2 高度计,但在海洋区域采集数据的能力却略高于 Jason-2 高度计。

值得注意的是 Jason-3 高度计 1~8 周期、10 周期和 20 周期由于采取 DIODE 采集/自主跟踪模式的高度计模式,产生了明显的异常值。Jason-3 高度计模式切换到 DIODE+DEM 模式时,海洋表面缺失测量的比例明显下降,采集数据的能力明显提高。由此可见,Jason-3 高度计采用 DIODE+DEM 模式对于避免海洋区域数据丢失的效果更佳。

3.2 数据有效性分析

根据高度计数据编辑准则,通过数据筛选的方式可以剔除掉高度计测量数据中的异常值,使得观测结果更加可靠、稳定。对于 Jason-3 高度计数据,本研究

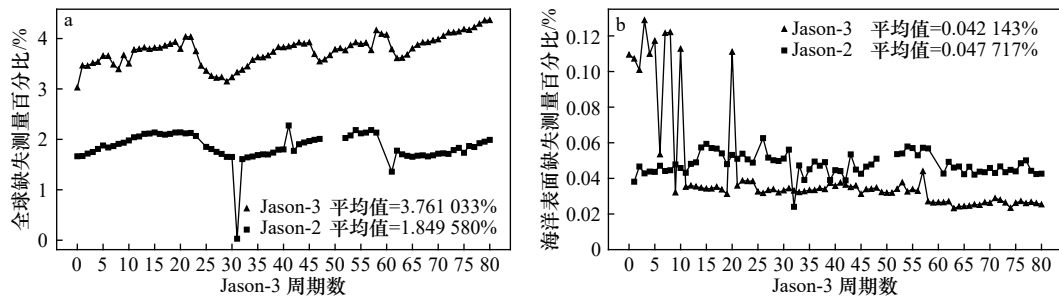


图1 全球范围(a)和海洋表面范围(b)的逐周期缺失测量所占比例

Fig. 1 Cycle-by-cycle monitoring of percentage of missing measurement over the world (a) and over land (b)

主要关注海洋数据质量,因此首先使用高度计陆地标识、降雨标识和海冰标识筛选出无雨无冰的海洋区域的数据,进一步根据高度计、辐射计各个参数的阈值范围(表1)进行数据筛选。对 Jason-2 高度计数据

和 Jason-3 高度计数据应用相同的数据编辑准则后进行比较,针对每个周期分析参数阈值以外的数据所占比例,以此来监测数据的异常情况,这些异常可能来自仪器因素、地球物理因素或算法的不同。

表1 Jason-2 和 Jason-3 高度计和辐射计数据编辑中的参数阈值

Table 1 Thresholds used for altimeter and radiometer parameters in the Jason-2 and Jason-3 editing procedures

参数	最小值	最大值	参数	最小值	最大值
20 Hz测距数据观测数	10	—	固体潮校正/m	-1	1
轨道高度-距离测量值/m	-130	100	极潮校正/m	-0.015	0.015
20 Hz测距标准差/m	—	0.2	Ku波段有效波高/m	0	11
模型干对流层校正/m	-2.5	-1.9	Ku波段后向散射系数/dB	7	30
辐射计湿对流层校正/m	-0.5	-0.001	风速/m·s ⁻¹	0	30
Ku波段电离层校正/m	-0.4	0.04	后向散射系数标准差/dB	—	1
Ku波段海况偏差/m	-0.5	0	后向散射系数观测数	10	—
潮汐校正/m	-5	5	Ku波段偏指向角平方/(°) ²	-0.2	0.64

注:—表示对最大值(最小值)没有限制要求。

不同编辑准则滤除异常数据所占比例如图2所示,绝大多数依据编辑准则剔除的高度计参数都具有明显的季节变化趋势。这一现象可能是季节变化引起海况变化造成的,或者由于南北半球海冰形成或融化导致的海洋覆盖波动引起的。该现象在监测 T/P、Jason-1、Jason-2 等高度计数据时也出现了^[11-12]。

Jason-3 高度计的剔除数据与 Jason-2 高度计剔除数据保持一致,仅在偏指向角、有效波高和40周期以后的湿对流层校正的观测中出现较明显差异。在偏指向角和40周期以后的湿对流层校正出现剔除数据所占百分比偏高的现象,在有效波高的观测中出现剔除数据所占百分比明显偏低的现象。由此可以看出,Jason-3 高度计数据在有效波高和湿对流层这两个参数的数据获取能力方面有所提高。

4 高度计参数分析

本研究针对 Jason-3 高度计的 Ku 波段的电离层

校正、有效波高、后向散射系数、偏指向角等参数的总体特征和异常情况进行分析。

4.1 20 Hz 测距数据观测数和测距标准偏差

20 Hz 测距数据观测数和测距标准偏差主要是采用平均二次误差(Mean Quadratic Error, MQE)标准来筛选有效数据。监测 20 Hz 测距数据观测数和 20 Hz 测距标准偏差可以揭示仪器测量级别的变化。这两个参数的周期平均值如图3所示,Jason-3 高度计 20 Hz 观测数和测距标准偏差分别约为 19.63 cm 和 7.99 cm,与 Jason-2 高度计处于同一水平。这两个参数除了弱季节信号外,没有明显异常趋势,这表明 Jason-3 高度计处于正常运行状态。

4.2 偏指向角

偏指向角的平方是根据高度计波形形状计算得到。偏指向角的逐周期平均值如图4所示,Jason-2 和 Jason-3 高度计偏指向角的平方平均值非常低且处于较稳定的同步变化状态,这可能与 Jason-3 和 Jason-

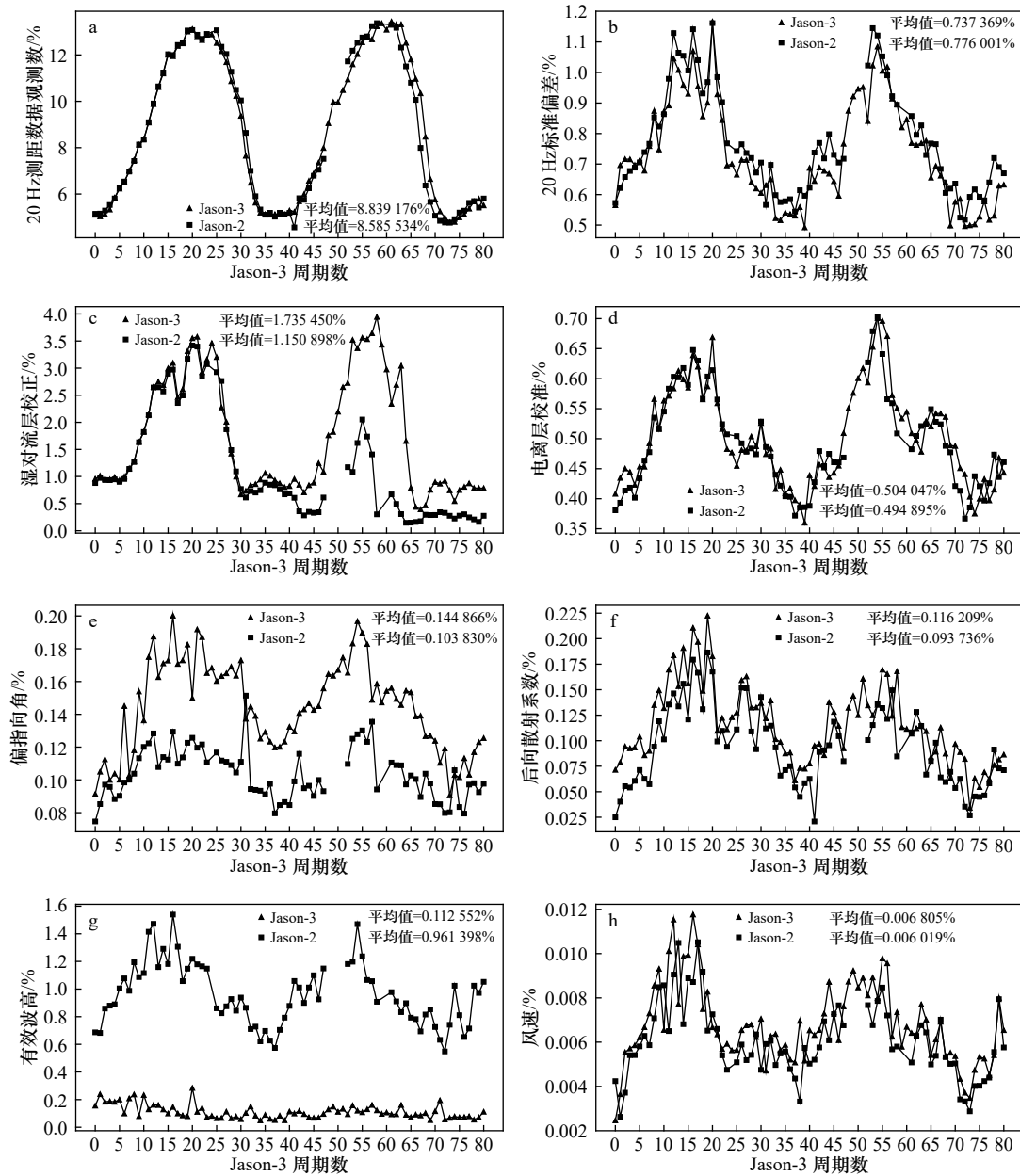


图 2 不同编辑准则逐周期剔除数据所占百分比

Fig. 2 Cycle-by-cycle percentages of edited measurements by the main Jason-2 and Jason-3 altimeter and radiometer parameters

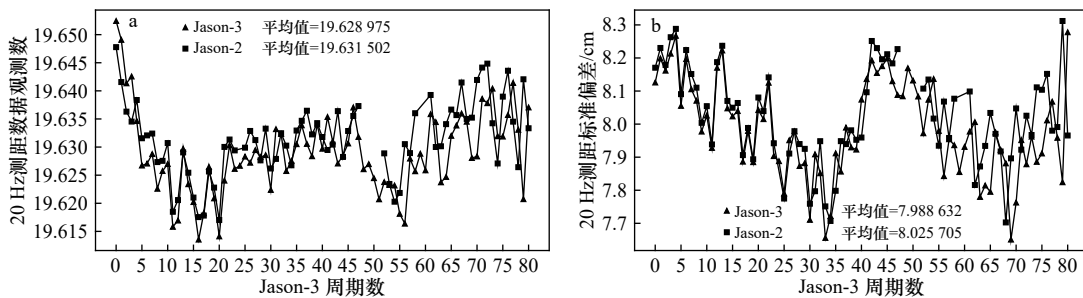


图 3 20 Hz 测距数据观测数(a)和 20 Hz 测距标准偏差(b)的逐周期平均值

Fig. 3 Cycle mean of number (a) and standard deviation (b) of 20 Hz range measurements

2 高度计均采用基于高度计波形的二阶模型(MLE4)有关。Jason-3 高度计前 3 个周期的偏指向角值平方

偏高是由于高度计没有进行 PF 指向更正(上传 STR1 和陀螺仪的更新参数)导致的。

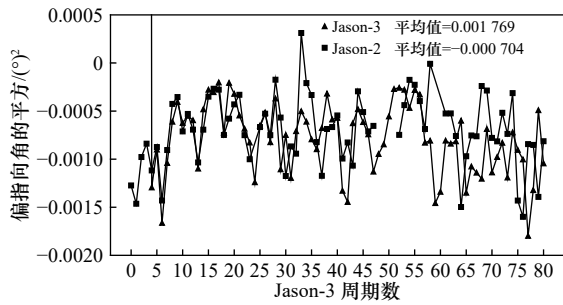


图4 偏指向角的平方逐周期平均值比较
Fig. 4 Cycle mean of square off-nadir angle from waveforms

4.3 后向散射系数和海面风速

在编队飞行阶段, Jason-3 高度计第3周期完成 PF 指向更正以后, Jason-3 和 Jason-2 高度计后向散射系数差值维持在 0.25~0.3 dB 之间, 平均标准偏差在 0.198 dB 左右(图5), 处于相对稳定的状态, 并没有出现明显异常波动。

在全球范围内比较, Jason-2 和 Jason-3 高度计后

向散射系数总体上依旧表现稳定, 后向散射系数的差值维持在 0.3 dB 左右, 每周期的后向散射系数标准偏差平均在 1.59 dB 左右, 两者之间没有观察到明显的漂移迹象(图6)。Jason-2 和 Jason-3 高度计风速标准偏差分别约为 3.5 m/s 和 3.6 m/s, 风速平均差值维持在 0.42 m/s 左右(图6), 这与后向散射系数表现一致。

4.4 微波辐射计湿对流层校正

湿对流层路径延迟是由大气中水汽和云液水对高度计脉冲信号延迟效应导致的, 雷达脉冲在穿过大气层时会受到大气的衰减作用, 导致传播速率的变化, 需要进行大气的延迟校正, 因此对湿对流层校正参数的监测就显得尤为重要。

在编队飞行阶段, Jason-3 与 Jason-2 的湿对流层校正差值平均在 0.125 cm 左右(图7), 平均标准偏差在 2×10^{-3} cm 左右, 这表明 Jason-3 高度计的微波辐射计湿对流层校正与 Jason-2 高度计处于同一水平且稳定工作。Jason-2 和 Jason-3 高度计全球匹配点湿对流

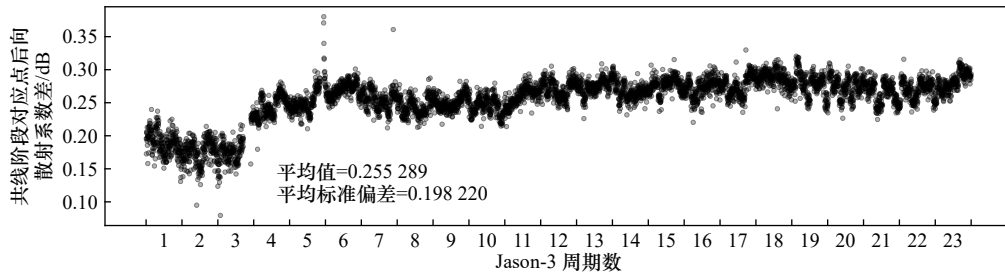


图5 编队飞行阶段对应点向后散射系数逐轨平均差值(Jason-3 与 Jason-2 差值)
Fig. 5 Pass mean of backscatter coefficient difference during the formation flight phase of Jason-3 minus Jason-2

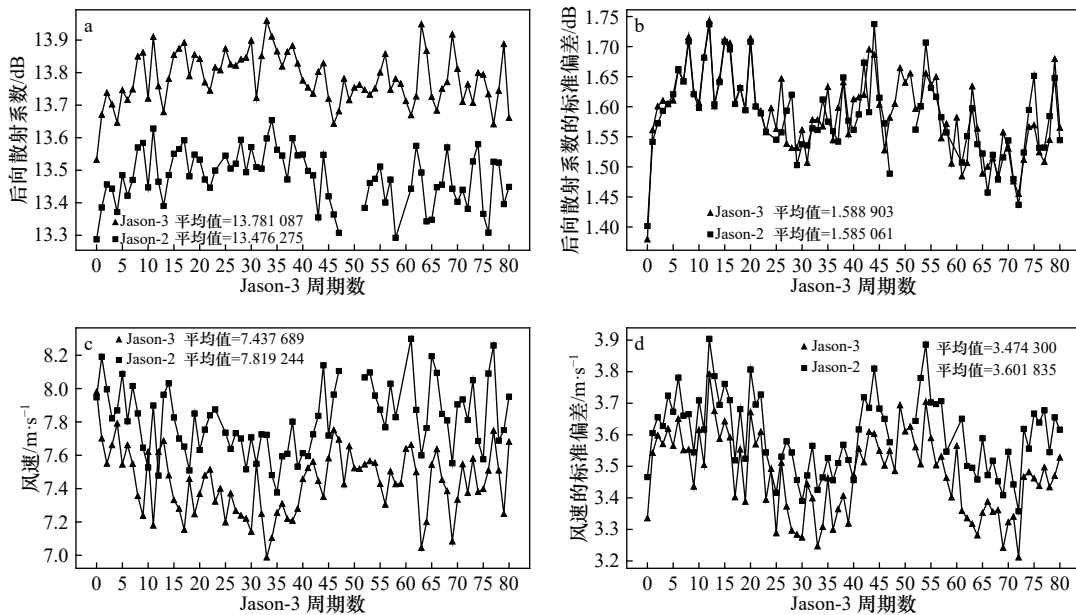


图6 后向散射系数(a)及其标准偏差的逐周期平均值(b)比较, 风速(c)及其标准偏差的逐周期平均值(d)
Fig. 6 Cycle mean of backscatter coefficient (a) and standard deviation of backscatter coefficient (b), cycle mean of wind speed (c) and standard deviation of wind speed (d)

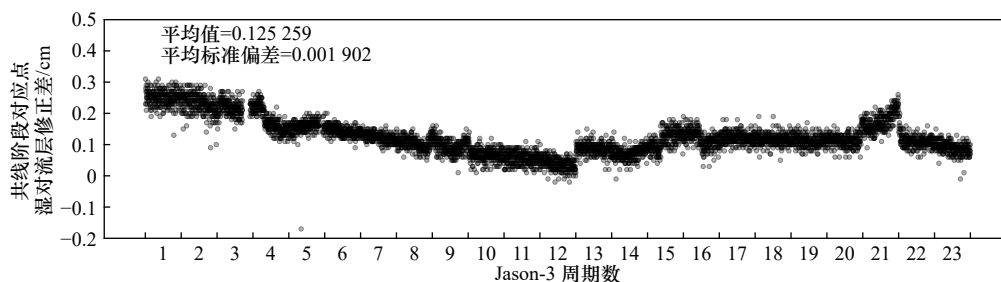


图 7 编队飞行阶段对应点湿对流层校正逐轨平均差值 (Jason-3 与 Jason-2 差值)

Fig. 7 Pass mean of radiometer wet troposphere correction difference during the formation flight phase of Jason-3 minus Jason-2

层校正差值仅在极地和赤道等气候变化显著的地区出现较大差值。其中, 由于湿对流层传感器原因可能出现观测误差, 故仪器会定期进行冷天空校准以保证正常运行, Jason-3 高度计第 13 周期出现跃变的原因可能是仪器漂移的人为调整, 第 22 周期出现跃变的原因是 Jason-3 高度计传感器进行冷天空校准导致的。

在全球比较过程中, 湿对流层校正及其标准偏差如图 8 所示, Jason-3 高度计与 Jason-2 高度计的辐射计湿对流层校正处于同一水平, 标准偏差曲线几乎重叠, 这说明 Jason-3 和 Jason-2 高度计的辐射计湿对流层校正参数具有相同的稳定性。图 8 中 Jason-2 高度计在第 322 周期 (对应 Jason-3 高度计第 41 周期) 的异常低值是由于 Jason-2 机动调动状态结束后, 虽然 IGDR 产品恢复正常, 但其湿对流层参数校正值并未恢复正常, 直到 2017 年 4 月 3 日 (对应 Jason-2 高度计该

周期第 231 轨迹) 才正式恢复正常。

4.5 双频电离层校正

电离层路径延迟是由大气中的自由电子对高度计脉冲信号折射所导致的, 雷达脉冲在传播过程中会受到地球电离层的影响, 自由电子密度越大则脉冲传播速度越低。由于电离层延迟和脉冲频率的平方成反比, 因此通常用双频观测方式估计电离层校正。编队飞行阶段可以观察到 Jason-3 和 Jason-2 高度计的差值存在 0.56 cm 左右的系统误差 (图 9), 这与两高度计的 C 波段校准方法不一致有关。电离层差值的全球分布并不规则, 但总体维持在 0.6 cm 左右。在全球比较过程中 Jason-3 与 Jason-2 高度计的电离层差值较小, 仅在 0.55 cm 左右, 平均标准偏差 0.03 cm 左右 (图 10)。这些电离层校正的差异可能取决于用于校正 Ku 波段和 C 波段范围的海况偏差 (SSB) 模型。

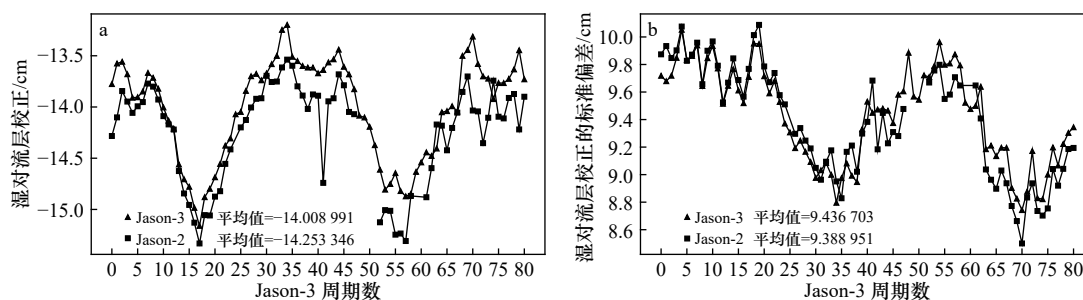


图 8 湿对流层校正逐周期平均值 (a) 及其标准偏差 (b)

Fig. 8 Cycle mean of radiometer wet troposphere correction (a) and standard deviation of radiometer wet troposphere correction (b)

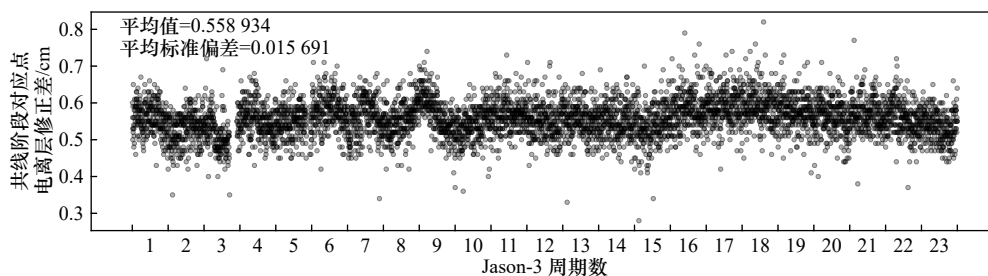


图 9 编队飞行阶段对应点电离层校正逐轨平均差值 (Jason-3 与 Jason-2 差值)

Fig. 9 Pass mean of dual frequency ionosphere correction difference during the formation flight phase of Jason-3 minus Jason-2

4.6 有效波高

有效波高是海洋气象预报中的常用量, 可根据高度计雷达回波前缘坡度计算出来, 近似等于一段时间内或者给定海域内海浪最大波高值的 1/3。在编队飞行阶段, Jason-3 和 Jason-2 高度计可以视为同时观测相同海域的有效波高, 此时二者有效波高差值如图 11 所示, Jason-3 和 Jason-2 高度计有效波高具有极高的一致性, 平均差值为 0.23 cm 左右, 平均标准偏差在 0.20 cm 左右。在 Jason-2 高度计变换轨道以后, Jason-3 和 Jason-2 高度计不再观测同一海域, 此时通过计算全球平均值的方法来进行二者有效波高数据质量比较, 结果如图 12 所示。由图 12 可以看出, Jason-3 和 Jason-2 高度计的有效波高及其标准偏差同样具有较高的一致性, 有效波高周期平均的差值在 0.24 cm 左右, 这与编队飞行时比较的结果一致, 这说明 Jason-3

高度计有效波高数据质量与 Jason-2 高度计相同。

5 Jason-3 高度计海面高度相关参数分析

5.1 海面高度

海面高度 (Sea Surface Height, SSH) 作为监测海洋的重要参数在开展海洋及其相关研究过程中发挥着重要作用, 第 4 节所分析的大部分参数都将用于海面高度的计算。本研究将采用共线阶段 (编队飞行阶段) 比较, 全球整体比较和交叉点比较 (包括编队飞行阶段重复轨道) 等分析方法对 Jason-3 高度计海面高度进行全面系统的监测。

首先, 采取下式计算海面高度:

$$SSH = Alt - Range - C_{wet} - C_{dry} - C_{iono} - C_{inv} - C_{tide} - C_{hf} - SSB, \quad (1)$$

式中, Alt 为高度计轨道高度; Range 为高度计距离测量

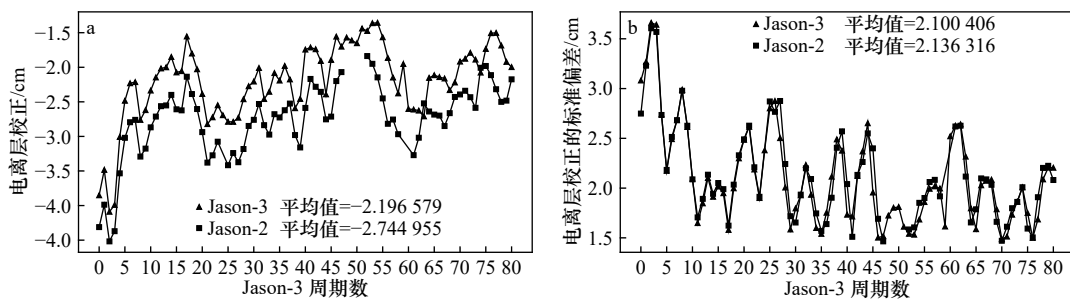


图 10 双频电离层校正逐周期平均值(a)及其标准偏差(b)

Fig. 10 Cycle mean of dual frequency ionosphere correction (a) and standard deviation of dual frequency ionosphere correction (b)

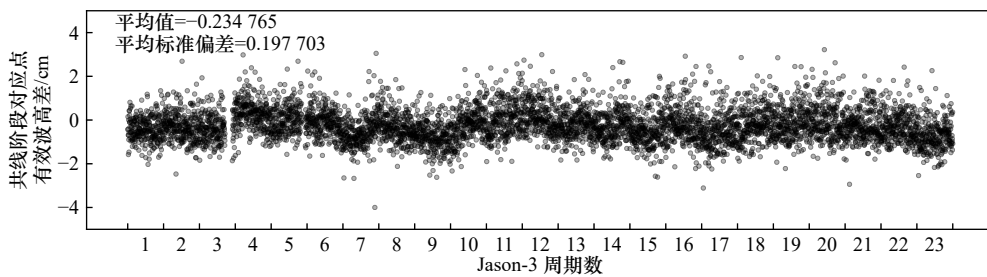


图 11 编队飞行阶段对应点有效波高逐轨平均差值 (Jason-3 与 Jason-2 差值)

Fig. 11 Pass mean of significant wave height difference during the formation flight phase of Jason-3 minus Jason-2

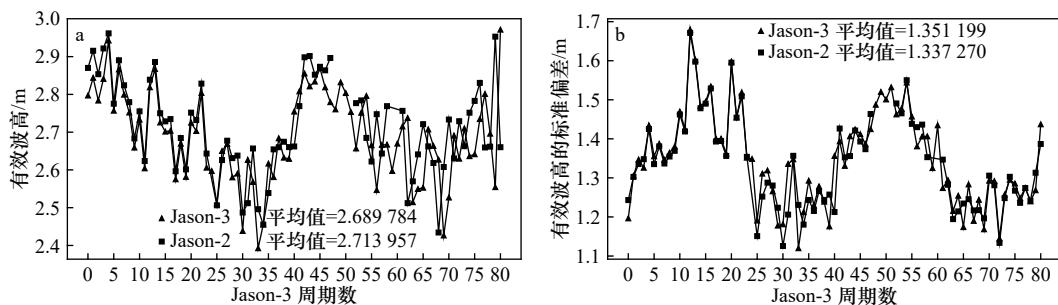


图 12 有效波高逐周期平均值(a)及其标准偏差(b)

Fig. 12 Cycle mean of significant wave height (a) and standard deviation of significant wave height (b)

值; C_{wet} 为湿对流层延迟校正; C_{dry} 干对流层延迟校正; C_{iono} 为电离层延迟校正; C_{inv} 为大气逆压校正; C_{tide} 为潮汐校正, 其中包括海洋潮汐校正、固体潮校正和极潮校正; C_{hr} 为海面地形的高频波动; SSB 为海况偏差。

在编队飞行阶段, Jason-3 与 Jason-2 对应点海面高度差值如图 13 所示, 此时海面高度差值存在 -3 cm 左右的系统误差, 其标准偏差仅在 0.06 cm 左右。

在全球比较过程中, Jason-3 和 Jason-2 高度计海

面高度及其标准偏差监测值如图 14 所示, Jason-3 与 Jason-2 高度计海面高度没有明显差异, 两者差值仅在 1.2 cm 左右, 而且两者标准偏差基本相同。

全球海面高度差分布呈现很强的区域性, 差值较大或较小的地方呈片状出现(图 15)。

在交叉点差异分析过程中, 为削弱洋流和纬度对海面变化的影响, 设置寻找交叉点的条件为最大时间间隔 10 d, 且交叉点位于纬度为 $50^{\circ}S \sim 50^{\circ}N$ 的海域,

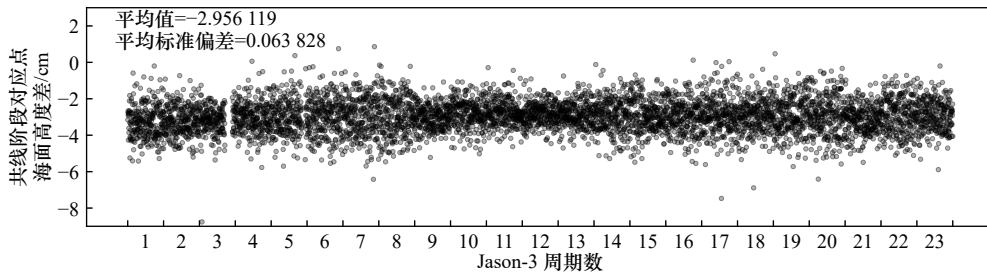


图 13 编队飞行阶段对应点海面高度逐轨平均差值 (Jason-3 与 Jason-2 差值)

Fig. 13 Pass mean of sea surface height difference during the formation flight phase of Jason-3 minus Jason-2

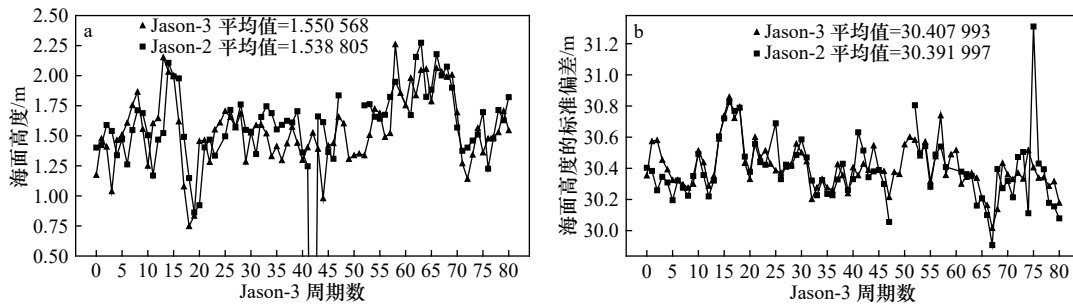


图 14 海面高度逐周期平均值(a)及其标准偏差(b)

Fig. 14 Cycle mean of sea surface height (a) and standard deviation of sea surface height (b)

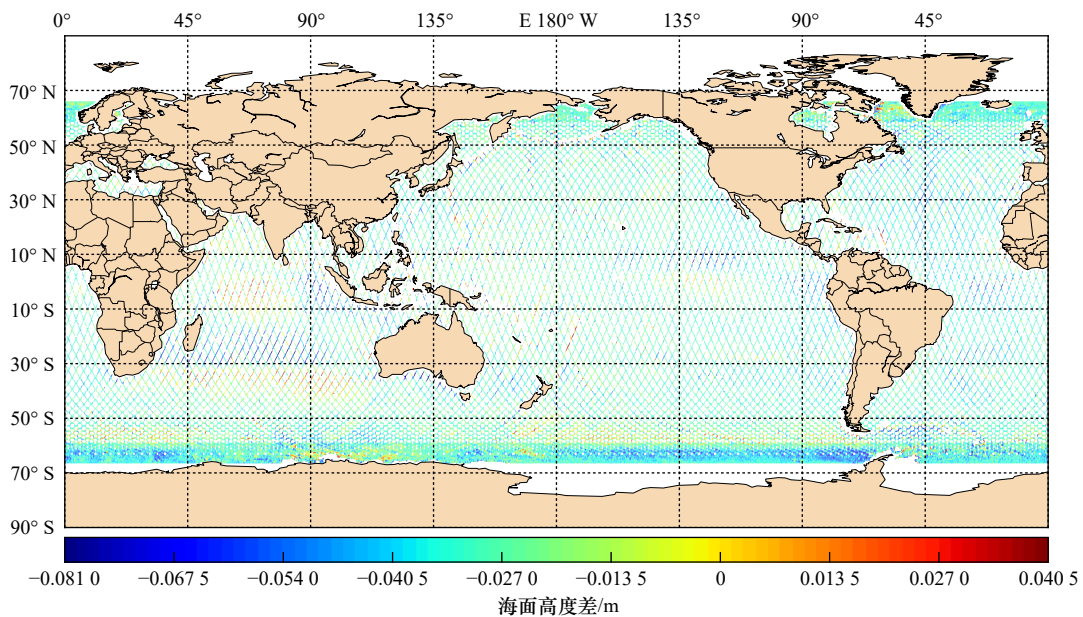


图 15 Jason-3 与 Jason-2 高度计编队飞行阶段海面高度差值全球分布

Fig. 15 Global difference of sea surface height during the formation flight phase of Jason-3 minus Jason-2

并滤除部分误差较大的高频信息。交叉点海面高度比较结果如图 16 所示, Jason-3 与 Jason-2 高度计互交叉点海面高度不符值为-2.56 cm 左右, 与编队飞行时结果一致, 这与电离层校正、对流层校正等参数存在系统误差有关。Jason-3 高度计自交叉点海面高度不符值为 -3×10^{-3} cm 左右, 且自交叉点和互交叉点的 RMS 分别为 6.87 cm 和 7.25 cm 左右, 这与 Dorandeu 等^[11]计算的 Jason-1 高度计海面高度自交叉点 RMS 为 6.15 cm 和 Ablain 等^[12]计算的 Jason-2 高度计海面高度自交叉点 RMS 为 5.07 cm 结果相近。

5.2 海面高度异常

海面高度异常 (Sea Level Anomaly, SLA) 可以很好地捕捉海洋变化的特征, 可对海平面变化的趋势做出准确的监测和评价, 长时间序列的 SLA 可以用于

监测高度计的稳定性和 SSH 观测的异常趋势和相关误差。一般, 采取下式计算海面高度异常,

$$SLA = SSH - MSS, \quad (2)$$

式中, SSH 为海面高度; MSS 为平均海平面, 本文中计算所用的 MSS 来自 Jason-2 卫星高度计所使用的 MSS_CNES_CLS-2011 模型。

Jason-3 自交叉点和 Jason-3 与 Jason-2 互交叉点的海面高度异常不符值全球分布如图 17 所示, 两者总体趋于平稳, 太平洋西部、印度洋西南部和大西洋西部海域等高动态变化海域会出现差值偏高或偏低的情况。自交叉点和互交叉点的逐周期不符值如图 18 所示, Jason-3 高度计自交叉点和 Jason-3 与 Jason-2 高度计互交叉点的 SLA 的 RMS 分别约为 6.10 cm 和 6.45 cm。在进行 Jason-3 与 Jason-2 高度计互交叉点分析时, 前

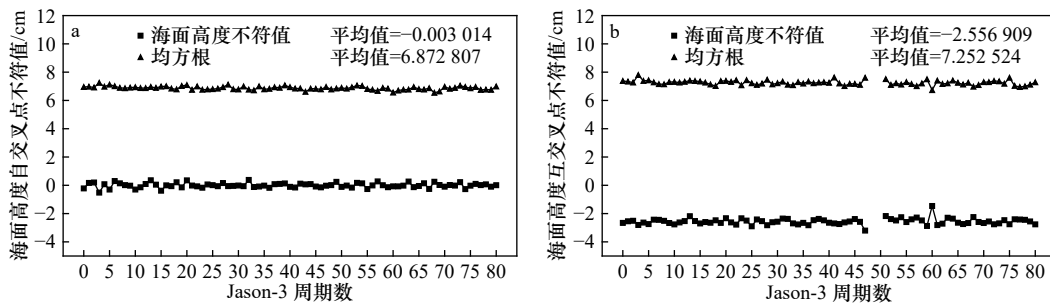


图 16 Jason-3 自交叉点 (a) 和 Jason-3 与 Jason-2 互交叉点 (b) 的海面高度逐周期不符值及其均方根值
Fig. 16 Cycle mean of self-crossover (a) and dual-crossover (b) sea surface height difference and root mean square

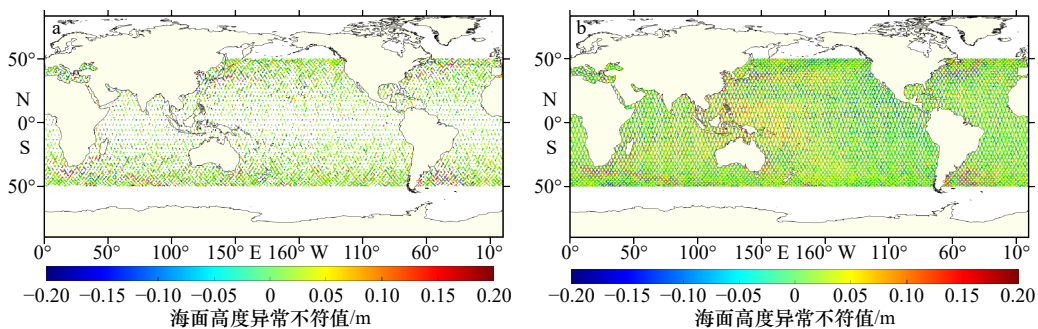


图 17 Jason-3 自交叉点 (a) 和 Jason-3 与 Jason-2 互交叉点 (b) 的海面高度异常不符值全球分布
Fig. 17 Global difference of self-crossover (a) and dual-crossover (b) sea level anomaly difference

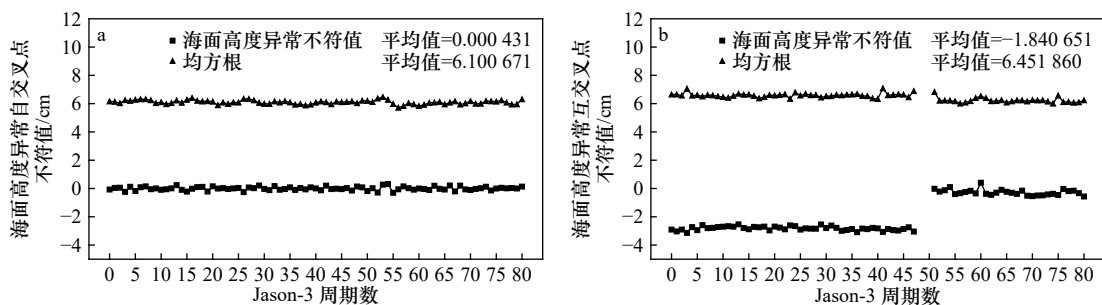


图 18 Jason-3 自交叉点 (a) 和 Jason-3 与 Jason-2 互交叉点 (b) 的海面高度异常逐周期不符值及其均方根值
Fig. 18 Cycle mean of self-crossover (a) and dual-crossover (b) sea level anomaly difference and its root mean square

47 周期交叉点不符值稳定在 $-2\sim-3$ cm 之间,这与二者海面高度比较结果一致。Jason-3 高度计在第 48 周期完成了专业技术校准,使其后续周期互交叉点不符值维持在 0 cm 左右,实现了 Jason-3 和 Jason-2 高度计海面高度异常的统一,这说明 Jason-3 和 Jason-2 高度计在以后的飞行任务中可以更方便的进行交叉点校正分析,使多源高度计数据融合^[17]变得更加简单。

6 结论

本研究使用了自 Jason-3 高度计发射以来的时间跨度 2 年以上(81 个周期)的数据,通过 Jason-3 高度计和辐射计的各个参数与 Jason-2 高度计的比较,进

行 Jason-3 数据质量评估。分析结果表明,Jason-3 高度计双频电离层和辐射计湿对流层校正与 Jason-2 高度计结果一致; Jason-3 高度计后向散射系数稳定且未出现明显异常波动;有效波高的比较分析结果说明 Jason-3 高度计的有效波高数据观测能力上明显优于 Jason-2 高度计; Jason-3 高度计自交叉点和 Jason-3 与 Jason-2 互交叉点比较分析结果表明 Jason-3 高度计的观测值与 Jason-2 高度计具有一致性, Jason-3 高度计可以更方便地与 Jason-2 高度计进行交叉点分析。总的来说, Jason-3 高度计观测显示出良好的稳定性。同时, Jason-3 高度计的长时间的监测需要继续,为海洋和全球变化等相关研究做好数据支持。

参考文献:

- [1] 崔伟, 王伟, 马毅, 等. 基于1993–2014年高度计数据的西北太平洋中尺度涡识别和特征分析[J]. 海洋学报, 2017, 39(2): 16–28.
Cui Wei, Wang Wei, Ma Yi, et al. Identification and analysis of mesoscale eddies in the Northwestern Pacific Ocean from 1993–2014 based on altimetry data[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(2): 16–28.
- [2] 胡冬, 陈希, 毛科峰, 等. 黑潮延伸体邻近区域中尺度涡特征统计分析[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(3): 497–511.
Hu Dong, Chen Xi, Mao Kefeng, et al. Statistical characteristics of mesoscale eddies near the kuroshio extension region[J]. Ocean and Lakes, 2018, 49(3): 497–511.
- [3] 赵杰, 汪一航, 王永刚, 等. 基于卫星高度计资料提取浙江近海的潮汐信息[J]. 应用海洋学报, 2018, 37(3): 356–365.
Zhao Jie, Wang Yihang, Wang Yonggang, et al. Extraction of tidal information on Zhejiang offshore based on satellite altimetry data[J]. Journal of Applied Oceanography, 2018, 37(3): 356–365.
- [4] 王天驹, 齐琳琳, 朱江, 等. HY-2卫星高度计波高资料在集合最优插值同化中的应用研究——以台风“Lipee”为例[J]. 海洋学报, 2017, 39(2): 29–38.
Wang Tianju, Qi Linlin, Zhu Jiang, et al. Application studies of using HY-2 satellite altimeter wave data in ensemble optimal interpolation method——“Lipee” for instance[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(2): 29–38.
- [5] 贾永君, 林明森, 张有广. 海洋二号卫星A星雷达高度计在海洋防灾减灾中的应用[J]. 卫星应用, 2018(5): 34–39.
Jia Yongjun, Lin Mingsen, Zhang Youguang. Application of ocean altimeter a satellite radar altimeter in marine disaster prevention and mitigation[J]. Satellite Applications, 2018(5): 34–39.
- [6] 赵小阳, 李建成, 王正涛, 等. 利用卫星测高技术监测厄尔尼诺和拉尼娜现象[J]. 海洋测绘, 2007, 27(1): 41–44.
Zhao Xiaoyang, Li Jiancheng, Wang Zhengtao, et al. Using satellite altimetry technique for monitoring El Niño and La Niña phenomenon[J]. Marine Surveying and Mapping, 2007, 27(1): 41–44.
- [7] 杨磊, 周兴华, 彭海龙, 等. 基于Jason-2的SARAL/AltiKa高度计全球统计评估与交叉定标[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(4): 482–490.
Yang Lei, Zhou Xinghua, Peng Hailong, et al. Global assessment and cross-calibration of SARAL/AltiKa based on Jason-2 altimeter[J]. Advances in Marine Science, 2014, 32(4): 482–490.
- [8] Prandi P, Philipps S, Pignot V, et al. SARAL/AltiKa global statistical assessment and cross-calibration with jason-2[J]. Marine Geodesy, 2015, 38(S1): 297–312.
- [9] Chambers D P, Ries J C, Urban T J. Calibration and verification of jason-1 using global along-track residuals with TOPEX special issue: jason-1 calibration/validation[J]. Marine Geodesy, 2003, 26(3/4): 305–317.
- [10] 彭海龙, 林明森, 穆博, 等. HY-2A卫星雷达高度计数据的全球统计评价及质量分析[J]. 海洋学报, 2015, 37(7): 54–66.
Peng Hailong, Lin Mingsen, Mu Bo, et al. Global statistical evaluation and performance analysis of HY-2A satellite radar altimeter data[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(7): 54–66.
- [11] Dorandeu J, Ablain M, Faugère Y, et al. Jason-1 global statistical evaluation and performance assessment: Calibration and cross-calibration results[J]. Marine Geodesy, 2004, 27(3/4): 345–372.
- [12] Ablain M, Philipps S, Picot N, et al. Jason-2 global statistical assessment and cross-calibration with Jason-1[J]. Marine Geodesy, 2010, 33(S1): 162–185.
- [13] 翟国君, 黄漠涛, 谢锡君, 等. 卫星测高数据处理的理论与方法[M]. 北京: 测绘出版社, 2000.
Zhai Guojun, Huang Motao, Xie Xijun, et al. Theories and Methods of Satellite Altimetry Data Processing[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2000.
- [14] 汪海洪, 罗北. 计算测高卫星地面轨迹交叉点的快速数值算法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2017, 42(3): 293–298.

- Wang Haihong, Luo Bei. Fast numerical algorithm for the calculation of altimetric crossovers from satellite ground tracks[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(3): 293–298.
- [15] Wessel P. Tools for analyzing intersecting tracks: The x2sys package[J]. *Computers & Geosciences*, 2010, 36(3): 348–354.
- [16] Desjonquères J D, Carayon G, Steunou N, et al. Poseidon-3 radar altimeter: new modes and in-flight performances[J]. *Marine Geodesy*, 2010, 33(S1): 53–79.
- [17] 崔伟. 多源卫星高度计海面高度异常数据融合研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2016.
Cui Wei. The study of merging sea level anomalies data derived from multi-satellite altimeter[D]. Qingdao: First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2016.

Jason-3 global statistical assessment based on Jason-2

Liu Zhizhong¹, Yang Jungang², Zhang Jie², Cui Wei²

(1. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China; 2. Remote Sensing Department of First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China)

Abstract: Jason-3 satellite was successfully launched on January 17, 2016, and was put on its nominal orbit on February 12, 2016. Jason-3 was flying in formation with Jason-2 only 1 minute 20 seconds, and was about 560 km from Jason-2. Jason-2 was moved to its new interleaved orbit on September 1, 2016. Two orbits were parallel to increase the spatial coverage of satellite observations. The objectives of this paper are to assess Jason-3 data quality and to estimate the altimetry system performance includes validation of Jason-3 data availability and data quality monitoring of Jason-3 and radiometer parameters. The objectives focused on comprehensive comparison of the parameters of the Jason-2 and Jason-3, accurately evaluated the consistency of the two altimeter parameters using the opportunity that the missions were on the same ground track during the formation flight phase, analyzed the ability and stability of the Jason-3 from the perspective of global data, verified Jason-3 data accuracy by self-crossover analysis and dual crossover analysis with Jason-2. From the results presented here, it is demonstrated that the Jason-3 mission fulfils the requirements of high precision altimetry. It allows continuing the observation of the sea surface height variations at the same or higher accuracy as Jason-1, Jason-2 and T/P. In addition, significant wave height quality of Jason-3 data is significantly better than the Jason-2.

Key words: Jason-3 satellite; Jason-2 satellite; data quality; evaluation