

# 利用南海石油平台的卫星雷达高度计定标与检验

叶小敏<sup>1,2</sup>, 林明森<sup>1,2</sup>, 宋庆君<sup>1,2</sup>, 兰志刚<sup>3</sup>

(1. 国家海洋局国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 2. 国家海洋局空间海洋遥感与应用研究重点实验室, 北京 100081; 3. 中海油能源发展股份有限公司北京分公司, 北京 100027)

**摘要:** 在对南海石油平台所处的南海北部海域海底地形、平均海平面、风浪时空分布等进行分析基础上, 利用南海石油平台水位计对 Jason-2 卫星高度计进行了测高绝对定标, 定标结果为  $30.9 \text{ cm} \pm 7.8 \text{ cm}$ , 分析发现南海北部中尺度涡可能对定标结果产生影响; 利用南海石油平台测波雷达对 Jason-1 高度计有效波高进行了精度检验, Jason-1 高度计 Ku 波段和 C 波段有效波高测量的均方根误差分别为  $0.43 \text{ m}$  和  $0.45 \text{ m}$ 。分析和检验结果表明, 南海石油平台所处海洋环境条件、平台上装载的水位计和测波雷达均满足卫星雷达高度计定标与检验要求。南海石油平台定标场预期可用于中国海洋二号卫星和其他卫星高度计的定标与检验。

**关键词:** 石油平台; 高度计; 南海; 定标; 检验

中图分类号: P714.3; P717 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2015)12-0135-08

doi: 10.11759/hyqx20130112001

卫星雷达高度计是可同步提供海面高度、海面风速大小和有效波高等海洋动力环境要素的微波传感器。在近 40 年海洋卫星发展过程中, 经历了 Seasat、Geosat、GFO、TOPEX/Poseidon、ERS-1/2、ENVISAT、Jason-1/2 和 HY-2 等典型的卫星雷达高度计, 目前卫星高度计海面测高精度高达  $2.5 \text{ cm}$ , 海面风速和有效波高观测精度分别达到了  $1.5 \text{ m/s}$ 、 $5\%$  或  $0.25 \text{ m}^{[1-2]}$ 。

在高质量定量化高度计遥感产品生产过程中, 定标与真实性检验是必不可少的环节。现今全球永久的高度计专业定标与真实性检验场有 4 个<sup>[3]</sup>: 希腊克利特岛(位于地中海东部)的 Gavdos 定标场<sup>[3]</sup>; 法国的科西嘉岛定标场<sup>[4]</sup>; 美国加利福尼亚州的 Harvest 石油平台<sup>[5]</sup>; 澳大利亚塔斯马尼亚州的巴士海峡定标场<sup>[6]</sup>。利用定标场可对在轨的卫星高度计进行定标和真实性检验, 高度计定标检验方法主要包括 3 类: 有源定标检验法、星星交叉定标检验法和现场观测定标检验法。有源定标检验即在高度计星下点安置微波异频雷达收发器实施对高度计后向散射系数和测高的有源定标检验; 星星交叉定标检验法即利用已有的高质量的卫星雷达高度计进行沿轨(对相同轨道的后继卫星)或交叉点进行交叉定标检验; 现场观测定标法即利用专门的海上定标场或现场观测数据对高度计进行定标和检验。

利用现场观测数据对海面风速和有效波高的检验

就是在一定的时空窗口内对现场观测值和高度计观测值进行比较<sup>[7-9]</sup>, 或者利用现场观测的月平均值与高度计在一定空间范围的观测月平均值进行比较<sup>[10-11]</sup>。高度计测高绝对定标检验方法可分为两种。一是标准方法, 比较卫星和现场测量之间的海面高度, 该方法需确保现场观测点在卫星地面轨迹上。二是参考平均海平面法, 比较卫星和现场测量之间的海平面距平, 该方法的现场观测点可不在卫星地面轨迹上, 但仍需满足无岛屿干扰的开放海域、大地水准面和潮汐模型相对精确和风浪环境要素均匀等条件<sup>[12-13]</sup>。

国内外学者在不同海域对在轨的卫星高度计进行了大量的定标检验工作。Christensen 等<sup>[14]</sup>利用 Harvest 石油平台得到 TOPEX 和 Poseidon 高度计的测高绝对定标结果分别为  $-14.7 \text{ cm} \pm 2.1 \text{ cm}$  和  $-2.9 \text{ cm} \pm 2.4 \text{ cm}$ ; Haines 等<sup>[15]</sup>利用 Harvest 石油平台确定 Jason-1 卫星高度计(2001~2003 年)的测高绝对定标结果为  $13.8 \text{ cm} \pm 1.8 \text{ cm}$ , 同时结果显示 T/P 卫星高度计于在轨的十多年间由于得到了很好的定标, 其海

收稿日期: 2013-01-12; 修回日期: 2014-03-18

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41506206, 41276019, 41006112); 海洋公益项目(201105032, 201305032, 201005030); 国家 863 计划(2008AA09A403; 2008AA09A401); 国家海洋局青年海洋科学基金(2012427)

作者简介: 叶小敏(1983-), 男, 江西九江人, 硕士, 主要从事高度计定标与检验研究, E-mail: yxm@mail.nsoas.org.cn; 林明森, 通信作者: mslin@mail.nsoas.org.cn

面高度测量偏差几乎接近零; Bonnefond 等<sup>[4, 16]</sup>在科西嘉岛定标场利用声学验潮仪和 GPS 浮标对 TOPEX/Poseidon、Jason-1 和 Jason-2 卫星高度计进行了定标检验得到测高绝对定标结果分别为 0.6 cm±0.3 cm(ALT-B)、12.0 cm±0.7 cm 和 18.3 cm±0.8 cm; Mertikas 等<sup>[3]</sup>在 Gavdos 定标场对 Jason-2 卫星高度计第 2~60 周期进行了定标检验, 得到了 Jason-2 高度计 Ku 波段和 C 波段测高绝对定标结果分别为 18.67 cm±5 cm 和 17.99 cm±7 cm, 而结合 CLS01\_MSS 平均海平面模型对相同的 Jason-2 卫星 GDR 数据进行定标, 得到的测高绝对定标结果为 15.98 cm±0.2 cm, 并对有源定标方法进行了介绍; Dong 等<sup>[12]</sup>利用英国验潮站和 GPS 设备对 TOPEX/Poseidon 卫星高度计进行了定标检验, 得到 TOPEX 和 Poseidon 高度计的海面测高绝对偏移量分别为 2 cm 和 3 cm; Christopher 等<sup>[6]</sup>在澳大利亚巴士海峡利用 GPS 浮标, 得到 TOPEX/Poseidon 卫星高度计测高绝对定标结果为 -1.0 cm±1.9 cm, Jason-1 卫星高度计的测高绝对定标结果为 13.1 cm±2.1 cm(MOE 轨道)和 13.1 cm±2.1 cm(GPS 轨道)。以上成果中, 利用 Harvest 石油平台定标场、科西嘉岛和巴士海峡定标场 GPS 浮标的定标属于在高度计地面轨迹上的标准定标方法, 而利用验潮仪的定标属于比较现场和卫星观测点间海平面距平的定标方法。本文以国家“863”计划“海洋遥感定标检验技术研究”南海石油平台定标场的水位计和测波雷达仪器观测数据, 对 Jason-2 卫星高度计进行测高绝对定标, 对 Jason-1 有效波高产品进行真实性检验。

## 1 高度计测高绝对定标方法与数据

### 1.1 高度计测高绝对定标原理

卫星高度计测高绝对定标是通过比较现场和卫星观测的海面高度来获得卫星高度计测高的绝对偏差。对于南海石油平台的定标场, 由于平台并非处于卫星观测的地面轨迹上, 需要比较两者测量的海平面距平来获得高度计的绝对偏差。

图 1 为南海石油平台对高度计测高绝对定标原理示意图, 高度计海面高度测量绝对偏差计算公式为<sup>[3]</sup>

$$B = H_{SLA} - h_{SLA} = (H_{SL} - h_{SL}) - (H_{MSS} - h_{MSS}) \quad (1)$$

式中,  $B$  为绝对偏差,  $H_{SLA}$ 、 $h_{SLA}$  分别为卫星高度计观测点和平台处海平面距平;  $H_{MSS}$ 、 $h_{MSS}$  分别为卫星高度计观测点和平台处的平均海平面高。在计算

偏差时, 平均海平面高可用大地水准面高代替<sup>[12]</sup>。

平台处瞬时海面高度  $h$  由水位计高度减去水位计到海面的水位雷达测量距离  $r$  得到。平台处海平面高度  $h_{SL}$  可表示为

$$h_{SL} = h - h_{corr} - h_{tide} = h - h_{IB} - (h_O + h_S + h_P) \quad (2)$$

式中,  $h_{corr}$  为平台处海面高度校正项, 仅包括平台处逆压校正  $h_{IB}$ ;  $h_{tide}$  为平台处潮汐项, 包括海洋潮汐  $h_O$ 、地球固体潮  $h_S$  和极潮  $h_P$ 。

卫星观测点处海面高度距平  $H_{SLA}$  为

$$H_{SLA} = H_{alt} - R - H_{corr} - H_{tide} \quad (3)$$

其中,

$$H_{corr} = H_{Iono} + H_{Wet} + H_{Dry} + H_{SSB} + H_{IB} + H_{HF} \quad (4)$$

$$H_{tide} = H_O + H_S + H_P \quad (5)$$

式中,  $H_{alt}$  和  $R$  分别为高度计高度、高度计测距大小;  $H_{corr}$  为高度计测高的校正项, 包括电离层校正  $H_{Iono}$ 、大气对流层延迟校正干分量  $H_{Dry}$ 、对流层延迟校正湿分量  $H_{Wet}$ 、海况偏差校正  $H_{SSB}$ 、逆压校正  $H_{IB}$ 、海面地形高频振荡校正  $H_{HF}$ ;  $H_{tide}$  为卫星观测点处的潮汐, 包括海洋潮汐  $H_O$ 、地球固体潮  $H_S$  和极潮  $H_P$ 。

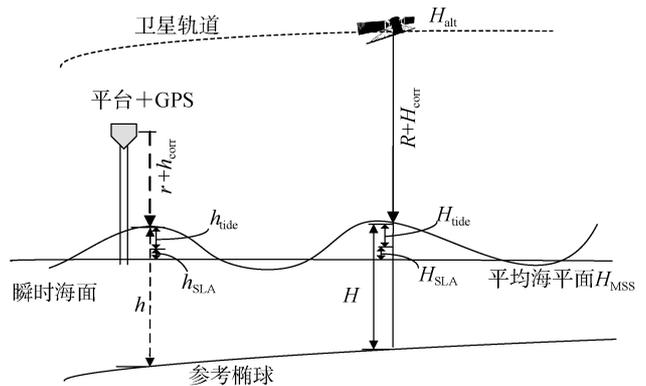


图 1 南海石油平台水位计对卫星高度计测高绝对定标原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the absolute calibration for the satellite altimeter using the sea level sensor fixed on the oil platform in the South China Sea

### 1.2 南海石油平台及其所在海域概况

南海石油平台位于南海北部(114°56'28.267"E, 20°14'41.880"N), 离岸约 220 km, 所在位置为开阔海域。南海石油平台位置偏离 Jason-1 卫星高度计 pass012 地面轨迹约 2 km (2012 年 2 月变轨前)。Jason-2 卫星距平台最近的四条轨道为 Pass012、Pass153、Pass190 和 Pass229, 距离在

110~160 km。南海石油平台与 Jason-1/2 卫星地面轨迹分布见图 2。

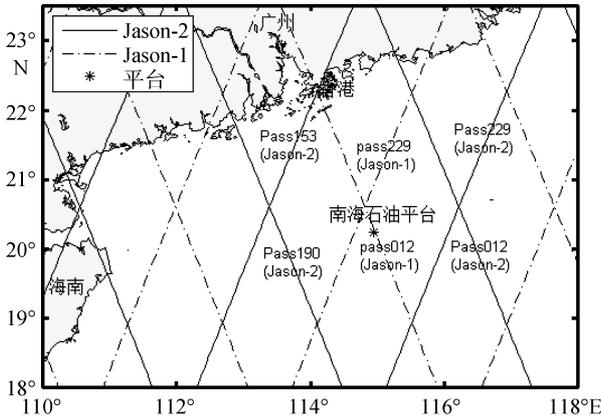


图 2 南海石油平台位置及 Jason-1/2 卫星地面轨迹

Fig.2 The location of the oil platform in the South China Sea and the ground track of Jason-1/2 satellites

南海石油平台处于南海大陆架上, 当地水深约 200 m。图 3 为平台所在的南海北部海域海底地形(英国海洋数据中心的 GEBCO\_08 水深模型, 网格分辨率为  $2' \times 2'$ )和平均海平面梯度场(法国空间中心的 CLS\_MSS11 平均海平面模型计算得到)。由图 3 可见, 平台附件海域水深较深(约 200 m), 平均海平面变化较平缓(梯度小于 4 cm/km), 且潮汐适用大洋潮汐模型, 无对卫星高度计观测干扰的岛屿。

图 4 为南海石油平台处近 3 a(2009~2011 年) Jason-1 卫星高度计的风浪观测值。平台处风浪随季节变化明显, 海面风速大小分布在 0~16 m/s 的范围

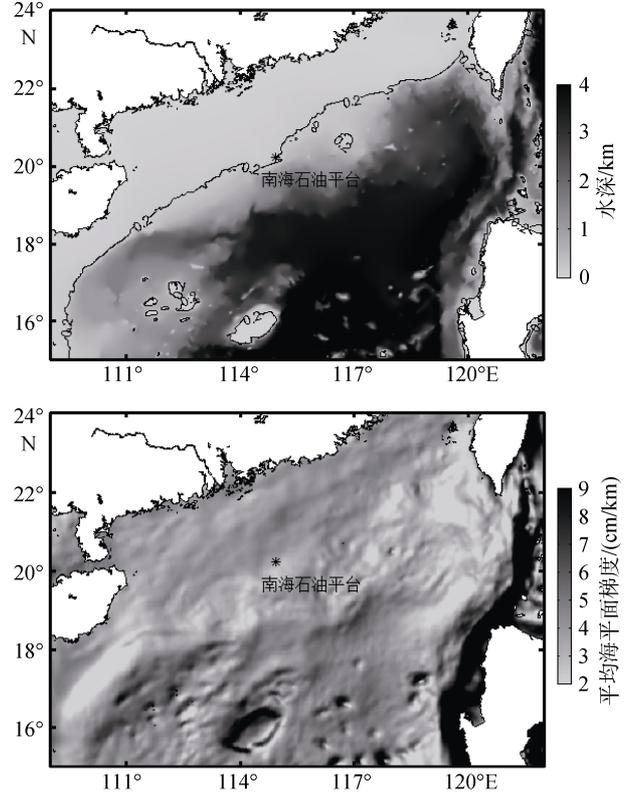


图 3 南海北部海底地形和平均海平面梯度场

Fig.3 Bathymetric map and the grads field of mean sea surface in the northern South China Sea

内, 有效波高分布在 0~5 m 的范围内; 夏季风浪相对偏小, 而冬、春两季风浪相对偏大; 海面风速大小和有效波高变化趋势一致。平台所处的南海北部海域风浪平面分布较均匀(分布示例见图 5), 不存在风浪剧烈变化的海域。

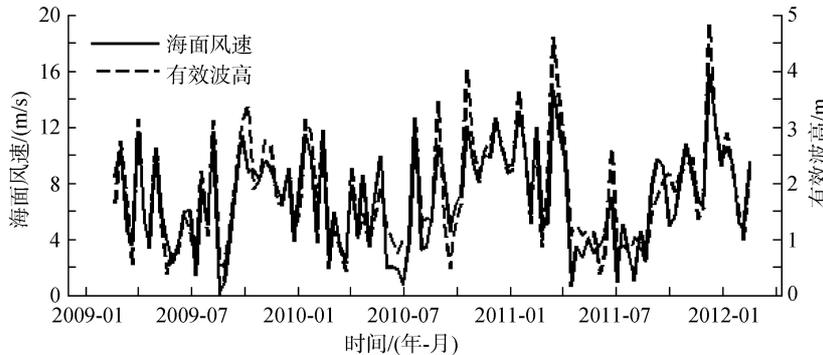


图 4 南海石油平台处近 3 a(2009~2011 年)海面风速和有效波高变化曲线

Fig.4 Variation of the sea surface wind speeds and significant wave heights at the oil platform in the South China Sea from 2009 to 2011

根据南海石油平台所处海域的地理位置、海底地形、平均海平面梯度和风浪时空分布特征。南海石油平台具备高度计定标检验的海洋环境条件。

### 1.3 数据及其处理

#### 1.3.1 水位计数据

南海石油平台上装载的水位计为挪威 MIROS 公

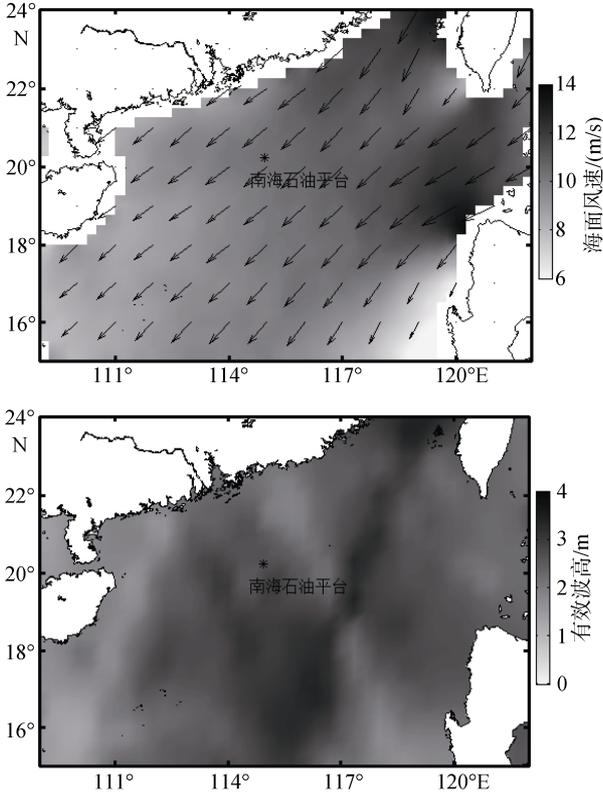


图5 南海北部 2011 年 1 季度(1~3 月)平均海面风场和有效波高分布(数据来源分别为 MetOp-A/ASCAT 散射计海面风场和 Jason-1/2 卫星高度计有效波高产品)  
Fig.5 Distribution of the sea surface wind field and significant wave heights in the northern South China Sea in the first quarter of 2011 (January–March)

司生产的 SM-094 型水位计, 工作于 9.4~9.8 GHz 微波波段, 采用双频 GPS PPP 定位技术进行高程定位, 其水位测量频率为 1 Hz, 单次测量精度优于 1 cm, 多次测量平均处理精度优于 1 mm。

水位计数据时间跨度为 2011 年 9 月 3 日 11: 00 至 2011 年 9 月 19 日 9: 00, 2012 年 3 月 4 日 10: 00 至 2012 年 5 月 29 日 10: 00 共约 104 d 的数据。水位计数据记录形式为每小时记录 1 次, 整点记录, 每次记录时间长度为 5 min, 水位测量频率为 1 Hz。对于高频水位采样数据, 采用某时刻前后一定时间长度下的水位测量值的平均作为该时刻的海面高度。随机选取 1 次水位记录数据, 计算其不同平均时间长度下的平均海面高度值(见图 6)。

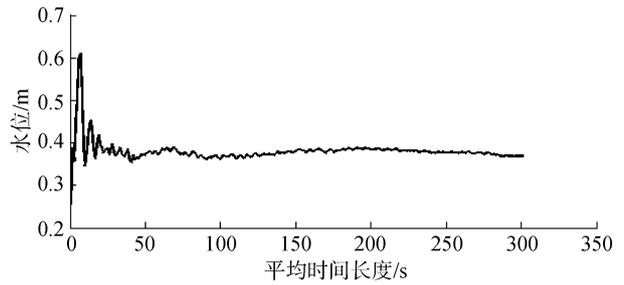


图 6 水位计不同平均时间长度下的平均海面高度  
Fig.6 The mean sea surface height measured by the sea level sensor at different average times

由图 6 可见, 对于南海石油平台 1 Hz 采样频率的水位计, 在约 150 s 时间长度下的水位测量值的平均值已经基本稳定, 即连续观测的时间长度大于 2.5 min, 即可作获得某一时刻的海面高度。本文采用 5 min 的高频观测值的平均值作为该时刻的海面高度值。

对 2011 年 9 月 3 日 11: 00 至 2011 年 9 月 19 日 9: 00 时段的水位计海面高度观测值与 GOT00.2 大洋潮汐模型潮位计算值进行比较(见图 7), 两者相关系数为 0.98, 差值的标准偏差为 5.7 cm。海洋潮汐是瞬

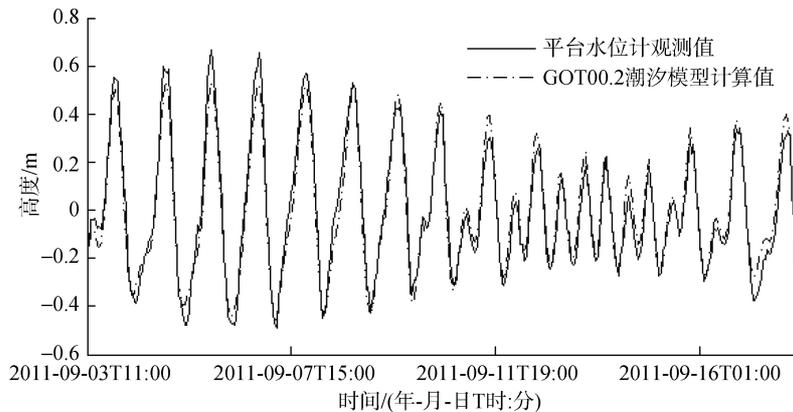


图 7 南海石油平台水位计海面高度观测值与 GOT00.2 海洋潮汐模型潮位计算值比较  
Fig.7 Sea level comparisons measured by the sea level sensor fixed on the oil platform in the South China Sea and calculated from the GOT00.2 ocean tide model

时海面高度变化的主要贡献量, 而平台水位计海面高度的测量值和海洋潮汐模型潮高计算值具有高相关性, 说明水位计测量数据能准确地对海面高度进行测量。

### 1.3.2 测波雷达数据

南海石油平台上装载有挪威 MIROS 公司生产的 C 波段波浪和海流测量雷达, 型号为 SM-050 MKIII。测波雷达有效波高测量精度为±5%或 0.2 m (0~30 m 范围内), 数据记录格式为 3 min 提供一个有效波高观测值。本文利用的测波雷达数据时间跨度为 2011 年 2 月 1 日至 2011 年 6 月 7 日, 2011 年 8 月 4 日至 2012 年 2 月 15 日, 测波雷达有效波高值随时间变化见图 8 所示。

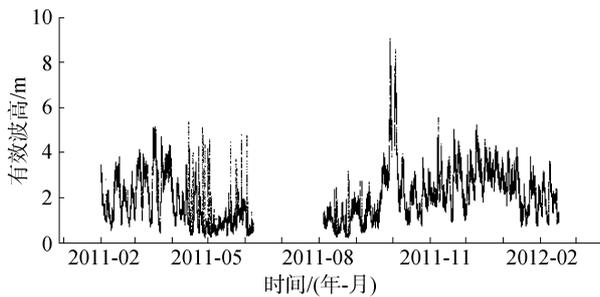


图 8 南海石油平台测波雷达有效波高观测数据

Fig.8 Significant wave heights measured by the wave radar fixed on the oil platform in the South China Sea

图 8 所示的实测有效波高时间序列同样显示: 在南海石油平台处夏季风浪相对偏小, 而冬、春两季风浪相对偏大。

### 1.3.3 高度计数据

本文使用的高度计数据为美国国家航空航天局 (NASA) 和法国空间局 (CNES) 联合发射的 Jason-1 和 Jason-2 卫星高度计观测数据。Jason-1 是 TOPEX/Poseidon (简称 T/P) 卫星的后继星, Jason-2 是 Jason-1 的后继星, 分别于 2001 年 12 月和 2008 年 6 月发射升空, 其上搭载的双波段雷达高度计, 分别工作在 Ku 波段 (13.6 GHz) 和 C 波段 (5.3 GHz)。覆盖范围为 66°S~66°N, 轨道高度 1 336.00 km, 轨道倾角 66.039°, 轨道周期 112.47 min, 重复周期为 9.915 d。Jason-1/2 卫星 1 Hz 地面观测点间的距离约 5.8 km, GDR 数据产品每周期包含 254 轨, 升降轨各 127 轨, 分别以奇偶数轨道号标记。本文选用的高度计数据为 2011 年 2 月~2012 年 2 月的 Jason-1 卫星 GDR 数据、2011 年 9 月 3 日至 9 月 19 日和 2012 年 3 月 4 日至 2012 年 5 月 29 日的 Jason-2 卫星 GDR 数据。Jason-1/2

卫星高度计 GDR 数据于法国 AVSIO/CNES 数据中心获取。

为了正确评估卫星高度计的测高绝对定标结果和有效波高精度, 需对高度计数据进行质量控制。删除陆地、冰上和降雨条件下的观测数据, 同时保证后向散射系数不高于 35 dB、有效波高处于 0~11 m 的范围内, 其余各观测和地球物理量处于合理范围和对应的质量标识为正常。

## 1.4 平台与高度计数据定标检验时空匹配

对卫星高度计进行测高绝对定标和有效波高产品的真实性检验, 均需对卫星数据和现场观测数据在一定的时空范围内进行匹配, 以确保现场观测值可作为待检验卫星观测值的真实值。

### 1.4.1 水位计与卫星高度计海面测高数据匹配

本文使用的南海石油平台水位计数据观测期间, 正处于 Jason-1 卫星变轨期, 本文选用 Jason-2 高度计作为待定标高度计。Jason-2 卫星 Pass012、Pass153、Pass190 和 Pass229 离南海石油平台最近, 该 4 条地面轨迹上距平台最近点可利用如下公式和方法获得<sup>[14]</sup>:

$$f = \sin Y \sin y + \cos Y \cos y \cos(X - x) \quad (6)$$

式中,  $X$  和  $Y$  分别为高度计观测点的经度和纬度;  $x$  和  $y$  分别为平台 (水位计) 的经度和纬度。当  $f$  取得极大值时, 对应时间为卫星过境时刻, 对应的经纬度即为最近点的位置。

由于 Jason-2 卫星 Pass012、Pass153、Pass190 和 Pass229 地面轨迹离南海石油平台在 110~160 km, 且均处于开阔海域, 可忽略南海平台处和距平台最近观测点之间的极潮、地球固体潮和逆压校正的差别, 为了降低平均海平面误差的影响, 采用距离南海石油平台水位计距离最近的 5 个连续观测点的海面高度平均值作为与水位计海面高度比较的对比值。Jason-2 卫星高度计绝对偏差计算公式 (1) 可简化为

$$B = H_{SLA} - h_{SLA} = [H_{alt} - R - (H_{Iono} + H_{Wet} + H_{Dry} + H_{SSB}) - H_O - H_{MSS}] - (h - h_O - h_{MSS}) \quad (7)$$

式中, 卫星高度  $H_{alt}$ 、高度计测距  $R$ 、电离层延迟校正  $H_{Iono}$ 、大气对流层延迟校正干分量  $H_{Dry}$ 、大气对流层延迟校正湿分量  $H_{Wet}$ 、海况偏差校正  $H_{SSB}$ 、海洋潮汐  $H_O$  和平均海平面  $H_{MSS}$  为距平台最近的连续 5 个观测点的平均值, 数据均由 Jason-2 卫星 GDR 数据直接读取; 卫星过境时刻的平台处海面高度  $h$  通

过每 1 小时一次的平台水位计海面高度测量值线性插值得到, 平台处海洋潮汐  $h_0$  和平均海平面高度值  $h_{MSS}$  分别使用 GOT00.2 大洋潮汐模型和 CLS\_MSS01 平均海平面模型计算得到。

### 1.4.2 测波雷达与卫星高度计有效波高匹配

选择距平台不大于 50 km 的 Jason-1 观测点的有效波高平均值作为待检验的有效波高高度计观测对比值。观测点至平台的地面距离计算公式如下:

$$L = R_0 \arccos f \quad (8)$$

式中,  $R_0=6\ 371\ \text{km}$  为地球半径,  $f$  为公式(6)的计算值。以卫星过境时刻前后各 15 min(共 30 min)的测波雷达有效波高的平均值作为检验的有效波高现场观测对比值。

## 2 结果与分析

### 2.1 Jason-2 高度计海面高度测量定标结果

经数据筛选和时空匹配处理后, 共获得 36 组对比数据。对该 36 组匹配对比数据利用公式(7)进行统计计算, 获得 Jason-2 高度计在南海平台处相对于水位计海面高度测量的平均偏差为 30.9 cm, 差值标准偏差为 7.8 cm; 水位计和 Jason-2 高度计对海面高度测量值的相关系数为 0.6。两者对比关系见图 9。

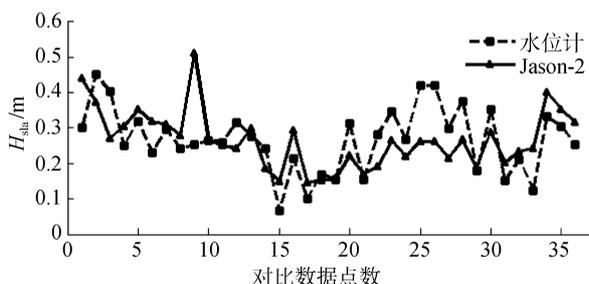


图 9 南海平台水位计与 Jason-2 卫星高度计海面高度距平比较  
Fig.9 Comparison of sea level anomalies between the sea level sensor and Jason-2 satellite altimeter in the South China Sea

由图 9 结果可见, 南海石油平台水位计和 Jason-2 高度计海面高度观测值变化趋势基本一致。对于少数异常值相差较大的对比值, 这可能是由于南海北部存在较大的海流所造成的, 图 10 为美国 NASA 海表面流场近实时分析(Ocean Surface Current Analysis Real-time, OSCAR)产品在南海北部分布图。

图 9 中第 9 组对比数据差值异常偏大, 该数据采集时间为 2012 年 3 月 10 日, 对应南海北部海流分布为图 10 所示。由图 10 可见, 在南海石油平台附近海

域存在较强的中尺度涡。这可能是造成平台水位计和 Jason-2 高度计海面高度距平相差较大的原因之一。

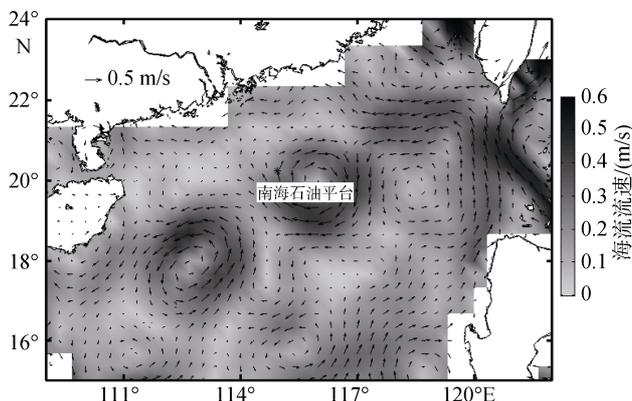


图 10 南海北部 OSCAR 海表流场分布图(2012 年 3 月 5~10 日)  
Fig.10 The distribution of the OSCAR ocean surface current in the northern South China Sea (March 5~10, 2012)

南海石油平台上水位计工作时间较短, 本文仅获得约 104 d 的观测数据, 对比数据有限。在本文使用的水位计数据观测期间, Jason-1 卫星正处于变轨期而无观测数据; Jason-2 地面轨迹距南海石油平台较远, 影响了海面高度高度计观测值与水位计观测值的对比结果。

### 2.2 Jason-1 高度计有效波高检验结果

对测波雷达和 Jason-1 高度计数据(Pass012)进行数据筛选和时空匹配处理后, 共获得 29 组对比数据(数据比较曲线见图 11)。

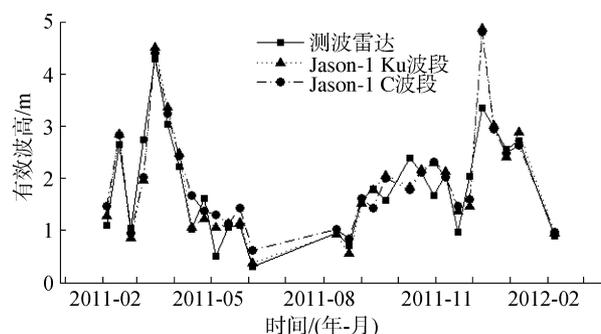


图 11 南海石油平台测波雷达和 Jason-1 高度计有效波高比较曲线  
Fig.11 A comparison curve of significant wave heights between the wave radar and Jason-1 altimeter in the South China Sea

对匹配的对比数据进行统计, 得到 Jason-1 卫星高度计 Ku 波段和 C 波段有效波高的均方根误差分别为

0.43 m 和 0.45 m, 平均偏差分别为-0.09 m 和-0.13 m, 与测波雷达有效波高测量值的相关系数分别为 0.92 和 0.90。Jason-1 卫星高度计有效波高检验统计结果显示: 南海平台测波雷达与 Jason-1 高度计有效波高观测值具有较高一致性, 测量精度满足定量化应用需求(精度优于 0.5 m)。

### 3 结论

南海石油平台作为海上综合定标场, 其所处海域的地理位置、海底地形、平均海平面梯度和风浪时空分布特征满足高度计定标检验的环境要求。利用南海石油平台上水位计(雷达)海面高度测量数据, 对 Jason-2 高度计进行测高绝对定标结果为  $30.9 \text{ cm} \pm 7.8 \text{ cm}$ ; 利用测波雷达对 Jason-1 高度计有效波高进行精度检验, Jason-1 卫星高度 Ku 波段和 C 波段有效波高相对于测波雷达有效波高测量值的均方根误差分别为 0.43 m 和 0.45 m。以上检验结果表明, 南海石油平台满足高度计海面高度和有效波高测量的定量化应用精度要求(海面高度测量精度优于 10 cm, 有效波高测量精度优于 0.5 m), 南海石油平台可作为卫星高度计在我国南海海域定标检验的业务化运行海上定标场。

#### 参考文献:

- [1] EUMETSAT, CNES, NOAA, NASA, JPL. OSTM/Jason-2 Products Handbook[DB/OL]. [2009-08-03]. <ftp://podaac.jpl.nasa.gov/allData/ostm/preview/L2/GPS-OGDR/docs/userhandbook.pdf>.
- [2] CNES, NASA. AVISO and PODAAC User Handbook, IGDR and GDR Jason Products[DB/OL]. [2008-10-30]. [ftp://podaac.jpl.nasa.gov/allData/jason1/L2/gdr\\_c/docs/Handbook\\_Jason\\_v4-1.pdf](ftp://podaac.jpl.nasa.gov/allData/jason1/L2/gdr_c/docs/Handbook_Jason_v4-1.pdf).
- [3] Mertikas S P, Daskalakis A, Hausleitner W, et al. Calibration of satellite radar altimeters at Gavdos Cal/Val facility using three different methodologies[DB/OL]. [2010-06-28]. [ftp://ftp.iwf.oceaw.ac.at/pub/satgeo/gavdos/graz\\_minutes/Appendix\\_A1.pdf](ftp://ftp.iwf.oceaw.ac.at/pub/satgeo/gavdos/graz_minutes/Appendix_A1.pdf).
- [4] Bonnefond P, Exertier P, Laurain O, et al. Absolute calibration of Jason-1 and TOPEX/Poseidon altimeters in Corsica[J]. *Marine Geodesy*, 2003, 26(3): 261-284.
- [5] Morris C S, Dinardo S J, Christensen E J. Overview of the TOPEX/Poseidon platform harvest verification experiment[J]. *Marine Geodesy*, 1995, 18(1): 25-37.
- [6] Watson C, Coleman R, White N, et al. Absolute calibration of TOPEX/Poseidon and Jason-1 using GPS buoy in Bass Strait, Australia[J]. *Marine Geodesy*, 2003, 26(3): 285-304.
- [7] Mitsuko K, Eurico D. Significant wave height in the Gulf of Mexico: Validation of Jason-1 measurement against buoy data[DB/OL]. [2012-03-08]. <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/134943.pdf>.
- [8] Durrant H, Greenslade D J M. Validation and Application of Jason-1 and Envisat significant wave heights [DB/OL]. [2007-11-16]. [http://www.waveworkshop.org/10thWaves/Papers/durrant\\_greenslade\\_wavesworkshop.pdf](http://www.waveworkshop.org/10thWaves/Papers/durrant_greenslade_wavesworkshop.pdf).
- [9] Durrant H, Greenslade D J M, Simmonds I. Validation of Jason-1 and Envisat remotely sensed wave heights[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(1): 123-134.
- [10] Cotton P D, Carter D J T. Cross calibration of TOPEX/ERS-1 and Geosat wave height[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1994, 99(C12): 25025-25033.
- [11] 陈永存, 徐青, 刘玉光, 等. T/P, Jason-1 测量风速及有效波高的验证与比较[J]. *大地测量与地球动力学*, 2008, 28(6): 117-122.
- [12] Dong Xiaojun, Woodworth P, Moore P, et al. Absolute calibration of TOPEX/Poseidon altimeters using UK tide gauges, GPS, and Precise, local geoid-differences[J]. *Marine Geodesy*, 2002, 25(3): 189-204.
- [13] 张有广, 林明森. 卫星高度计海上定标场及定标方法研究进展[J]. *海洋通报*, 2007, 26(3): 87-92.
- [14] Christensen E J, Haines B J, Keihm S J, et al. Calibration of TOPEX/Poseidon at platform Harvest[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C12): 24465-24485.
- [15] Haines B J, Dong Danan, Born G H, et al. The Harvest experiment: Monitoring Jason-1 and TOPEX/Poseidon from a California offshore platform[J]. *Marine Geodesy*, 2003, 26(3): 239-259.
- [16] Bonnefond P, Exertier P, Laurain O, et al. Absolute calibration of Jason-1 and Jason-2 altimeters in Corsica during the formation flight phase[J]. *Marine Geodesy*, 2010, 31(1): 80-90.

# Calibration and validation of satellite radar altimeters in the South China Sea using an oil platform

YE Xiao-min<sup>1, 2</sup>, LIN Ming-sen<sup>1, 2</sup>, SONG Qing-jun<sup>1, 2</sup>, LAN Zhi-gang<sup>3</sup>

(1. National Satellite Ocean Application Service, State Oceanic Administration, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, State Oceanic Administration, Beijing 100081, China; 3. CNOOC Energy Technology & Services Limited, Beijing Branch, Beijing 100027, China)

**Received:** Jan., 12, 2013

**Key words:** oil platform; altimeter; the South China Sea; calibration; validation

**Abstract:** We analyzed the distributing characteristics of bathymetric data, mean sea surface height, wind, and waves. We then performed an absolute calibration of a Jason-2 satellite altimeter by using *in-situ* sea level measurements gathered by a sea level sensor with a bias of  $30.0 \text{ cm} \pm 7.8 \text{ cm}$ . The analysis showed that calibration results can be affected by the mesoscale vortexes in the northern South China Sea. We also validated significant wave heights against *in-situ* data gathered by a wave radar. The root mean square error of the significant wave heights extracted from Ku and C microwave band measurements of Jason-1 were 0.43 m and 0.45 m, respectively. The analysis and validation results indicate that the marine environment where the oil platform was located, the sea level sensor, and the wave radar onboard the oil platform all fitted with the standard calibration/validation for a satellite radar altimeter. The oil platform calibration site in the South China Sea is expected to be used for calibration and validation of altimeters onboard the Chinese Haiyang-2 satellite and other satellites.

(本文编辑: 刘珊珊)