

引用格式:Zhai Wanlin,Chen Chuntao,Zhu Jianhua,*et al.*Research of Calibration of Satellite Altimeter Technology based on GPS Bouy[J].Remote Sensing Technology and Application,2016,31(5):925-929.[翟万林,陈春涛,朱建华,等.基于 GPS 浮标的高度计定标技术研究[J].遥感技术与应用,2016,31(5):925-929.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2016.5.0925

基于 GPS 浮标的高度计定标技术研究

翟万林,陈春涛,朱建华,闫龙浩

(国家海洋技术中心,天津 300112)

摘要:20 世纪 90 年代以来,卫星高度计在监测海平面变化、海洋环流、区域海面地形、气候变化等方面做出了巨大的贡献。但是,卫星高度计测量海面高度时都会存在偏差和偏移,需要进行定标。定标的基本原理是在卫星星下点位置处,卫星过境时刻现场测量海面绝对高度值,与卫星高度计的测量值进行对比,得到其偏差和偏移。利用自主设计的 GPS 浮标测量卫星过境时刻的瞬时绝对海面高度值,分别在山东石岛、海南清澜完成了 4 次针对 HY-2 卫星高度计的绝对定标工作。定标结果表明:①在岸基 GPS 基准站的支持下,使用自制的 GPS 浮标海面高程测量精度优于 50 mm,满足高度计定标检验的需求;②HY-2 卫星高度计测量的海面高度测量值随时间产生了漂移,存在系统偏差;③通过使用 Jason-2 高度计数据对 HY-2 的相对定标和使用 GPS 浮标对其进行的绝对定标结果表明,HY-2 绝对海面高度测量的精度可以达到国际先进水平。

关 键 词:HY-2;卫星高度计;定标;GPS 浮标;GAMIT/GLOBK

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2016)05-0925-05

1 引 言

20 世纪 90 年代以来,尤其是 T/P 卫星发射之后,高度计单轨测量海面高度的精度达到了 6 cm 左右^[1],使其在监测海平面变化、海洋环流、区域海面地形、气候变化等方面做出了巨大的贡献。但是,卫星高度计测量海面高度时都会存在偏差和偏移,需要进行校正,这一校正过程称之为定标。定标的基本原理是在卫星星下点位置处,卫星过境时刻现场测量海面绝对高度值,与卫星高度计的测量值进行对比,得到其偏差和偏移。

为完成上述工作,国际上已经建立了业务化运行的四大定标场^[2-8]并进行了多次的高度计定标检验试验。这些定标场内,主要利用验潮仪和 GPS 浮标等设备,配合 GPS 基准站以及周边的 IGS 站等基础条件,完成高度计的定标工作。

我国已于 2011 年发射了第一颗海洋动力环境卫星 HY-2,主要应用于监测和探测全球海洋动力环境参数,填补了我国海洋动力环境卫星监测的技术空白^[9]。其中,海面高度作为该卫星测量的一个重要参数,其设计测量精度为 5~10 cm^[10],但还没有专门用于对该卫星进行绝对定标的配套设施,目前主要通过近海的基于 GPS 浮标的定标试验和相对定标法开展定标工作。本文使用自主设计的 GPS 浮标,分别在山东威海石岛和海南清澜完成了 5 次针对 HY-2 高度计的绝对定标工作,对 HY-2 高度计的性能进行了初步评估。

2 原理与方法

2.1 高度计测高原理

卫星高度计每隔一定时间向海面发射一个电磁波脉冲,并接收海面反射的脉冲信号,通过计算脉

冲发射和接收的时间之差(Δt),乘以脉冲的传播速度(v),得到高度计到海平面的距离(Range):

$$\text{Range}=\Delta t \cdot v/2$$

(1)

然而,电磁波脉冲在大气传输的过程中包含了大量的误差项,这些误差项如干湿对流层延迟、电离层延迟、海况偏差等都会对测量值产生影响,因此海面高度值计算的公式为^[11]:

$$H_{\text{SSH}}=\text{Altitude}-(\text{Range}+\text{W/DTC}+\text{IC}+\text{SSB})$$

(2)

其中: H_{SSH} 表示绝对海面高度,Altitude 为高度计到参考椭球的距离,Range 为高度计到海面的距离,W/DTC 为干/湿大气校正,IC 为电离层校正,SSB 为海况偏差校正。

2.2 GPS 浮标对高度计定标的原理

卫星高度计的定标原理可以做如下解释:使用 GPS 浮标在卫星星下点处、卫星过境时刻测量海面绝对高度值,与卫星高度计测量的海面高度进行对比,二者对比的结果即为高度计的偏差或偏移^[2]:

$$\text{Bias}_{\text{Alt}}=\text{SSH}_{\text{Alt}}-\text{SSH}_{\text{GPS buoy}}$$

(3)

其中: SSH_{Alt} 是由卫星高度计测量得到的瞬时海面高度, $\text{SSH}_{\text{GPS buoy}}$ 是由 GPS 浮标测量得到的海面高度。最终得到的 Bias_{Alt} 正值表示高度计测量的海面高度比实际海面高度要高,负值相反。

使用 GPS 浮标法的优点在于测量精度高,仅考虑垂直基准的精度和动态数据处理的精度,大地水准面和潮位差的影响较小,可忽略不计^[2]。

2.3 GPS 浮标对高度计定标的方法

使用 GPS 浮标对高度计定标方法主要分为 3 个步骤:①GPS 浮标绝对基准的确定,主要是通过岸基 GPS 基准站测量来实现;②卫星过境时刻, GPS 浮标在卫星星下点处瞬时海面高度的测量;③实测海面高度值与高度计测量值的比较。下面进行简要介绍:

(1)高度计卫星的参考框架为 ITRF,因此在定标检验活动中,需要将现场测量值归算到与高度计卫星相同的参考框架下,才能完成高度计的定标检验。由于卫星高度计单轨测量海面高度的精度达到了 5~6 cm,因此需要对 GPS 数据进行高精度处理方能满足定标检验的要求,该类软件主要有 GAMIT/GLOBK^[12]、GIPSY、Bernese^[13]等。

(2)将 GPS 浮标布放在卫星星下点,与 GPS 基准站同步进行测量,得到卫星过境时刻的海面高度值。动态 GPS 浮标处理主要使用 GAMIT/GLOBK 软件的 Track 模块^[11]对浮标数据进行解算。

(3)使用式(2)计算得到海面高度值和过境时

间,根据第(2)步中的方法得到了卫星过境时刻的瞬时海面高度值,使用式(3)即可得到卫星的定标结果。

3 高度计定标试验

使用自主研制的 GPS 浮标(图 1),分别在山东威海石岛和海南清澜进行了 5 次针对 HY-2 高度计定标试验,定标时间和地点见表 1。试验步骤为:①使用相关软件推算试验区 HY-2 卫星的星下点坐标和过境时间;②在距离卫星星下点较近的岸边布放 GPS 基准站,数据接收不少于 24 h,布放期内须包含 GPS 浮标布放期间的数据;③根据①中推算的结果,于卫星过境前后 2 h,在星下点布放 GPS 浮标测量瞬时海面高程值;④利用 GAMIT/GLOBK 软件和 TRACK 模块计算 GPS 浮标位置处的海面高度值;⑤利用式(2)对 HY-2 高度计数据进行计算,得到高度计卫星测量的海面高度值。



图 1 GPS 浮标海上试验
Fig.1 Offshore Test of GPS buoy

表 1 HY-2 高度计定标试验时间及位置

Table 1 Time and location of HY-2 altimeter Cal./Val.					
位置	时间	经度/°E	纬度/°N	周期	过境
山东威海 石岛	2013/7/30	122.8225°	36.9320°	48	300
	2014/6/3	122.8390°	36.9690°	70	300
	2014/6/7	122.8324°	36.9235°	71	11
海南清澜	2014/8/5	111.0637°	19.4338°	75	93

3.1 绝对基准的确定

高度计定标的绝对基准是通过岸基 GPS 基准站来确定,岸基 GPS 基准站持续接收 24 h 的 GPS 数据,与周边的 IGS 站位(图 2)联合解算,得到特定椭球坐标系下的绝对坐标值。GPS 基准站的绝对坐标解算使用 GAMIT/GLOBK 软件来完成,其长基线解算精度可达 10^{-9} ,单天 GPS 静态站解算的绝对高程精度可以优于 1.5 cm。

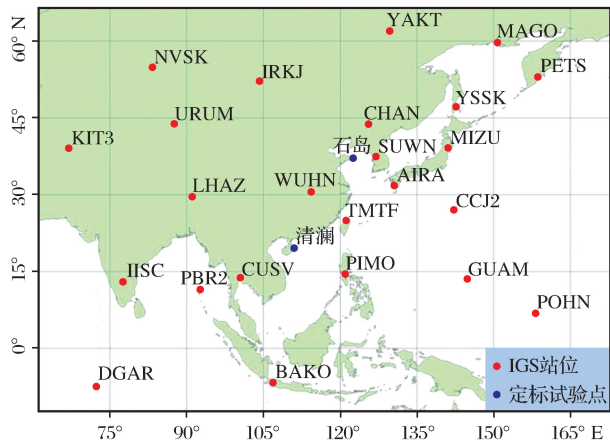


图 2 解算中用到的部分 IGS 站

Fig.2 Some stations in calculating the location of IGS reference stations

解算过程中使用的软件配置如下：

批处理迭代方案:1-ITER;观测值的选择:LC_ AUTCLN;处理模式:RELAX;卫星截止高度角:10°;光压模型:BERNE;数据筛选:AUTCLN;ARC 参考系统:IGS05;惯性框架:J2000;大气模型网格:VMF1;湿大气延迟参数:GPT。

3.2 GPS 浮标数据处理

GPS 浮标数据处理使用 GAMIT/GLOBK 软件的 TRACK 模块。HY-2 高度计的绝对海面高度数据是基于 ITRF 框架,TRACK 的输出结果是 SSH 参考 ITRF2008 的时间序列(GRS 椭球),使用文献[14]中给出的公式计算由于参考椭球不一致引起的海面高度差异。

在解算数据中取 $RMS < 10$,并进行了低通滤波处理,得到了高度计过境时 WGS-84 坐标系下的瞬时海面高度,滤波后的海面高程变化序列如图 3 中的红色曲线,以曲线横坐标中的时间与 HY-2 高度计过境时刻(图 3 中的黑色直线)测量的海面高度进行匹配,使用式(3)进行比对。

4 定标结果分析

4.1 GPS 浮标测高精度分析

为验证 GPS 浮标海面高程测量的精度,文献[15-17]对 GPS 浮标与验潮仪的测量结果进行了比对,在与 GPS 基准站距离 36 km 范围内,GPS 浮标的海面高程测量精度可以优于 50 mm。表 2 对 GPS 数据处理中的各项误差进行了详细描述,使用文献[18]中的方法综合这些误差因素,得到 GPS 浮标的总体误差优于 35 mm。GPS 浮标的海面测高精度满足高度计绝对定标的要求。

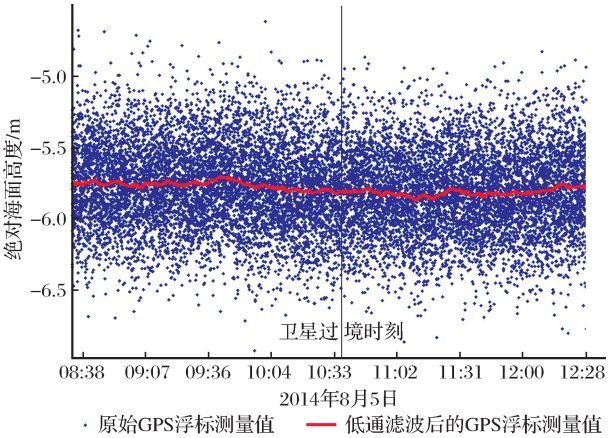


图 3 GPS 浮标测量的海面高度结果

Fig.3 Results of sea surface height from GPS buoy

表 2 高度计定标过程中的误差分配

Table 2 Error budget of altimeter Cal./Val.

误差源	误差值/mm
GPS 基准站绝对坐标误差	<15
GPS 天线相位中心误差	2
GPS 浮标解算相对高程误差	<30
GPS 浮标天线相位中心误差	2
GPS 浮标相位中心到水面的距离误差	<1
总体误差	<35

4.2 高度计定标结果与分析

根据 GPS 浮标测量结果,结合式(2)中对 HY-2 卫星高度计的数据处理方法,使用式(3)完成了对该高度计的绝对定标工作。由定标结果可以看出(图 4 中黑色线条),HY-2 高度计偏差存在一个随时间变化的漂移。

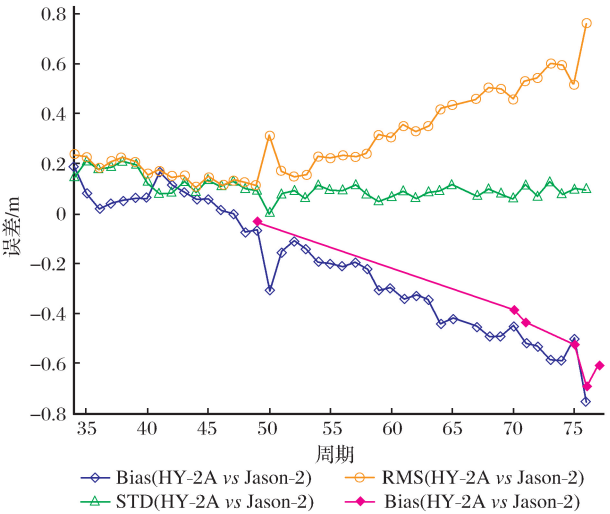


图 4 HY-2 高度计绝对定标与相对定标结果

Fig.4 Results of absolute and relative Cal/Val of HY-2 altimeter

为了验证 HY-2 高度计 GPS 绝对定标结果,采

用星星交叉相对定标法对 GPS 绝对定标结果进行验证。Jason-2 是目前业务化运行的高度计卫星,因此采用 Jason-2 高度计卫星,利用时空匹配技术对 HY-2 高度计测量的 SSH 进行全球尺度上的长时间序列的相对定标(时间尺度为 0.5 h,空间尺度为 50 km)。

定标结果如图 4 所示:蓝色曲线为 HY-2 与 Jason-2 相对定标的结果,红色曲线为 HY-2 与 Jason-2 高度计的 RMS 值,紫色曲线为 HY-2 绝对定标的结果,绿色曲线为 HY-2 高度计的标准偏差。

由图 4 可知 HY-2 高度计在第 39~41 个周期内变化较大。而在 41~76 个周期内,与 Jason-2 高度计的交叉检验得到的 RMS 为 8.75 cm(图 4 绿色曲线)。第 41 个周期以后,HY-2 高度计出现了约 -2.1 cm/周期的漂移。将 41~76 个周期内的交叉检验结果进行线性回归分析,得到了 GPS 浮标对 HY-2 高度计定标的结果为 $+3.78 \pm 6.5$ cm。相对定标和绝对定标的结果表明:HY-2 海面高度的测量精度一直比较稳定,表明偏差是系统偏差。

5 结 语

本文使用试制的 GPS 浮标完成了 4 次针对 HY-2 的定标工作,其结果与相对定标结果基本一致,另外,该浮标也被应用于针对 Jason-2 高度计卫星的定标工作,其结果与国际其他定标场的结果也基本一致^[17],证实了试制 GPS 浮标及其高度计定标方法的适用性。

HY-2 是我国第一颗海洋动力环境卫星,其上的高度计测量的海面高度精度已接近国际最高水平。目前,该卫星的地面应用系统已投入使用^[9],但是还没有配套的业务化高度计定标系统,因此高度计定标场的设计与建设势在必行。本文中试制的 GPS 浮标为定标场的建设提供了高度计定标所需的硬件材料,准确的定标方法为高度计定标场提供了技术支持。

参考文献(References):

- [1] Fu L, Christensen E J, Yamarone, *et al.* TOPEX/Poseidon Mission Overview[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(C12): 24369-24381.
- [2] Zhai Wanlin, Chen Chuntao, Yan Longhao. The Technology Progress in the Calibration of Satellite Altimeter Using GPS-Bouys[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2012, 32(6): 40-43. [翟万林, 陈春涛, 闫龙浩. 基于 GPS 浮标的高度计海面高度产品检验技术进展[J]. 海洋测绘, 2012, 32(6): 40-43.]
- [3] Bonnefond P, Exertier P, Lauraino, *et al.* Absolute Calibration of Jason-1 and TOPEX/Poseidon Altimeters in Corsica[J]. Marine Geodesy, 2003, 26(3-4): 261-284.
- [4] Martinez-Benjamin J J, Martinez M, Gonzalez S, *et al.* Ibiza Absolute Calibration Experiment: Survey and Preliminary Results[J]. Marine Geodesy, 2004, (27): 657-681.
- [5] Haines B J, Dong D, Born G H, *et al.* The Harvest Experiment: Monitoring Jason-1 and TOPEX/Poseidon from a California Offshore Platform[J]. Marine Geodesy, 2003, 26(3-4): 239-259.
- [6] Watson C, White N, Church J. Absolute Calibration in Bass Strait, Australia: TOPEX, Jason-1 and OSTM/Jason-2[J]. Marine Geodesy, 2011, (34): 242-260.
- [7] Mertikas S P, Daskalakis A, Tziavos I N, *et al.* Ascending and Descending Passes for the Determination of the Altimeter Bias of Jason Satellites Using the Gavdos Facility[J]. Marine Geodesy, 2011, (34): 261-276.
- [8] Ye Xiaomin, Lin Mingsen, Song Qingjun. Research on Validation Methods of Satellite Radar Altimeter Retrieved Sea Surface Wind Speed and Significant Wave Height Using In-situ Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(1): 26-32. [叶小敏, 林明森, 宋庆君. 基于现场预测数据的卫星雷达高度计海面风速和有效波高真实性检验方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(1): 26-32.]
- [9] Jiang Xingwei, Lin Mingsen, Zhang Youguang. An Overview of HY-2 Satellite Ground Application System[J]. Engineering Science, 2014, 16(6): 4-12. [蒋兴伟, 林明森, 张有广. HY-2 卫星地面应用系统综述[J]. 中国工程科学, 2014, 16(6): 4-12.]
- [10] Xu Ke, Dong Xiaolong, Zhang Dehai, *et al.* HY-2 Radar Altimeter and Microwave Scatterometer[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 20(1): 89-93. [许可, 董晓龙, 张德海, 等. HY-2 雷达高度计和微波散射计[J]. 遥感技术与应用, 2015, 20(1): 89-93.]
- [11] Dumont J P, Rosmorduc V, Picot N, *et al.* OSTM/Jason-2 Products Handbook[EB/OL]. http://www.ospo.noaa.gov/Products/documents/J2_handbook_v1-8_no_rev.pdf. 2008.
- [12] Herring T A, King R W, McClusky S C. Introduction to GAMIT/GLOBK Release 10.4[R]. 2010.
- [13] Li Jun, Gao Yongmei. Comparison Study of Processing by GAMIT, GIPSY and BERNESSE[J]. GNSS World of China, 2010, (3): 5-9. [李军, 高咏梅. GAMIT、GIPSY 和 BERNESSE 软件解算结果的比较研究[J]. 全球定位系统, 2010, (3): 5-9.]
- [14] Jin Taoyong, Li Jiancheng, Xing Lelin, *et al.* Research on Datum Unification of Multi-satellite Altimetric Data[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, 28(3): 92-96. (金涛勇, 李建成, 邢乐林, 等. 多源卫星测高数据基准的统一研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(3): 92-96.)
- [15] Zhai Wanlin, Chen Chuntao, Yan Longhao, *et al.* Research on the Influence Factors in the Precision of Height Measured by GNSS Buoy[J]. Journal of Ocean Technology, 2015, 34(4): 22-27. [翟万林, 陈春涛, 闫龙浩, 等. GNSS 浮标高程测量精度

的影响因素研究[J].海洋技术学报,2015,34(4):22-27.]

[16] Chen Chuntao,Zhai Wanlin,Zhang Qian,*et al.*Design,Manufacture and Test of Sea Surface Height Buoy for Altimeter Calibration based on the Global Positioning System[J].Journal of Ocean Technology,2014,33(1):102-108.[陈春涛,翟万林,张倩,等.基于 GNSS 测高浮标的设计、研制与测试[J].海洋技术学报,2014,33(1):102-108.]

[17] Zhai Wanlin,Chen Chuntao,Yan Longhao,*et al.*Study on the Technology of In-situ Calibration and Validation of Satellite Altimeter[J].Journal of Ocean Technology,2014,33(6):13-19.[翟万林,陈春涛,闫龙浩,等.基于现场的卫星高度计定标技术研究[J].海洋技术学报,2014,33(6):13-19.]

[18] Wu Shilin,Zhang Qi.Error Analysis and Data Processing[M].Beijing,Tsinghua University Press,2010:113-116.[吴石林,张纪.误差分析与数据处理[M].北京:清华大学出版社,2010:113-116.]

Research of Calibration of Satellite Altimeter
Technology based on GPS Bouy

Zhai Wanlin,Chen Chuntao,Zhu Jianhua,Yan Longhao
(National Ocean Technology Center,Tianjin 300112,China)

Abstract: Since 1990s, the satellite altimeter made a great contribution to the monitoring of sea level changes, ocean circulation, regional sea surface topography, climate change et.al. However, satellite altimeter has bias or drift when measuring the Sea Surface Height(SSH), so it needed to be calibrated. The principle of calibration is to measure the sea surface height in the same position of satellite when it travel through, then compare the in-situ SSH with the value of altimeter measurements, and achieve the bias or drift of the altimeter. In this paper, a self-designed GPS buoys was used to measure the SSH when the satellite transit above. Four experiments was done to calibrate HY-2 altimeter in Shidao town of Shandong province and Qinglan town of Hainan province. The results showed that: ①In support of GPS reference station, the precision of GPS buoy in measuring the SSH was better than 50mm. This could satisfy the demand of altimeter calibration. ②There was a systematic bias in HY-2 satellite altimeter measurements. ③By using the data of relative calibration between Jason-2 and HY-2 altimeter and absolute calibration results, HY-2 altimeter can reach the international advanced level.

Key words: HY-2; Satellite altimeter, Calibration; GPS buoy; GAMIT/GLOBK