

GPS 浮标测高精度影响因素研究

闫龙浩,陈春涛,翟万林,朱建华,张倩,张晓旭

(国家海洋技术中心,天津 300112)

[摘要] 海洋二号(HY-2)卫星高度计已在轨运行两年多,亟需深入开展海面高度定标工作,基于全球定位系统(GPS)浮标的高度计海面高度定标法是主要的定标方法。GPS浮标定标法的定标精度受到时间窗口、浮标姿态、温盐以及相位中心等因素影响。为了提高高度计海面高度GPS定标法的定标精度,本文对影响GPS浮标测高精度的主要因素进行了分析研究。结果表明,在充分考虑影响因素基础上自主研发的GPS浮标高程测量精度可以达到1 cm,满足高度计海面高度定标要求。

[关键词] GPS浮标精度;影响因素;高度计定标

[中图分类号] P73 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)06-0102-07

1 前言

星载高度计是一种星载微波雷达,为人类提供了高精度、周期性测量全球范围海面高度的手段,广泛应用于全球海平面变化、大中尺度的海洋变化、大洋环流、大地水准面、全球重力场等方面的研究^[1-3]。星载高度计遥感数据业务化应用和研究应用的前提是能确定其观测值的精度和准确度。利用海面真值测量进行的绝对定标是监视卫星高度计整体工作性能、提高遥感信息置信度的重要手段。为了满足高度计海面高度现场定标的需求,并确定定标的精度,需要对全球定位系统(GPS)浮标海面高度测量精度及影响因素进行研究。

目前,国际上主要利用GPS浮标和验潮仪对高度计进行海面高度定标。GPS浮标法具备直接测量星下点海面高度,不需要估计大地水准面的优势,得到了广泛的应用。Colorado大学天体力学研究中心和JPL(Jet Propulsion Laboratory)研究小组于1989年12月13—15日在La Jolla(California)进行了高精度的海平面高测量^[4],他们将一个GPS

浮标放在距离验潮站约100 m的海面上,与两个GPS接收机进行了4 h的联测,结果显示:GPS浮标与验潮站测高差异为 $1\text{ cm}\pm 5\text{ mm}$ 。1993年10月17—18日,JPL的Born等^[5]在使用GPS浮标在Harvest石油平台(California)完成了TOPEX雷达高度计的定标,使用K&RS和GIPSY-OASIS II两种GPS解算软件得到的定标结果分别为 $(-14.6\pm 4)\text{ cm}$ 和 $(-13.1\pm 4)\text{ cm}$,与验潮仪得到结果的差异分别为0.1 cm和1.6 cm。1995年5月22日和24日Colorado大学的Key等^[6]设计了一个GPS浮标在Harvest石油平台(California)附近10 km范围的16个测点进行试验(在TOPEX/Poseidon(T/P)卫星过境前后共计1.6 h),结果显示:GPS浮标与石油平台上的两个声学验潮站测量海面高度的差异约为1.5 cm。在法国太空总署(CNES)的支持下,Testut等^[7]于2010年5月和7月在Senetosa(Corsica)进行了BOCA和BDT两款GPS浮标和3个压力式验潮仪的精度和准确度交叉比对试验。试验结果表明:验潮仪测量的准确度为厘米级,精度为毫米级,GPS浮标性能优于验潮仪。Watson等^[8-10]在澳大利亚的Bass海峡

[收稿日期] 2014-04-10

[基金项目] 中科院合作项目“海洋高度计定标方法研究”Y2BZZ6AJ50;海洋公益性行业科研专项资助项目(201305032-3)

[作者简介] 闫龙浩,1984年出生,男,河北安平县人,硕士,主要从事高度计定标检验及海洋测绘工作;E-mail:reed1984@163.com

定标场,采用自行设计研制的GPS浮标对T/P、Jason-1、Jason-2卫星高度计进行定标工作,并对影响浮标测高精度的天线罩、姿态、系缆、盐度等因素进行了分析。

2 研究内容

GPS测高浮标是高度计海面高度定标中GPS浮标法的主要仪器,目前国内外没有商业化的GPS浮标产品,各高度计定标试验中使用的浮标全部为自行研制。虽然GPS浮标法在高度计海面高度定标中得到了广泛的应用,但是目前对GPS浮标这一关键设备的海面高度测量精度评价的研究并不充分,同时随着GPS技术的不断发展和系统的不断升级,GPS测量精度也在不断提高,需要对GPS浮标测高精度进行研究。

为了对HY-2卫星高度计进行定标,自行研制了GPS浮标^[1],并对影响浮标高程测量精度的基准站定位精度、GPS浮标相对基准站动态定位精度和GPS浮标天线高精度三个主要影响因素进行了研究。由于高度计定标过程中对站位选择的限制,GPS基准站一般无法选择现有的大地控制网中的站点,只能临时架设基准站,并利用IGS站点对其进行ITRF2008框架下的静态绝对定位,观测时间窗口是影响其精度的最主要的因素。GPS浮标相对基准站动态定位精度对GPS浮标测高精度影响最大,主要受GPS浮标与基准站之间的基线长度等因素的影响。GPS浮标天线高精度受到天线相位中心、温盐、浮标姿态等因素的影响。

3 试验概况

天津于桥水库主要进行了多基站GPS浮标测高比对试验,在不同基线长度下对于桥水库高程进行了测量。利用Gamt软件对基站观测时间窗口对基站坐标精度的影响、基线长度对GPS浮标精度的影响进行了分析。通过现场踏勘,选择于桥水库作为试验场(见图1),在水库岸边架设GPS基准站(00 km),距岸边约26 m的1 m×1 m平台上安装压力式验潮仪(加拿大RBR公司TGR 1050HT),并在验潮仪旁边布放GPS浮标(见图2)。利用水准仪对GPS基准站和验潮仪进行水准联测。在距离GPS浮标约15 km、28 km、36 km的位置架设GPS基准站,用于不同距离情况下对GPS浮标高程的解算。

2013年11月,在山东石岛镆铳岛进行了GPS天

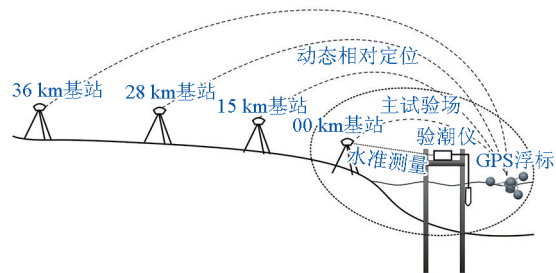


图1 于桥水库试验示意图

Fig. 1 A sketch map of Yuqiao Reservoir experiment



图2 GPS浮标

Fig. 2 GPS buoy

线相位中心相对高程差测量试验,测量GPS基站天线和GPS浮标天线实际相位中心的相对高程偏差,对GPS天线的相位中心进行相对定标,从而为高度计定标提供准确的相位中心参数。

试验前,在水槽进行了浮标密封性试验和天线高测量,并对GPS浮标进行了数据模拟和计算,并对温盐、浮标姿态等因素进行了分析。

试验中,GPS浮标和GPS基站的天线分别采用Trimble GNSS扼流圈天线和Trimble Tornado天线,接收机全部采用Trimble GPS Pathfinder ProXRT-2接收机,水准仪采用苏一光EL302A。GPS数据处理软件选择国际最先进的、最流行的开源GPS数据处理软件Gamt。

4 研究方法 with 结果

4.1 时间窗口对基站坐标解算精度的影响

解算时间窗口是影响GPS基准站绝对坐标解算精度的重要影响因素,解算精度一般随测量时间的增长而提高。但在高度计海面高度定标试验中,经常需要临时架设GPS基准站,难以保证GPS基准站的多天连续静态测量,需要了解时间窗口对基站坐标解算精度的影响。

试验中对不同时间的GPS基站数据进行解算,并对结果进行了分析。将2013年6月19日28 km基站24 h的解算结果作为标准结果,将24 h数据平

均拆分为2个12 h数据、4个6 h数据、8个3 h数据,依次采用同样方法进行静态解算,并将结果转换为大地坐标后进行比较(见图3)。

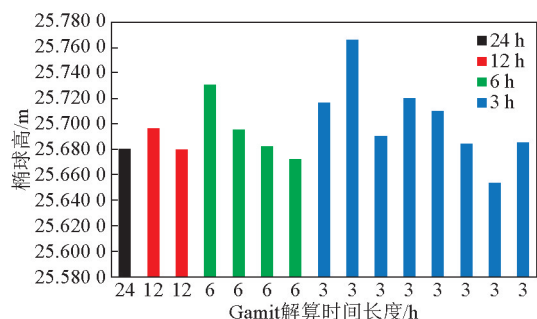


图3 Gamit解算时间窗口对高程坐标精度的影响

Fig. 3 The relation of Gamit analysis time length and the altitude precision

表1 Gamit解算时间窗口对空间坐标精度的影响

Table1 Therelation of Gamit analysis time length and the space precision

时间窗口	12 h		6 h				3 h							
平均距离/cm	1.31		2.16				3.52							
空间距离/cm	1.82	0.80	5.15	1.70	0.51	1.29	3.79	8.84	2.37	4.19	3.27	1.24	2.85	1.61

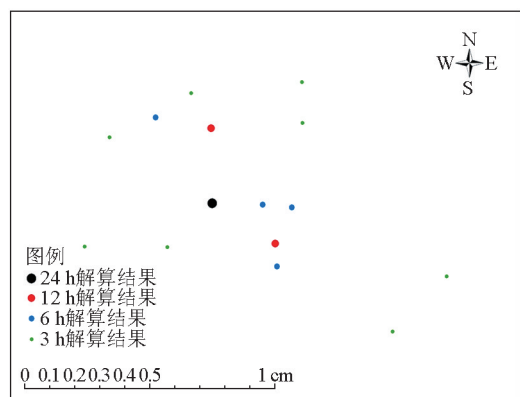


图4 Gamit解算时间窗口对平面坐标精度的影响

Fig. 4 The relation of Gamit analysis time length and the plane precision

4.2 浮标姿态对GPS浮标精度的影响

在波浪的作用下GPS浮标的倾角不断发生变化,其天线高误差随着浮标天线高和浮标倾角增大而增大。为了了解浮标在波浪中的运动状态,对浮标进行了数值模拟,考虑到波浪作用力中流体粘性的影响相对较小,对于运动和载荷的计算可以忽略,采用不考虑粘性的势流理论建立模型。

对浮标升沉值进行无量纲化 $z' = \frac{z}{H_w}$, 式中 z 为升沉值, H_w 是波高值。 z' 反映某种波浪周期下浮标

12 h、6 h、3 h的解算坐标结果与24 h结果的平均空间距离分别为1.31 cm、2.16 cm、3.52 cm(见表1),说明利用Gamit对GPS基准站坐标进行解算的精度随时间窗口的增加而增加。同时,拆分后的较小时间窗口的坐标分布的中心位置与24 h解算坐标基本一致(见图4),这也说明了24 h坐标解算的可靠性。12 h、6 h、3 h的解算坐标结果与24 h结果的最大空间距离分别为1.82 cm、5.15 cm、8.84 cm,说明解算的时间长度还是对坐标精度有着较大影响,在条件允许情况下选择24 h以上的静态观测时间窗口。

的升沉响应,该值是评价浮标随波性能的一个重要指标。当波浪周期大于5 s时,浮标的随波性能较好,响应值接近1(见图5)。

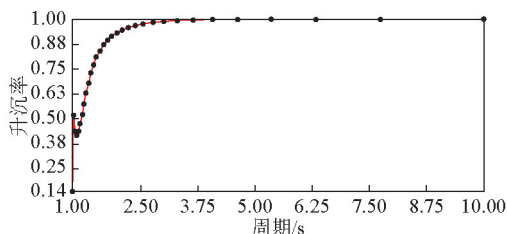


图5 升沉响应曲线

Fig. 5 Hoist and drop response line

这说明浮标在该种波浪中的升沉值与波高值接近相等,浮标测量的海面高度能代表当时海面的瞬时高度。在2 m有效波高情况下,浮标横摇角随波周期增大而减小,波周期大于5 s时,浮标横摇角小于10°(见图6)。不同海区、季节的海水温度和盐度的不同,三点浮球式浮标在海水中天线高为22 cm左右,数值模拟显示在1.5 m波高、7 s周期情况下浮标最大倾角为4.67°,在此情况下浮标的天线高差为0.8 mm(见图7),说明三级海况以内,浮标的姿态较为稳定,对测高精度的影响很小。Wat-

son 等^[9]利用摄像机和 1:2 浮标模型,对系缆 GPS 浮标在人工造浪运动状态和平静水面状态下的平均位置进行了分析,发现其最大差异为 +1.9 mm。对浮标影像很小。

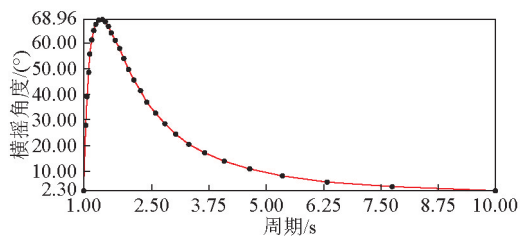


图6 横摇响应曲线

Fig. 6 Swing response line

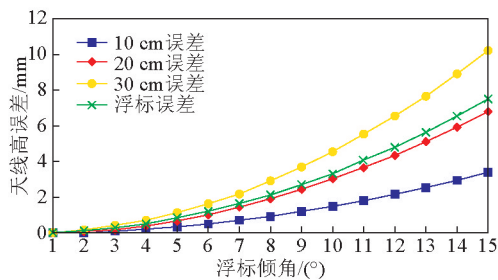


图7 不同天线高情况下浮标倾角与天线高误差的关系

Fig. 7 The relation of buoy obliquity and antenna height error

4.3 温盐对 GPS 浮标精度的影响

浮标天线高在淡水、室温条件下进行测量,与海上试验时的温度、盐度不同,两种环境下的水体密度差异会造成实验室内测量的天线高与海上试验时的天线高不符,造成误差。考虑 GPS 浮标重量 (69 kg)、吃水(吃水横截面面积为 0.31 m^2)、水体密度等因素,使用阿基米德定律对浮标在不同温度、盐度下的天线高进行分析,得到了不同温度、盐度与天线高误差的关系,从而可以在高度计定标试验中消除此项误差。表 2 中为不同温度和盐度的海水情况下, GPS 浮标天线高增加的情况,可根据不同海区、季节的情况选择合适的改正。在 Watson 等^[9]的试验中,在已知盐度的海水中直接测量浮标天线高,没有考虑温度的影响。

表 2 温度、盐度与天线高误差的关系

Table 2 The relation of temperature salinity and antenna height error

盐度	温度/°C					
	5	10	15	20	25	30
30	5.39	5.25	5.05	4.80	4.50	4.16
31	5.56	5.42	5.22	4.97	4.67	4.32
32	5.73	5.58	5.38	5.13	4.83	4.48
33	5.90	5.75	5.54	5.29	4.99	4.64
34	6.07	5.91	5.71	5.45	5.15	4.81
35	6.23	6.08	5.87	5.61	5.31	4.97

mm

4.4 天线相位中心对 GPS 浮标精度的影响

天线相位中心是指微波天线的电气中心,其理论设计应与天线几何中心一致。在高精度测量中要考虑天线相位中心与天线几何中心不一致所引起的误差:a. 天线瞬时相位中心会随接收到卫星的高度角、方位角改变而变化,天线瞬时相位中心与平均相位中心之间偏差即天线相位中心变化。b. 天线平均相位中心与几何中心的偏差称为天线相位中心偏差。高度计定标过程中 GPS 浮标与基准站之间的基线长度一般在 40 km 以内,而 GPS 卫星轨道平均高度约为 20 200 km^[12],通过计算三角函数关系, GPS 卫星高度角和方位角差异小于 0.11° ,可近似认为基线两端 GPS 天线接收到的卫星数目、高度角和方位角基本一致。基线两端 GPS 的天线相位中心变化基本相同。基线向量不受影响,仅由于天线相位中心变化使基线有一个小的平移量。因此在解算 GPS 基站与 GPS 浮标基线时可以不考虑对天线相位中心的变化进行改正,而仅考虑天线相位中心偏差的影响。

如图 8 所示,将两个 GPS 基准站和一个 GPS 浮标分别放在三脚架上进行超短基线静态测量,并用水准仪测量得到两个脚垫之间的高差 d_{12} ; 分别使用钢尺测量天线参考点与水准仪脚垫高差 h ; D 为天线高(天线几何中心与天线参考点高差),通过仪器参数获得; H 为 GPS 测量得到的相位中心大地高,



①—GPS浮标天线；②、③—GPS基准站天线

图8 GPS基准站和GPS浮标布置图

Fig. 8 GPS base and GPS buoy

Δ 为 GPS 天线相位中心偏差, Δ_{12} 为两个 GPS 天线相位中心之间的相对偏差, 其中:

$$\Delta_{12} = \Delta_1 - \Delta_2, H_{12} = H_1 - H_2, h_{12} = h_1 - h_2, D_{12} = D_1 - D_2$$

利用 GPS 超短距离静态相对测量和水准仪测量分别得到两个天线实际相位中心的高度差应一致:

$$H_1 - H_2 = (d_{12} + h_1 + D_1 + \Delta_1) - (h_2 + D_2 + \Delta_2)$$

得到: $\Delta_{12} = H_{12} - d_{12} - h_{12} - D_{12}$

试验分两天进行, 浮标扼流圈天线第一天不安装天线罩, 第二天安装天线罩, 用于分析不同天线、天线罩对天线相位中心的影响。结果显示 (见表 3), 浮标扼流圈天线与 GPS 基站天线之间的相对偏差在不安装天线罩时为 3.96 cm, 安装天线罩为 4.07 cm, 差异为 1 mm。本次试验中, 不同型号天线相位中心偏差较大, 需考虑相对相位中心对测高的影响; 这可能与解算过程中基站天线型号不准确有关系, 需要在后续试验中进行进一步的验证; 相同型号天线的相位中心也存在一定差异, 本次试验中为 0.5 cm 左右; Watson 等^[9]对天线罩对天线测高精度的影响进行了试验分析, 认为天线罩对相位中心的影响依赖于天线载波信号的组合, 很难定量, 试验中最大的差异在 4 mm 左右。试验中, 天线罩对 GPS 相位中心的影响很小, 但其精度主要受 GPS 定位精度和水准测量精度的影响, 本次试验中水准测量精度为 0.2 mm 左右, GPS 相对定位精度为 5~8 mm, 仅能确定天线罩对相位中心的影响为毫米级。

表3 天线相位中心相对偏差

Table 3 Antenna phase center relatively bias

cm

天线	第一天		第二天	
	相位中心 相对偏差	STD	相位中心 相对偏差	STD
Δ_{12}	3.70	0.97	4.29	0.95
Δ_{13}	4.22	0.91	3.84	0.92
Δ_{23}	0.51	1.06	-0.44	1.02

4.5 GPS 浮标测高精度

对各 GPS 基准站进行静态测量, 通过 Gamit 解算获得 GPS 基准站在 ITRF2008 框架和 WGS84 参考椭球下的坐标。

在于桥水库利用 GPS 浮标和验潮仪同时进行水平面高程测量。通过 00 km GPS 基准站绝对坐标和水准测量, 确定验潮仪坐标, 获得验潮仪测量的水面绝对高程。利用不同距离的基站对 GPS 浮标高程进行动态相对位置解算, 获得不同距离情况下, 浮标测量的水面绝对高程。最后, 利用验潮仪测量得到的水面绝对高程对 GPS 浮标水面高程进行检验和误差分析 (见图 9)。

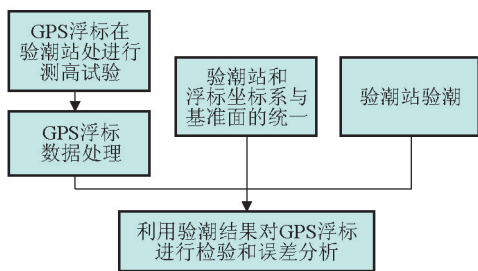


图9 GPS浮标与验潮站测高比对试验流程
Fig. 9 Flow chart of GPS buoy and tide gauge altitude compare experiment

由于同时进行的其他试验、渔民打渔等因素的影响,数据处理过程中剔除了部分验潮仪和浮标数据。验潮仪水面高程数据仅进行了基准转换处理。GPS浮标数据使用Gamt软件的Track模块进行解算,Track进行动态解算可以选择SHORT、LONG、AIR以及由软件自动选择四种模式,通过比较,00 km采用SHORT模式,15 km、28 km、36 km采用软件自动选择模式。解算完成后通过检查结果的RMS和明显异常值对GPS浮标数据进行筛选,并将每分钟数据平均,最后进行多项式拟合,将拟合后的结果与验潮仪数据进行比对。GPS数据与验潮仪数据比对结果见表4。

表4 GPS浮标与验潮仪测高比对
Table 4 Altitude compare of GPS buoy and tide gauge

日期	00 km 基站 Std	15 km 基站 Std	28 km 基站 Std	36 km 基站 Std
2013-6-17	0.38		0.62	1.71
2013-6-18	0.16		0.39	0.70
2013-6-19	0.53	0.56	1.09	1.36
2013-6-20	0.19	0.16	1.00	
平均	0.32	0.36	0.78	1.26

Testut等^[7]的试验2010年使用2款GPS浮标和3款压力式验潮仪进行了比对试验,结果显示,压力验潮仪之间、浮标与验潮仪之间的比对精度为毫米级。但两款浮标之间的比对的精度只达到了9 cm。本次试验中,使用了4个GPS基准站,但仅使用了1个GPS浮标和验潮仪,在GPS浮标距离GPS基站28 km以内时,浮标与验潮仪之间比对精

度为毫米级,优于TestutL结果。4个GPS基站对浮标高程的解算显示,浮标水面高程动态相对定位精度随着距离减少而增加。

5 结语

通过以上研究可以得出以下结论。a. GPS浮标高程动态相对定位精度随距离减少而增加,在距离基站28 km以内时,精度优于1 cm,满足高度计海面高度定位需求。b. 时间窗口对基站坐标解算精度有较大影响,在条件允许情况下选择24 h以上的静态观测时间窗。c. 三级海况以内,浮标的姿态较为稳定,对GPS浮标测高精度的影响可以忽略; d. 温度和盐度对GPS浮标测高精度的影响为毫米级,可通过校正消除误差。e. GPS浮标和基站在采用不同型号天线的情况下,需考虑相位中心相对偏差对测高的影响。

参考文献

- [1] 王广运,王海瑛. 卫星测高研究应用新进展[J]. 地球科学进展, 1993, 8(6): 36-43.
- [2] 李建成, 宁津生, 晁定波. 卫星测高在大地测量学中的应用及进展[J]. 测绘科学, 2006, 31(6): 19-23.
- [3] Chen Chuntao. Using multi-sensor satellite data to study the variability of Kuroshio [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [4] Christian Rocken, Thomas M, Kelecy, et al. Measuring precise sea level from a buoy using the global positioning system[J]. Geophysical Research Letters, 1990, 17(12): 2145-2148.
- [5] George H Born, Michael E Parke, Penina Axelrad, et al. Calibration of the TOPEX altimeter using a GPS buoy[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(C12): 24517-24526.
- [6] Kevin WKey, Michael E Parke, George H Born. Mapping the sea surface using a GPS buoy[J]. Marine Geodesy, 1998, 21: 67-79.
- [7] Testut L, Calzas M, Drezon C, et al. Precision and Accuracy of GPS buoys: an inter-comparison experiment[R]. France: CNES, 2010.
- [8] Watson C, Coleman R, Neil White, et al. Absolute Calibration of TOPEX/Poseidon and Jason-1 Using GPS Bouy in Bass Strait, Australia[J]. Marine Geodesy, 2003, 26: 285-304.
- [9] Watson C S. Satellite Altimeter Calibration and Validation Using GPS Buoy Technology[D]. Australia: University of Tasmania, 2005.
- [10] Christopher Watson, Neil White, John Church, et al. Absolute Calibration in Bass Strait, Australia: TOPEX, Jason-1 and OSTM/Jason-2[J]. Marine Geodesy, 2011, 34(3-4): 242-260.
- [11] 陈春涛, 翟万林, 张倩, 等. 基于GPS的测高浮标的设计、研制与测试[J]. 海洋技术学报, 2014, 33(1): 102-108.
- [12] 党亚民, 秘金钟, 成英燕. 全球导航卫星系统原理与应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2007.

Influencing factors research of GPS buoy measurement precision

Yan Longhao, Chen Chuntao, Zhai Wanlin,
Zhu Jianhua, Zhang Qian, Zhang Xiaoxu

(National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China)

[Abstract] Satellite altimeter was widely used in ocean monitoring and research, in order to find out the actual performance of the altimeter and access the accurate sea level data, we need to calibration. GPS buoys were mainstream devices in altimeter absolute calibration. Through simulation and experiment about the self-developed GPS buoy, this paper studied the precision of GPS buoy and factors affecting. The results show that the self-developed GPS buoy elevation measurement precision can reach 1 cm, meet the altimeter sea surface height calibration requirements.

[Key words] GPS buoy; precision factors affecting; altimeter calibration