

GNSS 海洋浮标海面高程动态不确定度研究

梁冠辉¹, 陶常飞^{1*}, 周兴华¹, 刘同木², 林冠英², 黄桦²

(1. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 自然资源部 南海局, 广东 广州 510301)

摘要: 为全面准确地评定 GNSS(Global Navigation Satellite System)海洋浮标测得瞬时海面高程的动态不确定度,根据 GNSS 海洋浮标的工作原理、系统组成及数据处理方法,提出了针对具体测量过程的瞬时海面高程动态不确定度评定方法。将浮标动态测量过程分解为静态测量过程的集合,采用 GUM(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)方法建立了测量模型,详细分析和计算了静态测量过程中瞬时海面高程的不确定度分量:GNSS 高程不确定度、GNSS 天线高程改正不确定度和高程异常不确定度,最后合成瞬时海面高程的动态标准不确定度和动态扩展不确定度。使用该方法对近海 GNSS 浮标测量结果进行了动态不确定度评定,验证了此方法的可行性,也为评价 GNSS 浮标测量结果质量提供了有效依据。

关键词: GNSS; 瞬时海面高程; 浮标; 动态不确定度; 姿态测量

中图分类号: P715.2; P229.5

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2020)03-0532-09

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.03.015

引用格式: LIANG G H, TAO C F, ZHOU X H, et al. Study on dynamic uncertainty of sea-level elevation measured by GNSS ocean buoy[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(3): 532-540. 梁冠辉, 陶常飞, 周兴华, 等. GNSS 海洋浮标海面高程动态不确定度研究[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(3): 532-540.

随着我国“十三五”海洋强国重大部署和“一带一路”的提出和推行,我国以及“一带一路”沿线各国在各自海域开展海洋经济和科研等活动会愈加频繁,海洋观测是各种海洋活动的前提^[1-2]。为了丰富海洋观测手段和提高海洋观测效率,我们研制了基于 GNSS(Global Navigation Satellite System)的海洋测量浮标并成功进行了海洋应用试验,GNSS 海洋浮标的直接测量结果是瞬时海面高程,通过该结果可以开展海洋潮位、波浪等参数测量和星载卫星高度计在轨绝对定标等工作。为了使该浮标能够为实际海洋工作提供准确可靠的测量结果^[3-5],根据海洋计量工作的要求^[6-7],文中对该浮标测量结果开展了不确定度评定工作。

海洋现场测量与陆地或者实验室内测量相比具有不同的特征,测量过程中,该 GNSS 测量浮标在海面上随着海平面的起伏与波动时刻进行垂向运动和水平摇动;时刻变化的天气和海面状况会对浮标的姿态和浮标接收 GNSS 电磁波的质量产生动态随机的影响;浮标的测量结果潮位也是动态变化的。从计量角度来看,在 GNSS 浮标测量过程中,测量系统、测量环境和被测量均具有时变性、随机性和相关性等特点,因此该测量过程是一种动态测量^[8-11]。

动态测量结果是一系列被测量瞬时值的集合,因此动态测量结果的不确定度同样是一系列被测量结果不确定度序列集合^[12-13]。目前,针对动态测量不确定度评定的主要理论有灰色理论、贝叶斯理论和蒙特卡罗方法,这些方法在计算动态不确定度的方程各异方面,本质是一致的,将动态不确定度当作时间函数,运用相应的理论方法建立模型来评定^[14-19]。GNSS 测量浮标长时间自动在海洋中工作,复杂多变的测量环境和测量过程使其动态不确定度变化并不具备规律性,很难用某个模型来全面评定 GNSS 浮标测量结果的动态不确定度,而且不同的测量过程的不确定度也不能互相代替,必须针对每一个具体测量过程开展不确定度评

收稿日期: 2019-03-13

资助项目: 国家重点研发计划项目——海上搜寻演示验证技术与评估(2017YFC0306003)

作者简介: 梁冠辉(1985-),男,助理工程师,硕士,主要从事海洋监测设备研制与维护方面研究。E-mail: lianggh@fio.org.cn

*** 通讯作者:** 陶常飞(1982-),男,工程师,硕士,主要从事海洋工程方面研究。E-mail: taochangfei@fio.org.cn

(王 燕 编辑)

定。文中根据 GNSS 浮标工作原理和数据处理方法,将浮标具体动态测量过程分解为一系列离散的静态测量过程,分析每个静态过程的不确定度分量,使用 GB/T27418—2017《测量不确定度评定与表示》中 GUM 方法对每个静态测量过程进行不确定度评定^[20],最终合成 GNSS 浮标瞬时海面高程的动态标准不确定度和动态扩展不确定度^[21-24],以期为该浮标的使用者提供精准合格的测量结果,保证该浮标能够有效地服务于海洋观测工作。

1 GNSS 测量浮标简介

GNSS 浮标主要由 GNSS 天线、GNSS 处理模块、姿态传感器、数据采集器、北斗通信终端、电源控制器、太阳能电池、蓄电池组和浮体组成,浮标原理图和实物如图 1 所示。

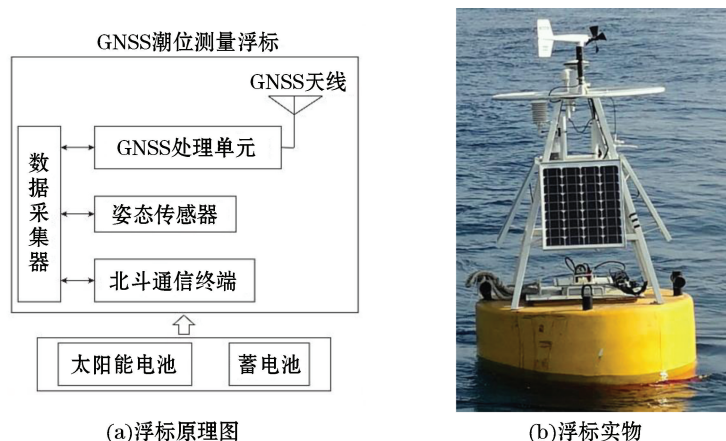


图 1 GNSS 浮标原理图和实物

Fig.1 Schematic diagram and photo of GNSS buoy

GNSS 天线实时接收 GNSS 卫星发射至地面的电磁波信号进行滤波放大等处理后,将其传输至 GNSS 处理模块,然后,GNSS 处理模块对卫星信号进行 A/D 转换和数字信号处理后通过电文解析和定位解算得到浮标水平坐标、GNSS 天线高程和时间等观测量。姿态传感器实时测量浮标的横滚角和俯仰角,用于后处理改正浮标的 GNSS 天线高程。

海洋现场测量工作完成后,首先提取浮标观测的 GNSS 数据和姿态数据,并将 GNSS 数据利用差分后处理算法解算得到浮标 GNSS 天线相位中心大地高程序列,然后利用姿态数据对浮标 GNSS 天线相位中心大地高程序列进行天线高程改正得到浮标所测海域的瞬时海面大地高程序列,对这些瞬时海面高程序列进行高程异常改正求得被测海域瞬时海面正常高程序列^[25]。

2 不确定度评定

2.1 测量模型

根据 GNSS 浮标的观测原理,瞬时海面高程测量结果的计算公式:

$$H_i = H_{0i} - h_i - N, \quad (1)$$

式中, i 为观测序号, $i=0,1,2,\dots,n$; H_i 为瞬时海面高程; H_{0i} 为浮标经过差分解算后测得 GNSS 天线相位中心处大地高; h_i 为观测站的 GNSS 天线高程改正,即 GNSS 天线相位中心至浮标吃水面距离; N 为浮标测量海域的高程异常值,该值由模型算法求得,在固定海域为固定值。

式(1)中 H_i 的 3 个输入量互不相关,所以 H_i 的动态合成标准不确定度计算公式为

$$u_c(H)_i = \sqrt{u(H_0)_i^2 + u(h)_i^2 + u(N)^2}, \quad (2)$$

分别评定 $u(H_0)_i$, $u(h)_i$ 和 $u(N)$, 然后合成 $u_c(H)_i$ 。

2.2 瞬时海面高程动态不确定度评定

标准不确定度分量评定方法有 2 种:1)根据一系列测得值采用统计方法获得实验标准差的方法为 A 类评定;2)根据有关信息估计的先验概率分布获得的标准偏差估计值的方法为 B 类评定。其中 A 类评定方法要求进行多次独立重复测量,该过程中需具备重复性或者可复现的测量条件,若无法对被测量进行多次重复测量,则不确定度评定时无法进行 A 类评定,而可以进行 B 类评定。文中以 GNSS 浮标测量原理为基础,具体分析 GNSS 浮标海洋测量过程,选择合适的方法对每个不确定度分量进行评定。

2.2.1 GNSS 高程动态标准不确定度 $u(H_0)_i$

GNSS 高程是 GNSS 天线相位中心大地高程,是通过载波相位差分后处理算法求得。由于测量过程及被测量的动态性,无法进行独立重复测量来通过统计方法获得 GNSS 高程的标准差,因此文中不对其进行 A 类不确定度评定,而是通过 B 类方法评定其标准不确定度。GNSS 高程结果中包含高程及高程 RMS 值等信息,RMS 值是 GNSS 数据处理过程中由验后残差计算所得,可用来表征其测量精度^[26-28],采用 GNSS 高程解算结果中的 RMS 值的绝对值作为被测量可能值区间的半宽度,且 GNSS 高程动态标准不确定度服从均匀分布,包含因子为 $k = \sqrt{3}$,则动态测量中,GNSS 高程测量动态标准不确定度 $u(H_0)_i$ 的计算公式为

$$u(H_0)_i = \frac{R_i}{k} = \frac{R_i}{\sqrt{3}}, \quad (3)$$

式中, R_i 为动态测量中 GNSS 高程测量结果可能值区间的半宽度。

2.2.2 GNSS 天线高程改正动态标准不确定度 $u(h)_i$

GNSS 天线高程改正是指 GNSS 天线相位中心至海面的动态高度,本文中研制的 GNSS 浮标天线安装在浮标纵向中心轴,改正公式为

$$h_i = h_0 \cos \epsilon_i \cos \theta_i, \quad (4)$$

式中, h_i 为 GNSS 天线相位中心至海面的动态垂向距离; h_0 为静水时 GNSS 天线相位中心至海面的垂向距离,对于同一个浮标,该值为固定值; ϵ_i 和 θ_i 分别为 GNSS 浮标动态横滚角度和俯仰角度。

从式(4)中可以看出,GNSS 天线高改正的不确定度输入量有 3 个,其中 h_0 采用全站仪测得, ϵ_i 和 θ_i 通过浮标内置姿态测量传感器测得,因此 h_0 与 ϵ_i 和 θ_i 不相关,相关系数为 0, ϵ_i 和 θ_i 的相关系数通过实测数据计算所得。

按照不确定度传播律,GNSS 天线瞬时高程改正动态标准不确定度 $u(h)_i$ 合成公式:

$$u(h)_i = \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial h_0}\right)^2 u(h_0)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial \epsilon}\right)_i^2 u(\epsilon)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial \theta}\right)_i^2 u(\theta)^2 + 2 \left(\frac{\partial h}{\partial \epsilon}\right)_i \left(\frac{\partial h}{\partial \theta}\right)_i r(\epsilon, \theta) u(\epsilon) u(\theta)}, \quad (5)$$

式中, $u(h_0)$, $u(\epsilon)$ 和 $u(\theta)$ 分别为 h_0 , ϵ 和 θ 的标准不确定度; $\frac{\partial h}{\partial h_0} = \cos \epsilon \cos \theta$, 为 h_0 的灵敏系数; $\left(\frac{\partial h}{\partial \epsilon}\right)_i$ 为动态横滚角灵敏系数,计算公式为

$$\left(\frac{\partial h}{\partial \epsilon}\right)_i = -h_0 \sin \epsilon_i \cos \theta_i, \quad (6)$$

$\left(\frac{\partial h}{\partial \theta}\right)_i$ 为动态俯仰角灵敏系数,计算公式为

$$\left(\frac{\partial h}{\partial \theta}\right)_i = -h_0 \sin \theta_i \cos \epsilon_i, \quad (7)$$

ϵ_i 和 θ_i 的计量特征与浮标测得的 GNSS 高程相似,需通过 B 类方法评定二者的标准不确定度,将姿态测量

传感器说明书中二者的最大允许误差绝对值作为二者测量值可能值区间的半宽度 a_ϵ 和 a_θ , 服从均匀分布, 包含因子 k_ϵ 和 k_θ 均为 $\sqrt{3}$, 则 ϵ_i 和 θ_i 的不确定度计算公式为

$$u(\epsilon) = \frac{a_\epsilon}{k_\epsilon} = \frac{a_\epsilon}{\sqrt{3}}, \quad (8)$$

$$u(\theta) = \frac{a_\theta}{k_\theta} = \frac{a_\theta}{\sqrt{3}}. \quad (9)$$

通过全站仪测量所得 h_0 的标准不确定度主要来源有外界气象条件(如气温、气压等)和全站仪自身的原因(如棱镜常数、轴系误差等), 经过评定 $u(h_0)$ 为毫米量级, GNSS 天线高程改正的总体不确定度为厘米量级, $u(h_0)$ 远小于 $u(h)_i$, 在计算过程中可以忽略不计, GNSS 天线高程改正动态标准不确定度 $u(h)_i$ 计算公式可简化为

$$u(h)_i = \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial \epsilon}\right)_i^2 u(\epsilon)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial \theta}\right)_i^2 u(\theta)^2 + 2 \left(\frac{\partial h}{\partial \epsilon}\right)_i \left(\frac{\partial h}{\partial \theta}\right)_i r(\epsilon, \theta) u(\epsilon) u(\theta)}. \quad (10)$$

2.2.3 高程异常不确定度 $u(N)$

文中高程异常值是利用最新的全球大地水准面模型 EGM 2008 结合区域 GPS 或水准网点成果精化区域大地水准面模型计算所得。该值取决于所在区域的模型精度, 若所在区域实测数据较多, 模型同化效果较好, 则模型精度较高, 因此高程异常不确定度评定需根据浮标所在区域开展具体的评定工作。根据研究人员在浮标所在区域的大地水准面测量工作经验来确定高程异常值的最大允许误差 a_N , 该值服从均匀分布, 取包含因子为 $k = \sqrt{3}$, 则高程异常标准不确定度计算公式^[29-30]:

$$u(N) = \frac{a_N}{k} = \frac{a_N}{\sqrt{3}}. \quad (11)$$

2.2.4 瞬时海面高程动态合成标准不确定度 $u_c(H)_i$ 和瞬时海面高程动态扩展不确定度 U_{99i}

瞬时海面高程动态合成标准不确定度 $u_c(H)_i$ 由式(3), 式(10)和式(11)求得的不确定度分量 $u(H_0)_i$, $u(h)_i$ 和 $u(N)$ 代入式(2)中合成所得。

假设瞬时海面高程动态合成标准不确定度服从均匀分布, 取包含概率 $p = 0.99$, 包含因子 $k_p = 1.71$, 则瞬时海面高程动态扩展不确定度计算公式:

$$U_{99i} = k_p \times u_c(H)_i \quad k_p = 1.71, p = 0.99. \quad (12)$$

3 试验分析

以 2018-09-19 在自然资源部南海局广州长洲岛码头使用 GNSS 浮标开展试验为例, 按照上述步骤构建的不确定度评定模型对试验结果开展不确定度评定, 试验中 GNSS 浮标观测数据采样频率为 1 Hz。首先提取浮标的 GNSS 解算结果中的 R_i 与经过式(3)计算的 $u(H_0)_i$ 如图 2 所示。

GNSS 高程动态标准不确定度曲线取决于 GNSS 高程结果的 RMS 值曲线。GNSS 高程 RMS 值作为评价 GNSS 高程精度的主要指标之一, 主要反映了高程观测质量的优劣, 即高程观测值与参数估计值之间的符合程度, 该值越小, 说明高程观测值质量越好。它与 GNSS 原始观测量中的多路径效应、电离层对相位的影响、电离层延迟的变化及接收机的钟漂和周跳等因素有密切关系, 这些因素有的受外界环境影响, 有的受观测仪器本身的影响。但是, 在 GNSS 数据处理过程中, 差分后处理算法会对这些影响因素进行消除或者抑制, 最终得到 GNSS 高程 RMS 序列代表 GNSS 整个观测过程的最终结果精度, 这个过程包括 GNSS 卫星信号传播、GNSS 卫星信号接收和 GNSS 数据处理等步骤。外界环境复杂而随机, 导致 RMS 值的变化亦随机无规律, 但数据处理过程的优化使 RMS 值的变化具有一定的平缓性。所以每一次具体的 GNSS 测量过程的 RMS 值曲线都不相同。

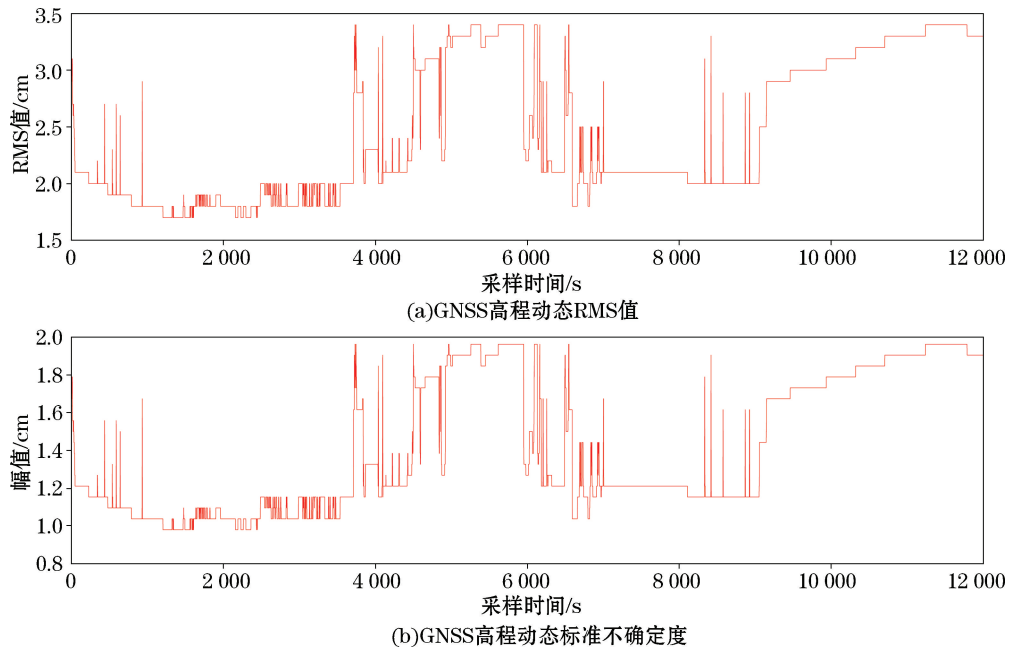


图2 浮标 GNSS 动态高程 RMS 值和高程动态标准不确定度
Fig.2 RMS value and uncertainty of dynamic elevation measured by GNSS buoy

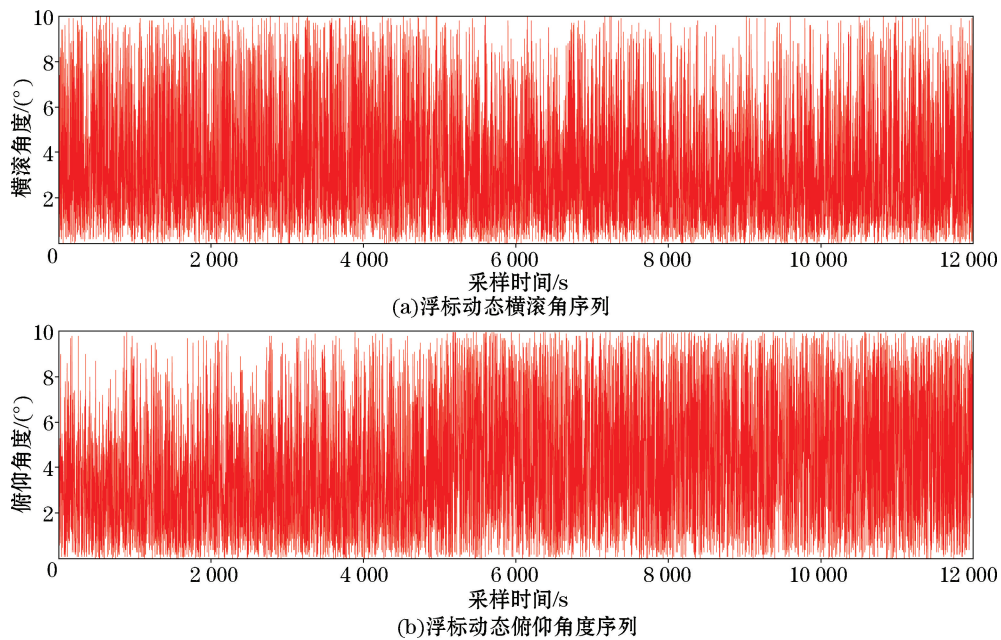


图3 浮标动态横滚角度和俯仰角度
Fig.3 Dynamic roll angle and pitch angle of the buoy

GNSS 浮标横滚角和俯仰角测量结果如图 3 所示,横滚角和俯仰角反应了浮标工作时所在海域的随浪性,由于浮标体的对称性,二者的幅值特征主要取决于浮标数据采样时所在海域的波浪的波向和浪高;频率特征由浮标本身固有的摇荡周期和波浪周期决定。我国近海的波浪周期一般为 $6\sim 8\text{ s}$,而 GNSS 浮标的横摇固有周期约为 10 s ,所以图 3 中浮标的横摇角和俯仰角的变化频率要远高于浮标 GNSS 高程 RMS 值的变化频率。

研制浮标时测量得到的静水时 GNSS 天线相位中心至海面的垂向距离 $h_0 = 143.6$ cm。通过图 3 中横滚角和俯仰角序列计算二者相关系数 $r(\epsilon, \theta) = 0.011$, 查阅姿态测量传感器说明书中二者的最大允许误差绝对值均为 0.2° , 则 $a_\epsilon = a_\theta = 0.2^\circ$ 。将数据分别代入式(6)~式(10), 计算出 $u(h)_i$ (图 4)。

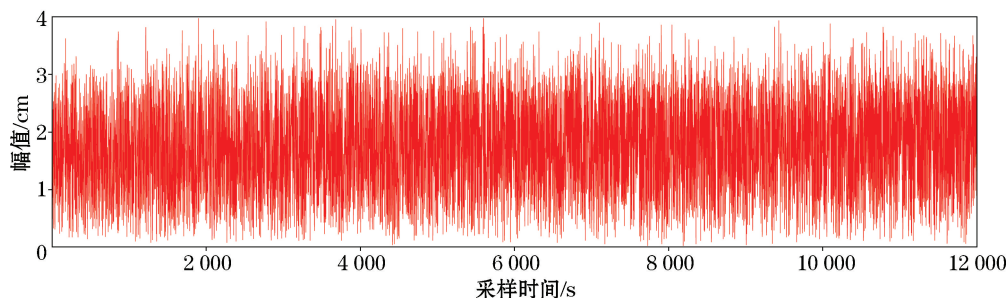
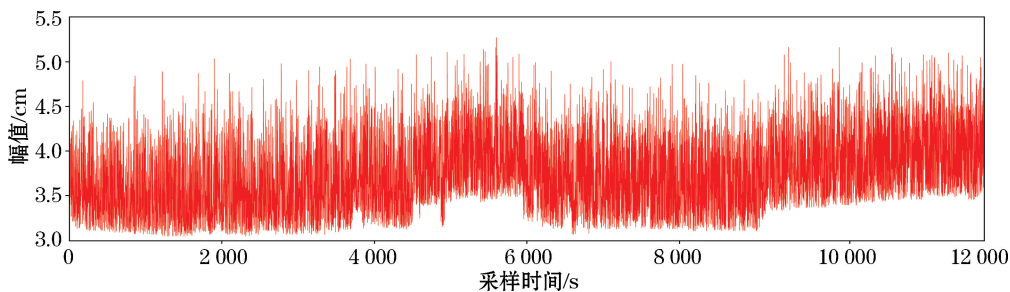


图 4 GNSS 天线高改正动态标准不确定度

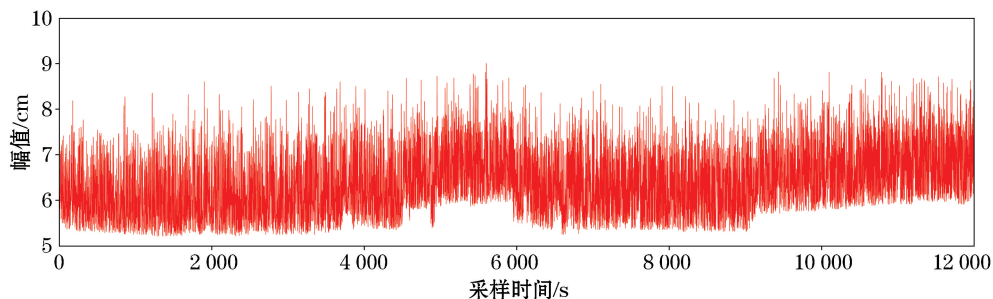
Fig.4 Dynamic uncertainty of the GNSS antenna height correction

根据此次试验浮标所在区域的其他的工作经验, 利用 EGM 2008 模型计算高程异常不确定度的最大允许误差, 得 $a_N = \pm 5$ cm, 代入式(11)求得高程异常不确定度。将瞬时海面高程动态标准不确定度的 3 个分量代入式(2)计算得 $u_c(H)_i$ (图 5a)。最终, 通过式(12)合成瞬时海面高程动态扩展不确定度, 如图 5b 所示。

图 5 中的动态合成标准不确定度和动态扩展不确定度为此次不确定度评定的最终结果, 高程异常标准不确定度为常量, 它们的曲线特性主要受 GNSS 高程动态标准不确定度和 GNSS 天线高改正动态标准不确定度影响。图中既体现出 GNSS 高程动态标准不确定度变化的趋势, 也包含了 GNSS 天线高改正动态标准不确定度的幅频特征。



(a)动态合成标准不确定度



(b)动态扩展不确定度

图 5 瞬时海面高程动态合成标准不确定度和瞬时海面高程动态扩展不确定度

Fig.5 Dynamic synthesis standard uncertainty and dynamic expanded uncertainty of the instantaneous sea-level elevation

4 结 语

综合考虑 GNSS 测量浮标的工作原理、系统组成、数据处理方法和测量环境等因素,针对浮标具体的动态测量过程提出了一种 GNSS 测量浮标不确定度评定方法。该方法对动态测量的每一个结果均提供不确定度,可以详细判断整个测量过程中每个数据的质量,保证该 GNSS 浮标测量的瞬时海面高程能准确地应用于海洋科学研究和工程开发等工作中。

不确定度评定过程中,分析和计算了 3 个动态不确定度分量,由此可知影响瞬时海面高程动态合成标准不确定的主要因素有:传感器的测量指标、浮标所处的海洋环境和高程异常计算模型的精准度。这对 GNSS 测量浮标的使用场合的选择和研制的优化均有指导作用。

参考文献(References):

- [1] WANG B, LI M, LIU S X, et al. Current status and trend of ocean data buoy observation technology application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(11): 2401-2413. 王波, 李民, 刘世萱, 等. 海洋资料浮标观测技术应用现状及发展趋势[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2401-2413.
- [2] YAO Y L, WANG J D, YE S, et al. Review on measuring techniques of ocean wave, tidal and water-level[J]. China Measurement & Test, 2013, 39(1): 31-35. 尧怡陇, 王敬东, 叶松, 等. 海洋波浪、潮汐和水位测量技术及其现状思考[J]. 中国测试, 2013, 39(1): 31-35.
- [3] FUND F, PEROSANZ F, TESTUT L, et al. An integer precise point positioning technique for sea surface observations using a GPS buoy[J]. Advances in Space Research, 2013, 51(51): 1311-1322.
- [4] STAL C, POPPE H, VANDENBULCKE A, et al. Study of post-processed GNSS measurements for tidal analysis in the Belgian North Sea[J]. Ocean Engineering, 2016, 11(8): 165-172.
- [5] ZHONG J H, LEI J H, YUE X N, et al. Determination of differential code bias of GNSS receiver onboard low earth orbit satellite[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2016, 54(8): 1-10.
- [6] LI J, YANG L, LI J. Research on standardization construction of ocean observation equipment[J]. China Standardization, 2015(9): 88-92. 李晶, 杨立, 李健. 海洋观测装备标准化建设现状、分析及思考[J]. 中国标准化, 2015(9): 88-92.
- [7] WANG B S, JIANG Q, GAO Z K. On current situation of marine metrology and suggestion on the future development[J]. Ocean Development and Management, 2016, 33(2): 91-94. 王宝森, 姜秋, 高占科. 海洋计量工作现状分析与未来发展建议[J]. 海洋开发与管理, 2016, 33(2): 91-94.
- [8] ZHOU C H, YUN P, LIU Y, et al. Research on dynamic angle error measurement method of angle sensor[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2014, 34(4): 6-9. 周彩红, 云鹏, 刘勇, 等. 角度传感器动态角误差测量方法的研究[J]. 宇航计测技术, 2014, 34(4): 6-9.
- [9] LAN K, LU S M, YAN J W, et al. Uncertainty separation principle of dynamic measurement[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2001, 22(5): 49-53. 蓝鲲, 陆寿茂, 闫俊武, 等. 动态测量的不确定度分离原理[J]. 遥测遥控, 2001, 22(5): 49-53.
- [10] XIE S F, CHEN X H, ZHANG Y B. The analysis of uncertainty and research of dynamic character on measurement system[J]. Acta Metrologica Sinica, 2002, 23(3): 237-240. 谢少锋, 陈晓怀, 张勇斌. 测量系统不确定度分析及其动态性研究[J]. 计量学报, 2002, 23(3): 237-240.
- [11] LI H Q, WANG K H, LI X L, et al. Application of dynamic uncertainty measurement in partial discharge signal extraction[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(19): 123-128. 李慧奇, 王凯红, 李晓龙, 等. 动态测量不确定度在局部放电信号提取中的应用[J]. 电测与仪表, 2014, 51(19): 123-128.
- [12] WU D Z. Differences and relationships between dynamic measurement uncertainty and measurement indefiniteness[J]. Metrology & Measurement Technique, 2010, 37(12): 15-17. 吴德洲. 动态不确定度与静态不确定度的区别和联系[J]. 计量与测试技术, 2010, 37(12): 15-17.
- [13] SHU W Q. A study of the dynamic measurement uncertainty[J]. Acta Metrologica Sinica, 2003, 24(3): 245-249. 舒伟群. 动态测量不确定度问题初探[J]. 计量学报, 2003, 24(3): 245-249.
- [14] LI Y X, YANG J G, LI Y Y, et al. Study of dynamic uncertainty in error measurement study of machine tool[J]. Acta Metrologica Sini-

- ca, 2008, 29(3): 289-292. 李永祥, 杨建国, 李昱瑶, 等. 机床误差检测系统的动态不确定度研究[J]. 计量学报, 2008, 29(3): 289-292.
- [15] GAO Y Y, CHEN X H. Calculation of dynamic measurement uncertainty with Monte Carlo method[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science & Technology, 2006, 16(6): 357-359. 高玉英, 陈晓怀. 应用蒙特卡罗方法计算动态测量的不确定度[J]. 黑龙江科技学院学报, 2006, 16(6): 357-359.
- [16] QIN L S, SHEN X J, GUO M Y, et al. Dynamic uncertainty of the measuring instrument for ball bearings' contact angles[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(8): 2025-2031. 秦萃晟, 沈雪瑾, 郭梦媛, 等. 球轴承接触角测量仪的动态不确定度[J]. 航空动力学报, 2017, 32(8): 2025-2031.
- [17] CHEN Y, HAN X L. Monte Carlo method and uncertainty analysis of dynamic measurement[J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, 2009, 27(3): 59-61. 陈勇, 韩晓林. 蒙特卡罗法与动态测试不确定度分析[J]. 河北建筑工程学院学报, 2009, 27(3): 59-61.
- [18] SONG B, LI SH P, WEN C B, et al. Evaluation of dynamic measurement uncertainty based on gray relation theories[J]. China Measurement & Test, 2010, 36(6): 33-36. 宋兵, 李世平, 文超斌, 等. 基于灰色关联分析的动态测量不确定度评定[J]. 中国测试, 2010, 36(6): 33-36.
- [19] GAO J L, FAN J B, WANG Y. Uncertainty evaluation of measurement data based on dynamic calibration[J]. Chinese Journal of Electron Device, 2017, 40(3): 557-560. 高建丽, 范锦彪, 王燕. 基于动态校准测量数据的不确定度评定[J]. 电子器件, 2017, 40(3): 557-560.
- [20] National Technical Committee 261 on Certification and Accreditation of Standardization Administration of China. Guide to the evaluation and expression of uncertainty in measurement: GB/T 27418—2017[S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing & Media Co., Ltd., 2017. 全国认证认可标准化技术委员会(SAC/TC 261). 测量不确定度评定和表示: GB/T 27418—2017[S]. 北京: 中国质量标准出版传媒有限公司, 2017.
- [21] HUANG J Q. Dynamic uncertainty estimation of dynamic calibration results in temperature measurement system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(4): 870-873. 黄俊钦. 测温系统动态校准结果的不确定度估算[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(4): 870-873.
- [22] ZHAO X, SHAO C L, CHI X Z, et al. Study on improvement of temperature sensor verification method in automatic weather station [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2015, 31(5): 179-183. 赵旭, 邵长亮, 迟晓珠, 等. 自动气象站温度传感器检定方法改进研究[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(5): 179-183.
- [23] WU F Y, HU C Q, ZHEN L. Uncertainty analysis and evaluation for indication correction of humidity sensor[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2016, 33(4): 5-8. 吴非洋, 胡春泉, 郑亮. 湿度传感器示值修正值的不确定度分析与评定[J]. 气象水文海洋仪器, 2016, 33(4): 5-8.
- [24] XU J J, ZHANG Z H, LI Z K, et al. Uncertainty analysis of the Joule balance method and the improvement of whole system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1168-1175. 许金鑫, 张钟华, 李正坤, 等. 能量天平不确定度分析与整体系统改进[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1168-1175.
- [25] LIANG G H, TAO C F, ZHOU X H, et al. Integrated design and development of a new gauge system used in open sea[J]. Advances in Marine Science, 2019, 37(1): 129-139. 梁冠辉, 陶常飞, 周兴华, 等. 新型远距离验潮系统集成与研制[J]. 海洋科学进展, 2019, 37(1): 129-139.
- [26] SONG C, HAO J M. Dynamic positioning accuracy testing of maritime GPS equipment[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2012, 29(3): 183-187. 宋超, 郝金明. GPS 设备海上动态定位精度检测新方法[J]. 测绘科学技术学报, 2012, 29(3): 183-187.
- [27] QU L Z, ZHAO Q L, GUO J, et al. Performance analysis on multi-GNSS kinematic precise point positioning[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2016, 36(4): 298-302. 屈利忠, 赵齐乐, 郭靖, 等. GNSS 融合动态精密单点定位性能分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(4): 298-302.
- [28] LIU W P, HAO J M, LÜ Z W. A new method for precision evaluation of kinematic GNSS positioning[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2014, 34(6): 92-96. 刘伟平, 郝金明, 吕志伟. 一种新的 GNSS 动态定位精度检测方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(6): 92-96.
- [29] ZHANG F X, LIU C. The approach of GPS height transformation based on EGM 2008 and SRTM/DTM 2006.0 residual terrain model [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(1): 25-32. 张兴福, 刘成. 综合 EGM2008 模型和 SRTM/DTM 2006.0 剩余地形模型的 GPS 高程转换方法[J]. 测绘学报, 2012, 41(1): 25-32.
- [30] ZHANG C Y, GUO C X, CHEN J Y, et al. EGM 2008 and its application analysis in Chinese mainland[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(4): 283-289. 章传银, 郭春喜, 陈俊勇, 等. EGM 2008 地球重力场模型在中国大陆适用性分析[J]. 测绘学报, 2009, 38(4): 283-289.

Study on Dynamic Uncertainty of Sea-Level Elevation Measured by GNSS Ocean Buoy

LIANG Guan-hui¹, TAO Chang-fei¹, ZHOU Xing-hua¹, LIU Tong-mu²,
LIN Guan-ying², HUANG Hua²

(1. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;*

2. *South China Sea Branch, MNR, Guangzhou 510301, China*)

Abstract: In order to evaluate comprehensively and accurately the dynamic uncertainty of instantaneous sea-level elevation measured by GNSS (Global Navigation Satellite System) ocean buoy, a method for evaluating the dynamic uncertainty of instantaneous sea-level elevation measured in specific measurement processes is proposed based on the working principle, system composition and data processing method of GNSS ocean buoy. The dynamic measurement process of the buoy is decomposed into a set of static measurement processes and a measurement model is established by using GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) method. The uncertainty components of the instantaneous sea-level elevation measured in the static measurement process, which include GNSS elevation uncertainty, GNSS antenna elevation correction uncertainty and elevation anomaly uncertainty, are analyzed and calculated in detail. Finally, the dynamic standard uncertainty and the dynamic expanded uncertainty of the instantaneous sea-level elevation are synthesized. This method has been used for evaluating the dynamic uncertainty of the results measured by GNSS buoy in the offshore areas, verifying the feasibility of the method and providing an effective base for evaluating of the quality of the GNSS buoy measurements.

Key words: GNSS; instantaneous sea-level elevation; buoy; dynamic uncertainty; posture measurement

Received: March 13, 2019