



## 高分辨率电子倾角传感器HRTM的倾角漂移和固有频率研究

何东汉, 郑勇, 李崇辉, 陈冰, 陈张雷

引用本文:

何东汉, 郑勇, 李崇辉, 陈冰, 陈张雷. 高分辨率电子倾角传感器HRTM的倾角漂移和固有频率研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(7): 766–770.

He Donghan, Zheng Yong, Li Chonghui, Chen Bing, Chen Zhanglei. Study on Dip Drift and Natural Frequency of High-Resolution Electronic Inclination Sensor HRTM[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2022, 42(7): 766–770.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2022.07.019>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 具有量程扩展和原位标定功能的RZB钻孔应变仪传感器稳定性研究

Research on the Stability of the RZB-Type Borehole Strain Sensor with Function of the Range Expansion and In-situ Calibration

大地测量与地球动力学. 2022, 42(3): 318–320 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2022.03.018>

#### 漾濞M6.4地震序列 $M \geq 5.0$ 地震震源机制解及构造特征

Focal Mechanism Solutions and Structural Characteristics of  $M \geq 5.0$  in the Yangbi M6.4 Earthquake Sequence

大地测量与地球动力学. 2022, 42(7): 680–686 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2022.07.004>

#### 环境温度对地震数据采集器时间精度的影响测试

Testing of Ambient Temperature Influence on Time Tag Accuracy of Seismic Digitizer

大地测量与地球动力学. 2022, 42(4): 431–435 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2022.04.019>

#### 基于LTE Cat-1的无线静力水准仪系统设计

Design of Wireless Static Level System Based on LTE Cat-1

大地测量与地球动力学. 2022, 42(1): 104–110 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2022.01.020>

#### 2020-07-12河北唐山 $M_S 5.1$ 地震震源参数及发震构造分析

Source Parameters and Seismogenic Structure Analysis of the July 12, 2020 Tangshan  $M_S 5.1$  Earthquake

大地测量与地球动力学. 2022, 42(2): 172–175 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2022.02.012>

# 高分辨率电子倾角传感器 HRTM 的 倾角漂移和固有频率研究

何东汉<sup>1</sup> 郑 勇<sup>2</sup> 李崇辉<sup>2</sup> 陈 冰<sup>2</sup> 陈张雷<sup>2</sup>

1 北京卫星导航中心,北京市 5128 信箱,100094

2 信息工程大学地理空间信息学院,郑州市科学大道 62 号,450001

**摘 要:** 电子倾角传感器普遍存在倾角漂移和输出数据跳变的现象,检测倾角传感器的倾角漂移规律和数据跳变的固有频率可以有效改善倾角传感器的数据质量。基于高分辨率电子倾角传感器 HRTM(very high resolution tiltmeter)的工作原理,分析影响倾角传感器倾角漂移的因素,设计检验倾角传感器输出数据固有频率的实验平台,提出基于傅里叶变换的固有频率检测方法。基于地下室恒温环境下采集的 10 h 数据进行实验,结果表明,该传感器的倾角输出数据存在明显的倾角漂移和输出数据跳变现象,倾角漂移与仪器内部温度高度线性相关, $x$  轴、 $y$  轴跳变的固有频率分别为 2.773 Hz 和 2.813 Hz。

**关键词:** 倾角传感器;物理钟摆;地震测量;倾角漂移;温度漂移;固有频率

**中图分类号:** P244;P315

**文献标识码:** A

精密倾角传感器广泛应用于地震地壳形变监测、地质工程测绘、机器人和电子设备平衡控制、农业机械水平控制及各类水平测量领域<sup>[1]</sup>,随着自动化和电子测量技术的发展,电子倾角传感器取代了过去简单的水泡倾角传感器。高分辨率电子倾角传感器 HRTM 是一款在地球物理和大地测量领域被广泛使用的精密电子倾角传感器。德国汉诺威大学研制的 TZK2-D 和瑞士苏黎世大学研制的 DIADEM 数字天顶仪都利用了 HRTM 的高分辨率和小型化结构,前者集成了两台 HRTM,用于仪器整平后测量垂直轴与物理铅垂方向之间的残余偏差,生成参考地球引力场。此外,中科院国家授时中心及北京天文台也利用 HRTM 测量倾角及其短时变化。

在电子倾角传感器的运用过程中,已有学者注意到漂移和固有频率现象的存在<sup>[2-8]</sup>,但这些研究均是针对基于液体摆的倾角传感器,缺乏基于固体摆的 HRTM 倾角传感器的相关研究。本文设计实验环境,采集多组 10 h 的 HRTM 数据,开展关于 HRTM 倾角漂移及固有频率跳变的验证和分析实验。一方面通过对传感器的结构进行研究,分析其产生固有频率跳变的原因;另一方面利

用对高精度转台的控制,记录提取 HRTM 固有频率的数据,验证 HRTM 的倾角漂移现象及其固有频率跳变的存在,并给出分析结果,为倾角传感器的进一步开发使用及数据处理提供依据。

## 1 倾角传感器设计

### 1.1 总体结构

HRTM 利用电容式位移传感器和物理钟摆作为检测单元,能够灵敏地检测到倾角变化,具有噪声低、精度高、敏感度高、结构紧凑等特点,但系统的测量范围较窄,通常只能覆盖  $\pm 2 \pm 0.3$  mrad。图 1 为 HRTM 的结构示意图,可以看出, HRTM 为三板电容器,摆锤位于 3 个电容器板之间。锁定放大器的电路为 30 kHz 左右的频率和 15 的增益操作,其优点在于能够选择性地放大有用信号,从而接近摆的布朗运动物理极限信噪比,造成的结果是,传感器中有用信号的最小倾斜度变化也能被显示出来。作为输出信号,倾斜传感器 HRTM 能提供大约  $\pm 6$  V 的模拟电压,这是电容器板之间摆锤位置的测量值,也是传感器倾斜度的量度。传感器由记录仪供电,工作电压为  $\pm 12$  V。分析 HRTM 倾角漂移的原因,主要是电

收稿日期:2021-09-23

项目来源:河南省青年人才托举工程项目(2022HYTP008)。

第一作者简介:何东汉,助理工程师,主要从事卫星大地测量研究,E-mail:827486202@qq.com。

通讯作者:郑勇,博士,教授,主要从事大地测量研究,E-mail:zhygj@126.com。

子元件的电流热效应造成倾角传感器测量电路所用元器件产生了温度漂移,从而导致信号发生漂移;其次,电容式倾角传感器的电容本身从理论上来说也存在电容的漂移<sup>[9]</sup>。

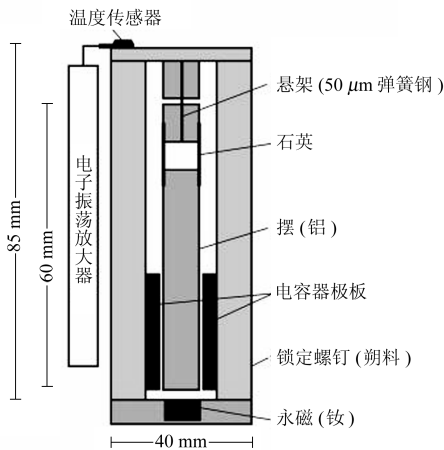


图 1 倾角传感器 HRTM 的设计原理  
Fig.1 Design principle of the tilt sensor HRTM

1.2 传感元件

倾角传感器 HRTM 拥有紧凑的金属外壳,其中铝摆作为重力敏感元件,通过 2 个铍铜制厚 50 μm、宽 3 mm 的板簧连接。操作所需电子元件安装在传感器侧面的电路板上,增加了紧凑性。两个塑料螺钉可以锁定摆锤以便运输,也可以机械地限制传感器的最大测量范围<sup>[10]</sup>。HRTM 的外部尺寸为 80 mm×60 mm×130 mm,分辨率优于 1 nrad,测量使用范围为-10~40 ℃,集成 24 位 ADC 和数据记录器,可以使用 RS232 或 RS485 接口传输数据,数据以 ASCII 格式输出,通过串口命令可以更改数据更新率。该型号倾角传感器还可以用于测量温度、压力、湿度等(表 1)。

表 1 电子倾角仪参数			
Tab.1 Electronic tilt meter parameters			
质量	0.6 kg	尺寸	80×60×130 mm
分辨率	<1 nrad	接口	RS232/RS485
测量范围	±2 mrad	电源	12 V/20 mA
采样率	10 Hz	传感器	压力、温度、湿度

1.3 固体摆倾角传感器的原理

固体摆由摆锤、摆线、支架组成,摆锤受到重力 G 和拉力 T 的作用,其合外力 F 为:

$$F = G\sin\theta$$
 (1)

式中,θ 为摆线与垂直方向的夹角。

物体做自由振动时,位移会随时间按正弦或余弦规律变化,振动的频率与初始条件无关,仅与系统的固有特性有关(如质量、形状、材质等),称为固有频率,也称自然频率,其对应周期称为固有周期。对固有频率进行研究有利于保证产品的稳定性<sup>[11]</sup>。由于倾角传感器是固体摆传感器,因此

在测量的数据中夹杂着其本身的固有频率。

2 实验及分析

采用 HRTM 进行倾角漂移和固有频率提取实验。倾角传感器的倾角漂移来源于仪器内部各种电子器件电流热效应的温度漂移,因此倾角传感器对温度非常敏感。为了找出倾角传感器受温度影响的范围、程度、规律和原因,需要保证足够长的实验时间来进行验证。对于固有频率的提取,叶上英等<sup>[6]</sup>提出了 2 种实验方法:第 1 种方法是采集合适的自然频率数据,通过频谱分析来提取固有频率;第 2 种方法是对倾角传感器进行激发实验,将传感器安放在摆动台上,通过不断变化的频率对倾角传感器进行激发。

由于 HRTM 的量程较短,为有效采集 HRTM 的倾角漂移现象及固有频率,实验将 HRTM 安装在高精度转台上,通过转台摆动刺激和提供不同的位姿来采集足够数量的倾角数据,以进行实验分析。

2.1 数据采集原理

在 HRTM 数据的“输出”菜单中,用户可以选择收集数据集的通道。根据子菜单“设置”中的首选项,数据通过两个串行接口中的一个或两个进行传输。此外,可以将测量数据集存储在内部闪存中,数据序列由其选择顺序决定,可以选择的输出数据包括:方位、温度、压力、湿度、电机电流、接地、电源电压、日期、时间及 HRTM 序列号。本实验采集了 HRTM 两轴的倾角、温度和时间信息(表 2)。

表 2 倾角传感器数据				
Tab.2 Inclination sensor data				
Date/Time	x/(°)	y/(°)	T <sub>x</sub> /℃	T <sub>y</sub> /℃
2020-12-16 00:11:03	7.899 9	-4.304 0	33.976 6	33.922 9
2020-12-16 00:11:04	7.929 2	-4.294 6	33.976 3	33.922 6
2020-12-16 00:11:05	7.889 3	-4.321 5	33.976 0	33.922 5
2020-12-16 00:11:06	7.855 4	-4.311 6	33.975 8	33.922 1
2020-12-16 00:11:07	7.908 3	-4.267 9	33.975 6	33.921 9

2.2 数据采集方法

为了排除环境温度对倾角传感器输出数据的影响,将 HRTM 放置于地下室恒温环境中,并安置在高精度转台上。由于 HRTM 的测量量程很小,需要调节转台位置使倾角传感器在其量程范围内。首先记录环境温度,并调整倾角传感器数据采集频率(10 Hz),将转台机械锁死,保持固定。然后记录两轴的倾角、温度等信息。数据采

集时长为 10 h。

设置 HRTM 采集参数,包括采集的内容(两轴的倾角、温度、日期、时刻)和数据采集频率。实验设置了多组采样频率,根据傅里叶变换及 HRTM 自身固有频率的范围,最终采用了每秒 10 个数据的采样频率进行分析。

2.3 数据分析

2.3.1 漂移现象

图 2 为 HRTM 采集的 10 h 倾角数据与时间的关系,图 3 为 HRTM 的温度漂移。由图 2 可见,HRTM 两轴均发生了漂移现象,HRTM 的输出倾角在初始阶段骤然下降,随后大幅度上升,最后趋于稳定。由图 3 可见,HRTM 两轴的温度持续下降,最终在 32.5℃ 附近稳定下来。由此可知,倾角传感器的漂移现象对其倾斜度测量的准确性产生了较大影响,尤其是在长期数据的采集过程中。

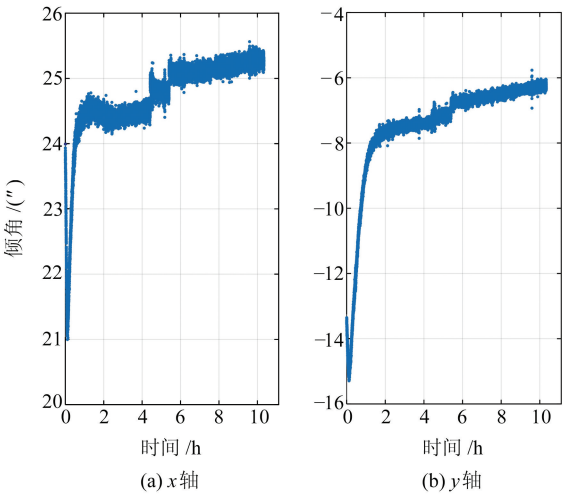


图 2 HRTM 两轴倾角随时间的变化  
Fig. 2 HRTM two-axis tilt angle as a function of time

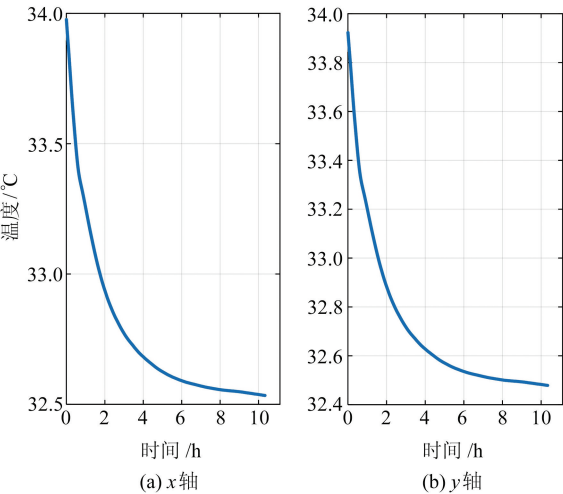


图 3 HRTM 两轴的温度漂移  
Fig. 3 Temperature drift in two-axis of HRTM

为了考察倾角与温度之间的相关性,引入 Pearson 相关系数进行衡量,其计算公式为:

$$r = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{N}}{\sqrt{\left(\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{N}\right)\left(\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{N}\right)}} \quad (2)$$

相关系数一般可以按照 3 个等级进行划分:  $|r| < 0.4$  为低度线性相关,  $0.4 \leq |r| < 0.7$  为显著线性相关,  $0.7 \leq |r| < 1$  为高度线性相关。调整转台的姿态,在不同的位置记录高分辨率电子倾角传感器 HRTM 的输出数据,可得到不同状态下 HRTM 两轴倾角与温度的相关系数。由表 3 可见,所有相关系数均处于 0.7~1.0 之间,由此可知,HRTM 的倾角与温度高度线性相关。

表 3 两轴倾角与温度的相关系数  
Tab. 3 Correlation coefficient of two-axis inclination angle and temperature

序号	x 轴	y 轴
1	0.862 6	0.946 1
2	0.958 2	0.806 8
3	0.782 8	0.725 1
均值	0.867 9	0.826 0

2.3.2 固定频率

图 4 为 HRTM 倾角数据的一次差分结果,可以反映 HRTM 输出的倾角数据跳变情况。由图可见,HRTM 输出的数据在短时间内不断跳变,且跳变幅度较小。考虑到 HRTM 的传感器是物理摆,根据文献[6]可知,物理摆自身的固定频率造成了上述跳变现象。

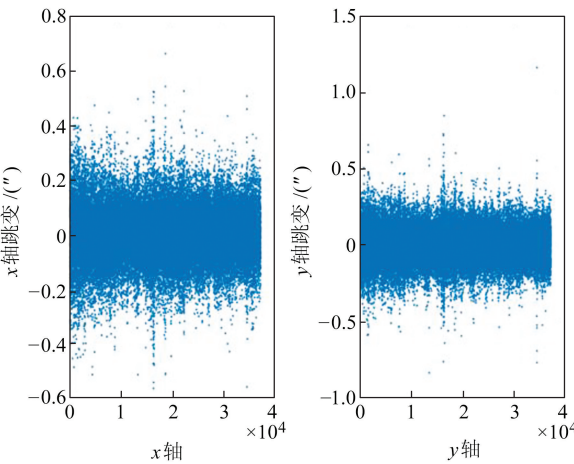


图 4 HRTM 两轴的倾角跳变  
Fig. 4 Inclination jump in two-axis of HRTM

表 4 为 HRTM 数据的跳变情况,由表可见,HRTM 跳变的均值都趋于 0,最大值为 1.164 1″。

由于 HRTM 的结构系统在受到外界刺激产生运动时,将按固有频率发生自然振动。为了确



定振动系统的固有频率,实验采集了数量足够且清晰可见的自然频率测量数据进行频率分析。傅里叶变换认为一个周期函数(信号)包含了多个频率的分量,任意函数  $f(t)$  都可通过多个周期函数(基函数)相加合成。图 5 为 HRTM 两轴的频谱,由图可见,HRTM 的  $x$  轴和  $y$  轴的固有频率分别为 2.773 Hz 和 2.813 Hz。

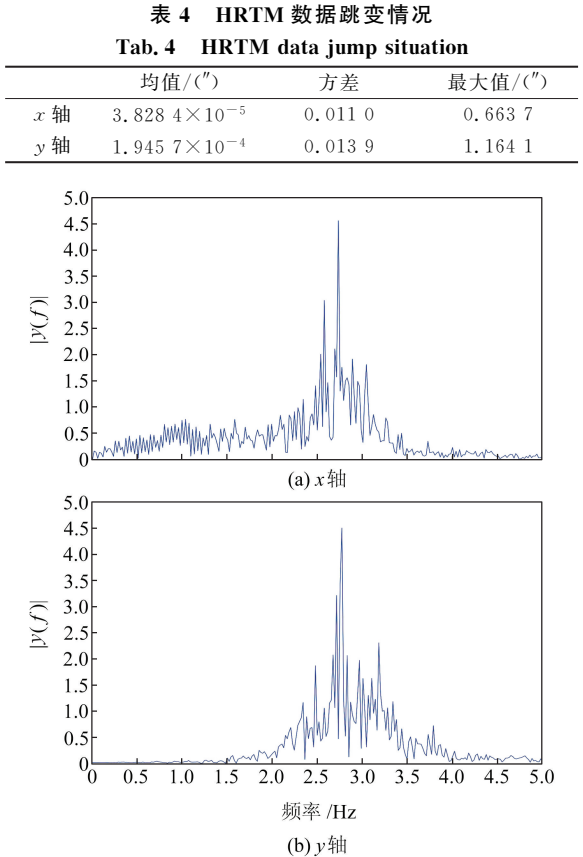


图 5 HRTM 两轴的固有频率  
Fig. 5 HRTM two-axis of intrinsic frequency

3 结 语

本文采用适用于 HRTM 的频谱分析方法,对一款高分辨率电子倾角传感器 HRTM 进行长期数据采集和分析。结果表明:

- 1)HRTM 具有较为明显的漂移现象,其  $x$  轴和  $y$  轴的温度在整个过程中变化了  $1.5^{\circ}\text{C}$ ,对应的倾角变化为  $4.5''$  和  $10''$ 。
- 2)HRTM 输出的倾角数据具有固有频率跳变, $x$  轴和  $y$  轴的固有频率分别为 2.773 Hz 和 2.813 Hz。
- 3)HRTM 两轴的倾角与仪器的内部温度高度线性相关。

由于倾角传感器输出的倾角数据除受温度的影响外,还会受到其他很多因素(如气压、湿度)的影响,后续可研究其他因素对倾角数据的干扰,以

对高分辨率电子倾角传感器 HRTM 的性能进行进一步研究。

参考文献

[1] 张维胜. 倾角传感器原理和发展[J]. 传感器世界,2002,8(8):18-21 (Zhang Weisheng. The Theory and Development of Tilt Sensor[J]. Sensor World, 2002, 8(8): 18-21)

[2] 狄樑,陆德明,丁建国,等. 气象因素对倾斜仪观测干扰特征分析[J]. 大地测量与地球动力学,2017,37(8):870-875 (Di Liang, Lu Deming, Ding Jianguo, et al. Analysis of Meteorological Factors on Tiltmeter Interference Characteristics[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2017, 37(8): 870-875)

[3] 王德利,卫建东,汪冲,等. 电子水平仪精度分析与测试[J]. 测绘工程,2018,27(1):68-72 (Wang Deli, Wei Jiandong, Wang Chong, et al. Analysis and Testing of Electronic Horizontal Instrument[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2018, 27(1): 68-72)

[4] 张起朋,李醒飞,谭文斌,等. 轴倾角传感器姿态角测量的建模与标定[J]. 机械科学与技术,2016,35(7):1 096-1 101 (Zhang Qipeng, Li Xingfei, Tan Wenbin, et al. Modeling and Calibration of Dual-Axis Tilt Sensor for Measuring Attitude Angles[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35(7): 1 096-1 101)

[5] 叶上英,王绥炳,蔡化焯. 温度对水平仪示值的影响[J]. 上海机械,1964,2(5):23-26 (Ye Shangying, Wang Suibing, Cai Huaxuan. The Effect of Temperature on the Value of the Level Meter[J]. Shanghai Machinery, 1964, 2(5): 23-26)

[6] 沈希忠,孙陈影. 振动信号经验模态分析和固有频率检测[J]. 噪声与振动控制,2018,38(增 2):406-410 (Shen Xizhong, Sun Chenying. Empirical Mode Analysis of Vibrating Signals and Measurement of Natural Frequencies[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(S2): 406-410)

[7] 司祯祯. 傅里叶变换与小波变换在信号去噪中的应用[J]. 电子设计工程,2011,19(4):155-157 (Si Zhenzhen. Application of Fourier Transform and Wavelet Transform in Signal De-Noiseing[J]. Electronic Design Engineering, 2011, 19(4): 155-157)

[8] 赵宏飞,马宏忠,李凯,等. 电力变压器油箱固有频率测试及其影响分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):165-169 (Zhao Hongfei, Ma Hongzhong, Li Kai, et al. Test and Analysis of Inherent Frequency of Power Transformer Tank[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 165-169)

[9] 马浩慧. 水平仪的发展及应用[J]. 上海计量测试,2017,44(4):42-44 (Ma Haohui. The Development and Application of Level Meter[J]. Shanghai Measurement and Testing, 2017, 44(4): 42-44)

[10] Welch D, Georgiou J, Christen J B. Fully Differential Current-Mode MEMS Dual-Axis Optical Inclination Sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 192: 133-139

[11] Zou X D, Thiruvengathanan P, Seshia A A. A High-Resolution Micro-Electro-Mechanical Resonant Tilt Sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 220: 168-177

# Study on Dip Drift and Natural Frequency of High-Resolution Electronic Inclination Sensor HRTM

HE Donghan<sup>1</sup> ZHENG Yong<sup>2</sup> LI Chonghui<sup>2</sup> CHEN Bing<sup>2</sup> CHEN Zhanglei<sup>2</sup>

1 Beijing Satellite Navigation Center, P O Box 5128, Beijing 100094, China

2 School of Surveying and Mapping, Information Engineering University, 62 Kexue Road, Zhengzhou 450001, China

**Abstract:** The electronic tilt sensor generally has a phenomenon of tilt drift and output data jump. Therefore, detecting the inclination drift law of the tilt sensor and the natural frequency of the data jump can effectively improve the data quality of the tilt sensor. Based on the working principle of high-resolution electronic tilt sensor HRTM, we analyze the factors affecting the tilt drift of the tilt sensor. We design the experimental platform for testing the natural frequency of the tilt sensor output data. We then propose a natural frequency detection method based on Fourier transform. Based on 10 h experimental data collected at constant temperature in the basement, the results show that the tilt output data of the sensor has obvious tilt drift and output data jump phenomenon, the tilt drift is highly linearly related to the internal temperature of the instrument, and the inherent frequency of the  $x$ -axis and  $y$ -axis jump is 2.773 Hz and 2.813 Hz, respectively.

**Key words:** inclination sensor; physical pendulum; seismic survey; inclination drift; temperature drift; natural frequency

**Foundation support:** Youth Talent Promotion Project of Henan Province, No. 2022HYTP008.

**About the first author:** HE Donghan, assistant engineer, majors in satellite geodesy, E-mail: 827486202@qq.com.

**Corresponding author:** ZHENG Yong, PhD, professor, majors in geodesy, E-mail: zhygj@126.com

(上接第 715 页)

# High-Precision Positioning Service Performance Analysis of Three BDS Ground-Based Augmentation Systems

SHI Junbo<sup>1</sup> OUYANG Chenhao<sup>1</sup> YUE Jinguang<sup>1</sup> CHEN Ming<sup>2</sup> GUO Jiming<sup>1</sup>

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China

2 National Geomatics Center of China, 28 West-Lianhuachi Road, Beijing 100830, China

**Abstract:** BDS Ground-based Augmentation System(GBAS) is an important infrastructure to promote high-precision BDS+ applications. For the first time, this paper studies the positioning performance of three nationwide GBASs: Qianxun, Sixents Technology and China Mobile. Through the analysis of two 8-9-hour observation sessions on July 21 and 22, 2021, we infer: 1) Both Qianxun SI and China Mobile support BDS-2 triple-frequency signals and BDS-3 dual-frequency signals (B1I and B3I), whereas Sixents Technology supports BDS-2 and BDS-3 dual-frequency signals(B1I and B3I); 2) All three BDS GBASs can provide 100% data availability; 3) Static baseline results show  $a < 2 \times 10^{-6}$  relative error of the closed loop with the three virtual base stations; 4) Single-epoch RTK results show that all three BDS GBAS can provide less than 3/9 mm horizontal/vertical precision. However, cm-dm level positioning bias exists among different BDS GBASs. As the result, it is not recommended to use inconsistent BDS GBASs in a single RTK task.

**Key words:** BDS ground-based augmentation system; Qianxun; Sixents Technology; China Mobile; network RTK

**Foundation support:** National Natural Science Foundation of China, No. 41804038; Open Fund of National Dam Safety Research Center, No. CX2020B04; Open Fund of Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, No. 20-02-04.

**About the first author:** SHI Junbo, PhD, associate professor, majors in GNSS high-precision positioning, E-mail: jbsi@sgg.whu.edu.cn.