

北斗区域星座对相对定位精度的影响分析

唐卫明¹ 崔健慧¹ 惠孟堂¹

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

摘 要:首先介绍了北斗系统的区域星座特点,然后从相对定位几何精度因子(relative dilution of precision, RDOP)和定位误差两方面进行精度分析,初步得出了北斗相对定位精度与区域星座的关系。理论分析和实验结果都表明,在我国范围内采用北斗卫星导航系统进行短基线相对定位时,其东西方向定位精度优于南北、高程方向;南北方向与高程方向的定位误差呈负相关;北斗相对定位精度随纬度增加而降低;与 GPS 相比,北斗相对定位在南北方向精度略差;载波相位相对定位精度受北斗区域星座的影响略大于单频伪距差分。
关键词:北斗卫星导航系统;区域星座;相对定位;RDOP;定位误差
中图法分类号:P228 **文献标志码:**A

截至 2012 年底,北斗卫星导航系统(BDS)已成功发射 16 颗卫星,并形成区域服务能力。中国卫星导航系统管理办公室于 2013 年 12 月 27 日公布了 BDS 公开服务性能规范(1.0 版)以及 BDS 空间信号接口控制文件(2.0 版)^[1]。许多学者对 BDS 的星座设计进行了研究,许其凤的研究表明,地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星和地球同步轨道(Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO)卫星对于区域卫星导航系统具有较高的利用率^[2];同时部分学者对 BDS 星座进行仿真分析,认为 BDS 系统的单点定位精度在我国范围内表现出南方优于北方、东部优于西部的特点^[3-6]。

本文通过对天津、武汉、广州地区的多组短基线观测数据进行解算,消除了基线长度对相对定位精度的影响,初步得出了 BDS 相对定位精度与区域星座的关系,同时比较了 BDS 区域星座对单频伪距差分和载波相位相对定位的影响差异。

1 BDS 区域星座现状

BDS 目前在轨工作卫星有 5 颗 GEO 卫星、5 颗 IGSO 卫星和 4 颗中圆地球轨道(medium earth orbit, MEO)卫星。GEO 卫星和 IGSO 卫星的轨道高度为 35 786 km,运行周期为 1 d。5 颗 IGSO 卫星的星下点轨迹构成了两个以赤道为对称轴的“8”

字形。MEO 卫星的轨道高度为 21 528 km,运行周期约为 12 h。北斗区域星座的星下点轨迹图如图 1 所示,图中给出了 1~10 号(1 d)和 13、14 号(<1 d)北斗卫星的星下点轨迹,并给出了天津、武汉和广州测站位置。

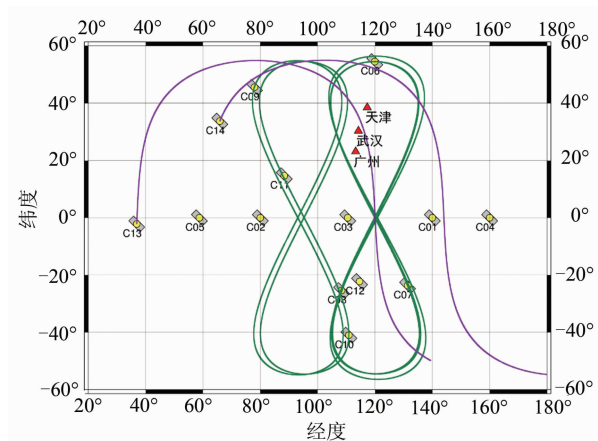


图 1 星下点轨迹示意图
Fig. 1 Track Chart of Satellite Bottom Point

在地球坐标系内,GEO 卫星是位于赤道上空的地球静止轨道卫星,可以增强卫星导航系统的区域服务能力。但其受导航定位所需星座几何构形的限制,不能单独构成区域系统的星座。文献[7]指出,采用 IGSO 卫星能充分利用 GEO 卫星的优点,同时可以保证对高纬度地区的覆盖。BDS 在现有星座下提供的公开服务区域包括 55°S~55°N,70°E~150°E 的大部分区域^[8]。中国虽然

在公开服务区域内,但由于 BDS 区域星座分布不均匀,因此 BDS 在我国范围内的定位精度呈现出一定的特点。

2 相对定位精度因子与定位误差

2.1 相对定位精度因子

在相对定位中,用载波和伪距观测值组成站间和星间双差观测值,并利用最小二乘法求解,得到对应的协因数矩阵 $Q_{\Delta X}$,具体表达式如下:

$$Q_{\Delta X} = \begin{bmatrix} q_{\Delta XX} & q_{\Delta XY} & q_{\Delta XZ} \\ q_{\Delta XY} & q_{\Delta YY} & q_{\Delta YZ} \\ q_{\Delta XZ} & q_{\Delta YZ} & q_{\Delta ZZ} \end{bmatrix} \quad (1)$$

再利用协方差传播定律将地心地固坐标系下的协因数矩阵 $Q_{\Delta X}$ 转换到站心直角坐标系下的协因数矩阵 $Q_{\Delta B}$:

$$Q_{\Delta B} = RQ_{\Delta X}R^T = \begin{bmatrix} q_{\Delta sm} & q_{\Delta se} & q_{\Delta su} \\ q_{\Delta se} & q_{\Delta ee} & q_{\Delta eu} \\ q_{\Delta su} & q_{\Delta eu} & q_{\Delta uu} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, R 为旋转矩阵。

相对定位几何精度因子(RDOP)与卫星的空间几何分布有关,且 RDOP 值在卫星个数逐渐增多且均匀分布时逐渐减小^[9]。同时,在卫星个数相同的情况下,卫星的几何分布对南北(N)、东西(E)、高程(U)三个方向上的精度因子的影响有所不同。通常情况下,RDOP 值要小于单点定位中的几何精度因子(dilution of precision, DOP)值^[10]。

2.2 定位误差

在观测精度确定的情况下,随着卫星个数的增多,卫星分布逐渐均匀,相对定位的定位误差也会逐渐减小。同时,相同卫星个数的不同分布情况也会对 N、E、U 三个方向的定位误差产生不同的影响。由于卫星均位于测站上方,对于 U 方向来说,卫星分布总是不对称的,许多系统误差难以消除,从而导致该方向定位精度普遍较差。对于平面定位误差而言,其 N 方向和 E 方向的误差大小与卫星的几何分布密切相关。当卫星的几何条件较好时,N、E 方向的定位误差接近一致;而几何条件较

差时,N、E 方向的定位误差相差较大。

3 算例分析

3.1 数据介绍

本文选择了位于中国天津(天津地区进行了两个时段的观测,分别表示为天津 1 和天津 2)、武汉、广州 3 个地区的测站所观测的 BDS/GPS 双系统短基线(<50 m)数据,取约 1.5 h 的数据,采样间隔为 1 s。然后依次对这三个地区的 BDS、GPS 观测数据独立进行基线解算(包括载波相位相对定位和单频伪距差分两种解算模式),并从基线解算结果和 RDOP 值两方面进行了精度分析。在 BDS 和 GPS 独立基线解算时,基准站采用相同的参考坐标,参考真值为 GPS 载波相位相对定位所得流动站坐标。

3.2 解算结果与分析

表 1 给出了流动站坐标在各个方向的 RMS。可以看出,采用 BDS 进行定位时,E 方向 RMS 值最小,其次为 N、U 方向;采用 GPS 进行定位时,N、E 方向 RMS 值相当;BDS 定位结果的 E 方向 RMS 值甚至优于 GPS。同时可以发现,当纬度逐渐变低时,BDS 定位结果的 RMS 会逐渐变好并接近 GPS。在天津算例中,BDS 和 GPS 载波相位相对定位的流动站 RMS 在 N、E、U 方向上的差异明显大于单频伪距差分的结果。

图 2 给出了流动站的定位偏差时间序列图。可以发现,对于载波相位相对定位而言,武汉、广州算例 3 个方向上的定位误差均优于天津算例,且武汉、广州算例的 N、E 方向误差可优于 0.01 m;对于单频伪距差分定位而言,N 方向定位误差随纬度降低而减小的趋势仍然存在,E、U 方向定位误差随纬度变化不大,且多数历元的定位误差优于 2 m。这是因为武汉和广州地区的纬度低于天津地区,随着纬度的降低,可视 BDS 卫星几何图形强度逐渐增强,定位误差逐渐减小。但同时由于单频伪距差分精度的限制,其定位误差随纬度变化的特性并不十分明显。

表 1 流动站坐标 RMS 分布/m

Tab. 1 RMS's Distribution of Rover Coordinates/m

测站	载波相位相对定位						单频伪距差分					
	BDS			GPS			BDS			GPS		
	N	E	U	N	E	U	N	E	U	N	E	U
天津 1	0.020	0.003	0.018	0.013	0.010	0.022	1.333	0.247	0.658	1.113	0.695	1.958
天津 2	0.036	0.008	0.025	0.014	0.008	0.017	1.079	0.387	0.986	1.025	0.573	1.367
武汉	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.006	0.191	0.148	0.475	0.281	0.278	0.730
广州	0.002	0.003	0.007	0.004	0.003	0.007	0.572	0.673	2.187	0.485	0.396	0.769

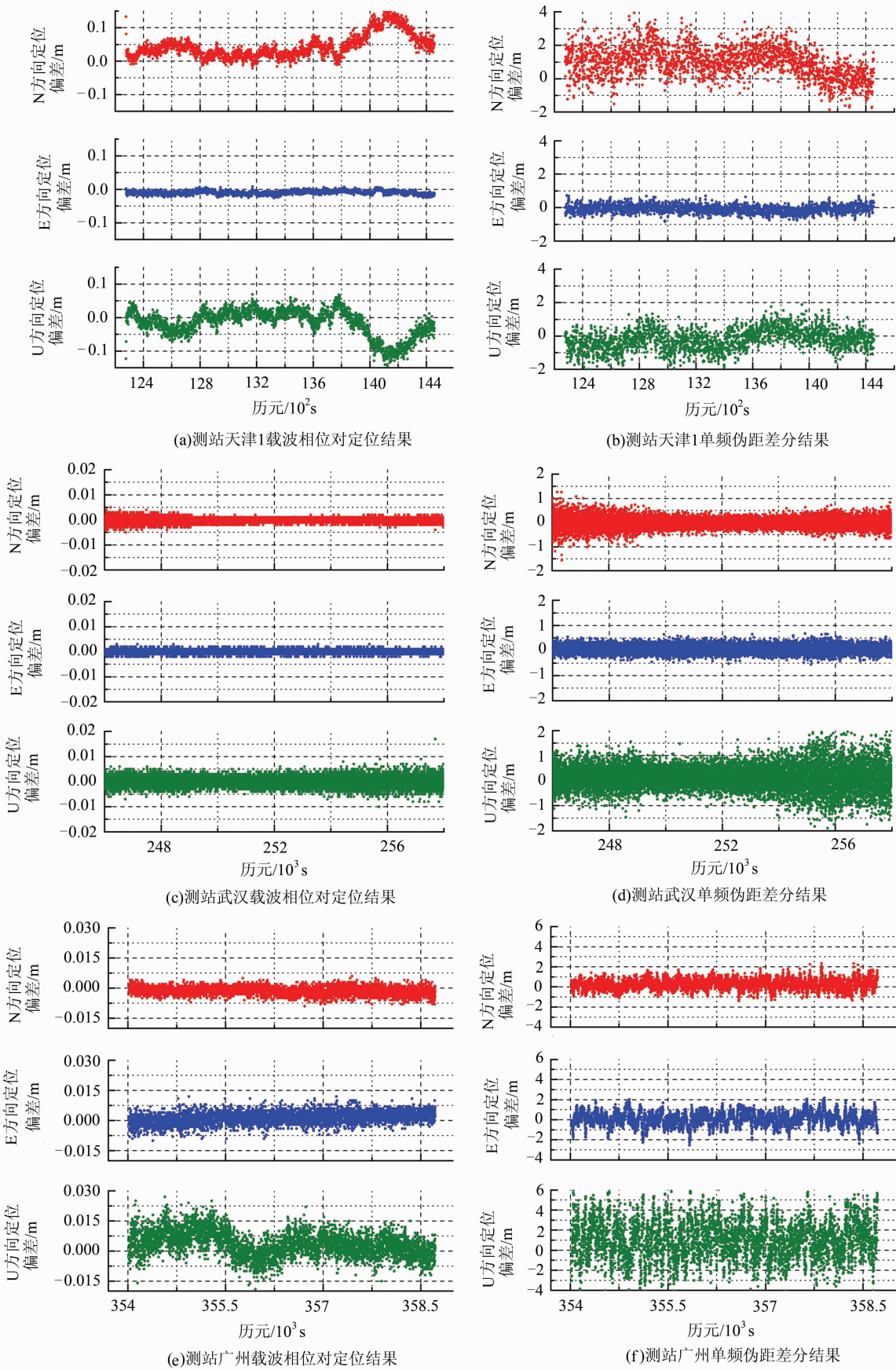


图 2 流动站定位偏差在 N、E、U 三个方向上的时间序列图

Fig. 2 Time Sequence Diagram of Rover Positioning Errors in North, East and Up Directions

此外,图 2 中天津算例的 N、U 方向误差变化表现出明显的负相关性。由解算结果统计得到 N、U 方向定位误差的相关系数,并在表 2 中给出。4 个算例的相关系数均为负,且负相关程度随纬度的降低而减小。这是因为 BDS 的 GEO 卫星始终静止在赤道上方,而我国又位于北半球,测距误差在 N 方向和 U 方向的投影符号相反,所以 N、U 方向定位误差呈负相关;同时,随着纬度的降低,测站北侧天空中的可视卫星数增多,且南侧天空中卫星的测距误差在 N 方向上的投影数值变小,提高了 N 方向的定位精度,从而减弱了由于投影符号相反而

造成的 N、U 方向误差变化的负相关性。

图 3 给出了由载波相位相对定位求得的天津测站第一时段和广州测站的 RDOP 分布情况。图 3 中,RDOP 随测站纬度的降低而减小,同时,天津算例中 BDS 系统的 RDOP 值在 N、E 方向上的差异明显大于 GPS 系统。这表明 BDS 区域星座的几何构形差于 GPS 星座的几何构形,且 BDS 卫星在 N、E 方向的分布不均匀。

图 4 给出了 3 个测站的 BDS 和 GPS 流动站定位结果的平面分布情况,图 4 中仅保留了坐标的个位和小数部分,去掉了公共的整数部分。在

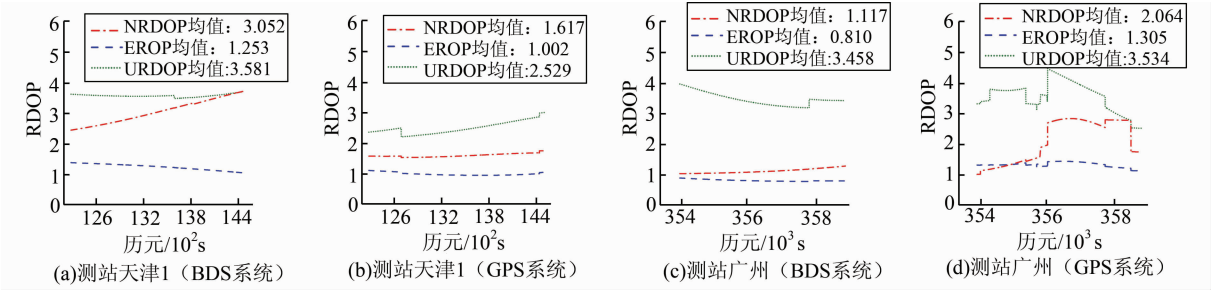


图 3 天津、广州测站 RDOP

Fig. 3 RDOP in Tianjin and Guangzhou

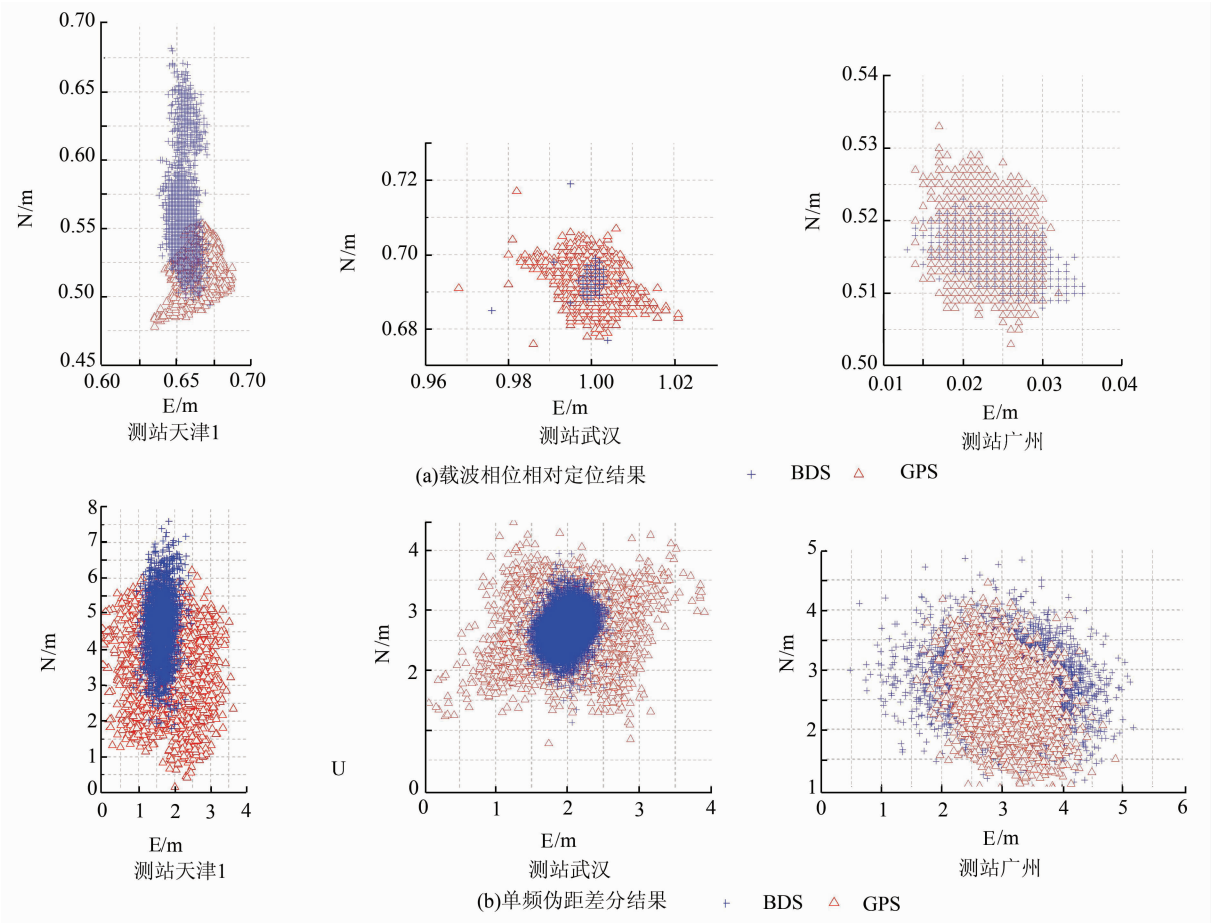


图 4 定位结果平面分布图

Fig. 4 Horizontal Distributions of Positioning Results

表 2 N-U 方向定位误差相关系数

Tab. 2 Correlation Coefficient of N-U Direction's Positioning Errors

测站	相关系数	
	载波相位相对定位	单频伪距差分
天津 1	-0.613	-0.678
天津 2	-0.793	-0.685
武汉	-0.497	-0.478
广州	-0.012	-0.156

天津算例中,BDS 的定位结果在 N 方向上的分布范围明显大于 GPS。在武汉、广州算例中,BDS 定位结果在 N、E 方向上的分布已较为均匀,其定位结果甚至要优于 GPS。这是因为随着纬度的降低,BDS 可视卫星数增多(接近于 GPS 的可视卫星数),且几何构形逐渐变好,因此 N、E 方向定位精度相近且接近于 GPS 的定位精度。

4 结 语

由于 BDS 区域星座中的 5 颗 GEO 卫星固定的线状分布和 IGSO 卫星在南北半球的对称运动特点,在我国范围内采用 BDS 系统进行短基线相对定位具有如下特点。① BDS 相对定位精度随纬度升高而降低,且东西方向定位精度优于南北方向;② 南北方向与高程方向定位误差的变化呈负相关;③ 在我国北部地区进行相对定位时,其东西方向定位精度明显优于南北、高程方向定位精度,而在我国中南部进行相对定位时,东西、南北方向定位精度相当,高程方向定位精度略差;④ 在我国中北部地区进行相对定位时,载波相位相对定位受 BDS 区域星座的影响大于单频伪距差分;⑤ NRDOP 随纬度的降低而减小;⑥ BDS 相对定位精度在东西方向上与 GPS 相当,在南北、高程方向上比 GPS 略差。

参 考 文 献

[1] China Satellite Navigation Office. Report on the Development of BeiDou Navigation Satellite System (Version2.2) [R]. Beijing: China Satellite Navigation Office, 2013(中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统发展报告(2.2 版)[R]. 北京:中国卫星导航系统管理办公室, 2013)

[2] Xu Qifeng. Satellite Constellation of Local Navigation System[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2001, 10(1): 1-5(许其凤. 区域卫星导航系统的卫星星座[J]. 测绘工程, 2001, 10(1): 1-5)

[3] Zhai Wei, Zhang Guozhu, Yong Shaowei. Performance Analysis of Service Volume of COMPASS Navigation Satellite System Based on Basic Constellation [J]. *GNSS World of China*, 2011, 4: 56-60(翟桅, 张国柱, 雍少为. 基本星座下北斗卫星导航系统服务性能分析[J]. 全球定位系统, 2011, 4: 56-60)

[4] Tang Chengpan, Hu Xiaogong, Zhou Shanshi, et al. A Study on Performance and Characteristic of Positioning and Timing with COMPASS Regional Constellation[C]. CSNC2013, Wuhan, 2013(唐成盼, 胡小工, 周善石, 等. COMPASS 区域星座下定位授时特征的分析[C]. 第四届中国卫星导航学术年会, 武汉, 2013)

[5] Zhou Shanshi, Cao Yueling, Zhou Jianhua, et al. Positioning Accuracy Assessment of the 4GEO/5IGSO/2MEO Constellation of COMPASS[J]. *Science China: Physics, Mechanics & Astronomy*, 2012, 55(12): 2 290-2 299

[6] Montenbruk O, Hauschild A, Steigenberger P, et al. Initial Assessment of the COMPASS/BeiDou2 Regional Navigation Satellite System[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(2): 211-222

[7] Liu Genyou, Hao Xiaoguang, Chen Xiaofeng, et al. On Constellation Scheme of 2nd Generation of China Satellite Navigation System for Northward Extending Coverage Range[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2007, 27(5): 115-118(刘根友, 郝晓光, 陈晓峰, 等. 对我国二代卫星导航系统覆盖范围向北扩展星座方案的探讨[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(5): 115-118)

[8] China Satellite Navigation Office. Performance Specifications of BeiDou Navigation Satellite System Open Service(Version1.0) [R]. Beijing: China Satellite Navigation Office, 2013(中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统公开服务性能规范(1.0 版)[R]. 北京:中国卫星导航系统管理办公室, 2013)

[9] Wang Jun, Zhang Huahai. The Influence of Satellite Geometric Distribution on the GPS Relative Positioning Accuracy[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2004, 29(2): 53-54(王军, 张华海. 卫星几何分布对 GPS 相对定位精度的影响[J]. 测绘科学, 2004, 29(2): 53-54)

[10] Yao Jing, Nie Pengcheng, Yi Dongyun, et al. Dilution of Precision of Relative Positioning for Formation Flying Satellites Using GNSS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(1): 92-96(姚静, 聂鹏程, 易东云, 等. 基于组合卫星导航系统的编队卫星分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(1): 92-96)

Analysis of the Impact of BeiDou Regional Constellation on Relative Positioning Accuracy

TANG Weiming¹ CUI Jianhui¹ HUI Mengtang¹

1 Research Center of GNSS, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: The current constellation of BeiDou Navigation Satellite System (BDS) is described and the relationship between the accuracy of BDS relative positioning and its regional constellation characteristic is discussed in relation to the RDOP (Relative Dilution of Precision) and positioning errors. Experiments were conducted, the results obtained when using BDS relative positioning on short baseline in our country show that : (1) the accuracy of BDS relative positioning is better in the east-west direction than in the south-north direction and the elevation direction; (2) positioning errors in the south-north direction and elevation direction are negatively correlated; (3)the improvement of positioning accuracy reduces as the latitude increases; (4)BDS positioning accuracy is slightly less than GPS in the south-north direction; (5)the impact of BeiDou regional constellation on carrier phase relative positioning accuracy is slightly larger than the single-frequency pseudo-range differential.

Key words: BeiDou Navigation Satellite System; regional constellation; relative positioning; RDOP; positioning error

First author: TANG Weiming, PhD, professor. His research fields include application development and system integration of GNSS real-time kinematic positioning. He has obtained some research achievements in GNSS network RTK, precise point positioning, and kinematic positioning algorithm research and software development. E-mail: wmtang@whu.edu.cn.

Foundation support: The Scientific Research Foundation for the Ministry of Water Resources of China in the Public Welfare, No. 201401072; the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program), No. 2014AA123101/01.

.....

(上接第 1106 页)

on GRACE satellite data from 2003 to 2012 using the least square method. This model is composed of annual and semi-annual trends and periodic terms ,usually of each spherical harmonic coefficient. Besides those empirical parameters, an acceleration term, tidal aliasing error, and large earthquakes are taken into account. Acceleration is a modification to linear trend to detect and express more details in signals. Tidal aliasing error is the residual error in a tide model that must be carefully removed from GRACE solutions; a co-seismic jump in the gravity field may disturb the secular trend. An evaluation of IGG-TVG2013 solutions and corresponding GRACE solutions shows that the RMSE value in 92% of global grids was less than one ugal. Extrapolation results for the first half of 2013 using the IGG-TVG2013 model shows this model has good potential in short-term forecasting. We concluded that the IGG-TVG2103 model can effectively describe the time-space variability of gravity field .

Key words: GRACE; time-variable unified gravity filed; least square fitting; spherical harmonic coefficients; acceleration; tide model error; great earthquake

First author: TU Yi, PhD candidate, specializes in applications of GRACE time-variable gravity field. E-mail: tuyi0126@163.com

Foundation support: The National Key Basic Research Program of China, No. 2013CB733301; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41274025, 41174064.