

# BDS、GPS 及其组合系统伪距单点定位精度分析

陈浩<sup>1,3</sup>, 许长辉<sup>2</sup>, 高井祥<sup>1</sup>, 宋现锋<sup>3</sup>, 袁林山<sup>4</sup>

(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国测绘科学研究院, 北京 100830;  
3. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049; 4. 江苏省有色金属华东地质勘查局, 江苏 南京 210007)

**摘要:**为研究北斗卫星导航系统(BDS)和 BDS/GPS 组合系统的定位性能,根据实测数据对比分析了 GPS、BDS 及 BDS/GPS 组合系统的可见卫星数、空间位置精度因子(PDOP)和伪距定位结果,以及 BDS 地球静止轨道(GEO)和中圆轨道/倾斜轨道(MEO/IGSO)卫星的定位结果;针对 BDS 与 GPS 观测值之间的精度差异,分别采用等权模型、高度角模型和 Helmert 模型研究组合系统的最优随机模型。研究表明:组合系统卫星的空间几何分布优于单系统;BDS 定位的平面精度低于 GPS,高程精度高于 GPS,而 BDS/GPS 组合系统平面和三维精度高于单个系统;Helmert 验后估计模型能够提高 BDS/GPS 组合定位的高程和三维定位精度。

**关键词:**北斗卫星导航系统;全球定位系统;伪距单点定位;随机模型

中图分类号:P221.48

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)02-0072-07

## Precision Analysis of Pseudorange Single Point Positioning by BDS, GPS and Combined BDS/GPS

Chen Hao<sup>1,3</sup>, Xu Changhui<sup>2</sup>, Gao Jingxiang<sup>1</sup>, Song Xianfeng<sup>3</sup>, Yuan Linshan<sup>4</sup>

(1. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. Chinese Academy of Surveying & Mapping, Beijing 100830, China;  
3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;  
4. East China Mineral Exploration & Development Bureau for Non-Ferrous Metals, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

**Abstract:** To analyze the performance of Beidou navigation satellite System (BDS) and combined BDS/GPS, the number of visible satellites, PDOP and SPP solutions by BDS, GPS and BDS/GPS as well as the SPP solution of GEO and MEO/IGSO by BDS were investigated based on the real-time tracking data. According to the precision difference in the observed values by BDS and GPS, equal weight, elevation and Helmert models were adopted respectively to find out the optimal stochastic models. The results show that the geometric distribution of combined BDS/GPS is better than that of any single system. Although horizontal precision of BDS is lower than that of GPS, height precision of BDS is higher than that of GPS. Both horizontal and three dimensional precisions of combined BDS/GPS are higher than those of either BDS or GPS. Relative to the other two models, Helmert model can improve height and three dimensional precision of positioning by combined BDS/GPS.

**Key words:** Beidou navigation satellite system; global positioning system; pseudorange single point positioning; stochastic model

BDS(北斗卫星导航系统, Beidou navigation system)完成区域组网后,伪距单点定位(pseudorange single point positioning, SPP)的精度已达到米级<sup>[1]</sup>,若采用 RTK(实时动态测量技术, real time kinematic)则可

收稿日期:2013-10-11

基金项目:国家自然科学基金项目(40774010);中国博士后科学基金面上项目(2013M530707);中国科学院大学校长基金项目;江苏省资源环境信息工程重点实验室开放基金项目(JS201304)

作者简介:陈浩(1987—),男,江苏淮安人,硕士研究生,主要从事 GNSS 精密导航定位方面的研究。

E-mail:chenhao1215@126.com

提高至厘米级,与GPS(全球定位系统,global positioning system)相比没有明显差别,且相关研究表明,BDS模糊度解算的成功率及可靠性均高于GPS<sup>[2-5]</sup>。

单系统定位的可靠性较低,甚至会出现精度很差或不能定位的现象。若采用BDS/GPS组合系统,将使可见卫星数增加一倍左右<sup>[1]</sup>,可解决单一系统卫星数不足的问题;同时能够增强卫星空间分布的几何结构,有效避免法方程系数矩阵的病态,增强定位可靠性、可用性及精度<sup>[6-7]</sup>。

由于受到卫星和接收机钟差、大气延迟误差、多路径效应等误差的影响,卫星观测值精度在测站间、卫星间和历元间存在差异<sup>[8]</sup>,采用最小二乘解算时需要观测值定权,即确定合理的随机模型。BDS存在三种不同类型的轨道,且轨道高度和倾角差别明显,因此在GPS定位中采用较多的等权、高度角、验后估计等模型在BDS和BDS/GPS组合系统上的精度如何,需要进一步论证。本文首先介绍BDS、GPS及其组合系统的观测模型,讨论组合随机模型的确定方法,然后通过实测数据研究GPS、BDS和BDS/GPS组合系统的可见卫星数、PDOP值以及采用不同随机模型所获得的伪距单点定位精度。

## 1 观测方程

对于单一GPS或BDS系统,其伪距观测方程相同,均可表示为<sup>[9]</sup>:

$$P_j^k(t) = \rho_j^k(t) + c\delta_j(t) - c\delta^k(t) + I_j^k(t) + T_j^k(t) + \epsilon_j^k(t) \quad (1)$$

其中: $j$ 表示接收机; $k$ 表示GPS或BDS卫星; $P_j^k$ 是卫星 $k$ 与接收机 $j$ 之间的伪距观测值,

$\rho_j^k = \sqrt{(X^k - X_j)^2 + (Y^k - Y_j)^2 + (Z^k - Z_j)^2}$ 是接收机 $j$ 到卫星 $k$ 的几何距离, $(X^k, Y^k, Z^k)$ 是根据卫星星历计算出的卫星 $k$ 坐标, $(X_j, Y_j, Z_j)$ 是接收机的坐标, $\delta_j, \delta^k$ 分别是接收机和卫星钟差改正, $I_j^k, T_j^k$ 分别是电离层和对流层延迟改正, $\epsilon_j^k$ 是其他项改正。

GPS卫星均匀分布在6个MEO平面内,所有卫星坐标计算方法相同;BDS卫星则分布于GEO,IGSO和MEO三个轨道平面内,IGSO和MEO卫星坐标计算方法一致,而计算GEO卫星坐标时,需先计算卫星的惯性系坐标,再转换到CGCS2000坐标。

GPS和BDS时间和坐标框架均不同<sup>[10]</sup>,组合系统定位时,首先要考虑框架的转换。GPST和BDT的周秒间存在14s差异;CGCS2000与GPS坐标框架WGS-84(G1150)相容,同一点在两个坐标系统下的坐标差异可以忽略<sup>[11]</sup>。组合系统观测方程可表示为:

$$\begin{aligned} P_j^{G,k}(t) &= \rho_j^{G,k}(t) + c\delta_j^G(t) - c\delta^{G,k}(t) + I_j^{G,k}(t) + T_j^{G,k}(t) + \epsilon_j^{G,k}(t) \\ P_j^{C,k}(t) &= \rho_j^{C,k}(t) + c\delta_j^C(t) + c\delta_{j,\text{sys}}^C(t) - c\delta^{C,k}(t) + I_j^{C,k}(t) + T_j^{C,k}(t) + \epsilon_j^{C,k}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

其中:上标G,C分别表示GPS卫星和BDS卫星; $\delta_{j,\text{sys}}^C$ 是接收机钟差相对于GPST和BDT的时间系统偏差。BDS/GPS系统组合定位时,需要估计五个参数: $X_j, Y_j, Z_j, \delta_j, \delta_{j,\text{sys}}^C$ 。

## 2 组合系统加权方案优选

随机模型的建立依赖于对观测值精度的确定,其合理性直接影响解算结果的精度<sup>[12]</sup>。单系统常采用等权、高度角和验后估计模型,组合系统误差较单系统复杂,更应对观测值合理定权。以下分别就三种模型在组合系统单点定位中的应用进行讨论。

### 2.1 等权模型

等权模型不考虑观测值之间的相关性,并假设BDS和GPS系统所有卫星到测站的观测值精度相同,模型虽然简单,但与实际情况不符。

### 2.2 高度角模型

卫星高度角与观测值的精度存在直接联系,卫星高度角越低,其信号传播路径越长,大气延迟影响和多路径效应越严重<sup>[12]</sup>。高度角模型基于卫星高度角表示观测值方差<sup>[13]</sup>,常用三角函数、指数函数等模型。本文采用正弦函数模型:

$$\sigma_i^2 = \sigma_{0,i}^2 / \sin^2(e_i) \quad (3)$$

其中, $e_i$ 是卫星高度角, $\sigma_{0,i}$ ( $i=G,C$ )是单位权方差。对于单系统,其值通常等于1或者等于测距误差。GPS

的码率为 1.023 MHz,码测距误差约为 2.93 m,BDS 的码率为 2.046 MHz,码测距误差是 GPS 的一半。因此,对于 BDS/GPS 组合系统,可取  $\sigma_{0,C}$  和  $\sigma_{0,G}$  比值为 2 : 1。

### 2.3 Helmert 模型

Helmert 模型首先对组合系统进行预平差,利用获得的改正数估计观测值方差。由于所获得的方差是对不同系统卫星观测值误差的无偏估计,模型可靠性更高<sup>[8,14-15]</sup>,估计方法可按以下步骤进行:

- 1) 假设 BDS 与 GPS 观测值独立,根据经验分别对 GPS,BDS 所有卫星观测值定初权  $P_i$ ;
- 2) 利用最小二乘原理解算得到观测值改正数  $V_i$ ,计算出  $V_i^T P_i V_i$ ,并按下式计算各观测值方差:

$$\begin{bmatrix} \hat{\sigma}_G^2 \\ \hat{\sigma}_C^2 \end{bmatrix} = S^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_G^T P_G V_G \\ V_C^T P_C V_C \end{bmatrix};$$

$$S = \begin{bmatrix} n_G - 2\text{tr}(N^{-1}N_G) + \text{tr}(N^{-1}N_G)^2 & \text{tr}(N^{-1}N_G N^{-1}N_C) \\ \text{tr}(N^{-1}N_G N^{-1}N_C) & n_C - 2\text{tr}(N^{-1}N_C) + \text{tr}(N^{-1}N_C)^2 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

- 3) 利用得到的观测值方差,对观测值重新定权:

$$\hat{P}_i = \frac{1}{\hat{\sigma}_i^2 P_i^{-1}}. \quad (5)$$

4) 重复运算过程 2) 和 3),当迭代前后方差值小于某一微小量  $\epsilon_0$  (可取 0.01) 时,终止迭代,结果即为组合系统中各卫星观测值方差。

## 3 实验分析

实验采用 NovAtel BDS/GPS 双模接收机进行数据采集,观测地点为上海,观测时段为 2013 年 1 月 17 日 9:35—24:00,采样周期为 30 s,共有 1 730 个历元的数据。卫星截止高度角设为  $10^\circ$ ,考虑地球旋转和相对论效应改正。对流层延迟采用改进的 Hopfield 模型改正。

### 3.1 卫星可见性及 PDOP 值分析

图 1 给出了观测时段内 BDS,GPS 及 BDS/GPS 组合系统的可见卫星数。在观测时段内,GPS 可见卫星为 6~11 颗,BDS 可见卫星为 8~12 颗,呈周期性增减变化,是 BDS 系统包含 5 颗 IGSO 卫星所致;BDS/GPS 组合系统的可见卫星数达 16~21 颗,比单系统的可用观测值数明显增加。

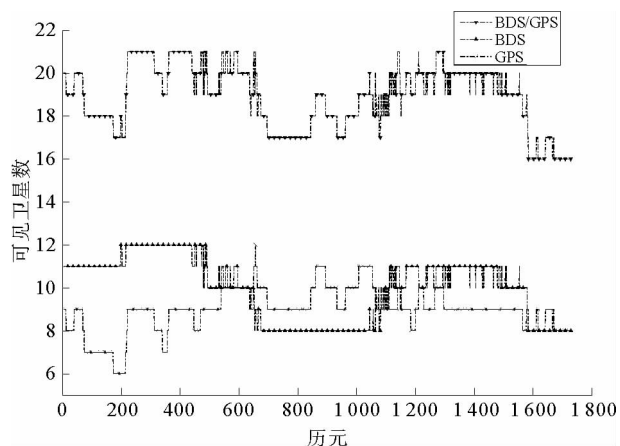


图 1 可见卫星数

Fig. 1 Visible satellites

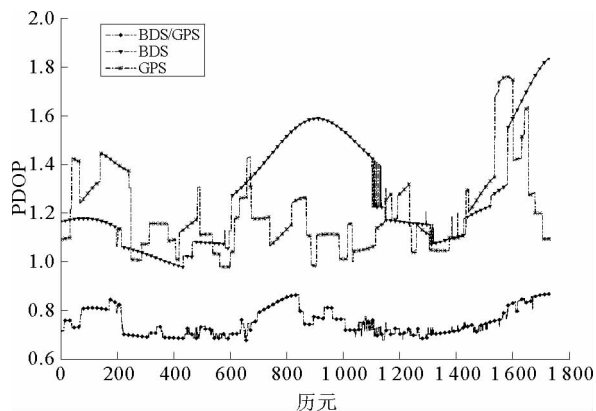


图 2 PDOP 值

Fig. 2 Position Dilution of Precision

BDS 卫星 PDOP(空间位置精度因子, position dilution of precision) 值呈周期性分布,将图 2 与图 1 对比,PDOP 值与可见卫星数成反相关。BDS 卫星 PDOP 值中间有一段呈弧线状,是因为这段时间的定位卫星主要是 GEO 卫星。表 1 统计了观测时段内各系统得到的 PDOP 平均值,结果表明,测站处 BDS 的 PDOP 值略低于 GPS,预计 BDS 系统完全组网后,这一现象将会得到改善,BDS/GPS 组合系统的 PDOP 值比单系

统降低了约 37%，说明组合系统卫星的空间几何分布优于单系统，有助于提高定位精度。

### 3.2 定位研究与分析

利用高精度基线解算软件 GAMIT/GLOBK，将从接收机输出文件中提取出的 GPS 观测值(包括 L1 和 L2 频点)与 BJFS、SHAO、WUHN、CHAN 站对应天的数据联合解算，获得的测站高精度坐标(mm 级)作为参考真值。以下实验结果均为采用单频伪距观测值(GPS 采用 L1 频点，BDS 采用 B1 频点)，并将结果与参考真值对比得到。

#### 3.2.1 基于 BDS 不同轨道卫星的定位实验

将卫星分成 GEO、MEO/IGSO 两组，进行单点定位实验，得到  $E, N, U$  方向结果与参考真值之间差值  $dE, dN, dU$ 。

表 1 PDOP 平均值

Tab.1 Mean value of PDOP

	GPS	BDS	BDS/GPS
PDOP	1.2	1.3	0.8

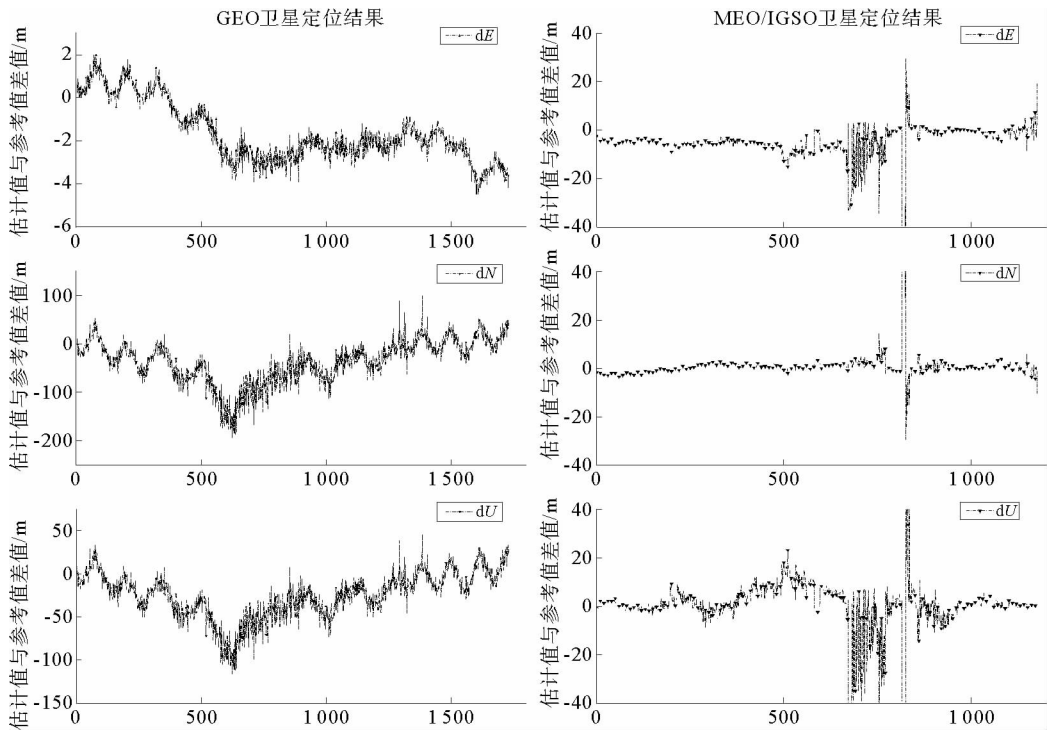


图 3 GEO、MEO/IGSO 卫星定位结果

Fig.3 SPP solutions of GEO and MEO/IGSO satellite

利用 GEO 卫星定位，定位结果的  $E$  方向精度较高，但是  $N$  方向和  $U$  方向精度很差。利用 IGSO/MEO 卫星定位，有 547 个历元的可见卫星数小于 4 颗，占总观测历元数的 32%，说明还不具备足够的定位能力；当卫星数足够且空间分布较好时，其定位精度比 GEO 卫星解算精度高；当卫星空间分布较差时，法方程系数矩阵出现奇异，导致解算结果发散(图 3)。虽然两种卫星解算时由于卫星几何条件或矩阵奇异导致解算存在发散，两种类型卫星同时解算能改善几何条件和解决奇异问题<sup>[16]</sup>。图 4 统计了定位结果 RMS(均方根, root mean

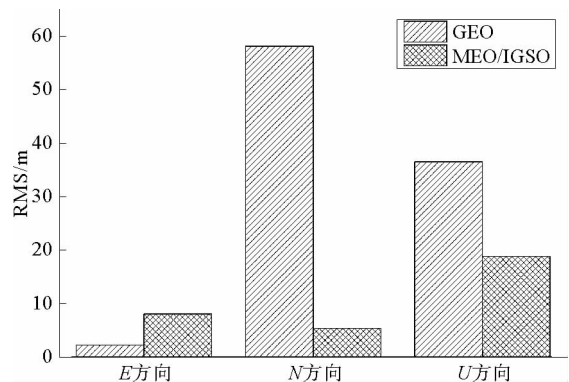


图 4 GEO、MEO/IGSO 卫星定位精度

Fig.4 RMS of solutions of GEO and MEO/IGSO satellites

square)值,其中,MEO/IGSO 结果剔除了卫星不足 4 颗以及法方程系数矩阵奇异历元解。结果表明:GEO 定位的  $E$  方向精度达到了 2.1 m, $N$  方向和  $U$  方向精度则较低,分别为 58 m 和 36 m,MEO/IGSO 定位结果整体优于 GEO。分析可知,引起这一结果的主要原因是 GEO 卫星全部位于赤道平面内,卫星几何图形分布极差。

### 3.2.2 BDS、GPS 及其组合系统定位实验

对单系统定位,随机模型依次采用等权模型、高度角模型;对于组合系统,增加 Helmert 模型。图 5 是三种系统不同随机模型得到的  $E, N, U$  方向坐标值与参考真值之间差值。可以看出,单系统三个方向的定位结果无论是在真值附近的抖动还是历元间的抖动都比较明显,组合定位可有效地削弱这两种抖动,使结果更加平滑;GPS 坐标值出现数次较明显的抖动,基本上都是由可见卫星的突然升降导致,BDS 可见卫星多于 GPS,具有更多的多余观测数,受卫星升降的影响较小;BDS 的  $E, N$  方向定位结果在真值附近的变化周期与 PODP 值变化周期一致。

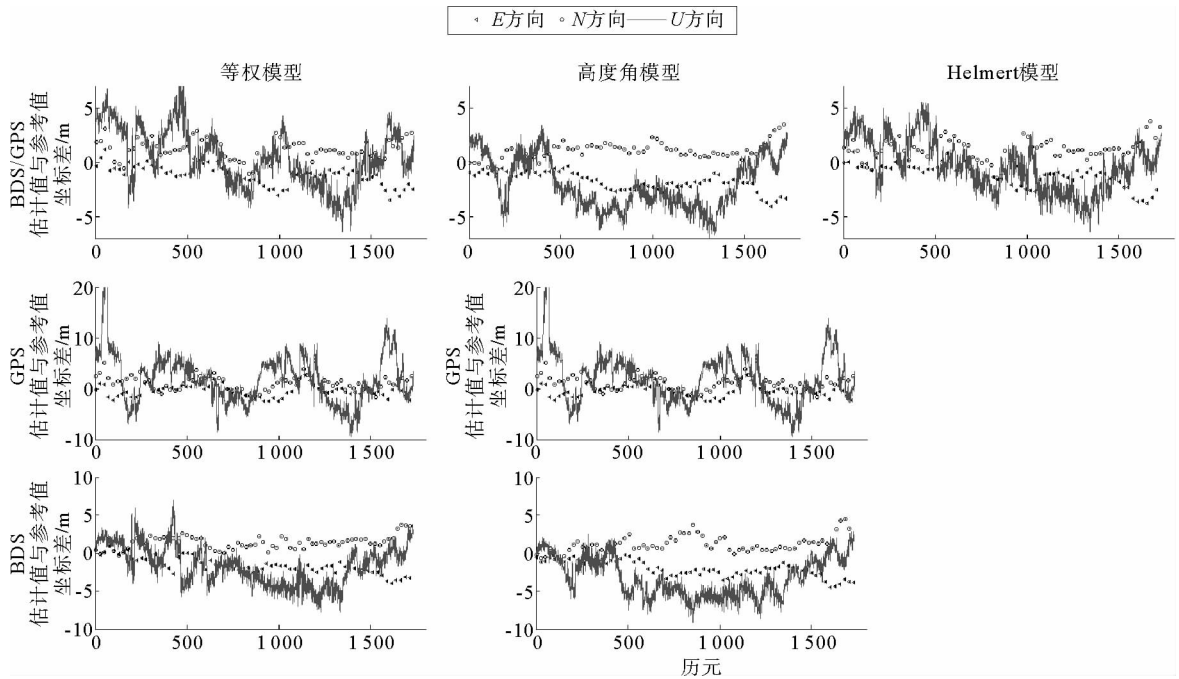


图 5 BDS、GPS、BDS/GPS 定位结果

Fig. 5 Solutions of BDS, GPS and combined BDS/GPS

统计结果的 STD(标准差,standard deviation)和 RMS 值,见表 2。表中, $dE, dN, dU$  分别表示  $E, N, U$  方向 STD 或 RMS 值, $dP, dS$  分别表示点的平面坐标差和三维坐标差。

表 2 GPS、BDS、BDS/GPS 精度

Tab. 2 Accuracies of GPS, BDS and combined BDS/GPS

	STD/m					RMS/m				
	dE	dN	dU	dP	dS	dE	dN	dU	dP	dS
GPS(EqW)	1.177	1.546	4.937	1.943	5.306	1.244	1.998	5.523	2.353	6.004
GPS(Elev)	1.061	1.413	4.745	1.767	5.063	1.222	2.001	5.213	2.345	5.716
BDS(EqW)	1.103	0.915	2.612	1.433	2.979	1.922	1.765	2.834	2.609	3.852
BDS(Elev)	1.040	1.132	2.590	1.538	3.012	2.292	1.721	3.746	2.866	4.717
BDS/GPS(EqW)	0.937	0.963	2.578	1.344	2.907	1.492	1.604	2.746	2.191	3.513
BDS/GPS(Elev)	0.846	0.802	2.323	1.165	2.599	1.943	1.378	2.775	2.382	3.657
BDS/GPS(Helm)	1.020	0.969	2.356	1.407	2.744	1.594	1.619	2.366	2.273	3.280

EqW—等权模型;Elev—高度角模型;Helm—Helmert 模型

从表2可以看出:BDS与GPS的水平方向STD和RMS值相近,但BDS的高程方向比GPS高程精度有所提高,主要是因为BDS可视卫星数多,几何图形更好。对比BDS和GPS的平面STD和RMS值,BDS的STD值比GPS小,而RMS值比GPS大,说明BDS解算结果相对GPS存在更大的系统误差,这与观测时段内,GPS卫星具有更高的卫星高度角有关。BDS/GPS组合系统水平方向STD和RMS值与单个系统相近,平面和高程的STD和RMS值比单个系统略有提高。三维STD和RMS值的排列顺序为:GPS>BDS>BDS/GPS,说明BDS空间精度比GPS高,而BDS/GPS的空间精度最高。

等权和高程角模型能在一定程度上提高水平和空间精度。虽然Helmert模型的STD值与等权模型相近,且比高程角模型差,但模型的水平和平面RMS值比高程角模型好,模型的三维RMS值比其他两种都有一定程度提高。

值得注意的是,由于目前BDS处于区域组网阶段,且考虑到GEO和IGSO卫星轨道特点,因此以上结果具有测站依赖性,并不具备全球通用性。

## 4 结论

1)单系统BDS的PDOP值和GPS相当,BDS/GPS组合系统的PODP值降低,卫星几何分布结构更好,定位精度提高。

2)BDS GEO卫星单独解算时,垂直方向精度较低,导致N和U方向定位精度较差。利用IGSO/MEO卫星定位时,存在观测卫星数不足、卫星几何图形差的情况,法方程可能发生病态。两种轨道卫星同时解算不仅提高定位精度,而且消除法方程奇异现象。

3)BDS定位结果相对于GPS存在更大的系统误差,其平面精度低于GPS,但高程精度优于GPS,而BDS/GPS组合系统定位平面和三维精度均高于单独BDS或GPS系统。

4)Helmert验后估计模型解算坐标的离散程度比高程角模型略差,定位精度相近,但Helmert验后估计模型的高程和三维精度比等权和高程角模型有所提高。

### 参考文献:

- [1]范磊,钟世明,欧吉坤. COMPASS与GPS伪距单点定位精度分析[C]//第四届中国卫星导航学术年会论文集-S3精密定轨与精密定位. 2013:59-65.
- [2]Li J, Yang Y, Xu J, et al. Performance analysis of single-epoch dual-frequency RTK by BeiDou (BDS) navigation satellite system[C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013: 133-143.
- [3]Xu J, Yang Y, Li J, et al. Performance analysis of COMPASS/GPS code differential positioning[C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013: 201-209.
- [4]Guo H, Li J, Xu J, et al. Performance of triple-frequency high-precision RTK positioning with compass[C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013: 167-176.
- [5]Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P, et al. Initial assessment of the COMPASS/BeiDou-2 regional navigation satellite system[J]. GPS Solutions, 2013, 17(2): 1-12.
- [6]王霞迎,秘金钟. GPS/BDS静态基线处理方法及其结果分析[J]. 导航定位学报, 2013, 1(2): 71-73.  
Wang Xiaying, Bi Jinzhong. GPS/BDS static baseline processing method and result analysis[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2013, 1(2): 71-73.
- [7]张辉,周田,李博,等. BDS/GPS组合系统定位性能分析[J]. 测绘科学, 2014, 39(6): 18-21.  
Zhang Hui, Zhou Tian, Li Bo, et al. Analysis of positioning performance on combined BDS/GPS system[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(6): 18-21.
- [8]刘超,王坚,路鑫,等. GPS载波相位观测值随机模型的比较研究[J]. 测绘科学, 2010, 35(6): 151-154.  
Liu Chao, Wang Jian, Lu Xin, et al. Comparison of stochastic model for GPS carrier phase measurements[J]. Science of Surveying and Mapping, 2010, 35(6): 151-154.
- [9]Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Collins J. Global positioning system: Theory and practice[M]. 5th edition. Wien: Springer-Verlag, 2001: 15-21.

- [10]中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件-公开服务信号 B1I(1.0 版)[EB/OL]. [2012-12-15][2013-10-11]. <http://www.beidou.gov.cn>.
- [11]魏子卿. 2000 中国大地坐标系及其与 WGS84 的比较[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(5): 1-5.  
Wei Ziqing. China geodetic coordinate system 2000 and it's comparison with WGS84[J]. Geodesy and Geodynamics, 2008, 28(5): 1-5.
- [12]刘照军, 张孔增, 朱习军. 基于提升小波的多路径效应减少方法[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2006, 25(4): 29-32.  
Liu Zhaojun, Zhang Kongzeng, Zhu Xijun. The method for reducing multi-path effects based on lifting wavelets[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2006, 25(4): 29-32.
- [13]戴吾蛟, 丁晓利, 朱建军. 基于观测值质量指标的 GPS 观测量随机模型分析[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, 33(7): 718-722.  
Dai Wujiao, Ding Xiaoli, Zhu Jiangjun. Comparing GPS stochastic models based on observation quality indices[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(7): 718-722.
- [14]高晓, 戴吾蛟. GPS/GLONASS 组合定位的抗差 Helmert 方差分量估计模型[J]. 全球定位系统, 2012, 37(6): 17-20.  
Gao Xiao, Dai Wujiao. Robust stochastic model of combined GPS and GLONASS[J]. GNSS World of China, 2012, 37(6): 17-20.
- [15]段举举, 沈云中. 基于方差分量估计的 GPS/GLONASS 组合点定位[J]. 测绘通报, 2011(4): 4-6.  
Duan Jujju, Shen Yunzhong. GPS/GLONASS combined point positioning using variance component estimation[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2011(4): 4-6.
- [16]Xu C H, Wang J, Gao J X, et al. Dilution of precision and clock of simulated pseudolites augmented GPS signals[C]//2<sup>nd</sup> International Congress on Image and Signal Processing. New York: Curran Associates, Inc. 2009: 1-4.

(责任编辑: 高丽华)

(上接第 63 页)

- [3]郭福生, 严兆彬, 杜杨松. 混合沉积、混积岩和混积层系的讨论[J]. 地质前缘, 2003, 10(3): 21-26.  
Guo Fusheng, Yan Zhaobin, Du Yangsong. The discussion on mixed deposits, Hunji rock and Mixed strata[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(3): 21-26.
- [4]王良忱, 张金亮. 沉积环境和沉积相[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 56-58.
- [5]吴力耘, 杨智敏, 梁波, 等. 王龙庄油田滚动勘探方向研究[J]. 西部探矿工程, 2006(7): 76-77.  
Wu Liyun, Yang Zhimin, Liang Bo, et al. A research on the direction of Wanglongzhuang oilfield rolling exploration[J]. West-China Exploration Engineering, 2006(7): 76-77.
- [6]王霞田. 金湖凹陷西斜坡阜宁组构造沉积演化研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2011.
- [7]罗钰涵, 刘桂玲. 金湖凹陷西斜坡阜二段混积储层产能特征及其影响因素研究[J]. 复杂油气藏, 2012, 12(5): 56-60.  
Luo Yuhan, Liu Guiling. Productivity characteristics of diamictic reservoir in the second member of Funing Formation of the west slope in Jinhu sag and its influential factors[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2012, 12(5): 56-60.
- [8]张金亮, 毛凤鸣. 苏北盆地高邮凹陷北斜坡阜宁组成岩作用及储层特征[J]. 石油学报, 2003, 24(2): 43-49.  
Zhang Jinliang, Mao Fengming. Clastic diagenesis and reservoir characteristics of Funing Formation in north slope of Gaoyou depression in Subei basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(2): 43-49.
- [9]汪建平. 准噶尔盆地东部台 3-北 10 井区侏罗系粒度特征[J]. 新疆石油地质, 1993, 14(4): 380-384.  
Wang Jianping. The grain size distribution of Jurassic in the well Tai 3-well Bei 10 area of the eastern Junggar basin[J]. Xin Jiang Petroleum Geology, 1993, 14(4): 380-384.
- [10]张喜林, 朱筱敏, 郭长敏, 等. 苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组滨浅湖沉积中的遗迹化石[J]. 沉积学报, 2006, 24(1): 81-87.  
Zhang Xilin, Zhu Xiaomin, Guo Changmin, et al. Trace fossils of shore-shallow lacustrine Dainan formation (Paleogene) in Gaoyou sag, Subei basin, Jiangsu province[J]. Acta Sedimentologica sinica, 2006, 24(1): 81-87.

(责任编辑: 高丽华)