

北斗/GPS 组合伪距单点定位性能测试和分析

唐卫明¹ 徐 坤¹ 金 蕾¹ 文雪中²

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

2 重庆市勘测院,重庆,400020

摘 要:讨论了北斗/GPS 伪距单点定位联合解算的数学模型,并根据北京、武汉两地的北斗/GPS 双系统实测数据,在多种模拟遮挡环境下将北斗/GPS 联合解算结果与北斗、GPS 单系统在可见卫星数、PDOP 值、定位精度、定位可用性等方面进行了对比分析。结果表明,相对于单系统伪距单点定位,北斗/GPS 组合定位大大增加了可见卫星数,减小了 PDOP 值,并在观测条件较差的环境下有效地改善了定位精度,显著提高了系统定位可用性。

关键词:北斗卫星导航系统;GPS;伪距单点定位;联合解算;可用性

中图法分类号:P228.1

文献标志码:A

GPS 能为全球用户提供高精度的导航定位服务,但在观测条件较差时,其可见卫星数、定位精度和可用性都有所下降^[1-2]。北斗卫星导航系统(BDS)已正式向我国及周边地区提供区域服务,作为全球 GNSS 的重要组成部分,北斗与 GPS 的联合定位和导航也将是未来 GNSS 的重要发展方向^[3]。

受限于北斗的建设过程,此前众多学者对其进行的研究多基于仿真系统,并不能完全反映系统真实性能^[4-6]。随着北斗区域服务的正式开放,利用北斗和 GPS 组合定位也进入了利用实测数据分析论证的新阶段。本文利用北京、武汉测站的 BDS/GPS 双系统观测数据,研究 BDS/GPS 组合伪距单点定位对单一系统定位精度和可用性等改善情况。

1 BDS/GPS 伪距单点定位联合解算

1.1 时间基准与坐标基准

BDS 与 GPS 是两个独立的导航系统,它们的时间系统不同步,确定卫星轨道的坐标框架也不同。北斗时(BDT)与 GPS 时(GPST)均采用原子时时间基准。BDT 起始历元为 2006 年 1 月 1 日协调世界时(UTC)0 时 0 分 0 秒,GPST 起始历元为 1980 年 1 月 6 日 UTC 0 时 0 分 0 秒,由于

UTC 闰秒,BDT 与 GPST 之间在周秒部分总有 14 s 的差异。又由于 BDT 与 GPST 二者原子时的维持存在差异,故 BDT 与 GPST 除了周秒相差 14 s 以外,还存在微小的同步误差。BDS 广播星历坐标系采用 CGCS2000,GPS 广播星历坐标系为 WGS84,二者定义一致,但框架实现有差异^[7-8]。在坐标系的实现精度范围内,CGCS2000 和 WGS84 坐标一致,在 cm 级精度的数据处理过程中,无需考虑坐标系差异引起的结果偏差^[9]。

本文研究对象为伪距单点定位,其精度受限于广播星历和伪距观测的精度而较低,故在数据处理过程中,忽略了 BDT 与 GPST 之间除了整秒以外的微小同步误差,也不考虑坐标系不同引起的结果偏差。

1.2 数学模型

GPS 和 BDS 伪距单点定位的观测方程分别为:

$$\rho_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2} - cV_{IR}^{GPS} + c(V_{ts})_i - (V_{ion})_i - (V_{trop})_i, (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

$$\rho_j = \sqrt{(X_j - x)^2 + (Y_j - y)^2 + (Z_j - z)^2} - cV_{IR}^{BD} + c(V_{ts})_j - (V_{ion})_j - (V_{trop})_j, (j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

收稿日期:2013-07-26

项目来源:某部预研基金资助项目(9140A24020713JB11342);某部十二五预研资助项目(51324040103);国家 863 计划资助项目(2012AA12A202)。

第一作者:唐卫明,博士,教授,从事 GNSS 的实时动态定位应用开发和系统集成等教学科研工作。E-mail: wmtang@whu.edu.cn

式中,下标 i, j 分别表示 GPS、BDS 卫星序号; (x, y, z) 为测站坐标; (X_i, Y_i, Z_i) 和 (X_j, Y_j, Z_j) 分别表示 GPS 和 BDS 卫星坐标; V_{iR}^{GPS} 和 V_{iR}^{BD} 分别表示 GPS 和 BDS 的接收机钟差; $V_{\text{ts}}, V_{\text{ion}}, V_{\text{trop}}$ 分别表示卫星钟差、电离层延迟和对流层延迟; ρ 表示伪距; c 表示真空中光速^[8]。

将观测方程(1)、(2)在测站近似坐标 (x_0, y_0, z_0) 处用泰勒级数展开,得到误差方程:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_m \\ V_{m+1} \\ \vdots \\ V_{m+n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_m & m_m & n_m & 1 & 0 \\ l_{m+1} & m_{m+1} & n_{m+1} & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_{m+n} & m_{m+n} & n_{m+n} & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ cV_{iR}^{\text{GPS}} \\ cV_{iR}^{\text{BD}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_1 \\ \vdots \\ L_m \\ \vdots \\ L_{m+n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $\frac{X_k - x_0}{\rho_k^0} = l_k, \frac{Y_k - y_0}{\rho_k^0} = m_k, \frac{Z_k - z_0}{\rho_k^0} = n_k$ ($k = 1, 2, \dots, m+n$) 为从测站近似位置至卫星 k 方向的方向余弦; ρ_k^0 为信号发射时刻第 k 颗卫星至测站近似位置的几何距离; dx, dy, dz 为测站坐标的改正数; 常数项为:

$$L_k = \rho_k^0 - \rho_k + c(V_{\text{ts}})_k - (V_{\text{ion}})_k - (V_{\text{trop}})_k \quad (4)$$

设式(3)系数矩阵为 B , 待估未知数矩阵为 \hat{x} , 常数项为 L , 观测值权阵为 P , 由最小二乘估计可得:

$$\hat{x} = (B^T P B)^{-1} B^T P L \quad (5)$$

待估参数中含 3 个坐标差参数和两个接收机钟差参数,理论上至少需要观测两个系统的至少 5 颗卫星才能求解。

本文仅使用 BDS 的 B1 和 GPS 的 L1 频率进行单频伪距定位,电离层延迟改正使用 CODE 的球谐函数模型^[8],对流层延迟改正使用简化的 Hopfield 模型^[10],观测值定权方式采用简单的卫星高度角定权。且为了方便地分析 BDS、GPS、BDS/GPS 三种模式定位差异,将 BDS 与 GPS 观测值视为等权,即不再根据卫星系统进一步定权。

2 实测数据测试分析

本文数据来源于北斗跟踪站实验网中的北京站(BJF1)和武汉站(CENT),数据包含 2013 年 1 月 23 日全天采样间隔为 1 s 的 BDS 和 GPS 双系统观测数据。根据卫星方位角剔除部分观测卫星,模拟多种遮挡环境。按方位角剔除观测卫星条件如下:

1) 无遮挡:不剔除卫星。

2) 半边天空遮挡。① 东:剔除方位角为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的卫星;② 南:剔除方位角为 $90^\circ \sim 270^\circ$ 的卫星;③ 西:剔除方位角为 $180^\circ \sim 360^\circ$ 的卫星;④ 北:剔除方位角为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 和 $270^\circ \sim 360^\circ$ 的卫星。

3) 城市街道/峡谷。① 东西向:剔除方位角为 $0^\circ \sim 45^\circ, 135^\circ \sim 225^\circ, 315^\circ \sim 360^\circ$ 的卫星;② 南北向:剔除方位角为 $45^\circ \sim 135^\circ, 225^\circ \sim 315^\circ$ 的卫星。

2.1 可见卫星数和 PDOP 值

当观测卫星数目较多时,空间较好的卫星几何分布可使位置精度因子(PDOP)值较小,定位精度提高^[11]。根据程序计算结果,BDS、GPS、BDS/GPS 三种定位模式在各环境类型下的可见卫星数在 1 d 内的平均值如表 1 所示。

表 1 1 d 内所有历元可见卫星数平均值/颗

Tab. 1 Mean Values of Visible Satellites for All Epoches in One Day

站点	模式	无遮挡	半边天遮挡			街道/峡谷		
			东	南	西	北	东西	南北
北京	BDS	9.57	5.96	1.66	3.60	7.91	4.59	4.98
	GPS	8.54	4.04	4.70	4.50	3.84	5.60	2.94
	B/G	18.1	10.0	6.36	8.11	11.8	10.2	7.93
武汉	BDS	9.92	6.06	2.05	3.86	7.87	4.45	5.48
	GPS	8.64	4.14	4.84	4.50	3.80	4.51	4.12
	B/G	18.6	10.2	6.88	8.36	11.7	8.96	9.60

注: B/G 为 BDS/GPS 的缩写,表示 BDS/GPS 组合系统,下文同。

表 1 中,在无遮挡环境下,北京、武汉两站组合系统平均可见卫星数均超过了 18 颗,且 BDS 平均每个历元比 GPS 多观测 1 颗卫星。遮挡半边天环境下,GPS 可见卫星数较无遮挡时近似减半,在 4 个方向遮挡的平均值均为 4 颗左右;组合系统在西、南面遮挡后可见卫星平均不到 9 颗,BDS 在南面遮挡后平均值锐减至 1~2 颗;城市街道/峡谷中,BDS 在两个走向中都能平均观测到 5 颗左右卫星,南北走向的平均值均比 GPS 大。

遮挡南面时 BDS 可见卫星数骤减至 1~2 颗,这是因为 BDS 采用了 GEO 和 IGSO 卫星对我国及周边地区实施了区域增强^[7],其中 5 颗 GEO 卫星在赤道上空,无遮挡时在区域内长期可见。北京、武汉两测站地处北半球,当遮住测站南面半边天时,这 5 颗 GEO 卫星都不可见,此时 BDS 可见卫星数锐减,大部分时段甚至不能达到 4 颗星,无法完成定位。而 GPS 采用 MEO 卫星,在全球分布较为均匀,所以各方向遮挡时卫星数变化也较均匀。

由于组合系统的可见卫星较单一系统增多,

组合系统的 PDOP 值较单一系统有所减小。表 2 给出了各环境下两站观测卫星 PDOP 值在(1,3)和(1,10)区间分布的百分比。

表 2 PDOP 值在(1,3)及(1,10)区间分布/%

Tab.2 PDOP Value in (1,3) and (1,10) Interval/%

范 围	模 式	无 遮挡	半边天遮挡			街道/峡谷			
			东	南	西	北	东西	南北	
北 京	BDS	98.7	0	0	0	40.3	10.9	0	
	<3	GPS	98.0	4.1	2.7	3.4	3.9	45.5	5.7
	B/G	100	28.6	6.9	17.2	91.0	94.3	26.0	
	<10	BDS	100	76.5	0	23.8	96.3	85.3	56.1
	GPS	100	50.4	68.7	65.6	50.9	93.7	26.0	
	B/G	100	100	81.2	92.8	100	100	94.1	
武 汉	BDS	99.6	0	0	0	44.5	2.7	2.3	
	<3	GPS	96.7	6.8	4.8	1.8	1.3	20.2	23.0
	B/G	100	32.8	13.9	18.6	91.6	76.2	64.2	
	<10	BDS	100	84.0	1.2	25.7	98.4	79.2	69.6
	GPS	100	56.0	80.4	62.2	46.1	73.4	53.4	
	B/G	100	100	88.6	90.4	100	100	99.8	

表 2 显示,无论在何种环境条件下,组合系统 PDOP 值在(1,3)区间的百分比都比 BDS、GPS 单系统要大,其中无遮挡环境下组合系统 PDOP 值小于 3 的比例达到了 100%;组合系统 PDOP 值即使在东、北面遮挡以及东西向街道/峡谷环境下,小于 10 的比例也达到了 100%。在西面遮挡和南北向街道/峡谷环境下小于 10 的比例超过了 90%,在南面遮挡环境下小于 10 的比例超过了 80%。

2.2 定位精度和可用性

本文在进行精度分析时,将各历元解算坐标与测站真值的偏差换算为站心直角坐标方向(N, E,U)后,重点对平面(H)和高程(U)方向的偏差进行分析,其中 $H = \sqrt{N^2 + E^2}$ 。三种定位模式在不同环境类型下的定位偏差如图 1 所示(限于篇幅,仅给出北京站分析结果,武汉站结论一致)。

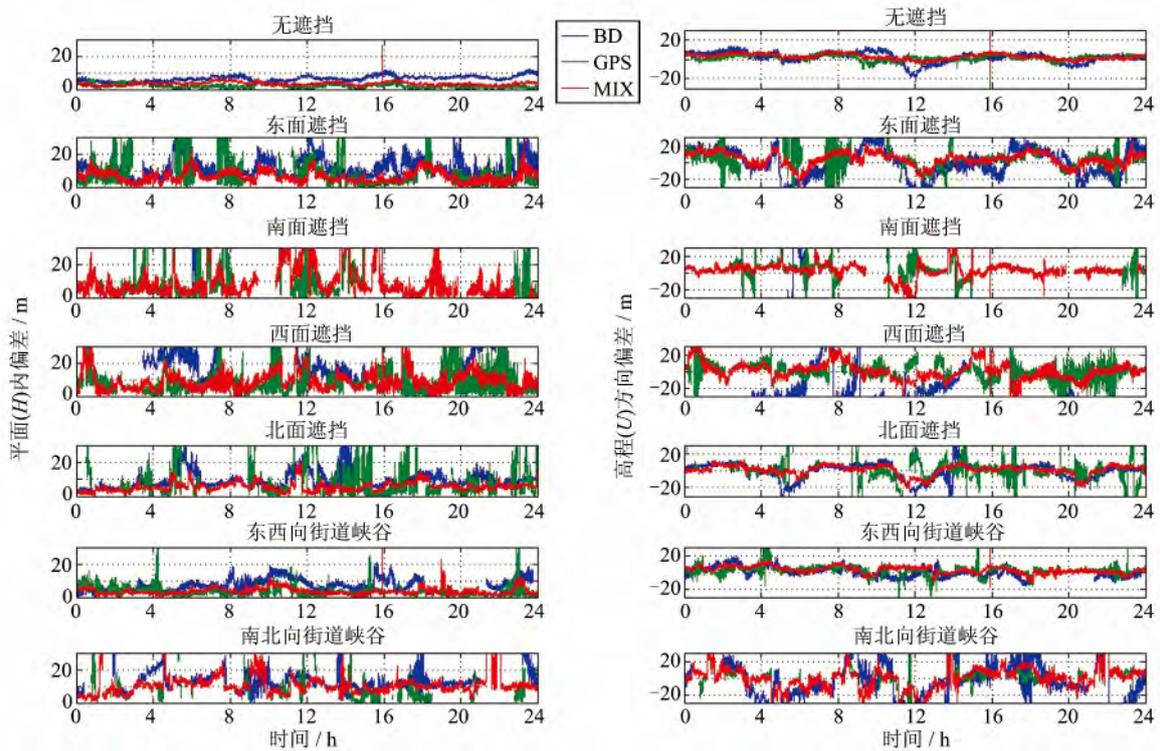


图 1 BGF1 在平面(左)和高程(右)方向的定位偏差

Fig.1 Positioning Bias of BGF1 in Horizontal Plain (left) and Elevation (right)

经计算,北京站在无遮挡环境下,BDS、GPS、BDS/GPS 在 1 d 内平面方向定位偏差的 RMS 值分别为 6.71 m、2.40 m、3.59 m,在高程方向定位偏差的 RMS 值分别为 5.72 m、3.18 m、3.84 m,结合图 1 中第一行的两幅图也可知,GPS 定位偏差最小,BDS/GPS 次之,BDS 最大。造成此现象的原因为:BDS 测距精度和信号稳定性比 GPS 略差,且 BDS 内部不同星座的测距精度和多路径

效应也有差别;而在 BDS/GPS 联合解算时将 BDS 与 GPS 观测值视为等权,不精确的随机模型导致组合定位结果精度低于 GPS^[12]。

半边天遮挡环境下,图 1 中 BDS 在东、北面遮挡后可定位历元都占总历元的 100%,西面遮挡后可定位历元减至 54.7%,南面遮挡后骤减至 4.5%;GPS 在 4 个方向的遮挡可定位历元都超过了 60%;BDS/GPS 仅南面遮挡后可定位历元

为90%,其他方向都为100%。以BDS可见卫星数最少和最多的南面、北面遮挡为例,南面遮挡后GPS和BDS可定位历元在平面和高程方向偏差的RMS值都大于100m,而组合系统在平面和高程方向分别为16.3m和9.4m;北面遮挡后,GPS在平面和高程偏差的RMS值仍大于100m,而BDS则分别减小到13.3m和11.3m,组合系统分别减小到6.1m和5.9m。结合表1,因为南、北面遮挡后GPS可见卫星减半至4颗左右,导致无法定位或定位结果很差,而北斗卫星在测站南面分布较多,北面遮挡对BDS定位影响较小。组合系统定位精度随着组合卫星数的增加而提高。

街道/峡谷环境下,图1显示东西走向定位精度优于南北走向,结合表2中东西向PDOP值在(1,3)和(1,10)的百分比普遍大于南北向可知,东西向可见卫星比南北向具有更好的几何分布。

表3按照5个精度等级统计了北京站在不同环境下三种定位模式的三维导航可用性指标。本文中统计的导航可用性即为定位三维偏差在特定精度范围内的历元数占全部观测历元的百分比。

表3 三维导航可用性统计/%

Tab.3 Statistics of 3D Navigation Usability/%

精度/m	模式	无遮挡	半边天遮挡			街道/峡谷		
			东	南	西	北	东西	南北
≤5	BDS	2.9	1.48	0.01	0.03	1.6	1.8	0.3
	GPS	76.40	16.9	24.3	16.4	20.4	47.6	9.3
	B/G	60.74	22.0	23.4	8.6	19.0	44.7	2.9
≤10	BDS	80.04	22.8	0.5	2.0	51.1	51.0	6.3
	GPS	99.95	37.7	57.4	53.6	38.5	87.7	19.2
	B/G	99.75	57.2	58.1	48.6	81.6	91.3	27.1
≤20	BDS	99.93	64.2	1.2	7.1	87.5	85.2	45.7
	GPS	99.99	56.3	77.9	78.4	51.0	94.8	25.4
	B/G	99.99	96.0	76.5	84.9	99.0	100	80.4
≤50	BDS	100	98.6	1.8	34.0	99.1	85.3	80.0
	GPS	100	65.0	85.4	87.7	61.0	96.4	27.7
	B/G	100	100	87.5	99.5	100	100	97.6
≤100	BDS	100	100	2.5	50.9	99.6	85.3	86.0
	GPS	100	66.8	87.4	88.9	62.8	96.7	28.1
	B/G	100	100	90.6	100	100	100	98.9

首先从环境类型来分析。在无遮挡环境下,北京站10m精度内的GPS、北斗/GPS可用性已经达到了99%以上,北斗在20m精度内也已经达到99.9%以上,且三种定位模式在50m精度内的可用性都达到了100%。半边天遮挡时,西、南面遮挡后,北斗在100m精度内可用性仅分别为50.9%和2.5%,而东、北面遮挡后可用性分别为100%和99.6%,表现出了极大的向异性;受北

斗可见卫星数影响,组合系统在南面遮挡后100m精度内的可用性仅为90.6%,其他三面的遮挡都为100%。街道/峡谷环境下,三种定位模式在东西走向的可用性普遍大于南北走向,主要是由于东西向可见卫星具有更好的几何分布。

从定位精度来分析,在5m、10m精度级别,北斗可用性均相对较小,且当GPS观测卫星数较多时,GPS可用性比组合系统稍大,当GPS观测卫星数较少时,GPS可用性比组合系统差;在50m、100m精度级别,观测卫星数差异导致的三种定位模式可用性有了较明显的差别,组合系统的可用性比北斗和GPS都有了显著提高,且除了较特殊的南面遮挡外,组合系统可用性都达到了97%以上,在100m级别的可用性接近100%。

3 结 语

本文在多种模拟遮挡环境下将BDS/GPS联合解算结果与BDS、GPS单系统在可见卫星数、PDOP值、定位精度、可用性等方面进行了对比分析,初步结论如下:①BDS/GPS组合系统能大大增加单一系统的观测卫星数,改善卫星空间分布,能有效减小系统PDOP值。②当测站南面遮挡严重时,北斗卫星观测将受到很大影响,造成北斗系统无法定位或定位精度大大降低,在100m导航精度内可用性不超过10%。③在遮挡环境下,导航精度级别内,BDS/GPS组合系统有效提高了单系统的导航可用性,在50m精度内历元可用性提升至97%以上(南面遮挡除外),南面遮挡时在100m精度内历元可用性提升至90%以上,且有效地提高了定位精度。

参 考 文 献

- [1] Pirti A. Accuracy Analysis of GPS Positioning near the Forest Environment[J]. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2008, 29(2): 189-199
- [2] Wang Zemin, Meng Yang, Wu Yue, et al. DOP for GPS, Galileo and Combination Navigation System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(1): 9-11(王泽民, 孟泱, 伍岳, 等. GPS、Galileo及其组合系统导航定位的DOP值分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(1): 9-11)
- [3] Yang Yuanxi. Progress, Contribution and Challenges of Compass/ Beidou Satellite Navigation System[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(1): 1-6(杨元喜. 北斗卫星导航系统的进

- 展、贡献与挑战[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 1-6
- [4] Chen H C, Huang Y S, Chiang K W, et al. The Performance Comparison Between GPS and BeiDou-2/Compass: A Perspective from Asia[J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2009, 32(5): 679-689
- [5] Yang Xinchun, Li Zhenghang, Wu Yun. The Performance Analysis of Constellation and XPL for Compass[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40: 68-72(杨鑫春, 李征航, 吴云. 北斗卫星导航系统的星座及 XPL 性能分析[J]. 测绘学报, 2011, 40: 68-72)
- [6] Han Yanben, Ma Lihua, Qiao Qiyuan, et al. Selection of Satellite Constellation Framework of CAPS[J]. *Science in China*, 2009, 3: 458-471(韩延本, 马利华, 乔琪院, 等. 中国区域卫星定位系统星座布局的选择[J]. 中国科学, 2009, 3: 458-471)
- [7] China Satellite Navigation Office, BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Open Service Signal B1I (Version 1.0)[R]. Beijing: China Satellite Navigation Office, 2012(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)[R]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2012)
- [8] Kong Xiangyuan, Guo Jiming, Liu Zongquan. Foundation of Geodesy[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005(孔祥元, 郭际明, 刘宗泉. 大地测量学基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005)
- [9] Wei Ziqing. China Geodetic Coordinate System 2000 and Its Comparison with WGS84[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2008, 28(5): 1-5(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)
- [10] Wei Ziqing, Ge Maorong. Mathematic Model of GPS Relative Positioning[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1998(魏子卿, 葛茂荣. GPS 相对定位的数学模型[M]. 北京: 测绘出版社, 1998)
- [11] Liu Huijie, Zhang Naitong. Research on Constellation Visibility for Global Navigation Satellite System[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2000, 22(5): 23-25(刘会杰, 张乃通. 全球导航卫星系统的星座可见性研究[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(5): 23-25)
- [12] Deng Chenlong, Tang Weiming, Liu Jingnan, et al. Reliable Single-epoch Ambiguity Resolution for Short Baselines Using Combined GPS/BeiDou System[J]. *GPS Solutions*, DOI 10.1007/s10291-013-0337-5

Test and Analysis of BeiDou/GPS Combined Pseudo-range Point Positioning Performance

TANG Weiming¹ XU Kun¹ JIN Lei¹ WEN Xuezhong²

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

² Chongqing Survey Institute, Chongqing 400020, China

Abstract: This paper first discussed the mathematical model of BeiDou/GPS combined pseudo-range point positioning. And then observational data of Beijing and Wuhan stations was used to compare BeiDou/GPS combined solution results with BeiDou and GPS single system solution results on the aspects of satellite visibility, PDOP value, positioning accuracy and usability in multiple simulative masking environment. The numerical results showed that compared with the pseudo-range point positioning of a single system, BeiDou/GPS combined positioning greatly increases the number of visible satellites and reduces the PDOP value. In addition, the combined system can effectively improve the positioning accuracy and the usability under poor observation conditions.

Key words: BeiDou System; GPS; pseudo-range point positioning; combined solution; usability

First author: TANG Weiming, PhD, professor, his research fields include application development and system integration of GNSS real-time kinematic positioning. E-mail: wmtang@whu.edu.cn

Foundation support: The Pre-research Fund Program, No. 9140A24020713JB11342; Pre-research Fund Program of the 12th Five-Year Plan Period, No. 51324040103; the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program), No. 2012AA12A202.