

一种高精度北斗基线解算软件的研制与性能分析

严 丽¹ 黄丁发¹ 朱东伟¹

¹ 西南交通大学高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室,四川 成都,610031

摘 要:针对高精度载波相位相对定位解算的需求,研制了北斗基线解算软件 BGO(BeiDou Navigation Satellite System/Global Positioning System Office)。BGO 能单独处理北斗及 GPS 数据,也可以将北斗与 GPS 观测数据进行联合解算。结合一高速铁路基础平面控制网(basic plane control network, CPD)的测试表明,BGO 解算北斗基线 X、Y、Z 方向的分量精度分别优于 1 mm、2 mm、1 mm,能满足高精度高速铁路 CPI 控制网的要求;BGO 处理 GPS 数据的精度与 TGO(Trimble Geomatics Office)软件、Bernese 软件基本一致,处理北斗与 GPS 联合基线性能与 TBC(Trimble Business Center)软件相当。相比独立系统,联合处理北斗和 GPS 数据能有效提高基线解算合格率与精度。

关键词:北斗;GPS;基线解算软件;北斗和 GPS 联合数据处理;性能分析

中图法分类号:P228.41 **文献标志码:**A

目前,北斗导航卫星系统(BDS)已实现局域覆盖,随着系统建设的不断完善和应用的不断拓展,与之相关的各类数据处理软件的开发成为重要的研究内容。因此,自主开发北斗高精度数据处理软件,成为发展高精度位置服务的迫切任务^[1-8]。因北斗导航卫星系统与 GPS 在星座构造、坐标框架、时间系统、信号频率等方面具有明显差异^[9-15],现有的高精度 GPS 数据处理软件无法直接处理北斗数据。本文针对北斗高精度数据处理的系统设计、数据流、功能模块及高精度算法实现等进行了研究,研制开发了一套高精度北斗基线解算软件 BGO(BeiDou Navigation Satellite System/Global Positioning System Office),并将其用于高速铁路高精度控制测量建网。通过与商业软件 TGO(Trimble Geomatics Office)和 TBC(Trimble Business Center),及高精度科研软件 Bernese 进行对比测试、性能分析,验证了该软件的正确性和有效性。

1 系统的设计与模块算法的实现

1.1 系统设计与数据流分析

北斗和 GPS 基线解算软件主要包含北斗基

线处理、GPS 基线处理及联合基线处理 3 大模块。各模块间相互独立,但使用相同的数据结构,且数据流基本一致。数据处理流程如图 1 所示。

基线解算之前,需选择有效双频观测数据,具体包含低高度角卫星剔除、观测值粗差剔除、星历未获取观测数据剔除等。剔除质量较差的观测数据可通过可视化的方式实现。通过双频数据组合有效消除电离层延迟影响,伪距消电离组合能算出测站精确至 10 m 内的概略位置,从而形成网络拓扑图,便于用户查看站点的平面分布。基线解算时,北斗与 GPS 独立系统数据处理算法相同;联合处理需选择统一的坐标和时间框架,随着多余观测数的增加,还需设置合理的模糊度固定限值。基线解算后,进行网平差,应剔除不合格基线,直至平差结果满足要求。

1.2 高精度基线解算算法实现

高精度基线解算利用双差观测量建立误差方程,北斗双差观测量构造如式(1):

$$\Delta VL_{S_i S_j}^{C_m C_n} = (L_{S_j}^{C_n} - L_{S_i}^{C_n}) - (L_{S_j}^{C_m} - L_{S_i}^{C_m}) \quad (1)$$

式中, ΔVL 表示双差观测量; S_i 和 S_j 表示任意站点; C_m 和 C_n 表示任意北斗卫星。

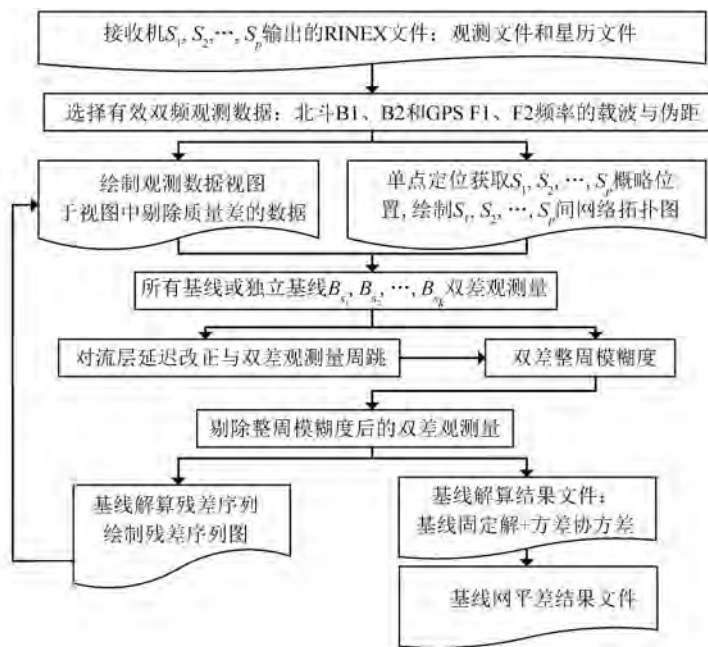


图1 BGO软件数据流

Fig.1 Data Stream of BGO Software

依据式(1)构建的双差观测测量,建立误差方程,如式(2):

$$\begin{bmatrix} \Delta \nabla \Phi \\ \Delta \nabla P \end{bmatrix} = \mathbf{B}\mathbf{X} + \mathbf{A}\Delta \nabla N + \mathbf{V} \quad (2)$$

式中, $\Delta \nabla \Phi$ 和 $\Delta \nabla P$ 分别表示卫星载波相位和伪距双差观测测量; $\mathbf{X}$ 表示基线向量; $\Delta \nabla N$ 表示双差整周模糊度; $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{A}$ 为系数阵; $\mathbf{V}$ 为残差向量。

利用式(2)构建的误差方程,解算基线向量和双差整周模糊度浮点解。利用LAMBDA方法^[16,17]固定双差整周模糊度后去除。再利用载波相位观测值获取高精度基线向量结果。基线解算过程中,主要利用抗差估计的切比雪夫多项式拟合法^[18]及MW-GF组合法^[19]探测与修复周跳。

对北斗和GPS双系统基线解算,只需将各系统的双差观测测量误差方程叠加后平差计算,即可实现双系统联合基线解算。但需注意,星间差分需选择同一系统卫星,否则会引入系统间信号硬件延迟^[20],影响双差整周模糊度的固定。另外,北斗和GPS在时间框架、坐标框架等存在一定差异,双系统联合解算需保证框架的统一。

北斗和GPS时间转换公式如式(3):

$$t_c = t_g - 14 \text{ s} \quad (3)$$

式中, t_c 和 t_g 分别表示北斗时和GPS时,两者均为原子时,起算原点不同^[13]。

北斗和GPS坐标转换公式如式(4):

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D & -R_z & R_y \\ R_z & D & -R_x \\ -R_y & R_x & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,北斗坐标 (X_c, Y_c, Z_c) 与GPS坐标 (X_g, Y_g, Z_g) 可通过七参数 $T_x, T_y, T_z, D, R_x, R_y, R_z$ 进行转换。北斗CGCS2000坐标系采用ITRF97框架2000历元的坐标和速度场,当前GPSWGS84坐标和ITRF08基本一致。因此,可利用ITRF97框架2000历元与ITRF08间转换的七参数(ITRF网站公布)实现北斗与GPS坐标框架的统一^[11,12]。

2 BGO数据处理实例与性能测试

2.1 高速铁路CPI控制网基线解算

处理高速铁路CPI控制网时,通过读取观测文件和星历文件,单点定位生成控制网的基线网络拓扑图,如图2所示。基线解算前,设置相关参数包括卫星截止高度角、误差限差参数、框架、对流层模型、电离层模型、模糊度Ratio值、同步最小观测历元数等。设置完成后,可选择北斗、GPS、联合3种模式进行基线解算。基线解算完成后,软件界面中将显示解算的基线分量及其精度,并可显示残差向量检核基线解算效果。

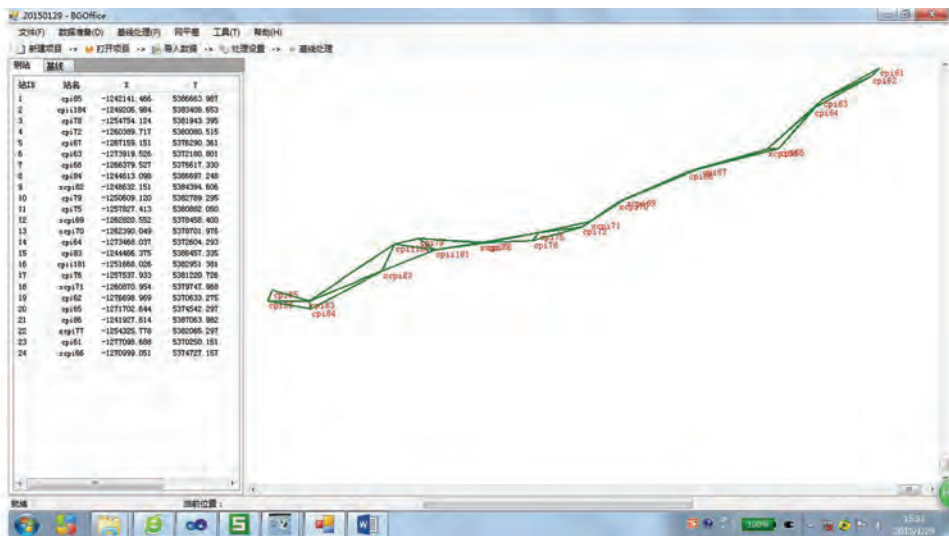


图 2 BGO 软件主界面

Fig.2 Software View of BGO

2.2 BGO、TGO、Bernese 软件处理 GPS 基线结果比较

为了测试 BGO 解算 GPS 基线的正确性, 将其与 TGO 和 Bernese 软件处理结果进行了比较, 得到 57 条 GPS 基线 (基线最长 6 667 m, 最短 446 m) 的比较结果, 如图 3 所示。

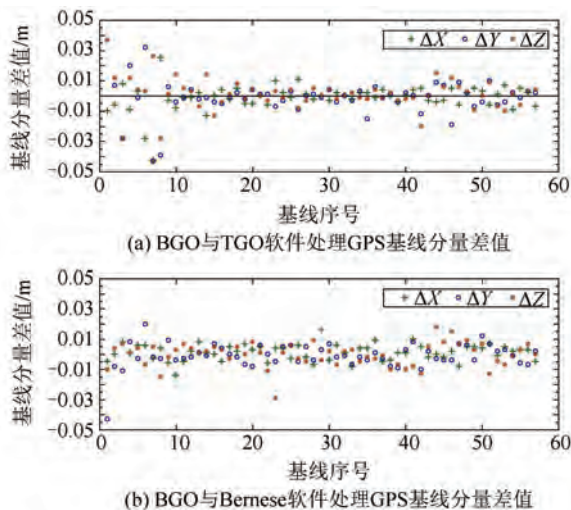


图3 BGO、TGO、Bernese 软件处理 GPS 基线分量比较
Fig.3 Comparing GPS Baseline Components from
BGO, TGO and Bernese Software

图 3(a)、3(b)分别表示 BGO 软件与 TGO、Bernese 软件处理 GPS 基线分量的差值 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 。图 3(a)中,BGO 和 TGO 有 52 条基线在 X 、 Y 、 Z 方向的分量差值均在 2 cm 内,有 48 条基线各分量差值在 mm 级。TGO 解算少量基线验后方差分量超限,与 BGO 基线分量差值较大。图 3(b)中,BGO 和 Bernese 有 55 条基线在 X 、 Y 、 Z 方向的分量差值均在 2 cm 内,有 49 条基线

各分量差值在 mm 级。

图 4(a)~4(c)分别表示 BGO、TGO、Bernese 软件处理 GPS 基线的内符合精度 σ_X 、 σ_Y 、 σ_Z (BGO、TGO、Bernese 软件基线解算精度分别精确至 0.1 mm、1 mm 和 0.1 mm)。整体上,约 90% 的基线 3 个软件的解算精度相当。

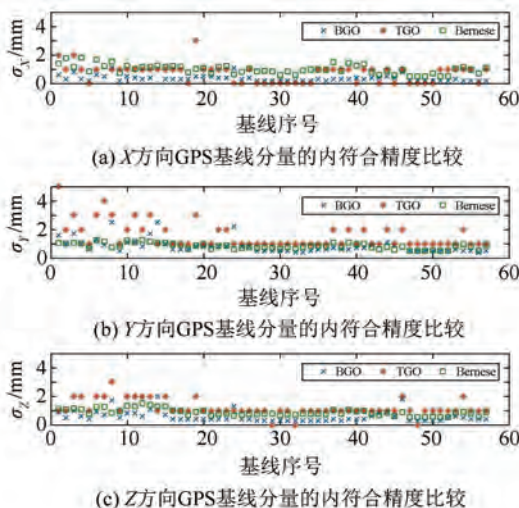


图4 BGO、TGO、Bernese 的 GPS 基线内符合精度比较

Fig.4 Comparing GPS Baseline Precision from
BGO, TGO and Bernese Software

2.3 BGO、TBC 软件处理北斗与 GPS 联合基线结果

为了测试 BGO 解算北斗与 GPS 联合基线的性能,本文选用美国 Trimble 的商业软件 TBC 与之进行比较。同上 57 条基线,每条基线观测数据均包含北斗与 GPS 观测数据。图 5 展示了 BGO 和 TBC 处理北斗与 GPS 联合基线分量的差值 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 。图 5 可见,98% 的基线分量差值分

布在 mm 级,表明 BGO 软件处理联合基线能达到与 TBC 软件相当的水平。另外,两者内符合精度绝大部分均在 mm 级,故图 5 中未加以比较。

由此可知,BGO 软件处理 GPS 基线、北斗与 GPS 联合基线的内外符合精度能达到 TGO、Bernese、TBC 相当的水平。因此,以 BGO 软件处理 GPS、北斗与 GPS 联合基线结果为参考值,分析该软件处理北斗基线结果的正确性和可靠性,如图 6 和图 7 所示。图 6 比较了北斗与 GPS、联合基线分量的差值,图 7 比较了北斗、GPS、联合基线解算的内符合精度。

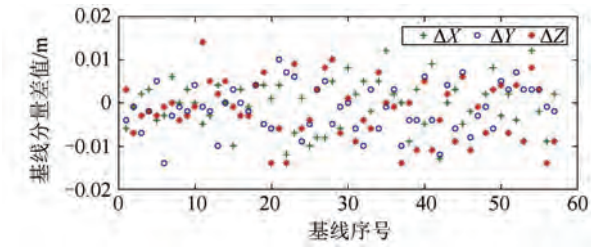


图 5 BGO 与 TBC 软件处理北斗与 GPS 联合基线分量比较

Fig.5 Comparing BDS and GPS Combined Baseline Components from BGO and TBC Software

图 6(a)表示 BGO 软件处理北斗与 GPS 基线分量的差值 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ ,其中有 43 条基线在 X、Y、Z 方向上的分量差值 Δx 、 Δy 、 Δz 在 2 cm 内,有 31 条基线在 X、Y、Z 方向上的分量差值在 mm 级。图 6(b)表示 BGO 软件处理北斗与联合基线分量的差值,其中有 54 条基线在 X、Y、Z 方

向上的分量差值在 2 cm 内,有 38 条基线在 X、Y、Z 方向上的分量差值在 mm 级(图 6 中第 6 条基线北斗为浮点解,各分量差值结果较大,图中置为 0)。

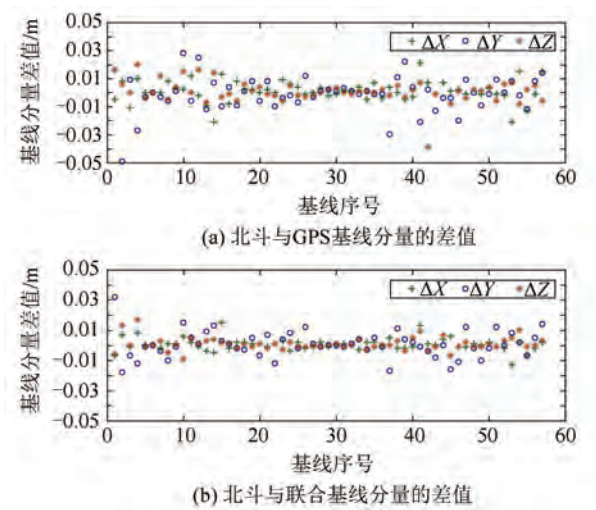


图 6 BGO 软件处理北斗与 GPS、联合基线分量比较
Fig.6 Comparing BDS, GPS and BDS/GPS Combined Baseline Components from BGO Software

图 7 中,93% 的联合基线在 X、Y、Z 方向上的分量精度分别优于 0.5 mm、1 mm、0.5 mm;约 90% 的北斗基线和 95% 的 GPS 基线在 X、Y、Z 方向上的分量精度分别优于 1 mm、2 mm、1 mm。由北斗、GPS、联合基线 3 者精度比较可知,在北斗试运行阶段,GPS 基线内符合精度略优于北斗,北斗与 GPS 联合系统基线内符合精度明显高于独立系统。

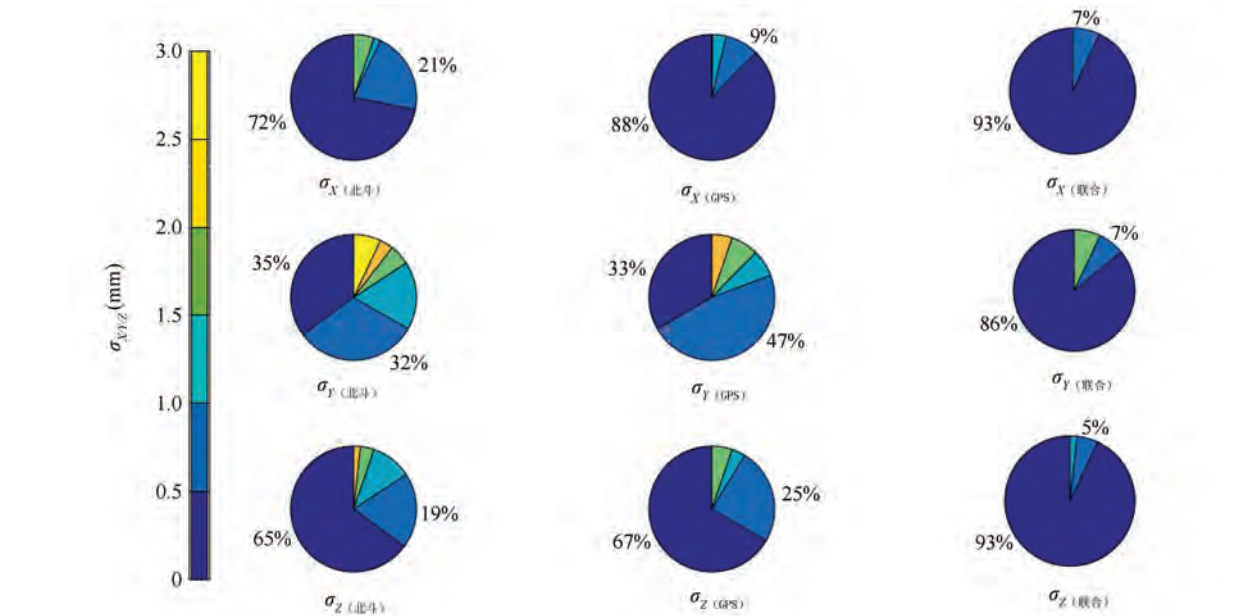


图 7 北斗、GPS、联合基线解的内符合精度统计

Fig.7 The Statistics of Precision of BDS, GPS and BDS/GPS Combined Baseline Solutions

2.4 BGO 基线网平差及其精度分析

BGO 具备网平差功能,根据网平差后的基线分量改正数、相对中误差、点位精度等判断基线解算结果的可靠性。对上述解算的北斗、GPS、联合基线分别进行无约束网平差。

北斗、GPS、联合基线无约束网平差的平差改正数 δX 、 δY 、 δZ 绝大部分在 $\pm 1\text{ cm}$ 内,如图8(a)~8(c)所示。最弱边相对中误差优于 5.5 ppm (规范限值),具体见表 1。据图 8、表 1 及《高速铁路工程测量规范》^[21] 可知,BGO 能合理稳定地解算北斗、GPS 及联合基线,解算结果中的基线向

量改正数、最弱边相对中误差、最弱点点位精度均满足 CPI 控制测量要求,各系统解算均能精确获得 24 个 CPI 控制点坐标。

表 1 GPS、北斗、联合无约束平差结果统计

Tab.1 The Statistics of GPS, BDS and BDS/GPS Combined Unconstrained Adjustment Results

解算模式	独立基线	多余观测数	控制点个数	最弱边相对中误差/ppm	最弱点点位精度/mm
GPS	55	66	24	3.6	23.6
北斗	51	57	24	3.1	26.9
联合	57	72	24	3.7	17.9

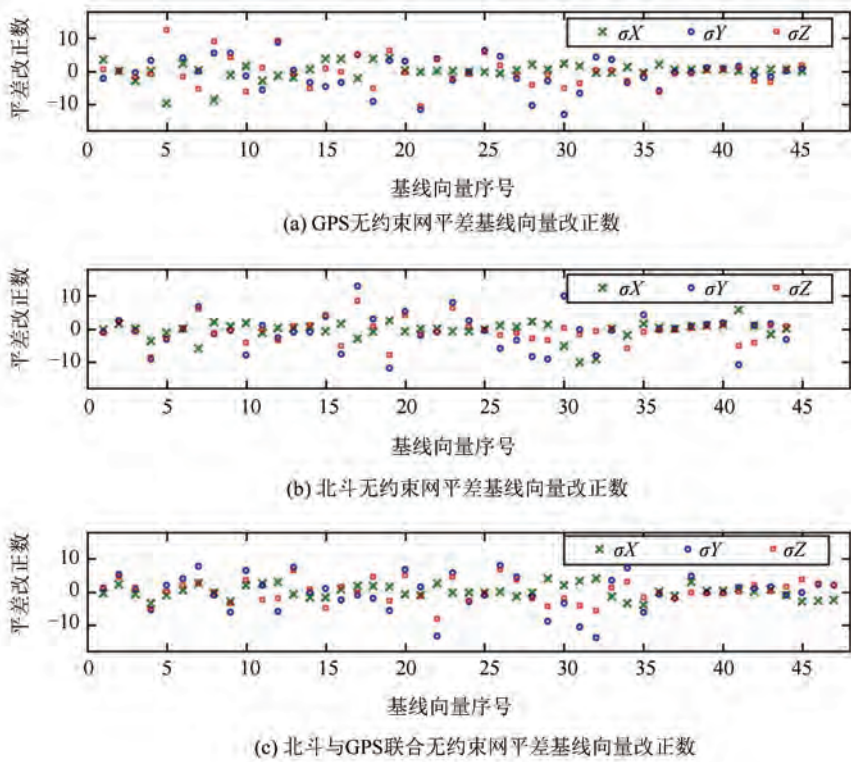


图 8 GPS、北斗、联合无约束网平差基线向量改正数

Fig.8 Baseline Vector Corrections from GPS, BDS and BDS/GPS Combined Unconstrained Adjustment

3 结 语

本文系统地研究了北斗与 GPS 联合基线解算的算法,自主开发了北斗高精度基线解算软件 BGO。通过实测高铁 CPI 控制网的数据处理测试表明:软件能进行高精度地处理北斗与 GPS 数据,以及北斗与 GPS 联合数据处理;GPS 基线解算性能与天宝 TGO 软件相当,能达到与 Bernese 软件一致的精度;北斗与 GPS 基线处理能达到与 TBC 相当的水平。BGO 最大的优势在于能对北斗和 GPS 进行联合解算,从而提高北斗或 GPS 单系统的基线解算合格率和精度。经高速铁路

CPI 控制网实例测试,证明该软件处理基线结果可用于高精度北斗和 GPS 测量控制网的数据处理。

参 考 文 献

[1] China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Specification (Version 1.0) [EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn/index.html>,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)[EB/OL].<http://www.beidou.gov.cn/index.html>,2013)

[2] China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Development Report (Version 2.2)

- [EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn/index.html>, 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)[EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn/index.html>, 2013)
- [3] China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Open Service Signal (Version 2.0) [EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn/index.html>(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(2.0版)[EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn/index.html>, 2013)
- [4] Yang Yuanxi, Li Jinlong, Wang Aibing, et al. Preliminary Assessment of the Navigation and Positioning Performance of BeiDou Regional Navigation Satellite System [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 44(1): 72-81(杨元喜, 李金龙, 王爱兵, 等. 北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(1): 72-81)
- [5] 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)
- [6] Shi Chuang, Zhao Qile, Li Min, et al. Precise Orbit Determination of Beidou Satellites with Precise Positioning [J]. *Sci China: Earth Sci*, 2012, 42(6): 854-861(施闯, 赵齐乐, 李敏, 等. 北斗卫星导航系统的精密定轨与定位研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(6): 854-861)
- [7] Zhou S, Cao Y, Zhou J, et al. Positioning Accuracy Assessment for the 4GEO/5IGSO/2MEO Constellation of COMPASS [J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2012, 55(12): 2 290-2 299
- [8] He H, Li J, Yang Y, et al. Performance Assessment of Single- and Dual-Frequency BeiDou/GPS Single-Epoch Kinematic Positioning [J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(3): 393-403
- [9] Zhou Wei. Research and Realization on Theories and Methods of Precise Positioning Base on BeiDou Navigation Satellite System [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2013: 71-98(周巍. 北斗卫星导航系统精密定位理论方法研究与实现 [D]. 郑州: 信息工程大学, 2013: 71-98)
- [10] Deng C, Tang W, Liu J, et al. Reliable Single-Epoch Ambiguity Resolution for Short Baselines Using Combined GPS/BeiDou System [J]. *GPS Solutions*, 2013, 18(3): 375-386
- [11] Gao Xingwei, Guo Jingjun, Cheng Pengfei, et al. Fusion Positioning of Compass/GPS Based on Spatio Temporal System Unification [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 45(5): 743-748, 755(高星伟, 过静珺, 程鹏飞, 等. 基于时空系统统一的北斗与GPS融合定位[J]. 测绘学报, 2012, 45(5): 743-748, 755)
- [12] Huang Dingfa, Zhang Qin, Zhang Xiaohong, et al. Principal of Satellite Navigation and Positioning [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2015: 30-39(黄丁发, 张勤, 张小红, 等. 卫星导航定位原理 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2015: 30-39)
- [13] Sun Hui, Wang Liaojie, Chen Hongqing. Discussing the Meaning of BeiDou System Time [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2014, 34(1): 42-45(孙辉, 王辽杰, 陈洪卿. 北斗系统时BDT解析[J]. 宇航计测技术, 2014, 34(1): 42-45)
- [14] Yan Li, Huang Dingfa, Feng Wei, et al. Performance Comparison of Pseudorange Point Positioning Between COMPASS and GPS [C]. The 3rd China Satellite Navigation Conference, Guangzhou, 2012(严丽, 黄丁发, 冯威, 等. COMPASS与GPS伪距单点定位性能比较研究[C]. 第三届中国卫星导航学术年会, 广州, 2012)
- [15] Tang Weiming, Deng Chenlong, Gao Lifeng. Preliminary Results of Single Epoch Baseline Solution Based on Beidou Navigation Satellite System [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(8): 897-901(唐卫明, 邓辰龙, 高丽峰. 北斗单历元基线解算算法研究及初步结果 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(8): 897-901)
- [16] Teunissen P. Least-Squares Estimation of the Integer GPS Ambiguities [C]. IAG General Meeting; in Invited Lecture, Section IV Theory and Methodology, Beijing, 1993
- [17] Verhagen S, Li B. LAMBDA Software Package: MATLAB Implementation, Version 3.0 [OL]. https://www.researchgate.net/profile/Bofeng_Li2/publication/236213370_LAMBDA_software_package_Matlab_implementation_Version_30/links/55824b808ae6cf036c17aac/LAMBDA-software-package-Matlab-implementation-Version-30.pdf, 2012
- [18] Liu Ning, Xiong Yongliang, Xu Shaoguang. Detection and Repair of Cycle Slips Using Improved TurboEdit Algorithm and Chebyshev Polynomial Method [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(12): 1 500-1 503(刘宁, 熊永良, 徐韶光. 利用改进的TurboEdit算法与Chebyshev多项式探测与修复周跳[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(12): 1 500-1 503)

[19] Blewitt G. An Automatic Editing Algorithm for GPS Data[J]. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(3): 199-202

[20] Odijk D, Teunissen P J. Characterization of Between-Receiver GPS-Galileo Inter-system Biases and Their Effect on Mixed Ambiguity Resolution[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(4): 521-533

[21] China Railway. TB10601-2009 Specifications for Survey Engineering of High Speed Railway[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2009(中国铁道部. TB 10601-2009 高速铁路工程测量规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2009)

Development and Performance Analysis of a High Precision BDS Baseline Processing Software

YAN Li¹ HUANG Dingfa¹ ZHU Dongwei¹

1 State-Province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology of High-Speed Rail Safety, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

Abstract: BDS(BeiDou Navigation Satellite System) is the first heterogeneous constellation and the only currently fully operational tri-band navigation system. However, the international and domestic market is still dominated by GPS(Global Positioning System), since BDS starts relatively late. Because of the differences between BDS and GPS in space-time reference frame, constellation structure, signals and data quality, the existing high precision GPS data processing software can not directly deal with the BDS data. In order to realize high precision BDS positioning, the corresponding BDS data processing software must be developed as soon as possible. In this paper, the key issues of BDS/GPS high precision relative positioning are studied, and static relative positioning algorithm model is proposed. Moreover, this paper introduces a self-developed high precision BDS and GPS baseline processing software BGO(BDS/GPS Office), which contains BDS, GPS and combined baseline processing modules. The software is applied to process a CPI control network of high speed railway. The results show that BDS baseline precision is better than 1 mm in X and Z direction, and is better than 2 mm in Y direction. The experiment indicates that BDS baseline solutions meet the requirement of high speed railway CPI data processing. GPS baseline solutions from BGO are equivalent to the results from TGO (Trimble Geomatics Office) and Bernese software, and BDS/GPS combined baseline solutions from BGO are well-matched with the solutions from TBC(Trimble Business Center) software. Comparing BDS and GPS alone system, BDS/GPS combined could improve qualified rate and precise of baseline solutions.

Key words: BDS; GPS; baseline processing software; BDS and GPS combined data processing; performance analysis

First author: YAN Li, PhD candidate, specializes in GNSS data processing. E-mail: yanli20060675@foxmail.com

Corresponding author: HUANG Dingfa, PhD, professor. E-mail: dfhuang@home.swjtu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41374032; 2013 Doctoral Innovation Fund in Southwest Jiaotong University and the Fundamental Research Funds in Central Universities; Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in Southwest Jiaotong University, No. PCSIRT.