

高频单历元 GPS 双差解算及其精度分析

邓兴升¹ 孙虹虹¹ 唐安雷¹

1 长沙理工大学测绘工程系,长沙市万家丽南路 960 号,410004

摘 要: 基于 Windows 研制 WinTrack 高频单历元 GPS 双差解算软件,进行 10 Hz 短基线和 1 Hz 中基线高频观测、动态差分解算及精度分析。试验表明,中短基线条件下,高频单历元 GPS 双差解的保守精度为 cm 级,与数据质量、观测条件及时机等因素相关;不同精密星历条件下的解算精度一致,而 5 m 精度广播星历对短基线结果最大差异小于 1 mm。

关键词: WinTrack; 高频; 单历元; GPS 解算

中图分类号: P228 **文献标识码:** A

高频单历元 GPS 动态定位广泛应用于地形测量、变形监测、地震监测及确定飞行器和船舶的瞬时位置、速度和姿态等^[1]。在精度方面,文献[2]利用 10 Hz 双频 GPS 发现 1~2 mm 的微小结构振动;文献[3]报道 10 km 基线定位精度为: E 分量 6.1~8.1 mm, N 分量 6.9~9.9 mm, H 分量 3.4~43.7 mm;文献[4]对于 39 km 基线定位精度为: E 分量 1.1~5.8 mm, N 分量 1.4~7.6 mm, H 分量 38.6~51.8 mm;文献[5]报道 N 、 E 分量精度为 4~10 mm, H 分量精度为 10~20 mm。近年来, GPS 接收机采样频率从 1 Hz 到 50 Hz, JAVAD TRIMMPH-1 接收机达到 100 Hz^[6]。

高频单历元 GPS 发展迅速,但数据处理方法及软件还不能满足 mm 级动态形变分析的要求;解算结果存在高频偶然误差和系统误差,偶然误差可消除,但系统误差尚难以建立改正模型来消除;高精度解算依赖精密星历,但 IGS 精密星历需要 2~3 周才能获取,不能满足高实时性要求;解算依赖 GAMIT、BERNESE、GIPSY 等软件。为此,本文研制基于 Windows 的 WinTrack 高频单历元 GPS 双差解算软件,采用 IGU、IGR、IGS 精密星历及广播星历进行解算,在短/中基线条件下进行试验与精度分析。

1 高频单历元 GPS 解算模式

GAMIT、BERNESE 和 GIPSY 软件都能处

理 GPS 单历元数据,单历元动态解算模式包括 PPP 与双差定位两种。BERNESE 与 GAMIT 采用差分定位,GIPSY 可处理相对于参考站的坐标,并需要基站提供时钟参考。以 Bock 为代表的美国 Geodetics 公司研究瞬时定位方法,能利用单历元数据解算整周模糊度^[7],研制了 RTD 软件并申请专利^[8]。WinTrack 高频单历元 GPS 动态双差定位解算软件基于 Windows 开发,解算模式和技术特点如下:

- 1) 基础文件为参考站与观测站 O 文件、星历 SP3 文件、解算控制文件,一次可处理 1 个固定站和 12 个动态站 24 h 的 1 Hz 频率观测数据;
- 2) 采用双差解定位,需定义稳定参考站,解算结果为动态站每个历元到参考站的三维坐标差及精度;
- 3) 采用卡尔曼滤波求解各历元的三维坐标差及方差,采用双频 P 码伪距和相位组合(“M-W”方法)求解宽巷模糊度,单历元解算模糊度固定算法见文献[9-10];
- 4) 中短基线解算结果精度为 cm 级,与位置和时间相关的误差源需进行系统误差建模分离改正、小波分解及恒星日/Stacking/空间滤波等后处理。

2 高频单历元观测与解算分析

选择中/短基线、午后/凌晨等不同条件,进行高频单历元 GPS 观测试验。结果表明,中短基线

收稿日期:2014-03-05
项目来源:湖南省属科研机构技术创新发展专项(2012TF1004);湖南省国土资源厅科研项目(2013-27);湖南省教育厅科研项目(13C1011);特殊环境道路工程湖南省重点实验室开放基金(kfj120405)。
第一作者简介:邓兴升,博士,高级工程师,主要从事大地测量数据处理、GNSS 动态定位研究,E-mail:whudxs@163.com。

N 、 E 方向精度约为 1 cm。当观测条件良好、时机恰当时,中基线 N 、 E 方向精度达 5~7 mm。

2.1 短基线

试验网布点 4 个(参考站 YUQH, 动态站 TANL、YADT、SUHH),平均基线长 252 m,15° 高度角,30 m 范围有建筑,采用 4 台 Trimble R8 接收机于 2013-04-22 UTC 时间 7:15~8:20,即北京时间 15:15~16:20 观测,中低纬度地区此时段电离层活跃。以 15°截止高度角 10 Hz 采样,解算前使用 TEQC 对观测数据 1 s 重采样。动态站 YADT、SUHH 在观测期间人为将接收机在 N 、 E 方向平移。为测定人工平移量,设计如图 1 所示测量表,让仪器基座在该表 N 、 E 方向平移指定位移量,记录位移轨迹并与解算结果比较。解算结果如表 1、图 2~4 所示。

由图 2 可知,TANL 站在观测过程中虽未人为平移,但结果显示高频波动,因而视为随机误差。由表 1 可知,误差约为 1 cm。

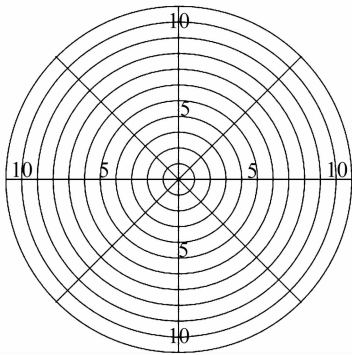


图 1 人工位移量测表
Fig. 1 The chart forartificial displacement measurement

表 1 短基线(0.25 km)动态站观测中误差
Tab. 1 Observational mean square error of dynamic station in short baseline (0.25 km)

测站	m_N /cm	m_E /cm	m_H /cm
TANL	0.96	1.05	1.18
YADT	1.33	1.17	1.12
SUHH	1.46	2.30	1.41

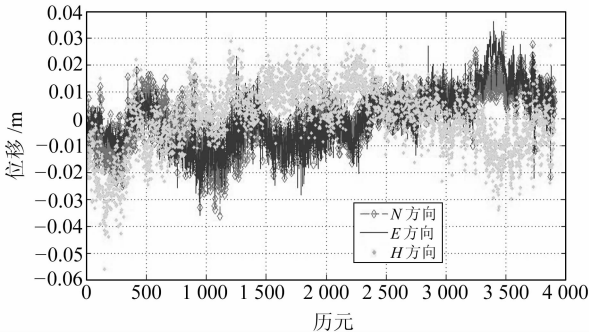


图 2 TANL 站 N 、 E 、 H 方向位移值(基线长 246 m)
Fig. 2 N 、 E 、 H displacement of TANL station (baseline length 246 m)

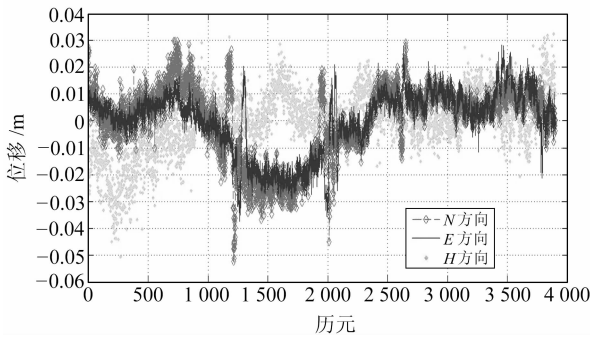


图 3 YADT 站 N 、 E 、 H 方向位移值(基线长 311 m)
Fig. 3 N 、 E 、 H displacement of YADT station (baseline length 311 m)

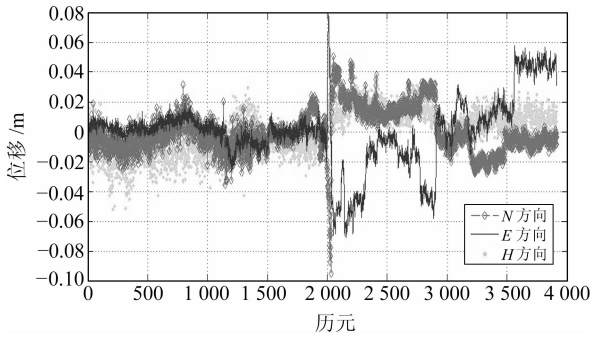


图 4 SUHH 站 N 、 E 、 H 方向位移值(基线长 199 m)
Fig. 4 N 、 E 、 H displacement of SUHH station (baseline length 199 m)

在 YADT 站 1 250 历元时,人工在 N 方向平移 \pm 4 cm 后归位,再在 E 方向平移 \pm 3 cm 后归位,在 2 000 历元,人工在 N 方向平移 \pm 3 cm 后归位,再在 E 方向平移 \pm 2 cm 后归位;在 2 650 历元,人工在 N 方向平移 \pm 2 cm 后归位,再在 E 方向平移 \pm 1 cm 后归位。图 3 显示,在 1 250、2 000、2 650 历元实测位移与人工位移一致,表明高频单历元短基线解算在未进行误差改正的情况下可以捕捉到 1 cm 以上的突变形变。但即使没有形变的产生,表 1 及图 3 也显示 YADT 站存在 1 cm 级高频噪声。

图 4 在 2 000 历元之后,对接收机人工进行 N 、 E 两方向连续平移,并在图 1 所示位移量测表上移动接收机的同时画出其位移轨迹。图 4 显示,SUHH 站在 1~2 000 历元存在 1 cm 级随机误差,2 000 历元以后可发现 N 、 E 方向连续不规则平移,其结果与人工平移记录一致,表明高频单历元短基线解算在未进行误差改正的情况下可以发现 1 cm 以上的连续形变信息。

2.2 中基线

CSCORS 基准站采用 NovAtel 接收机 1 Hz 采样率、2010-08-20UTC 时间 17:00~18:00,即北京时间 1:00~2:00 间数据,期间电离层稳定。

参考站为 CHKO, 动态站为 GADU、DAYO, 平均基线长 75 km, 基准站视野开阔, 15° 高度角无遮挡。解算结果如表 2、图 5~6 所示。

表 2 CSCORS 中基线(75 km)动态站观测中误差

Tab. 2 Observational mean square error of CSCORS dynamic station in medium baseline (75 km)

测站	m_N/cm	m_E/cm	m_H/cm
GADU	0.72	0.62	2.03
DAYO	0.51	0.61	1.95

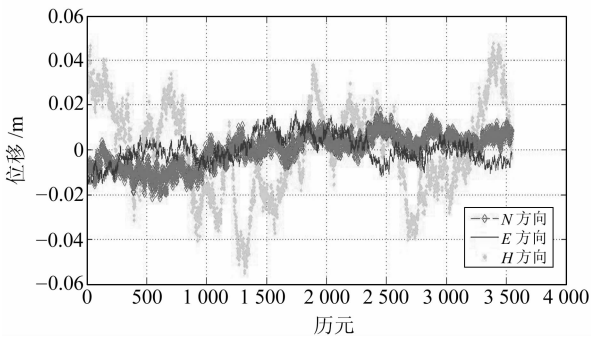


图 5 GADU 站 N 、 E 、 H 方向位移值(基线长 85 km)
Fig. 5 N 、 E 、 H displacement of GADU station (baseline length 85 km)

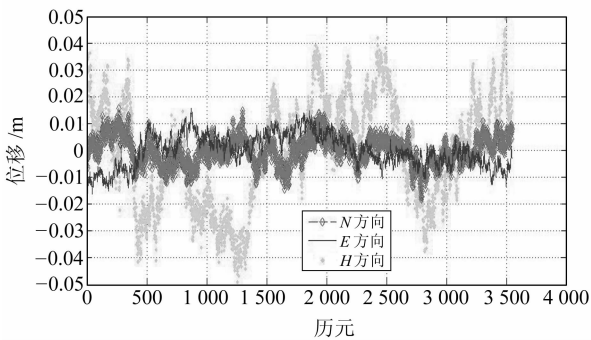


图 6 DAYO 站 N 、 E 、 H 方向位移值(基线长 64 km)
Fig. 6 N 、 E 、 H displacement of DAYO station (baseline length 64 km)

观测期间 CSCORS 基准站稳定, 位移为 0。由表 2 可知, N 、 E 方向中误差为 5~7 mm, H 方向中误差为 2 cm。图 5~6 中, 高频抖动为随机误差, N 、 E 方向无趋势性, H 方向的波动明显大于 N 、 E 方向且具系统性。

对比表 1、2 可知, 实例中 75 km 中基线 N 、 E 精度优于 0.25 km 短基线结果, 该现象有悖常理。其原因是两次试验的观测环境和时机不同, 受多路径效应和电离层活跃程度等综合因素影响。短基线在北京时间 15:00~16:00 观测, 电离层活跃; CSCORS 中基线在 1:00~2:00 观测, 电离层稳定。多路径引起的最大相位偏移 90°, 即 1/4 个波长, 对 L_1 载波为 4.8 cm, 对 L_2 载波为 6.2 cm^[11]。短基线差分可消除电离层影响, 但多路径效应不能通过差分消除。而 CSCORS 基准

站位置高、视野开阔, 多路径效应影响较小。

2.3 采用不同精密星历解算

变形监测通常有实时性要求, 但 IGS 最终精密星历一般需 2~3 周才提供下载。为了测试替代精密星历的解算精度, 采用 IGU、IGR、IGS 精密星历及 5 m 精度广播星历对 § 2.1 实例单历元解算, 前 3 种精密星历的三维坐标差及其精度信息一致; 采用 5 m 精度广播星历的解算精度一致, TANL 站广播星历与精密星历解算结果差异如图 7 所示, N 、 E 方向最大相差 ± 0.2 mm, H 方向最大相差 ± 0.4 mm。文献[12]报道, GPS 广播星历计算卫星位置误差小于 2 m, 即可忽略广播星历对短基线结果产生的差异。因此, 在短基线条件下为了提高数据处理的实时性, 可采用最快的精密星历或广播星历进行解算。

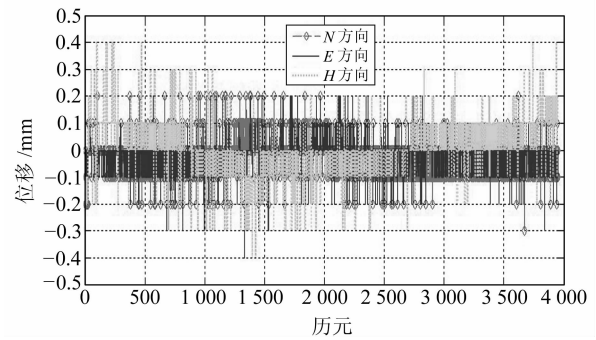


图 7 TANL 站广播星历与精密星历结果的差异
Fig. 7 The difference of solution between broadcast ephemeris and precise ephemeris

3 结 语

1) WinTrack 高频单历元中短基线动态定位解算可获得 cm 级精度, 试验结果与文献[5]一致。良好的观测条件和时机, 可得到质量较好的数据, 获得较高的解算精度。

2) 中短基线条件下, 采用 IGU、IGR、IGS 精密星历、广播星历解算, 前 3 种星历结果相同, 精度一致; 5 m 精度广播星历对短基线结果差异最大为 $\pm 0.2(N、E) \sim 0.4(H)$ mm。

3) 解算精度提高到 1~3 mm 较困难, 原因是观测误差源缺乏精准模型。对解算结果进行滤波、小波分解、时间差分等后处理, 可提高精度。与测站位置相关的多路径误差, 不能通过差分消除。但 GPS 卫星轨道周期重复, 对于指定测站点的变形监测, 可望通过长周期观测建立多路径误差改正模型。

参考文献

[1] 李林红, 何秀凤. 利用动态定位模块 Track 进行 GPS 单历元

定位研究[J]. 全球定位系统, 2011(6):37-40(Li Linhong, He Xiufeng. Single Epoch GPS Positioning with Track Module[J]. GNSS World of China, 2011(6):37-40)

[2] Chen Y Q, Huang D F, Ding X L. Measurement of Vibration of Tall Building with GPS: A Case Study[C]. SPIE, 2001

[3] Genrich J F, Bock Y. Instantaneous Geodetic Positioning with 10-50 Hz GPS Measurements: Noise Characteristics and Implications for Monitoring Networks[J]. J Geophys Res, 2006,111:B03403

[4] Xu P L, Shi C, Fang R X, et al. High-Rate Precise Point Positioning (PPP) to Measure Seismic Wave Motions: an Experimental Comparison of GPS PPP with Inertial Measurement Units[J]. J Geod, 2013, 87:361-372

[5] Bilich A, Cassidy J F, Larson K M. GPS Seismology: Application to the 2002 Mw7.9 Denali Fault Earthquake[J]. Bull Seismol Soc Am, 2008, 98: 593-606

[6] Yi T H, Li H N, Gu M. Experimental Assessment of High-Rate GPS Receivers for Deformation Monitoring of Bridge[J]. Measurement, 2013, 46:420-432

[7] 孟国杰, 任金卫, 金红林,等. GPS 高频数据处理方法及其在 地震学中的应用研究进展[J]. 国际地震动态, 2007(7): 26-31(Meng Guojie, Ren Jinwei, Jin Honglin, et al. Data Processing Methods of High Rate GPS and Its Application to Seismology [J]. Recent Developments in World Seismology [J]. 2007(7): 26-31)

[8] 苏小宁. 高频 GPS 单历元定位方法及其在 地震学中的应用研究[D]. 北京:中国地震局地震预测研究所, 2011(Su Xiaoning. Study on High-Rate Epoch by Epoch GPS Positioning and Its Application in Seismology [D]. Beijing: Institute of Earthquake Science, CEA, 2011)

[9] 郭际明, 周命端, 谢翔, 等. 利用 DUF- COM 和 DC 算法的 GPS 单历元双差整周模糊度快速确定算法[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2013, 38(7): 813-817 (Guo Jiming, Zhou Mingduan, Xie Xiang, et al. A Fast Fixed Algorithm of GPS Single Epoch Ambiguity Resolution Based on DUF- COM and DC Algorithms [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(7): 813-817)

[10] 祝会忠, 刘经南, 唐卫明, 等. 长距离网络 RTK 基准站间整周模糊度单历元确定方法[J]. 测绘学报, 2012, 41(3):359-365 (Zhu Huizhong, Liu Jingnan, Tang Weiming, et al. The Algorithm of Single-Epoch Integer Ambiguity Resolution between Long-Range Network RTK Base Stations[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(3):359-365)

[11] 戴吾蛟. GPS 精密动态变形监测的数据处理与方法[D]. 长沙:中南大学, 2007(Dai Wujiao. A Study of Data Processing for Precise Dynamic Deformation Monitoring Using GPS [D]. Changsha: Central South University, 2007)

[12] 刘伟平, 郝金明, 李作虎. 由广播星历解算卫星位置、速度及精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(2): 144-147 (Liu Weiping, Hao Jinming, Li Zuohu. Solution Method and Accuracy Analysis of Satellite Position and Velocity from Broadcast Ephemeris[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(2): 144-147)

The High-Rate Single Epoch GPS Double Difference Solution and Its Accuracy Analysis

DENG Xingsheng¹ SUN Honghong¹ TANG Anlei¹

¹ Department of Surveying Engineering, Changsha University of Science & Technology, 960 South-Wanjiali Road, Changsha 410004, China

Abstract: A high-rate single-epoch software using GPS double difference, WinTrack, is developed and used to analyze the precision of a dynamic differential positioning solution using high-rate GPS data with short baselines of 10 Hz and medium baselines of 1 Hz. The single epoch GPS solution accuracy of broadcast ephemeris and three kinds of precise ephemeris (IGU, IGR and IGS) are compared. Experimental results show their accuracy is almost the same under the condition of a medium-short baseline. A conservative estimation of the accuracy of high-rate single epoch GPS solution is 1 cm. The accuracy is relative to observational condition, observational time and data quality.

Key words: WinTrack; high-rate; single-epoch; GPS solution

本刊微信公众号 dadiceliang, 敬请关注。

