

# 一种历元间差分单站单频周跳探测与修复方法

邹璇<sup>1</sup> 李宗楠<sup>1</sup> 陈亮<sup>2</sup> 宋伟伟<sup>1</sup> 王成<sup>1</sup> 唐卫明<sup>1</sup>

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079  
2 千寻位置网络有限公司,上海,200438

**摘 要:**提出了一种基于历元间单差观测值的单站单频周跳探测与修复方法。通过假定前一历元为基准站,当前历元为流动站,采用相对定位处理模式获取当前历元观测值的验后单位权中误差,并基于抗差最小二乘获取每颗卫星的观测值残差,对单站单频数据进行周跳探测与修复。通过对实测数据的验证分析表明,按照本文方法可以 100%探测周跳发生的历元。并且,当至少 4 颗卫星未发生周跳时,如发生异常卫星数小于可视卫星数的 30%,则在 95%以上的情况下可以有效确定异常卫星;当异常卫星过多时,本文方法确定异常卫星的成功率会有所下降。但是,对于探测出发生周跳的异常卫星,本文方法均可 100%对其周跳进行修复。

**关键词:**单站;单频;历元间单差;周跳探测;周跳修复

**中图法分类号:**P228.41      **文献标志码:**A

随着北斗、GPS、GLONASS、伽利略等卫星导航系统星座的逐步完善,目前可用卫星数已达 78 颗,GNSS(global navigation satellite system)除了应用于传统精密测绘领域,还在手机定位服务、移动测量技术、机械控制、产量监测、智能交通系统和无人机等新兴领域得到了越来越广泛的应用<sup>[1]</sup>。与高精度高可靠性定位需求的传统精密测绘相比,这些新兴应用领域对定位精度要求相对较低,但对接收机的成本、体积及在复杂环境下的可用性等因素较为敏感。传统的精密测绘一般采用大地测量型接收机,定位精度高,但价格较为昂贵、体积相对较大。用户由于使用成本的限制更多地会采用单频多模接收机,为满足大众化的应用需求,低成本的 GNSS 单频精密定位方法具有重要的研究价值。而单频周跳探测与修复方法又是 GNSS 单频精密定位亟待解决的关键问题。

与传统多站相对定位数据处理模式相比,PPP(precise point positioning)、PPP-AR(PPP ambiguity resolution)、URTK(undifferenced network RTK)等单站处理模式虽然在理论上与多站模式等价,但由于其在数据处理时的灵活性,可以满足大规模网、大区域的分层并行解算,因此越来越被人们所接受<sup>[2-8]</sup>。与多站处理模

式相比,单站处理模式下无法利用周边测站的观测数据消除观测值中电离层、对流层、卫星钟差等误差影响。此外,单频数据预处理无法采用 MW(melbourne-wubben)、GF(geometry free)、IF(ionosphere free)组合观测值辅助周跳探测,因此单站单频数据预处理较多站模式以及单站双频/多频模式要更为困难。

目前,针对单频数据预处理主要有高次差法、多项式拟合法、Kalman 滤波法、小波变换法、多普勒观测值辅助探测法等。多项式拟合法探测周跳算法的基础是假设观测值随时间的变化可以用一个高阶多项式来表示,这一假设很容易被接收机自身的运动所打破,因此该方法通常不适用于动态定位中周跳的探测<sup>[9]</sup>。3 阶多项式模型的 Kalman 滤波探测周跳,仅适用于高采样率的观测数据<sup>[10]</sup>。基于双差的单频单站数据预处理方法,可以有效探测出大部分的周跳观测值,但如果参考卫星的观测值发生周跳,组成双差观测方程时,会把参考卫星的周跳值引入到每一个双差观测值中,这就为确定发生周跳的卫星号带来一定的困难,甚至导致误判<sup>[11]</sup>。综上所述,针对单站单频数据预处理,现有方法还存在一定的局限性,为此本文提出一种历元间单差观测值的单站单频

周跳探测与修复方法。

1 周跳探测原理

1.1 探测周跳发生历元

假定测站  $i$  在历元  $t$  的位置为基准站  $p$ , 在历元  $t+1$  的位置为流动站  $q$ , 组成历元间单差观测方程式(1)。相邻历元间电离层延迟和对流层延迟的变化量有限, 卫星钟变化微小, 历元间单差观测值可基本消除电离层、对流层及卫星钟差的影响, 故式(1)不考虑这些误差。残余的电离层、对流层及卫星钟差被吸收至  $\Delta\epsilon$  中。

$$\lambda\Delta\varphi = \rho_{s_q} - \rho_{s_p} - c\Delta t - \lambda\Delta N + \Delta\epsilon \quad (1)$$

式中,  $\Delta\varphi$  为历元间单差观测值;  $\rho_{s_p}$  为历元  $t$  的卫地距;  $\rho_{s_q}$  为历元  $t+1$  的卫地距;  $\Delta t$  为接收机钟变化量;  $\Delta N$  为周跳值;  $\Delta\epsilon$  为观测噪声;  $c$  为光速;  $\lambda$  为载波波长。

即使相邻历元的观测值都是同一台接收机观测值, 历元间单差观测值也消除不了接收机钟差影响, 需作为参数估计。假定观测值未发生周跳, 则前后历元的整周模糊度相等可通过历元间单差消除, 因此共存在 3 个坐标参数和 1 个接收机钟差参数, 如需确定发生周跳的观测值或进行周跳修复, 需保证至少存在 4 颗卫星的观测数据未发生周跳。采用相对定位模式可解出测站  $i$  在历元  $t+1$  处的观测值验后单位权中误差。观测值未发生周跳, 如图 1 所示, 验后单位权中误差一般在毫米级。如果发生周跳即  $\Delta N$  不为零, 图 2(b) 和图 3(b) 中验后单位权中误差会显著增大, 因此可根据验后单位权中误差探测发生周跳的历元。

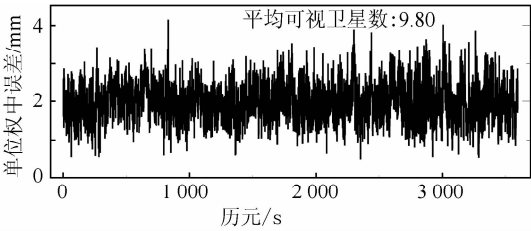


图 1 实测静态数据验后单位权中误差

Fig. 1 Standard Deviation of Real Static Data

1.2 确定周跳发生卫星

在测量数据服从正态分布的情形下, 最小二乘估计具有最优统计性质, 即它是最优线性无偏估计<sup>[12]</sup>。但是由于最小二乘具有良好均衡误差的特性, 观测值中有粗差出现时, 估值必将迁就粗差, 因此个别的粗差会对估值产生较大影响, 导致估计严重失实, 因此本文采用抗差最小二乘法确

定发生周跳的异常卫星, 等价权函数的选取如式(2)<sup>[13]</sup>:

$$\bar{P}_i = \begin{cases} P_i, & |\hat{V}_i| \leq k_0 \\ \frac{k_0 P_i}{|\hat{V}_i|} \left( \frac{k_1 - |\hat{V}_i|}{k_1 - k_0} \right)^2, & k_0 < |\hat{V}_i| \leq k_1 \\ 0, & |\hat{V}_i| > k_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\hat{V}_i$  为标准化残差;  $P_i$  采用高度角定权; 本文  $k_0$  取 1.0,  $k_1$  取 2.5。

采用抗差最小二乘法解算法方程, 逐步进行迭代计算, 直至前后两次解的坐标差值符合限差要求为止。此时可获得每个观测值的残差  $v_i$ , 当标准化残差  $|\hat{V}_i| = \frac{|v_i|}{\sqrt{Q_{vv}}}$  大于某一阈值(本文取 0.05 m)时, 可确定该观测值有周跳发生。 $Q_{vv}$  只与图形结构及观测值的权阵有关, 权阵采用先验权即高度角定权。

1.3 周跳修复

当确定某颗卫星观测值发生周跳时, 在式(1)中增加一个周跳值待估参数  $\Delta N$ 。循环发生周跳的异常卫星, 每次循环确定一颗卫星的周跳值, 其余发生周跳的异常卫星观测值权降为 0, 使其观测值对参数估计不起作用。直至修复所有周跳值, 结束循环。

2 有效性测试分析

采用 2010 年 5 月 21 日山西省连续运行参考站系统(SXCORS)一组 1 s 采样间隔的实测静态和动态数据验证本文方法的有效性。实测数据为双频观测数据, 为模拟单频实时周跳探测与修复的过程, 仅采用 L1、CA 观测值及卫星广播星历。

2.1 实测静态数据测试

为验证本文方法对实测静态观测数据的有效性, 选取 SXCORS 中某一基准站的观测数据进行试验, GPS 接收机和天线类型分别为 LEICA GRX1200GGPRO 和 LEIAR25 LEIT, 能够采集 C1、L1、P2 和 L2 共 4 种观测值。本文测试了前一小时共 3 600 历元连续无周跳的观测数据, 平均可视卫星数为 9.80。按照本文方法逐历元计算出历元间单差观测值的单位权中误差(见图 1)。各历元的单位权中误差均为毫米级, 验证了所采用的实验数据并不存在周跳。

文献[11]中验证了基于双差的单频单站数据预处理方法相对多项式拟合的优越性, 是单频数据预处理中较为有效的一种方法, 以下进一步验

证本文方法相对该方法的有效性。在历元 100 处对参考卫星 G15 添加 1 周周跳,图 2 显示了两种方案的处理结果,其中 A 方案为基于双差的单频单站数据预处理方法,B 方案为本文方法。图 2(a)显示了观测值未发生周跳时的抗差估计验后残差,两种方案得到的验后残差基本一致。参考卫星发生周跳时,图 2(b)中两种方案的验后单位权都被显著的放大,A 方案和 B 方案都可以探测

出周跳发生的历元。然而如图 2(c)所示,A 方案中参考卫星的周跳值被星间单差观测值吸收,每颗卫星的验后残差被不正常地放大从而导致周跳探测失效。而本文方法由于无需设置参考卫星,观测值间不存在相关性,如图 2(d)所示,只有卫星 G15 的验后残差被显著的放大。因此,任意卫星发生周跳均不会影响本文周跳探测方法的有效性。

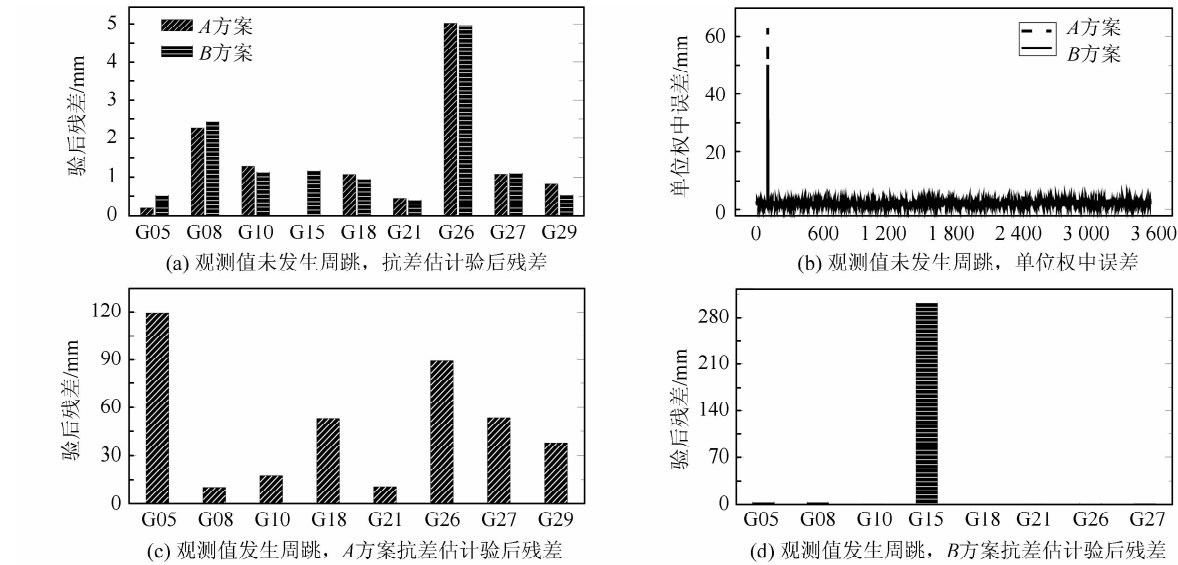


图 2 抗差估计验后残差  
Fig. 2 Robust Estimation Residuals

本文方法能否正确定位周跳的位置取决于发生周跳的个数。在复杂观测环境下,发生周跳的异常卫星数、周跳值大小存在多样性,周跳探测与修复的有效性可能会有所降低。为系统测试分析本文周跳探测与修复方法在不同观测条件下的抗差性,每个历元分别添加  $n$  个不同的周跳,周跳值大小分别为  $1, 2, \dots, n$ ,参与统计的历元在观测时段内都至少存在 4 颗卫星的观测数据未发生周跳,历元数总计 3 600,统计结果见表 1。

表 1 静态数据周跳探测与修复成功率统计  
Tab. 1 Statistics on the Rate of the Successful Cycle Slip Detection and Repair of Static Data

(发生周跳卫星数/ 可视卫星数)/%	周跳探测成 功率/%	探测到的周跳 修复成功率/%
0~10	98.88	100
10~15	99.25	100
15~20	99.11	100
20~25	96.83	100
25~30	95.86	100
30~35	70.50	100
35~40	58.11	100
40~45	34.31	100
45~50	0.94	100

从表 1 可见,当发生周跳的异常卫星数小于可视卫星数的 30% 时,周跳探测成功率在 95% 以上;当发生周跳的异常卫星数大于可视卫星数的 30% 时,随着发生周跳异常卫星数的增加,周跳探测的成功率逐渐下降。由表 1 还可以看出,如果周跳探测成功,则周跳修复成功率高达 100%。

### 2.2 实测动态数据测试

为了进一步验证本文周跳探测与修复方法的有效性和可靠性,利用 SXCORS 网中的一组实测动态数据进行验证分析,GPS 接收机和天线类型分别为 Trimble 5800 和 TRM5800,能够采集 C1、L1、L2 和 P2 共 4 种类型的观测类型。选取时段 10:50:40~10:55:21 共 280 个历元连续无周跳的观测数据,平均可视卫星数为 9,利用本文方法逐历元计算出历元间单差观测值的单位权中误差(图 3(a)),实测动态数据所得的中误差相比实测静态数据略高,但基本在同一量级,验证了所采用的实验数据并不存在周跳。

对 G15 卫星在历元 100 处添加 1 周周跳,图 3(b)显示了观测值添加周跳后解算得到的验后单位权中误差。从图 3(b)中可以看出,在历元

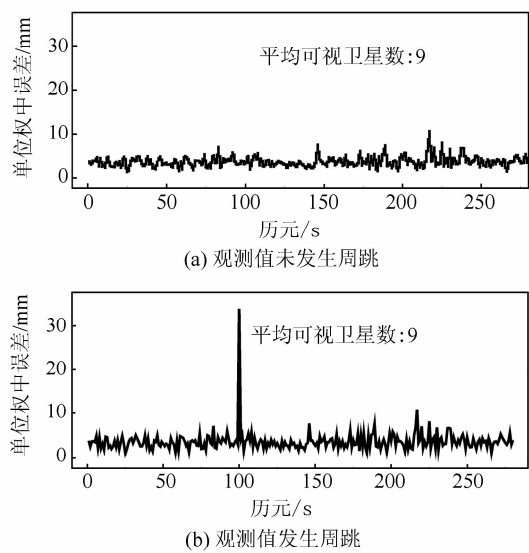


图 3 实测动态数据验后单位权中误差  
Fig. 3 Standard Deviation of Real Dynamic Data

100 处的验后单位权中误差显著增大,可探测出该历元有周跳发生,采用与静态测试相同的处理流程便可实现周跳探测与修复。为测试本文方法对动态数据的抗差性,选取 10:50:41~11:09:01 时段中无周跳发生的历元为统计时段,平均可视卫星数为 9。每个历元分别添加  $n$  个不同的周跳,周跳值大小分别为  $1, 2, \dots, n$ ,参与统计的历元在观测时段内都至少存在 4 颗卫星的观测数据未发生周跳,历元数总计 1 035,统计结果见表 2。

表 2 动态数据周跳探测与修复成功率统计  
Tab. 2 Statistics on the Rate of the Successful Cycle Slip Detection and Repair of Dynamic Data

(发生周跳卫星数/ 可视卫星数)/%	周跳探测成 功率/%	探测到的周跳 修复成功率/%
0~15	98.74	100
15~20	98.84	100
20~25	99.61	100
25~30	99.61	100
30~35	42.03	100
35~40	34.49	100
40~45	17.29	100
45~50	0.48	100

由表 2 可以看出,即使采用实测动态数据,仍可得到与静态数据类似的测试分析结果,这进一步验证了本文方法在进行单站单频周跳探测与修复时的有效性。

3 结 语

基于实测静态和动态数据的测试结果表明,按照本文方法,根据历元间差分观测值的验后单

位权中误差,能够 100%探测出发生周跳的历元。当至少 4 颗卫星未发生周跳时,如异常卫星数小于可视卫星数的 30%,则在 95%以上的情况下可以有效确定异常卫星。当异常卫星过多时,本文方法确定异常卫星的成功率会有所下降。当无法确定异常卫星时,建议将所有可视卫星重新初始化。整体而言,只要能够探测出发生周跳的异常卫星,本文方法对其观测值进行修复的成功率高达 100%。本文提出的单站单频周跳探测与修复方法,对于 GNSS 单频精密定位技术发展,以及将相对廉价、轻便的 GNSS 单频接收机设备应用于城市定位服务、精准农业、智能交通系统等新兴领域具有一定的推动作用。

参 考 文 献

[1] Bahrami M, Ziebart M. Doppler-Aided Positioning [J]. *GPS World*, 2011:47-56

[2] Ye Shirong. Theory and its Realization of GPS Precise Point Positioning Using Un-differenced Phase Observation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2002 (叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位理论与实现 [D]. 武汉: 武汉大学, 2002)

[3] Li X. Improving Real-time PPP Ambiguity Resolution with Ionospheric Characteristic Consideration [R]. Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2012

[4] Odijk D, Zhang B, Teunissen P J G. Multi-GNSS PPP and PPP-RTK: Some GPS + BDS Results in Australia[J]. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2015, 341:613-623

[5] Zhang B, Teunissen PJG, Odijk D. A Novel Undifferenced PPP-RTK Concept [J]. *Journal of Navigation*, 2011, 64(16):180-191

[6] Li Xingxing, Zhang Xiaohong. Improving the Estimation of Uncalibrated Fractional Phase Offsets for PPP Ambiguity Resolution[J]. *Journal of Navigation*, 2012, 65(3):513-529

[7] Zou Xuan, Feng Yangtong, Tang Weiming, et al. Equivalence of the Undifferenced HiRIM Method and the Existing Double-differenced Network RTK Methods[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(11):1 276-1 280 (邹璇, 冯彦同, 唐卫明, 等. 非差 HiRIM 方法与现有双差网络 RTK 方法的等价性[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(11):1 276-1 280)

[8] Zou Xuan, Li Zongnan, Tang Weiming, et al. A New Undifferenced Network RTK Scheme for Massive Users[J]. *Geomatics and Information Science*

of Wuhan University, 2015, 40(9):1 242-1 246(邹璇, 李宗楠, 唐卫明等. 一种适用于大规模用户的非差网络 RTK 服务新方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(9):1 242-1 246)

[9] Li Zhenghang, Zhang Xiaohong. New Techniques and Precise Data Processing Methods of Satellite Navigation and Positioning[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009(李征航, 张小红. 卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009)

[10] Wang Cheng, Wang Jiexian. Cycle Slip Detection and Correction of Single-frequency Undifferenced Phase Observation[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2012(9):1 393-1 398(王成, 王解先. 单频非差相位观测值的周跳探测与修复方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012(9): 1 393-1 398)

[11] Song Weiwei, Yao Yibin. Pre-process Strategy in Complex Movement Using Single-frequency GPS Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(11):1 305-1 308(宋伟伟, 姚宜斌. 复杂运动状态下的单频数据预处理方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(11):1 305-1 308)

[12] Liu Dajie, Tao Benzao. Method of Data Processing in Practicall Measure[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2000(刘大杰, 陶本藻. 实用测量数据处理方法[M]. 北京: 测绘出版社, 2000)

[13] Qin Xianping, Yang Yuanxi. Applications of Robust Variance Component Estimation to Satellite Orbit Determination[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2003(4): 40-43(秦显平, 杨元喜. 抗差方差分量估计在卫星定轨中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2003(4): 40-43)

A New Cycle Slip Detection and Repair Method Based on Epoch Difference  
for a Single-frequency GNSS Receiver

ZOU Xuan<sup>1</sup> LI Zongnan<sup>1</sup> CHEN Liang<sup>2</sup> SONG Weiwei<sup>1</sup> WANG Cheng<sup>1</sup> TANG Weiming<sup>1</sup>

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

2 Qianxun SI Inc. , Shanghai 200438, China

**Abstract:** This paper proposes a new cycle slip detection and repair method for a single-frequency GNSS receiver based on epoch difference. Taking the previous and current epoch as base and rover station respectively, posteriori standard errors and residuals of observations were derived from relative positioning and robust estimation. Single-frequency cycle slip detection and repair were carried out as well. Analysis of experiments with measured data suggest that the success rate of detection epochs of cycle slip is 100%, and more than 95% of abnormal satellites can be detected on occasions when the number of observed satellites without cycle slips is more than four and the percentage of the satellites without cycle slips is less than 30%. With an excessive number of abnormal satellites, the success rate of detection descends correspondingly. The success rate of cycle slip repair can reach 100% based on the success of detection of cycle slips.

**Key words:** single station; single-frequency; epoch difference; cycle slip detection; cycle slip repairing

**First author:** ZOU Xuan, PhD, associate professor, specializes in undifferenced network RTK and high accuracy data processing. E-mail: supermanzx1982@sina.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, No. 41304028; the China 863 Program, No. 2014AA123101; the Hubei Key Laboratory of Three Gorges Project for Conservation of Fishes, No. SXSXN/4008; the Fundamental Research Funds for the Central Universities, Nos. 2042016kf0184, 2042016kf0061.