

# 基于观测值域的 GPS 多路径误差应用分析

陈德忠<sup>1</sup> 叶世榕<sup>1</sup> 刘炎炎<sup>1</sup> 刘 郑<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

**摘要:** 基于观测值域双差残差恒星日滤波方法消除多路径误差, 利用事先计算的前一天观测卫星双差残差并进行去噪处理, 根据各自卫星周日重复性改正到第二天对应时刻的双差观测方程中, 得到剔除多路径误差后的“干净”双差观测值, 最后解算基线信息。试验结果表明, 与常规基于坐标域恒星日滤波相比, 该方法在平面方向的精度可提高23%, 且高程方向也有一定程度的提高。

**关键词:** 形变监测; 观测值域; GPS; 多路径误差

中图法分类号:P228.41

文献标志码:A

在GPS短基线数据处理中, 接收机和卫星钟差、对流层延迟和电离层延迟等主要误差源都具有较强的空间相关性, 通常采用双差处理模式消除或削弱其影响。但与站点环境相关的多路径误差不具有空间相关性, 无法采用差分模式消除其影响, 已成为提高GPS定位精度与可靠性的瓶颈<sup>[1]</sup>。

在一定条件下, 多路径误差最大值为信号波长的1/4<sup>[2]</sup>, 在高精度工程应用中必须消除其影响。目前, 削弱多路径误差影响的方法中除选择合适站址外, 主要从提高接收机质量和改进数据后处理软件算法两个方向展开。在接收机硬件改进方面主要有特殊天线法<sup>[3]</sup>、窄相关技术<sup>[4]</sup>、MET<sup>[5]</sup>和MEDLL<sup>[6]</sup>等技术, 基于接收机硬件和信号处理的改进技术对多路径误差的削弱已展现出一定的优势, 但是其对高度角较大的多路径误差敏感性较差<sup>[7]</sup>。在数据后处理算法中有信噪比定权的SNR技术<sup>[8]</sup>、多天线阵列技术<sup>[9]</sup>、射线追踪法<sup>[10]</sup>及基于卫星星座周日重复性的恒星日滤波<sup>[11-13]</sup>等。其中利用卫星周日重复性的恒星日滤波技术已在国内外展开广泛研究, 但是目前针对恒星日滤波技术研究的重点集中于采用滤波去噪方法从前一天坐标时间序列中提取出多路径误差, 然后将其改正到第二天对应的坐标序列中, 得到消弱多路径影响的坐标序列值, 通常称为基于坐标域的恒星日滤波。

坐标域恒星日滤波的多路径误差模型为所有可观测卫星多路径误差的综合, 计算的坐标序列时间延迟会有一定误差; 且因坐标序列噪声为所有卫星噪声整体表现, 每颗卫星在同一时刻高度角不同而噪声不同, 在滤波去噪时对相关滤波方法提出更高的要求。本文提出了一种基于观测值域的双差残差多路径改正方法, 先逐历元计算第一天每颗卫星的双差残差, 然后采用相关滤波去噪方法对残差降噪处理, 将其改正到第二天最大相关时刻处的该号卫星双差观测值上, 最后组成观测方程, 得到消除多路径误差影响的坐标序列。

## 1 观测值域多路径误差改正研究

在GPS短基线( $\leq 5 \text{ km}$ )静态数据处理中, 基于双差数据处理模式通常用 $L_1$ 或者 $L_2$ 载波即可固定模糊度, 测站j到i在卫星p和q之间双差观测方程为:

$$\lambda \Delta \Phi_{ij}^{pq} = \Delta_{ij}^{pq} d \Delta x_{ij} + \Delta m_{ij}^{pq} d \Delta y_{ij} + \Delta n_{ij}^{pq} d \Delta z_{ij} + \lambda N_{ij}^{pq} + M_{p,ij} + \Delta_{ij} \quad (1)$$

式中,  $\lambda$ 为相位波长;  $\Delta\Phi$ 为双差载波相位;  $\Delta$ 、 $\Delta m$ 、 $\Delta n$ 分别为相应坐标分量方向余弦;  $N$ 为双差模糊度;  $M_p$ 为双差观测方程中多路径误差项;  $\Delta$ 为随机噪声。采用双差解算模式, 在模糊度参数固定后将坐标参数和模糊度回带到式(1)中, 剩余

残差即为多路径误差和随机噪声,随机噪声信号幅值一般在2 mm以内,且为高频部分,可采用相关滤波去噪方法将其从多路径误差中分离出来,文中则采用移动平均法。在前后两天对应时刻如出现参考星不一致时,可通过做差将前一天的残差基准换到当前参考星基准下。假设第一天某时刻参考星为Prn5,且还观测到Prn3和Prn8等,则3号和8号卫星双差残差为 $V_{53} = V_3 - V_5$ , $V_{58} = V_8 - V_5$ ,第二天对应时刻参考星为Prn3,则前一天的双差残差为 $V_{35} = V_5 - V_3 = V_{53}$ , $V_{38} = V_8 - V_3 = V_{58} - V_{53}$ ,即转换到当前参考星基准上。在第二天数据处理时将前一天每颗卫星的多路径误差改正到第二天对应时刻处的双差观测值中,即为剔除多路径误差的双差观测值。

为了定量地分析多路径误差周期性特征及在GPS基线解算中的影响,2012-10-23~25在武汉大学教学实验大楼楼顶安置两台双频GPS接收机进行连续观测。在离其中一台1.5 m处安置一块带金属箔纸挡板,以此增加多路径误差;将另一台安置在约30 m外且观测环境较好处。数据

采集期间保持两台接收机位置、观测模式不变,并设置1 s采样率,截止卫星高度角8°,连续观测3 d采集数据。

依次对3 d的GPS观测数据按照双差模式计算卫星双差残差,并采用基于移动窗口的去噪方法降噪处理。由于卫星运行的周日重复性,即卫星运行一周期后回到“相同”的位置,对于多路径误差同样具有一定的重复周期。以12、13号卫星为例,其双差残差如图1所示。由图1可知:12、13号卫星连续3 d的双差残差序列具有较强的相似性,对Prn 13残差序列分别统计3 d之间的最大互相关系数、相关延迟和RMS值如表1。由表1统计结果中可以看出,对双差残差去噪后其连续两天(day1~day2, day2~day3)的相关性最大值均达到0.99以上,且大于非连续天(day1~day3)最大相关性,说明在相邻观测天多路径效应具有较高的符合性,RMS值进一步说明卫星双差残差连续3 d的一致性。随着观测时间的延长,卫星、测站和反射物等的几何条件有所变化,多路径误差相关性程度降低。

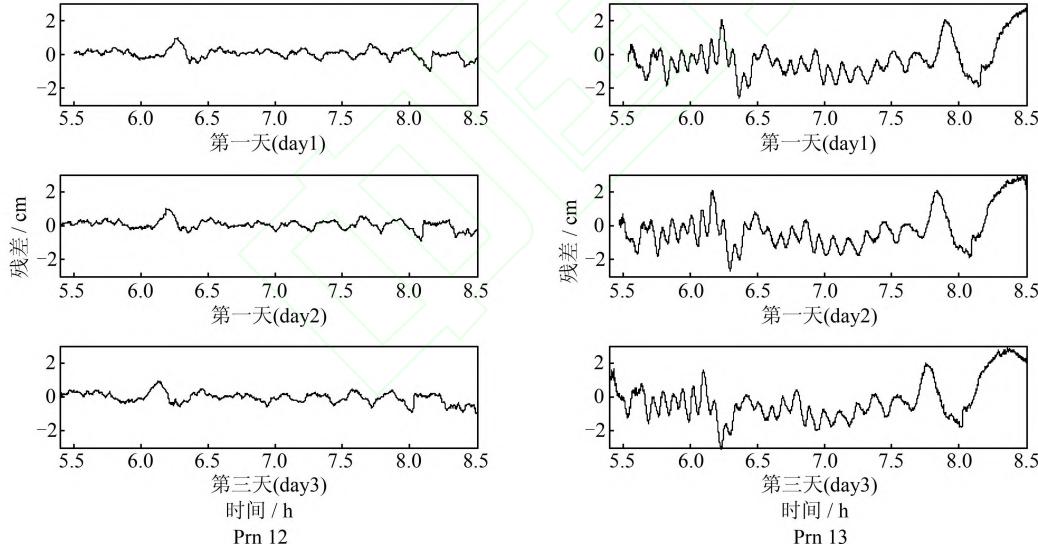


图1 Prn 12、Prn13 双差残差序列

Fig. 1 Double Difference Residual Sequence of prn 12 and prn 13

从表1中的相关延迟时间可知,卫星的轨道重复周期并不是严格不变的,因此,分别计算各卫星相关延迟及多路径误差的观测值域滤波法消多路径误差在理论上更为合理。

表1 Prn 13 双差残差相关性统计

Tab. 1 Correlation Statistic of prn 13's DD Residual

Day	相关日期	最大相关性	相关延迟/s	RMS/cm
Day1	Day2	0.994 3	246	1.110
Day2	Day3	0.991 7	245	1.113
Day3	Day1	0.988 1	493	1.115

## 2 两种滤波比较分析

分别采用两种消除多路径误差滤波方式对上述连续3 d数据进行相关处理。图2为day1、day2、day3连续3 d未消除多路径误差模型的N、E和U等3个坐标分量残差,各分量在3 d的对应时段变化趋势较为一致,表明多路径效应的周期性变化,但历元解基线参数整体波动性较大,3 d解中RMS在各分量上分别在5 mm~3 mm和

9 mm 左右。图3为用基于坐标域的恒星日滤波消除多路径误差后各坐标序列残差图,在表2的多路径效应统计分析中可以看出,day2 ~ day1 和 day3 ~ day2 的坐标序列在3个分量上的相关性均达到0.9左右,进一步验证了在测站环境变化不大的情况下多路径误差具有周期强相关性; day3 ~ day1 坐标分量的相关性系数明显比前两组低,主要是随着时间间隔增长,卫星轨道的重复性减弱,导致多路径空间相关性减弱。在基于观测值域的恒星日滤波消多路径误差处理后的图4中可知,其各残差分量较图3中基于坐标域的恒星日滤波更为平缓(day2 ~ day3 组和 day3 ~ day1 组),RMS 值也减小了1~2 mm,说明其多路径误

差剔除较彻底,仅残留了随机误差部分。

由双差残差相关性及坐标序列相关性统计结果可知,表1中卫星双差残差相关性在相邻两天观测中达到0.99,而表2中相邻两天坐标序列相关性大约为0.90,可认为基于各卫星双差残差恒星日滤波更为合理有效。两种恒星日滤波方式提取多路径误差后 RMS 值及改善程度如表2后两项所示,在前两组组合中,观测值域滤波比坐标域滤波在N、E 分量的定位精度平均提高23.6%, RMS 均达到1.4 mm,而在U 方向也有一定程度的提高。在时间间隔较长的day3 ~ day1 组合中,其坐标序列相关性明显较弱,对比两种多路径误差改正模型的残差结果,进一步体现出观测值域

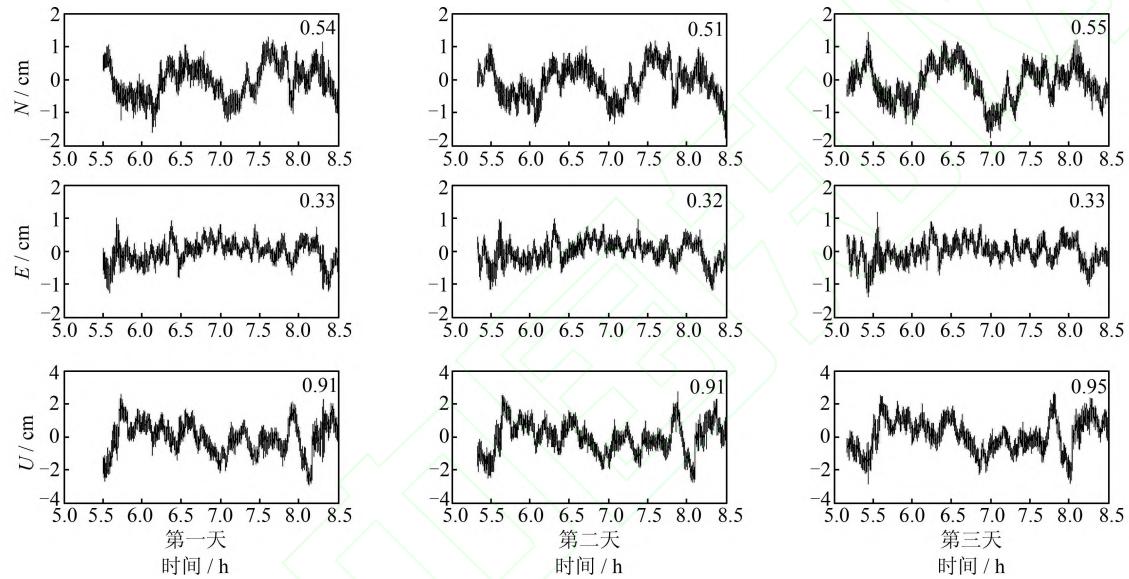


图2 原始N、E、U坐标序列残差

Fig. 2 Residuals of Raw N, E, U Coordinate Sequence

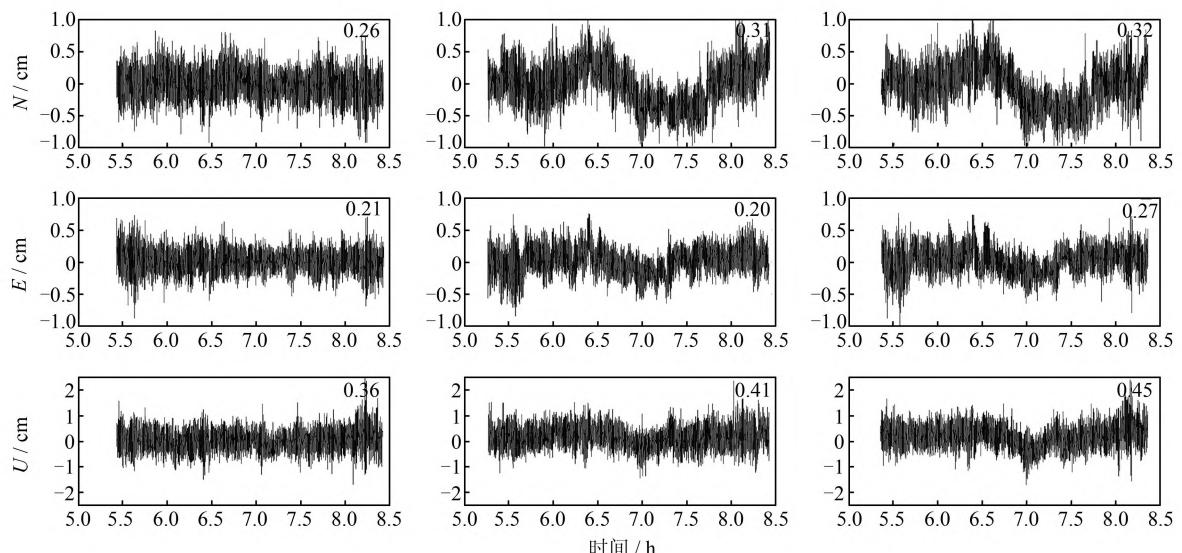


图3 基于坐标域恒星日滤波N、E、U 残差

Fig. 3 Residuals of N, E, U with Spherical Filtering Based on the Coordinate Domain

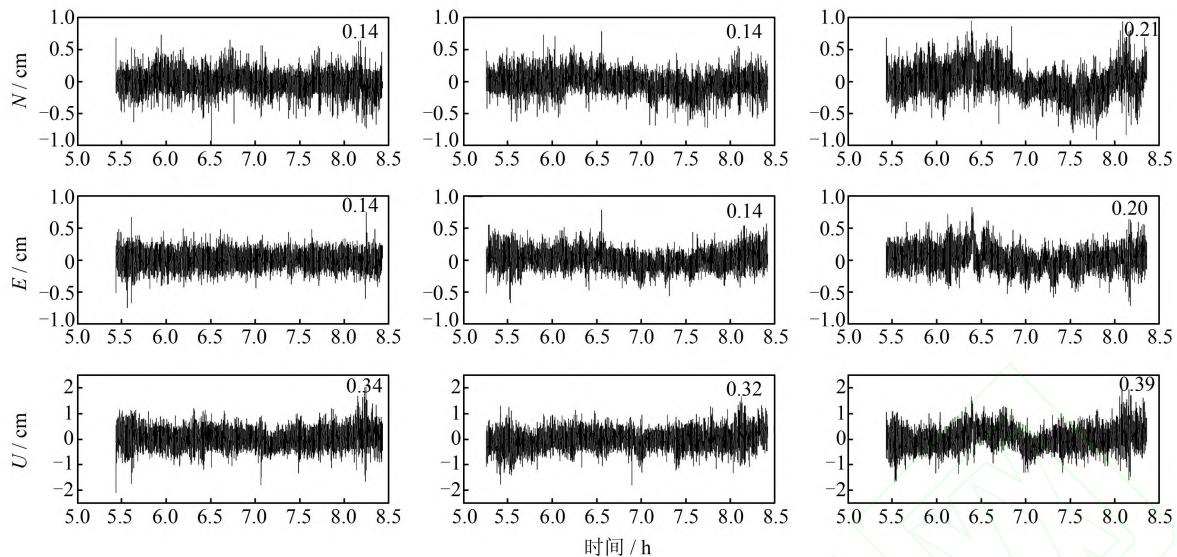


图4 基于观测值域恒星日滤波N、E、U残差

Fig.4 Residuals of N, E, U with Sdered Filtering Based on the Observation Domain

表2 多路径效应统计分析

Tab 2 Correlation Statistic of Multipath Effects

Day	相关日期	坐标序列	最大相关性	相关延迟/s	RMS/mm	坐标域滤波		观测值域滤波	
						RMS/mm	改善程度/%	RMS/mm	改善程度/%
Day2	Day1	N	0.915 8	250	5.1	2.6	49.0	1.4	72.5
		E	0.901 7	254	3.2	2.1	34.2	1.4	56.1
		U	0.920 1	254	9.1	3.6	60.4	3.4	62.6
Day3	Day2	N	0.900 3	249	5.5	3.1	43.6	1.4	74.5
		E	0.902 5	250	3.3	2.0	39.3	1.4	57.5
		U	0.917 7	238	9.5	4.1	56.8	3.2	66.3
Day3	Day1	N	0.824 5	492	5.5	3.2	41.8	2.1	61.8
		E	0.821 0	491	3.3	2.7	18.2	2.1	36.3
		U	0.830 1	491	9.5	4.5	52.6	3.9	58.9

滤波用于消周期性较大的多路径误差的优势。前两组中相关延迟时间即第二天坐标序列提前于对应的第一天坐标序列在各分量上都不一样,day3 ~day2 组中U 分量为238 s,与其他分量差异性较大,且day3 ~day1 中时间延迟并不是前两组时间延迟的简单相加,这是由于各卫星的严格轨道周期有所差异,且前后天所观测卫星不完全一致,因此,基于各卫星轨道周期及观测值域的多路径误差模型显得更为合理。

### 3 结语

本文在分析多路径误差改正基础上研究了一种基于观测值域去噪处理后的双差残差用于GPS 短基线数据处理中消除多路径误差方法,与常规坐标域恒星日滤波相比具有一定的优势。连续观测且测站环境差异不大情况下,卫星双差残差比坐标序列相关性更大,因此单独考虑各卫星

的多路径效应及相关延迟更为精确。对于相邻两天数据,观测值域滤波比坐标域滤波平面精度提高23.6%;对于间隔一天的观测数据,其改善效果也较为明显;在提前计算出前一天双差残差后,第二天数据处理中直接在双差观测值中消除多路径误差,更有利于实时动态变形监测系统。但相较于坐标域滤波,观测值域滤波数据处理过程更为复杂,且目前仅用1 s 采样率数据试验,对于利用高采样率数据的地震监测等应用还需进一步研究。

### 参考文献

- [1] Leick A . GPS Satellite Surveying [M]. Hoboken: John Wiley & Sons , Inc , 2004
- [2] Huang Shengxiang , Li Peihong , Yang Baocen , et al . Study on the Characteristics of Multipath Effects in GPS Dynamic Deformation Monitoring [J] . Geomatics and Information Science of Wuhan University , 2005 , 30 (10) : 877-880 ( 黄声享, 李沛鸿, 杨保

- 岑,等.GPS动态监测中多路径效应的规律性研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2005,30(10):877-880)
- [3] Schupler B C, Allshouse R L, Clarkta. Signal Characteristics of GPS User antennas [J]. Institute of Navigation, 1994, 41(3):277-295
- [4] van Dierendonck A J, Fenton P C, Ford T. Theory and Performance of Narrow Correlator Spacing in a GPS Receiver [J]. Navigation, 1992, 39(3):265-283
- [5] Townsend B, Fenton P. A Practical Approach to the Reduction of Pseudorange Multipath Errors in a L1 GPS Receiver [C]. Proceedings of ION GPS-94, Salt Lake City, USA, 1994
- [6] Townsend B, Vannee R, Fenton P, et al. Performance Evaluation of the Multipath Estimating Delay Lock Loop [C]. Proceedings of ION National Technical Meeting, CA, USA, 1995
- [7] Young L, Meehan T. GPS Multipath Effect on Codeusing Receiver [C]. American Geophysical Union Meeting, Baltimore, USA, 1998
- [8] Lau L, Mok E. Improvement of GPS Relative Positioning Accuracy By Using SNR [J]. Journal of Surveying Engineering, 1999, 125(4):185-202
- [9] Ray J K. Mitigation of GPS Code and Carrier Phase Multipath Effects Using a Multi-antenna System [D]. Canada: University of Calgary, 2000
- [10] Lau L, Cross P. Development and Testing of a New Ray Tracing Approach to GNSS Carrier Phase Multipath Modelling [J]. Journal of Geodesy, 2007, 81(11):713-732
- [11] Ge L, Hans, Rzo C. Multipath Mitigation of Continuous GPS Measurements Using an Adaptive Filter [J]. GPS Solution, 2000, 4(2):19-30
- [12] Yi Tinghua, Li Hongnan, Yi Xiaodong, et al. On GPS Observation Errors with ANC Principles and Wavelet Denoise Method [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(11):995-998 (伊廷华,李宏男,伊晓东,等.基于自适应噪声抵消与小波滤波的GPS监测误差分析[J].武汉大学学报·信息科学版,2006,31(11):995-998)
- [13] Cui Xianqiang, Yang Yuanxi, Gao Weiguang. Comparison of Adaptive Filter Arithmetics in Controlling Influence of Colored Noises [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(8):731-735 (崔先强,杨元喜,高为广.多种有色噪声自适应滤波算法的比较[J].武汉大学学报·信息科学版,2006,31(8):731-735)

## Applied Analysis of GPS Multipath Errors Based on Observation Domain

CHEN Dezhong<sup>1</sup> YE Shirong<sup>1</sup> LIU Yanyan<sup>1</sup> LIU Zheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Research Center of GNSS, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** Multipath must be eliminated as an important error source when improving relative positioning accuracy of GPS short baseline in practical deformation monitoring engineering such as for dams, high-rise buildings and big bridges. In this study, a new sidereal algorithm based on a double residual in the GPS observation domain is proposed to mitigate multipath errors. We calculated residuals for all double observations after resolving ambiguity while denoising those residuals for the first day. These results were taken as a multipath model to remove the multipath errors from the double difference observation equations of the subsequent day by taking advantage of sidereal repeatability of every satellite. Clean double observations without multipath errors could be extracted, and a better baseline coordinate sequence was consequently calculated. The results show that this new method not only does well in the vertical precision but also reduces the root mean square ( $r_{ms}$ ) in horizontal coordinate precision by 23%, as compared with traditional sidereal filter.

**Key words:** deformation monitoring; observation domain; GPS; multipath errors

First author: CHEN Dezhong, PhD candidate, specializes in high precision GNSS data processing. E-mail: cdz1999@qq.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41074008; the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China, No. 20120141110025; the National Program on Key Basic Research Project (973 Program), No. 2012CB957701; the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program), No. 2012AA12A202; the Independent Research Fund for PhD candidate of Wuhan University, No. 201161802020001.