



# 测站处GNSS多路径误差效应反演及其应用研究

邹璇<sup>1</sup> 付睿男<sup>1</sup> 王亚伟<sup>1</sup> 李志远<sup>1</sup>  
徐纵<sup>2</sup> 唐卫明<sup>1</sup> 李洋洋<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 国网浙江省电力有限公司检修分公司,浙江 杭州,311232

**摘要:**针对测站观测环境变化对数据质量影响难以有效评估并削弱的问题,研究了一种可通用于各类卫星导航系统的多路径误差半球格网点建模方法(multi-point hemispherical grid model, MHGM)。该方法能够综合利用不同GNSS(global navigation satellite system)系统的不同时期观测数据进行整体建模,显著削弱GNSS信号所受多路径误差影响,并图像化反演测站周围的多路径效应,确定信号干扰源的方位。算例的测试结果表明,在模拟的强多路径环境下,模型改正后模糊度固定时段的载波相位观测值残差的均方根误差(root mean square error, RMSE)统计值由0.983 cm降为0.318 cm,改善率高达67.7%。此外, MHGM建模结果中改正量较大的异常区域与对应测站处所架设挡板的方位相一致,能够反演出测站周围不同方向观测信号所受多路径误差影响。国际GNSS服务组织的历史观测数据在利用MHGM模型改正后,合计18年测试算例的观测值残差RMSE平均改善率达到29.5%。这对于评估测站观测环境在不同时期的变化状况,提升现有各类增强服务产品的精度和可靠性具有一定的潜在应用价值。

**关键词:**GNSS;多路径误差;半球格网点建模方法;图像化反演

**中图分类号:**P228

**文献标志码:**A

国际GNSS服务组织(International Global Navigation Satellite System Service, IGS)是一个自发性的国际组织,通过遍布全球的连续运行参考站提供高质量GNSS(global navigation satellite system)观测数据和相关应用服务产品<sup>[1-2]</sup>。

随着时间的推移,各IGS站周围的观测环境不可避免会发生改变,但IGS提供的测站相关信息大多只记录了天线或接收机等硬件变更情况<sup>[3]</sup>。目前,IGS对测站数据质量的评估也仅限于数据传输的完整性和有效性,并未考虑到测站观测环境变化对数据质量造成的影响<sup>[4]</sup>。对GNSS各类误差的有效消除是高精度数据处理的基础,随着近年来误差源消除方法的逐步精化,为改善原有卫星轨道、卫星钟差等产品精度,IGS组织开展过两次针对自1994年起观测数据的重处理工作<sup>[5]</sup>,目前IGS官方标称的GPS(global positioning system)事后精密卫星轨道一维精度高达2.5 cm。但观测信号所受多路径误差影响取决于测站观测环境,无法利用现有方法有效消除。

多路径误差是指卫星信号受反射、散射等原因通过多条路径到达接收机天线而导致观测值出现的偏差<sup>[6]</sup>,对于载波相位观测量而言最大可达波长的1/4<sup>[7-8]</sup>,是影响GNSS数据处理精度的一种主要误差源<sup>[9-11]</sup>。为削弱多路径误差影响,目前应用较为广泛的是恒星日滤波方法,该方法利用了多路径误差的周日重复特性从坐标域或观测值域进行误差建模<sup>[12-15]</sup>。不过该方法在进行误差改正时较为繁琐,同时低采样率的观测数据也无法进行有效的改正。

设计一套应用模式简单有效且适用于不同GNSS卫星星座的多路径误差建模方法是进一步提升精密卫星轨道、钟差、区域大气增强信息等产品精度的关键。本文研究了一种对测站处多路径误差进行半球格网点建模的新方法,该方法能够图像化反演测站周围存在的多路径误差效应,并有效修复对GNSS信号的多路径误差影响,对于进一步提升现有增强服务产品的精度和可靠性具有一定的潜在应用价值。

收稿日期:2020-10-26

项目资助:国家重点研发计划(2018YFB0505201)。

第一作者:邹璇,博士,副教授,主要从事GNSS精密数据处理方面研究。zxuan@whu.edu.cn

## 1 多路径误差效应的反演建模

若测站天线处于一个无限大的平面上方且只受该平面中单一反射信号的影响,则周围环境导致的多路径效应对载波相位观测值影响可描述如下:

$$\Delta = \frac{\lambda}{2\pi} \tan^{-1} \frac{\alpha \sin((4\pi H \sin \epsilon)/\lambda)}{1 + \alpha \cos((4\pi H \sin \epsilon)/\lambda)} \quad (1)$$

式中,  $H$  为反射面距天线相位中心的高度;  $\epsilon$  为反射信号的入射角;  $\alpha$  为反射信号物体的反射系数;  $\lambda$  为卫星信号的波长。

由式(1)可知,卫星的位置变化导致反射信号的入射角及反射系数变化,对应的多路径误差也随之改变。如果接收机天线与周边环境的位置关系保持不变,则相同频率的不同卫星处于同一方位时,其载波相位观测值所受的多路径误差影响相同。本文提出在空间域对测站周围环境所引起载波相位多路径误差进行精细描述的建模方法(multi-point hemispherical grid model, MHGM)。假定测站环境保持不变时,多路径误差影响仅与信号传播方向相关,以测站卫星间模糊度固定时段对应的双差载波相位观测值残差作为观测信息,在各测站建立多路径半球格网点模型。通过多时段的观测数据进行方程叠加,得到整体最优的格网点建模结果。

具体实现步骤如下:以各测站天线相位中心为原点建立半球,高度角为半球球的纬度,方位角为半球球的经度,按照一定的间隔  $d$  进行格网划分,并对各格网点设置一个待估参数,建模时间间隔  $d$  取值越小,模型中待估参数越多,对计算机内存资源消耗越大,模型计算时间越长,但对测站处的多路径误差描述也越精细;反之,模型资源消耗更少且计算更快,但对测站处的多路径误差描述越简略,建模时需要综合考虑以上因素确定格网划分间隔。对于测站  $p$ 、 $q$  上两颗共视卫星  $s$ 、 $t$  对应的模糊度固定时段内双差载波相位观测值残差  $v_{pq}^{st}$ ,其中测站  $p$  上卫星  $s$  对应的残差为  $v_p^s$ ,该卫星在半球上的穿刺点涉及 4 个格网点参数  $Q_{p1}^s$ 、 $Q_{p2}^s$ 、 $Q_{p3}^s$ 、 $Q_{p4}^s$ ,则:

$$v_p^s = \alpha_1 Q_{p1}^s + \alpha_2 Q_{p2}^s + \alpha_3 Q_{p3}^s + \alpha_4 Q_{p4}^s \quad (2)$$

式中,  $\alpha_1 \sim \alpha_4$  为采用双线性内插方法时的内插系数。则每个测站各颗可视卫星的非差载波相位观测值残差与相关格网点参数间的关系如下:

$$v_{pq}^{st} = (v_p^s - v_p^t) - (v_q^s - v_q^t) \quad (3)$$

最终对每一组双差载波相位观测值残差  $v_{pq}^{st}$  构建如式(3)的观测方程,观测方程的权由相位

观测值的精度确定,理论上相位观测值的精度可以达到毫米级甚至更好。

载波相位双差观测方程可以通过差分的方式消除卫星和与测站相关的多类误差影响,由于是采用事后数据处理的方式,因此可以有效探测出粗差和周跳观测值,并通过使用精密卫星轨道、钟差产品进行对流层延迟、地球固体潮、大洋潮等多类误差改正等方式,尽可能地排除各类误差源的影响。此时对于双差模糊度固定时段的观测值残差,理论上主要由多路径误差和观测噪声构成。与多路径误差相比,载波相位观测噪声的量级较小且在频域上呈现高频特性,此时双差载波相位观测值残差  $v_{pq}^{st}$  主要受多路径误差影响。对任意格网点参数  $Q_1$ ,加入的虚拟观测方程为:

$$Q_1 = 0 \quad (4)$$

由式(1)可知其多路径误差理论上小于波长的 1/4 周,以此作为该类观测方程的权。由于临近格网点  $Q_1$ 、 $Q_2$  所对应测站周围环境存在一定相关性,可对相邻格网点参数间加入虚拟观测方程,该类观测方程的权由格网点间多路径误差的相关性决定,通过多组实测数据分析,一般可设置为 0.5~5.0 cm/(°),并以此设定该类观测方程的权为:

$$Q_1 - Q_2 = 0 \quad (5)$$

利用式(3)对应的不同时段、不同测站卫星对的相位双差观测值残差,以及式(4)、(5)对应的虚拟观测方程进行方程叠加解算,得到各格网点参数间整体最优的建模结果。该模型在反演测站周围信号干扰源造成多路径误差影响的同时,可进一步提升载波相位观测值的精度和有效性。从各 GNSS 系统的频率设置还可以发现, GPS 的 L1 信号和伽利略定位系统(Galileo positioning system, Galileo)的 E1 信号以及北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)三代的 B1C 信号,其频率均为 1 575.420 MHz, BDS 二代的 B1 信号与上述频率存在微小差异,为 1 561.098 MHz,这也为融合各 GNSS 系统观测数据进行不同卫星对、不同时段观测数据的多路径误差整体建模创造了条件。

## 2 测试分析

### 2.1 模拟强多路径环境实验分析

为验证半球格网点模型反演测站周围信号干扰源的有效性,在武汉大学教学实验大楼楼顶进行测试,并采集了 2018 年年积日 207 天~

237天的 BDS/GPS/Galileo 观测数据。布设了 A、B、C 共 3 个测站,其中 A 测站的西方向和 B 测站的东方向安装了金属挡板,用于模拟强多路径观测环境,C 测站为正常的观测环境,如图 1 所示。



图1 测站间位置关系及周围观测环境

Fig.1 Spatial Relationship and Surrounding Environments of the Three Stations

利用 3 个站精确已知的测站坐标,采用武汉大学研发的高精度导航定位数据处理分析软件(positioning and navigation data analyst,PANDA)计算模糊度固定时段对应的双差载波相位观测值残差。对于 MHGM 模型,本文中采用 2018 年年积日 207 天~236 天共计 30 d 的多 GNSS 观测数据对 3 个测站进行 B1/L1/E1 观测值的多路径误差整体建模(见图 2),综合考虑模型描述的有效性和计算资源消耗,建模时设定格网间隔为  $2^\circ$ ,利用第 237 天观测数据进行验证分析。

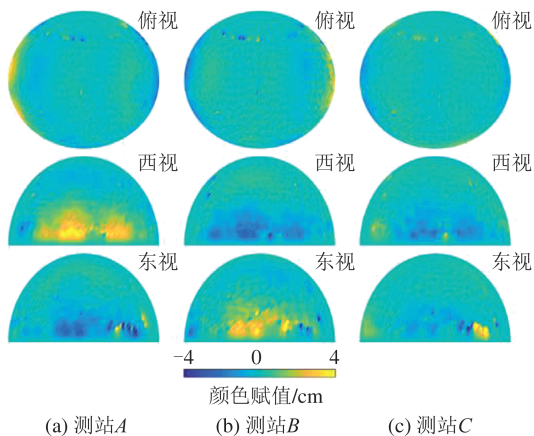


图2 各测站的 MHGM 建模结果

Fig.2 MHGM Modeling Results at Each Station

由图 2 可见,A 测站的西侧视图、B 测站的东侧视图存在明显且连续的黄色异常区域,该区域所处位置与 A、B 测站的金属挡板架设方位相一致,体现出挡板对测站观测环境造成的多路径误差影响,未架设挡板的 C 测站对应的 MHGM 模型则相对较为平滑。

MHGM 模型在图像化反演测站周围 GNSS 载波信号多路径误差效应的同时还能有效削弱

该类误差影响。图 3 给出了采用 MHGM 模型前后于年积日 237 天 3 个测站间各双差模糊度固定时段载波相位观测值残差的均方根误差(root mean square error, RMSE)统计结果。

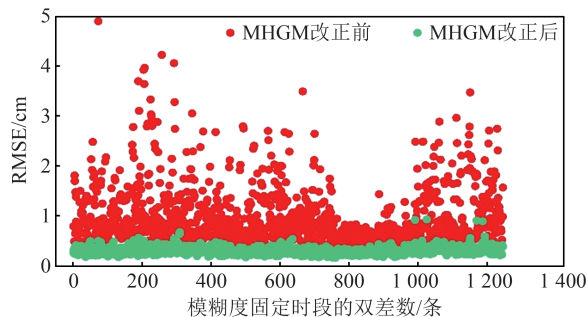


图3 双差模糊度固定时段相位观测值残差的 RMSE

Fig.3 RMSE Results of Double-Differenced Carrier Phase Observation Residuals in Ambiguity Fixed Period

由图 3 可知,模型改正后各双差模糊度固定时段观测值残差的 RMSE 得到了较为明显的改善, RMSE 的均值由 0.983 cm 降低为 0.318 cm,改善率高达 67.7%。

## 2.2 IGS 站点实验分析

为利用长时间连续观测且可公开获取的 IGS 观测数据进一步验证本文方法的有效性,评估多路径误差改正在现有 IGS 数据处理中的潜在应用价值,选取了中国境内 BJFS、SHAO、WUHN 共 3 个 IGS 站的 GPS 观测数据进行验证分析。图 4 给出了实验数据选取的测站以及时间分布。

每年选取 12 d 数据参与解算,为保证数据的完整性和环境误差的相关性,选取的解算数据在 3 个站均有效且时间跨度在 20 d 以内。由于 2015 年和 2017 年存在较为严重的数据缺失现象,故未参与测试。IGS 站点周围观测环境随着时间的推移会发生变化,这将引起 GNSS 信号干扰源的变动,进而对各 IGS 站的数据质量造成不同程度影响。采用与前文类似的方案对 3 个 IGS 站进行验证分析,每年选取前 10 d 的数据利用其载波相位无电离层观测值的残差进行 MHGM 模型构建,后续 2 d 作为验证数据用以分析 GNSS 测站处多路径误差效应反演的建模效果。受限于文章篇幅,图 5 中仅展示了 WUHN 测站于 2000 年、2010 年和 2019 年的 MHGM 建模结果。

利用已建立的 MHGM 模型对相应年份测试算例中后 2 d 的数据进行多路径误差改正,得到模糊度固定时间段内的双差相位观测值残差。统计 2 d 验证数据在模型改正前后于模糊度固定时段内观测值残差的 RMSE,并计算 RMSE 改善率,统计结果如图 6 所示。



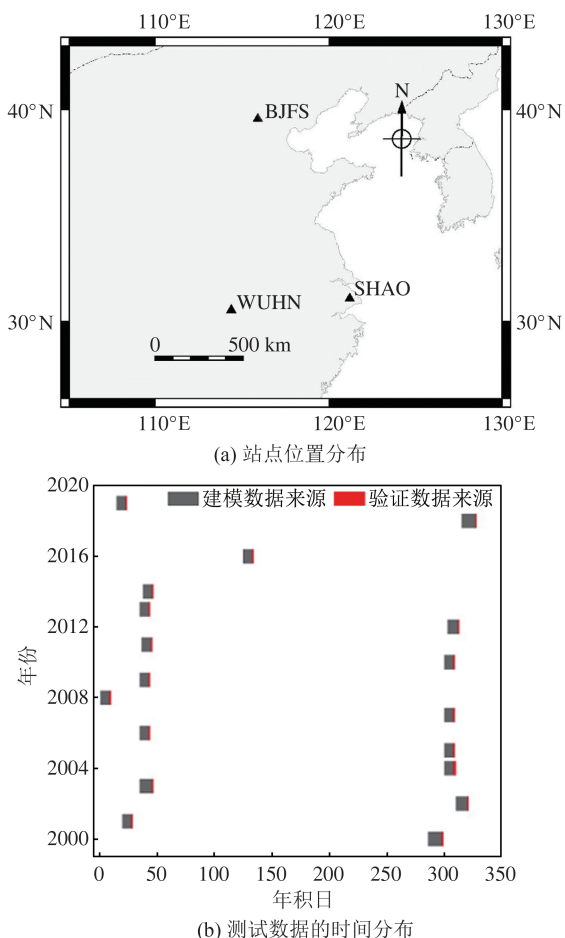


图4 IGS 站点及实验数据时间分布

Fig.4 Location of the Selected IGS Stations and Time Distribution of Experimental Data

当未进行模型改正时,2006年前模糊度固定时段内对应载波相位双差观测值残差的RMSE基本在1.2 cm左右,表明在IGS站建立的初期其周围观测环境对数据质量影响相对较小;2006年后RMSE统计结果存在一个较为明显的增长,整体提升至1.4~1.7 cm,表明由于IGS站周围观测环境变化对数据质量造成了一定程度的影响。对比3个IGS站点采用MHGM的逐年建模结果可以发现,MHGM可以有效反演出测站周围环境变化导致的多路径误差效应影响。

由图6可知,2016年数据处理结果相对较差,模型改正前的双差观测值残差RMSE为1.69 cm,模型改正后的改善率为19.7%。2000—2019年在进行模型改正后,双差观测值残差RMSE较为一致,可有效降低至0.75~1.16 cm。本文测试算例合计18 a的平均改善率为29.5%,除2000年、2001年和2016年的改善率在20%以下外,其他年份的改善率均达到了27%以上。

为验证MHGM模型在现有IGS数据处理工作中的有效性,选取了2019年的年积日25天

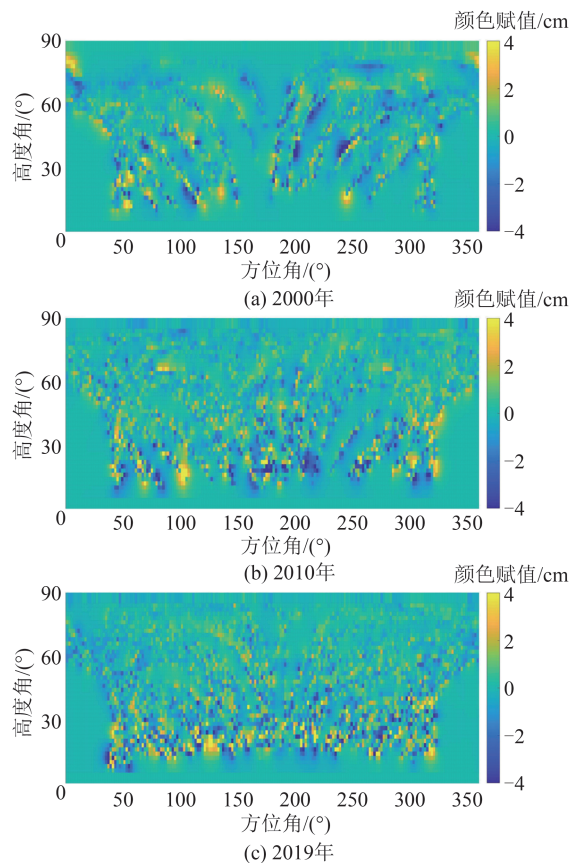
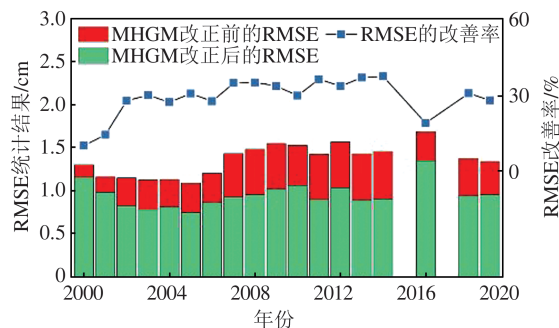
图5 2000年、2010年和2019年WUHN站MHGM结果  
Fig.5 MHGM Results of WUHN in 2000,2010 and 2019

图6 2000—2019年3个IGS站进行MHGM改正前后的观测值残差RMSE及改善率

Fig.6 RMSE and Improvement of Observed Minus Computed Residuals Before and After MHGM Correction at Three IGS Stations from 2000 to 2019

的观测数据进行精密定位测试。实验中固定BJFS站,对WUHN站按动态相对定位模式解算。结果表明,WUHN站南北和高程方向的动态定位结果在MHGM模型改正后提升较为明显。其中,南北方向上由未改正前的1.03 cm下降至0.63 cm,高程方向上由2.73 cm下降至1.68 cm,分别得到了38.8%和38.5%的提升,东西方向也提升了25.0%,同样与上述对双差观测值残差RMSE改善率的统计分析结果基本一致。



由此可见,MHGM模型可有效反演和削弱IGS测站周围环境对载波相位信号的多路径误差影响,在评估测站周围GNSS多路径误差效应变化状况的同时,有效提升了数据处理精度。

### 3 结 语

针对测站观测环境变化对数据质量影响难以有效评估并削弱的问题,本文研究了一种对测站处多路径误差进行半球格网建模的新方法,通过以天线相位中心为球心建立半球格网,并对各格网点进行参数化解算以描述测站周围环境对载波相位观测信号造成的多路径误差影响。考虑到各GNSS系统中存在公共频率观测数据的特性,本文方法可融合各GNSS系统观测数据进行不同卫星对、不同时段观测数据的多路径误差整体建模,以进一步提高模型的可靠性。

为验证MHGM模型反演测站周围信号干扰源的有效性,分别在模拟的强多路径观测环境下和利用IGS历史观测数据进行了两组测试。通过在测站周围架设挡板模拟的强多路径环境测试发现,MHGM模型能够图像化反演出测站周围存在的GNSS多路径误差效应。模糊度固定时段内双差载波相位观测值残差的RMSE均值在利用MHGM模型改正后改善率可达67.7%。通过IGS历史数据的测试发现,MHGM可以有效反演出2006年前后测站周围环境变化对载波相位观测数据的影响。除2016年外,利用MHGM模型改正后的观测值残差RMSE基本达到了一个较为稳定的水平,18 a的平均改善率为29.5%。模型改正后,WUHN站动态定位结果的误差序列在南北、东西和高程方向分别得到了38.8%、25.0%和38.5%的提升。

由MHGM模型的上述特性和测试结果可知,该模型不但可用于削弱测站处存在的多路径误差影响,还能进一步对测站周边可能存在的多路径误差源进行方位确定,这对于评估IGS连续运行参考站周围环境变化对观测数据质量的影响,改善IGS站数据处理精度,提升IGS产品精度均具有一定的潜在应用价值。

### 参 考 文 献

- [1] Dow J M, Neilan R E, Rizos C. The International GNSS Service in a Changing Landscape of Global Navigation Satellite Systems[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(3): 191-198
- [2] IGS. International GNSS Service: Terms of Reference [EB/OL]. [2020-09-11]. <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/115003535547-IGS-Terms-of-Reference-v-02-2017>
- [3] IGS. Current IGS Site Guidelines[EB/OL]. [2020-09-11]. <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202011433-Current-IGS-Site-Guidelines>
- [4] Villiger A, Dach R. International GNSS Service Technical Report 2018(IGS Annual Report) [M]. Bern, Switzerland: University of Bern, Bern Open Publishing, 2019
- [5] IGS. IGS Analysis Center Coordinator (ACC)[EB/OL]. [2020-09-11]. <http://acc.igs.org/>
- [6] Roberts G W, Meng X L, Psimoulis P, et al. Time Series Analysis of Rapid GNSS Measurements for Quasi-Static and Dynamic Bridge Monitoring[M]// *Geodetic Time Series Analysis in Earth Sciences*. Berlin, Germany: Springer, 2019
- [7] Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Wasle E. GNSS-Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and More [M]. Berlin, Germany: Springer, 2008
- [8] 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)
- [9] Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B3): 5005-5017
- [10] Zhong Ping, Ding Xiaoli, Zheng Dawei. Study of GPS Multipath Effects with Method of CVVF [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2005, 34(2): 161-167 (钟萍, 丁晓利, 郑大伟. CVVF方法用于GPS多路径效应的研究[J]. 测绘学报, 2005, 34(2): 161-167)
- [11] Zhou Xiaowei, Dai Wujiao, Zhu Jianjun, et al. HVF Method and Its Application in the Study on GPS Multipath Effects [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2007, 27(1): 107-111 (周晓卫, 戴吾蛟, 朱建军, 等. HVF方法在GPS多路径效应研究中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(1): 107-111)
- [12] Bock Y, Nikolaidis R M, Jonge P J, et al. Instantaneous Geodetic Positioning at Medium Distances with the Global Positioning System [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2000, 105

- (B12): 28223-28253
- [13] Ragheb A E, Clarke P J, Edwards S J. GPS Side-real Filtering: Coordinate-and Carrier-Phase-Level Strategies[J]. *Journal of Geodesy*, 2007, 81(5): 325-335
- [14] Chen Dezhong, Ye Shirong, Liu Yanyan, et al. Applied Analysis of GPS Multipath Errors Based on Observation Domain[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(2): 147-151 (陈德忠, 叶世榕, 刘炎炎, 等. 基于观测值域的 GPS 多路径误差应用分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(2): 147-151)
- [15] Wang Yan, Zhang Chuanding, Hu Xiaogong, et al. Sidereal Filtering Based on Sphere Multipath Stacking and Its Application in PPP[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(10): 1496-1503 (王琰, 张传定, 胡小工, 等. 球面多路径格网的恒星日滤波算法及其在 PPP 中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(10): 1496-1503)

## Inversion of GNSS Multipath Effects Around the Stations and Its Applications

ZOU Xuan<sup>1</sup> FU Ruinan<sup>1</sup> WANG Yawei<sup>1</sup> LI Zhiyuan<sup>1</sup>

XU Zong<sup>2</sup> TANG Weiming<sup>1</sup> LI Yangyang<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Maintenance Branch Company of State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 311232, China

**Abstract: Objectives:** It is difficult to effectively evaluate and weaken the impact of observation environment change on data quality. To solve the problem, this paper studies a multi-point hemispherical grid model which can be applied to various satellite navigation systems. **Methods:** It integrates the observations of different global navigation satellite system (GNSS) satellite pairs in different observation periods to establish a global optimal multipath model. GNSS multipath error can be estimated effectively using multi-point hemispherical grid model (MHGM), image-based inverse of multipath effect and reflect the orientation of interference sources in the observation environment around stations. **Results:** To a certain extent the observation environment around stations can be modelled. The test under deliberate high multipath environment reveals that using MHGM significantly improved the root mean square error (RMSE) of the double-differenced carrier phase observation residuals in the period of fixed ambiguity, reducing the mean RMSE from 0.983 cm to 0.318 cm, a 67.7% improvement. In addition, the abnormal areas with large value of correction in the MHGM results is consistent with the direction of the baffle mounted at the corresponding stations. This model indicates multipath effects on GNSS carrier phase observations in different directions from the station. The test with International GNSS Service historical observations shows MHGM can effectively reflect the influence of changing multipath interference around stations on carrier phase observations, with an average improvement of 29.5% in the RMSE of residuals over the past 18 years. **Conclusions:** This model can be used to evaluate the changes in observation environments surrounding stations over time. It has potential application value to improve the accuracy and reliability of augmentation system products.

**Key words:** global navigation satellite system (GNSS); multipath error; multi-point hemispherical grid model(MHGM); image-based inversion

**First author:** ZOU Xuan, PhD, associate professor, specializes in high accuracy GNSS data processing. E-mail: zxuan@whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Key Research and Development Program of China (2018YFB0505201).

**引文格式:** ZOU Xuan, FU Ruinan, WANG Yawei, et al. Inversion of GNSS Multipath Effects Around the Stations and Its Applications[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(9): 1416-1421. DOI: 10.13203/j.whugis20200392 (邹璇, 付睿男, 王亚伟, 等. 测站处 GNSS 多路径误差效应反演及其应用研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(9): 1416-1421. DOI: 10.13203/j.whugis20200392)