引文格式:王亚伟,邹璇,叶远斌,等.顾及NLOS信号的多路径误差削弱方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(4):666-673.DOI:10.13203/j.whugis20220769

Citation:WANG Yawei,ZOU Xuan,YE Yuanbin,et al.Multipath Error Mitigation Method Considering NLOS Signals[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(4):666-673.DOI:10.13203/j.whugis20220769

顾及NLOS信号的多路径误差削弱方法

王亚伟[1,2] 邹 璇[2,4] 叶远斌[3] 付睿男[2] 唐卫明[2] 李志远[2]

1 湖南省第一测绘院,湖南 长沙,410114

2 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

3 广东省国土资源测绘院,广东 广州,510500

4 湖北珞珈实验室,湖北 武汉,430079

摘 要:多路径误差是全球卫星导航系统(global navigation satellite system,GNSS)精密数据处理中的主要误差源之一,非直射(non line of sight,NLOS)信号与多路径信号具有不同的信号特性,在厘米至毫米级别的GNSS定位中可能导致显著的误差。然而目前针对载波相位观测值的多路径误差改正方法均未对两者进行有效区分。通过三维(3 dimensional,3D)点云数据检测静态测站处的NLOS载波信号,评估了半天球格网点模型(multi-point hemispherical grid model,MHGM)对多路径和NLOS信号的削弱效果,并在原有MHGM的基础上进一步提出剔除NLOS信号的多路径误差建模改进策略。实验中,模糊度固定时段内的双差残差统计显示,MHGM对多路径和NLOS误差分别有73.5%和81.2%的削弱,但MHGM改正后NLOS观测值的精度仍然显著低于多路径观测值。在将NLOS信号在多路径误差建模和应用阶段进行剔除之后,模糊度固定时段内载波相位双差观测值残差的均方根进一步降低,相比不剔除NLOS时提升了8.8%。动态定位测试结果表明,在多系统和可用卫星数量充足的情况下,MHGM对定位结果3D精度有68.6%的提升,而采用剔除NLOS信号的MHGM时,3D定位精度的改善率可以达到76.0%。

关键词:NLOS;多路径误差;MHGM;3D点云

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-01-17

DOI:10.13203/j.whugis20220769 **文章编号**:1671-8860(2025)04-0666-08

Multipath Error Mitigation Method Considering NLOS Signals

WANG Yawei[1,2] *ZOU Xuan*[2,4] *YE Yuanbin*[3] *FU Ruinan*[2] *TANG Weiming*[2] *LI Zhiyuan*[2]

1 The First Surveying and Mapping Institute of Hunan Province, Changsha 410114, China

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

3 Surveying and Mapping Institute Lands and Resource Department of Guangdong Province, Guangzhou 510500, China

4 Hubei Luojia Laboratory, Wuhan 430079, China

Abstract: **Objectives**: Multipath error is one of the main error sources in high-precision global navigation satellite system (GNSS) data processing. Non line of sight (NLOS) signal and multipath signal have different characteristics, which may lead to significant errors in centimeter to millimeter GNSS positioning. However, the current multipath error mitigation methods for carrier phase observations do not effectively distinguish them. **Methods**: The NLOS signals of carrier phase observations at the static station are detected using 3D point cloud data, and the correction effect of multi-point hemispherical grid model (MHGM) on multipath and NLOS is evaluated. Based on the original MHGM, an improved multipath error modeling strategy to eliminate NLOS signals is further proposed. **Results**: In the experiments, the statistics of double-differenced residuals in the ambiguity-fixed periods show that MHGM can mitigate the multipath and NLOS errors by 73.5% and 81.2%, respectively, but the accuracy of NLOS affected observations after MHGM correction is still significantly lower than that of multipath observations. After the NLOS signal is eliminated in the multipath error modeling and application stage, the root mean square of double-differenced residuals in the

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB3904601);广东省卫星导航定位基准服务建设技术委托(0877-21GZTPO1G134)。

第一作者:王亚伟,博士,主要从事GNSS精密数据处理及多路径误差建模研究。grcwongyw2016@whu.edu.cn

ambiguity-fixed periods is further reduced, and it is increased by 8.8% compared with the absence of NLOS. Kinematic positioning results show that under the condition of multiple systems and sufficient number of available satellites, MHGM can improve the three-dimensional accuracy of positioning results by 68.6%, while using MHGM with NLOS signals eliminated, the improvement rate can reach 76.0%.**Conclusions:** It shows that MHGM with NLOS elimination has better correction effect on multipath error, and can achieve a higher positioning accuracy in complex environment.

Key words: NLOS; multipath; MHGM; 3D point cloud

目前,全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)在各个领域得到广泛应用。同时,许多行业及用户对于GNSS的导航定位精度也提出了更高的需求。近年来,随着不同学者对于高精度GNSS数据处理方法的研究,绝大多数GNSS定位中的误差项得到了显著削弱。多路径误差与测站环境高度相关,难以通过差分算法予以消除,也缺乏合适的理论模型进行描述。多路径误差成为影响高精度GNSS数据处理的主要误差源之一,也限制了GNSS在许多场景下的应用。

为了削弱多路径效应的影响,一般可采取如下措施:选择观测环境良好的测站位置,尽可能避免障碍物、反射体和辐射源;采用特殊的硬件设备,例如扼流圈和抑径板等[1]。此外,还可以通过数据处理算法对多路径误差进行削弱。时间域的恒星日滤波方法[2-3];空间域的查找表格、多路径堆积图和多路径半天球图等方法目前应用比较广泛,这些方法是在空间域对多路径误差进行建模,其理论基础为相同频率的不同卫星信号引起的多路径误差只取决于卫星在天空中所处的位置,而与观测时间和具体的卫星无关。通过拟合半天球网格中多路径误差的趋势,文献[4]进一步提出了基于趋势面分析的多路径半天球图(multipath hemispherical map based on trend-surface analysis, T-MHM)。此外,文献[5]提出了半天球格网点模型(multi-point hemispherical grid model,MHGM),采用载波相位双差观测值残差对多路径误差进行建模。该方法无需特殊硬件设备,适用于不同GNSS系统、不同卫星星座以及现有各类GNSS站网整体解算数据处理模式。

通常情况下,可以认为多路径效应是由直射信号(line of sight, LOS)与反射信号或衍射信号共同进入接收机天线造成的。但在建筑密集区域或其他遮挡严重的复杂环境下,由于遮挡而无法被直接接收的卫星信号也可以通过反射或衍射被接收机天线捕获,它被称为非直射(non line of sight, NLOS)信号[6-7]。一方面,NLOS信号与多路径效应具有不同的信号特性。多路径效应是由直射信号和反射信号、衍射信号等叠加产生,而NLOS信号不含直射信号。另一方面,NLOS信号和多路径效应的测距误差是不同的[8]。由NLOS信号接收引起的伪距测量误差总是正值,即反射信号相对于被遮挡的直射信号的额外路径长度[9],这个路径延迟通常在数米到数十米之间。关于NLOS载波信号的测距误差,有研究人员表示它与NLOS伪距误差相似,但目前针对它的研究相对较少。为了检测和抑制NLOS信号接收,文献[10]采用双极化天线技术,将同轴右旋圆极化和左旋圆极化的敏感天线相结合。通过比较两类天线输出的测量值,双极化天线技术能够有效区分NLOS信号、多路径信号和纯粹的直射信号。但由于依赖于特殊的硬件设备,双极化天线技术并不是一种通用的方法;如果NLOS信号由于二次反射恢复为右旋圆极化,则无法正确检测。在数据处理算法方面,文献[9]使用一致性检验检测NLOS和多路径信号,无需额外的硬件。在大多数信号通过直射路径被接收的情况下,一致性检验方法能够成功检测NLOS和多路径信号,但在NLOS信号接收和多路径干扰严重的建筑密集区域,一致性检验方法会变得不可靠。文献[11]提出矢量跟踪算法,同样可以抑制NLOS和多路径信号的影响,并测试了其在长路径延迟NLOS信号接收情况下的表现。矢量跟踪算法将GNSS信号跟踪和用户位置求解结合,最初用于抑制动态环境下的信号衰减和干扰。该算法同时适用于静态和动态场景,同样无需额外的硬件或数据集。随着三维(3 dimensional, 3D)建筑模型的迅速发展和广泛应用,它们越来越多地被用于在建筑密集地区辅助导航和改善定位精度。3D建筑模型结合用户位置能够判断卫星可见性,用于检测NLOS信号接收。然而存储3D建筑模型中海量数据所需的内存空间、频繁判断卫星可见性消耗的巨额计算量,使得该方法难以得到实际应用。文献[12-13]

提出了建筑边界方法,根据3D建筑模型和用户位置,预先生成用户位置处的建筑物边界,并采用建筑边界在每个方位处的高度角表示。通过比较卫星和相同方位角处建筑物边界的高度角,即可判断该卫星的可见性。建筑物边界方法显著减少了直接使用3D建筑模型原始数据所需的大量存储空间和计算量,但如果建筑物边界以下存在允许卫星信号通过的空间,例如高架桥、拱门或其他建筑结构,建筑边界方法可能无法正确预测卫星可见性。尽管NLOS信号接收逐渐被视为影响GNSS定位不可忽略的误差源之一,目前大多数关于NLOS信号的研究都是关于伪距观测值,针对NLOS载波信号的研究较少。在厘米级的GNSS定位中,NLOS信号接收可能导致显著的误差,然而目前针对载波相位观测值的多路径误差改正方法并未有效区分多路径误差和NLOS信号。

针对毫米级定位应用一般都是在静态或准静态场景的特点,本文提出首先采用3D环境模型对NLOS信号进行检测,以达到区分观测值中的多路径误差和NLOS信号的目的;然后使用MHGM对多路径和NLOS误差进行建模,并评估对它们的削弱效果;接下来比较使用MHGM后多路径和NLOS信号的精度差异,并在原有MHGM的基础上提出对NLOS信号进行剔除的改进策略;最后,将改进策略与原有MHGM进行比较,验证本文提出的多路径误差削弱方法的有效性。

1 基本原理

1.1 多路径误差削弱方法

为了消除GNSS载波相位观测值中的其他误差项,选用双差观测模型。在短基线条件下,模糊度固定时段的载波相位双差观测残差仅包含多路径误差、NLOS信号误差和观测噪声。以天线相位中心为原点建立测站处的半天球,并根据方位角和高度角进行格网划分,建立MHGM[14]。半天球的方位角范围设置为0°~360°,高度角范围设置为E_0~E_1,其中E_0通常设置为卫星截止高度角。对于半天球格网,将方位角和高度角的划分间隔分别设置为d_A和d_E,表示格网划分的精细程度。图1以$E_0=20°$、$E_1=80°$、$d_A=d_E=20°$为例展示半天球的格网划分,其中黑色格网点处需设定相应的待估模型参数。

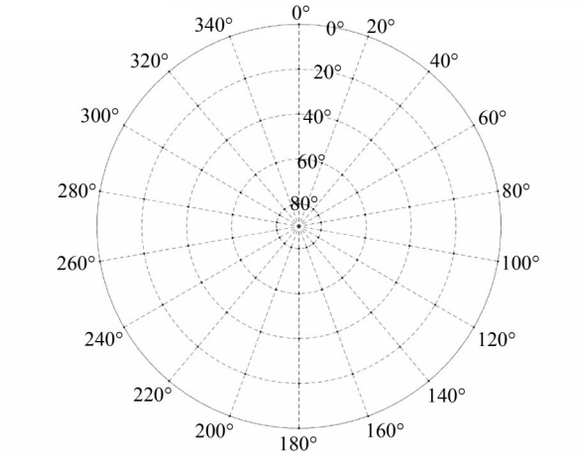


图1 半天球格网划分

Fig. 1 Division of Hemisphere Grid

对于测站m、n与卫星j、k间任意一组模糊度固定解对应的双差观测值残差s,可构建相关待估格网点参数对应的法方程。测站m与卫星j间的多路径误差涉及格网模型上的4个点Q^j_{m1}、Q^j_{m2}、Q^j_{m3}和Q^j_{m4}(卫星j的高度角在E_0和E_1之间)或3个点Q^j_{m1}、Q^j_{m2}和Q^j_{m3}(卫星j的高度角大于E_1时)。V^j_m处的模型参数计算值可通过双线性内插方法或平面内插方法表达为如下形式(假设涉及4个格网点参数):

$$V^j_m=b_1Q^j_{m1}+b_2Q^j_{m2}+b_3Q^j_{m3}+b_4Q^j_{m4} \quad (1)$$

式中,b为内插系数。类似地得到卫星j和k在测站m和n处产生的其他3组多路径误差V^k_m、V^j_n和V^k_n,则双差观测值残差s可表述为:

$$s=\left(V^j_m-V^k_m\right)-\left(V^j_n-V^k_n\right) \quad (2)$$

根据上述观测方程,构建相关格网点模型参数对应的法方程。采用不同观测时段、不同测站和卫星的双差残差,通过最小二乘估计求解各个格网点处的模型参数。应用MHGM时,采用相邻格网点的模型参数计算卫星在测站处的多路径误差,并对其观测值进行改正。

1.2 3D点云数据检测NLOS载波信号

测站周围环境的数字化,包括建筑物、树木等一切可能遮挡卫星信号的物体,可以采用近景摄影测量、3D激光雷达等技术。以3D激光雷达技术为例,它以点云的形式采集数据,但考虑到重建测站周围3D环境模型的复杂性,本文提出了一种直接利用拼接完整的点云数据进行NLOS信号判定的方法。

在将3D点云数据转换到以测站为原点的站心坐标系下后,假设某激光点p在站心坐标系下的坐标为(E_p,N_p,U_p),则可计算其在测站处的方

位角A和高度角E:

$$A=\begin{cases}\arctan\left(\dfrac{E_p}{N_p}\right), N_p>0\\ \arctan\left(\dfrac{E_p}{N_p}\right)+\pi, E_p\geqslant 0, N_p<0\\ \arctan\left(\dfrac{E_p}{N_p}\right)-\pi, E_p<0, N_p<0\\ \dfrac{\pi}{2}, E_p>0, N_p=0\\ -\dfrac{\pi}{2}, E_p<0, N_p=0\end{cases} \tag{3}$$

$$E=\arctan\left(\frac{U_p}{\sqrt{\left(E_p\right)^2+\left(N_p\right)^2}}\right) \tag{4}$$

根据激光点p在测站处的方位角A和高度角E,并将其映射至类似图1所示的半天球的对应网格内,该格网在测站半天球中所处的位置可用行列号索引(i,j)表示:

$$i=\mathrm{int}\left(\frac{A}{d_A}\right) \tag{5}$$

$$j=\mathrm{int}\left(\frac{E-E_0}{d_E}\right) \tag{6}$$

式中,$\mathrm{int}(n)$表示对n进行向下取整。将每个激光点依次投射至测站半天球上,记录投射至每个格网中的激光点总数量$N(i,j)$。受到3D激光雷达自身的限制以及测量环境等因素的影响,点云中不可避免地存在噪点[15]。为了避免它们对卫星可见性判断的影响,设置经验值N_0作为判断网格方向上是否存在障碍物的激光点数量最小阈值。设定NLOS信号判定因子α为:

$$\alpha\left(i,j\right)=\frac{N\left(i,j\right)}{N_0} \tag{7}$$

在检测NLOS信号时,首先根据卫星坐标求解其方位角和高度角,并确定其在半天球上的穿刺点所在网格。若对应网格内的激光点数量$N\leqslant N_0$,即判定因子$\alpha\left(i,j\right)\leqslant 1$,表示网格内不存在障碍物,卫星信号为可能受多路径误差影响的直射信号;相反地,若激光点数量$N>N_0$,判定因子$\alpha\left(i,j\right)>1$,表示网格内存在障碍物遮挡,直射信号不能通过,此时的卫星信号为NLOS信号。需要指出的是,对于点云判定的半天球格网,其划分间隔d_A和d_E根据激光点数量和周围障碍物确定,可以与MHGM的网格划分方案不同。

参考建筑物边界方法,可以将点云数据转换到静态测站处的半天球上进行呈现。据此判断卫星的可见性,并对载波NLOS信号进行检测。针对模糊度固定时段的载波相位双差观测值,可检测其原始观测值是否为NLOS信号。进一步地,评估剔除NLOS信号对数据解算以及多路径误差建模的影响。

2　NLOS信号干扰下的数据实验

在武汉大学教学实验大楼的顶部架设了A、B两个测站。测站A为正常的观测环境,在测站B的西北和东南方向安装了两块金属挡板,用于模拟强多路径和NLOS信号干扰。测站A和测站B的观测环境如图2所示。2021年年积日第19—30天期间,在测站A和测站B采集了GPS、北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system, BDS)和伽利略卫星导航系统(Galileo satellite navigation system, Galileo)12 d的载波相位观测数据,采样间隔为1 s。在静态环境中,两测站天线及周围的观测环境保持不变,因此可以使用MHGM对多路径误差进行建模。图2展示了测站A、B的观测环境及点云数据采集时的标靶和扫描仪布设。

为了获取测站B的3D环境模型,使用FARO3D激光雷达从不同的角度采集了测站B周围的点云数据。通过赫尔默特变换将激光点云从原始坐标系转换到站心坐标系下,并采用§1中提到的方法将激光点映射至测站B的半天球上,记录每个网格中的激光点数量。此处对于测站B的半天球,设置$E_0=0°$,$E_1=89°$,$d_A=d_E=1°$,并设置激光点数量的最小阈值N_0为5。根据§1.2中的方法以及式(7),可以得到测站B上所有网格对应的判定因子。图3进一步图形化地展示了该NLOS判定模型,黄色表示判定为存在NLOS的网格,蓝色则是不存在NLOS信号网格,可以发现该模型的遮挡区域与实际挡板安装方位相吻合。

根据整个实验周期的观测数据求解测站A和B的坐标平均值,固定坐标后,计算模糊度固定时段内载波相位的双差残差,此时双差残差内主要包含多路径误差、NLOS信号误差以及观测噪声。理论上,若测站天线和周围观测环境保持不变,位于相同半天球位置的相同频率的不同卫星信号在测站处产生的多路径误差相同。因此,根据GNSS的频率设置,可以建立统一的MHGM。对于本文实验中的MHGM,高度角范围设置为5°至85°,方位角和高度角的划分间隔均设置为2°。考虑到不同的卫星轨道重复周期,根据实验周期

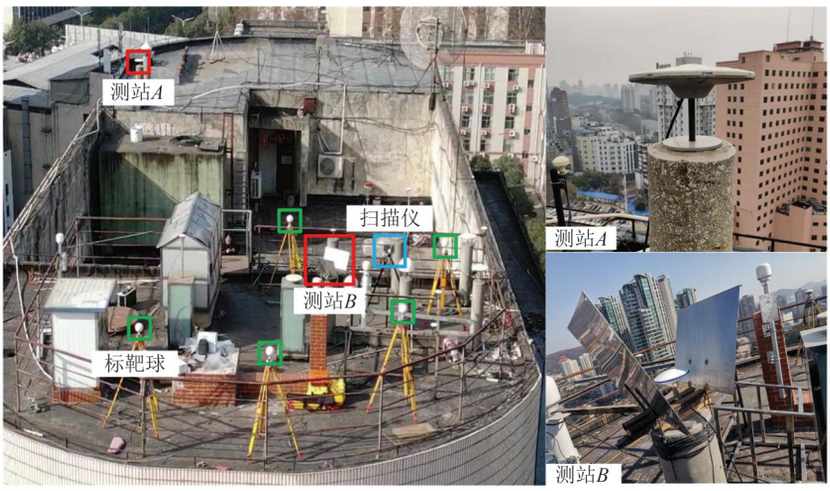


图2 测站A和测站B的观测环境

Fig. 2 Observation Environment of Station A and Station B

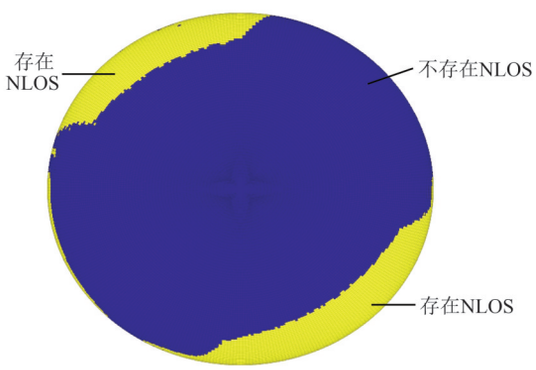


图3 测站B的NLOS信号判定模型

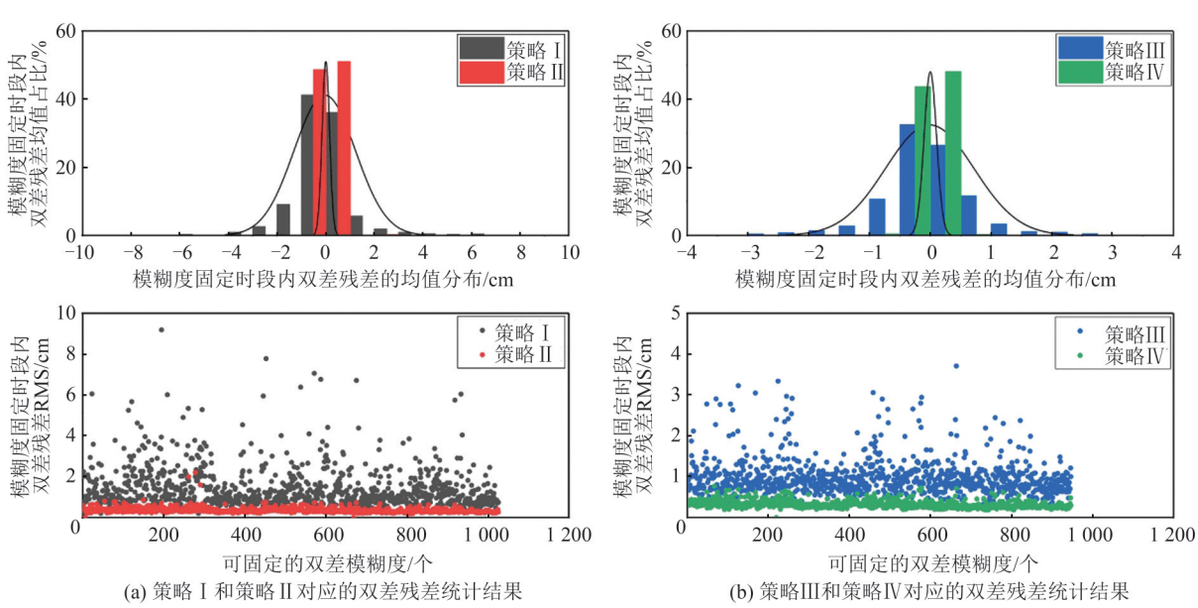
Fig. 3 NLOS Signal Judging Model of Station B

前10天的观测数据建立MHGM,并采用后2天的数据用于验证。对于验证天的实验数据,本文设计了4种改正策略以评估多路径误差改正和NLOS信号剔除的影响:策略Ⅰ:不进行两类改正的原始数据结果;策略Ⅱ:只利用MHGM进行多路径误差改正;策略Ⅲ:只进行NLOS信号剔除;策略Ⅳ:在剔除NLOS信号的基础上利用MHGM进行多路径误差改正。

3 结果与分析

3.1 模糊度固定时段内双差残差统计结果

在使用和不使用MHGM以及是否剔除NLOS信号的情况下,分别统计了验证天内模糊度固定时段的双差观测残差均值和均方根(root mean square, RMS),如图4所示。



(a) 策略Ⅰ和策略Ⅱ对应的双差残差统计结果 (b) 策略Ⅲ和策略Ⅳ对应的双差残差统计结果

图4 不同策略下模糊度固定时段内双差残差的统计结果

Fig. 4 Statistical Results of Double-Differenced Residuals in Ambiguity-Fixed Periods Under Different Strategies

首先,对比图4(a)和4(b)中双差残差的均值分布可以发现,未进行任何改正的观测值残差在−8 cm和10 cm之间均有分布,分布在±1.5 cm内的双差残差占总数据量的82.9%。剔除NLOS信号之后的残差集中在±4 cm之间,残差明显减小,同时分布在±1.5 cm内的双差残差提高到92.6%,残差的分布更加集中,因此NLOS对精密数据解算的影响不可忽视。根据NLOS信号的判定模型可以将策略Ⅰ对应的双差残差区分为两类来源:(1)由仅含多路径信号的观测值构成;(2)由含有NLOS信号的观测值构成,图5同时展示了两类观测值在策略Ⅱ下的结果。可以发现,验证时段(2)类观测值残差的RMS波动较大,其均值在3.0 cm左右;而(1)类观测值残差的RMS则相对较小,均值为0.6 cm。这表明NLOS误差的量级远大于多路径误差,且NLOS误差的数值稳定性更差。

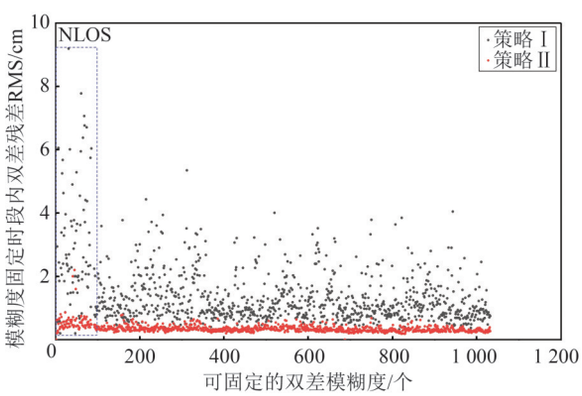


图5　模糊度固定时段内残差分布

Fig. 5　Residuals Distribution in Ambiguity-Fixed Periods

其次,通过图5中策略Ⅰ和Ⅱ的实验结果可以发现,在不剔除NLOS信号的情况下利用MHGM进行多路径误差改正,可以显著地降低双差残差的RMS。这说明MHGM不仅可以削弱多路径误差,也可以部分削弱NLOS信号的影响,此时(1)类观测值残差RMS由1.3 cm降至0.3 cm,相对于策略Ⅰ提升了73.5%,(2)类则相对于策略Ⅰ提升了81.2%。但图5中虚线框内的数据表明MHGM仍然无法彻底消除NLOS信号的干扰,(1)类观测值残差在改正后精度仍然低于(2)类,且存在部分残差RMS偏大。因此,对于NLOS信号干扰严重的观测值只进行多路径误差改正对于精度的提升是有限的。

最后,策略Ⅳ的RMS进一步降低,较策略Ⅱ提升了8.8%,同时分布在±1.5 cm内的双差残差由99.7%上升至100%,实验结果表明策略Ⅳ的改正效果最优,证实利用剔除NLOS信号的观测值残差可以进一步提高MHGM模型的精度。

为进一步了解NLOS信号的误差特性,将测站B处的MHGM建模结果展示在图6中。方位角大约为70°~160°和250°~330°的大片区域显示出偏高的多路径误差模型值,这与安装在测站A的金属挡板的方位一致(如图2所示)。理论上,卫星直射信号无法穿过金属挡板,但存在来自这些方向的多路径和NLOS信号参与建模,并且它们的模型值大于零。这表明测站B确实接收到NLOS信号,并且这些信号的误差为正值,与NLOS信号的理论误差特性一致,并进一步证明MHGM可以在一定程度上对NLOS误差进行建模。另外,注意到金属挡板底部方位角大约为30°~330°的区域边缘出现模型值为负值的情况,但理论上由于卫星轨道的设置,该区域是不存在卫星覆盖的,这是因为相邻格网点的模型参数间存在约束。因此,根据最小二乘估计求解MHGM时,这些格网点会出现异常估计值。然而,这基本不影响MHMG对多路径和NLOS误差的削弱效果。

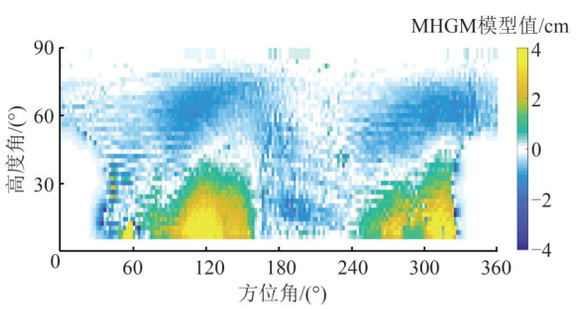


图6　测站B处MHGM建模结果

Fig. 6　Value of MHGM at Station B

3.2　验证天定位测试结果

同样采用建模天(2021年年积日第19—28天)的观测数据建立MHGM,验证的策略与§3.1相同。采用外推天GPS、BDS、Galileo系统和L1/B1/E1频率的观测数据,进行实时动态差分模式下的定位测试[16],测站A和B分别设置为基准站和流动站,按照动态模式进行定位解算,数据处理间隔为1 s。表1给出了验证天内测站B在东(east, E)、北(north, N)、天(up, U)方向的坐标定位结果统计。

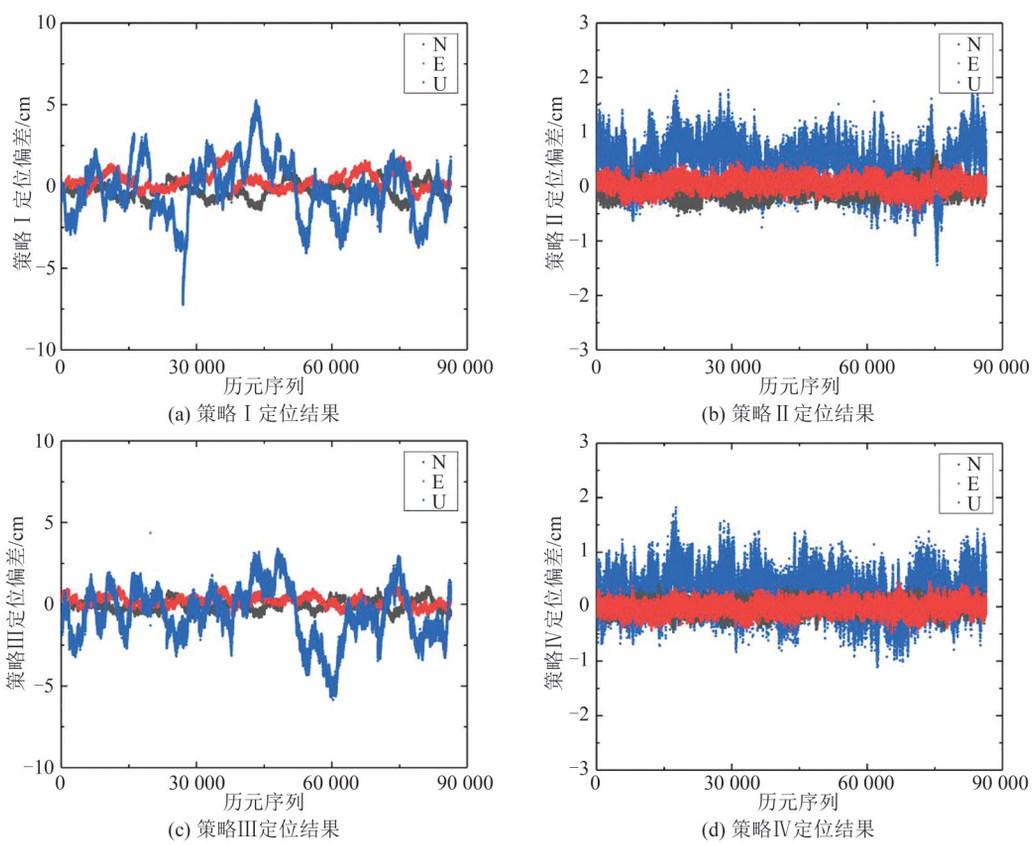
与策略Ⅰ相比,只改正NLOS的策略Ⅲ定位结果提升有限,仅在平面方向有提升。策略Ⅱ和策略Ⅳ在3D方向的提升更明显,分别达到了68.6%和76.0%。同时可以发现,策略Ⅳ在高程

表1 测站*B*动态定位结果的RMS

Table 1 RMS of Kinematic Positioning Results of Station *B*

策略	RMS/cm			3D方向相对策略Ⅰ的精度提升/%
	E	N	U	
Ⅰ	0.62	0.53	1.73	
Ⅱ	0.12	0.15	0.57	68.6
Ⅲ	0.36	0.34	1.73	5.9
Ⅳ	0.11	0.11	0.43	76.0

方向的提升要优于策略Ⅱ,平面方向则差异较小。与策略Ⅱ相比,高程和平面方向的定位精度分别提升了24.2%和18.1%。这与§3.1的双差残差统计结果也较为类似。图7中给出了测站*B*在策略Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ下年积日第30天的动态定位结果序列,可以直观地发现策略Ⅳ的定位结果要优于策略Ⅲ,进一步说明附有NLOS剔除的MHGM对多路径误差的改正效果要更加优秀,可以更好地提升复杂环境下的定位精度。本文的实验结果是基于短基线数据的测试分析,文献[14]中对MHGM在长基线的适用性已进行过相关验证,理论上附有NLOS剔除的MHGM同样适用于长基线数据。



(a) 策略Ⅰ定位结果 (b) 策略Ⅱ定位结果

(c) 策略Ⅲ定位结果 (d) 策略Ⅳ定位结果

图7 测站*B*在策略Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ下的定位结果

Fig. 7 Positioning Results of Station *B* Under Strategies Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ and Ⅳ

4 结 语

对于载波相位观测值,目前的多路径误差改正方法并未有效区分NLOS信号与多路径效应。针对毫米级定位应用一般是在静态或准静态场景的特点,本文采用3D点云数据检测测站的NLOS载波信号,并基于原有MHGM提出了顾及NLOS信号的MHGM建模改进策略。

实验分析表明,不使用MHGM时,NLOS误差的量级远大于多路径误差,且其数值稳定性弱于多路径误差。使用MHGM时,可以削弱多路径误差,但无法消除NLOS信号的干扰。利用本文方法,顾及NLOS信号的改进MHGM建模策略的改正效果更优,模糊度固定时段双差残差RMS进一步降低,较不剔除NLOS信号的MHGM提升了8.8%。另外,测站*A*处的MHGM的建模结果显示NLOS误差为正值,这与NLOS信号的理论误差特性一致。同时,顾及NLOS信号的MHGM与传统MHGM相比,高程和平面方向的定位精度分别提升了24.2%和

18.1%,该方法可以更好地提升复杂环境下静态或准静态测站的定位精度。

同时,考虑到剔除NLOS信号会降低观测数据量,对于使用低成本接收机的应用场景数据解算会存在较为明显的影响,因此,对NLOS信号由剔除转变为降权应该也是一种合理的改进策略。

参 考 文 献

[1] 范晓燕, 周乾. GPS测量中多路径效应研究综述[J]. 工程地球物理学报, 2010, 7(3): 382-386.
FAN Xiaoyan, ZHOU Qian. Review of Multipath Effects in GPS Measurement[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2010, 7(3): 382-386.

[2] AGNEW D C, LARSON K M. Finding the Repeat Times of the GPS Constellation[J]. *GPS Solutions*, 2007, 11(1): 71-76.

[3] 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.
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.

[4] WANG Z R, CHEN W, DONG D N, et al. Multipath Mitigation Based on Trend Surface Analysis Applied to Dual-Antenna Receiver with Common Clock[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(4): 104.

[5] 王亚伟, 邹璇, 唐卫明, 等. 削弱GNSS多路径效应的半天球格网点建模方法[J]. 测绘学报, 2020, 49(4): 461-468.
WANG Yawei, ZOU Xuan, TANG Weiming, et al. A Method for Mitigating GNSS Multipath Effect Based on Multi-point Hemispherical Grid Model[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(4): 461-468.

[6] BRADBURY J, ZIEBART M, CROSS P A, et al. Code Multipath Modelling in the Urban Environment Using Large Virtual Reality City Models: Determining the Local Environment[J]. *Journal of Navigation*, 2007, 60(1): 95-105.

[7] GROVES P D, ADJRAD M. RETRACTED ARTICLE: Likelihood-Based GNSS Positioning Using LOS/NLOS Predictions from 3D Mapping and Pseudoranges[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(4): 1805-1816.

[8] 邵梦杨, 郭磊, 王甫红. 城市典型环境下单频导航型GNSS接收机多路径误差特性分析[J]. 测绘通报, 2018(9): 1-7.
SHAO Mengyang, GUO Lei, WANG Fuhong. Multipath Error Analysis of Single Frequency Navigation GNSS Receiver in Typical Urban Environment[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018(9): 1-7.

[9] GROVES P D, JIANG Z Y. Height Aiding, C/N_0 Weighting and Consistency Checking for GNSS NLOS and Multipath Mitigation in Urban Areas[J]. *Journal of Navigation*, 2013, 66(5): 653-669.

[10] JIANG Z Y, GROVES P D. NLOS GPS Signal Detection Using a Dual-Polarisation Antenna[J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(1): 15-26.

[11] HSU L T, JAN S S, GROVES P D, et al. Multipath Mitigation and NLOS Detection Using Vector Tracking in Urban Environments[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(2): 249-262.

[12] WANG L, GROVES P D, ZIEBART M K. Multi-constellation GNSS Performance Evaluation for Urban Canyons Using Large Virtual Reality City Models[J]. *Journal of Navigation*, 2012, 65(3): 459-476.

[13] WANG L, GROVES P D, ZIEBART M K. GNSS Shadow Matching: Improving Urban Positioning Accuracy Using a 3D City Model with Optimized Visibility Scoring Scheme[J]. *Navigation*, 2013, 60(3): 195-207.

[14] TANG W M, WANG Y W, ZOU X, et al. Visualization of GNSS Multipath Effects and Its Potential Application in IGS Data Processing[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(9): 103.

[15] 邓文君, 叶景杨, 张铁. 面向机器人磨抛的激光点云获取及去噪算法[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 172-180.
DENG Wenjun, YE Jingyang, ZHANG Tie. Acquisition and Denoising Algorithm of Laser Point Cloud Oriented to Robot Polishing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 172-180.

[16] 邹璇, 陈亮, 李宗楠, 等. 基于PPP-AR模糊度快速重收敛技术提供可靠的URTK服务[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(10): 1366-1371.
ZOU Xuan, CHEN Liang, LI Zongnan, et al. Reliable URTK Service Based on PPP-AR Ambiguity Rapid Reconvergence[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(10): 1366-1371.