

DOI:10.13203/j.whugis20150313



文章编号:1671-8860(2018)02-0213-06

基于三频 SNR 数据探测北斗 GEO 卫星多径效应

高 晓^{1,2} 杨志强¹ 康军梅¹ 王 君¹

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054

2 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司,陕西 西安,710032

摘 要:多径误差是全球卫星导航系统(global navigation satellite system,GNSS)高精度实时定位的主要误差源。由于多径效应具有时变特性且与观测环境有关,难以有效探测与剔除,尤其是动态定位领域。鉴于多径效应对同颗卫星不同频率观测值影响不同,本文采用三频信噪比(signal-noise ratio,SNR)频率间差分数据,设计算法探测北斗对地静止卫星(geostationary orbit satellite, GEO)多径误差,并依据开阔环境 SNR 频率间差分数据序列进行统计分析,确定其探测阈值。实验结果表明,北斗 GEO 卫星易受多径误差影响,传统方法难以实时有效探测,本文提出的新方法可有效探测 GEO 多径误差,并基于设定的阈值对其数据进行降权或剔除,可应用于 GNSS 数据质量控制。

关键词:多径效应;SNR;三频;北斗;GEO;实时;探测阈值

中图法分类号:P228

文献标志码:A

大气延迟误差、卫星轨道误差与多径效应等误差是全球卫星导航系统(global navigation satellite system,GNSS)实时定位的主要误差源,成为制约其定位导航授时(positing navigation and timing,PNT)服务质量进一步提升的瓶颈^[1-2]。其中,大气延迟与轨道误差等系统性误差可通过模型改正、数据平滑以及差分技术等予以削弱或消除。由于多径效应具有时变特性,且与测量环境密切相关,难以通过上述方法予以有效抑制,成为 GNSS 高精度定位最主要的误差源^[3-4],尤其是观测环境复杂的区域。针对多径效应,诸多学者提出了一系列算法削弱其影响^[5-8],但这些方法均有自身的局限性,难以有效地推广应用,尤其是动态定位领域。多径效应对观测卫星不同载波频率影响不同,导致其信噪比(signal-noise ratio,SNR)变动有所差异,因此,本文利用三频 SNR 频率间差分数据探测北斗 GEO 卫星多径误差,并基于开阔环境观测数据设定多径误差探测阈值。当观测值 SNR 频率间差分数据超出阈值时,可对其观测数据进行降权或剔除,保证观测数据的质量,适用于动态定位领域。

1 基于 SNR 频率间差分数据探测多径效应

1.1 多径效应特性

由于地表环境等因素的影响,卫星信号会经不同路径被 GNSS 天线接收。多径效应就是卫星信号反射波与直射波发生干涉使其观测值偏离真值的物理现象^[9]。测码伪距较之载波相位更易受多径误差影响,其 C/A 码最大影响值可达到 150 m,P 码约为 15 m,而相位观测值的多径误差量级为厘米级^[1]。

假设接收机天线仅接收直射信号与反射信号,其组合信号可表示为^[2]:

$$S = A \sin(\varphi) + \alpha A \sin(\varphi + \Delta\varphi) = \alpha_c A \sin(\varphi + \Delta\varphi_c) \quad (1)$$

式中, A 和 φ 分别为直射信号的振幅与相位; α 和 $\Delta\varphi$ 分别为反射信号的阻尼系数和相位偏移。经计算可知,反射信号引起相位的最大偏移为 90° ,转化为振幅即为 $\lambda/4$,对于 BDS,3 个频点 B_1 、 B_2 、 B_3 相位多径误差最值分别为 4.80cm、6.21cm

收稿日期:2016-05-05

项目资助:国家自然科学基金(41504001)

第一作者:高晓,博士生,主要从事多星座 GNSS 组合定位算法与数据处理研究。834606637@qq.com

与 5.91 cm, 使用线性组合观测值时该数值会增大。较之直射信号, 反射信号存在相位偏移, 同时其信号强度也会降低, 主要原因为: ①部分信号能力被反射面吸收; ②反射改变信号极化特性, 导致天线对反射信号产生抑制作用^[10]。

1.2 信噪比(SNR)

GNSS 测量中, 接收机可逐历元、逐卫星输出信噪比观测值, 单位为 dB-Hz。SNR 是接收机输出端信号功率与噪声功率之比, 而载噪比(carrier-noise ratio, CNR)是接收机输入端信号功率与噪声功率之比, 二者的关系为^[11]:

$$\text{SNR} = \text{CNR} + G_p \quad (3)$$

式中, G_p 为标准化天线增益。可见, 信噪比不仅与输入信号 CNR 有关, 同时涉及接收机内部信号处理方法。而 CNR 与信号带宽有关, 仅考虑其振幅大小时, 通常采用 1Hz 带宽的 CNR 数值作为信号的质量指标, 则有:

$$C/N_0 = \text{CNR} + B_n \quad (4)$$

其中, B_n 为等效噪声带宽。

联合式(3)与式(4)可知, 当接收机直接采集原始观测量(禁用数据平滑等信号处理算法), 则信噪比与载噪比具有良好的一致性^[12]。

1.3 基于 SNR 频间差探测多径效应

GNSS 接收机 PLL 跟踪环路接收直射波与反射波的合成信号。多径信号对合成信号的影响取决于多径信号的振幅与相移。PLL 跟踪环路除记录锁定的 GNSS 信号外, 还同时记录信号 SNR。当多径效应发生时, 多径信号会导致合成信号的质量改变, 相应的 SNR 值也随之发生变化^[13]。当然, 影响 SNR 的因素较多, 主要包括天

$$\begin{cases} MP_1 = M_1 + B_1 - (1 + \frac{2}{\partial - 1})m_1 + (\frac{2}{\partial - 1})m_2 = P_1 - (1 + \frac{2}{\partial - 1})L_1 + (\frac{2}{\partial - 1})L_2 \\ MP_2 = M_2 + B_2 - (\frac{2\partial}{\partial - 1})m_1 + (\frac{2\partial}{\partial - 1} - 1)m_2 = P_2 - (\frac{2\partial}{\partial - 1})L_1 + (\frac{2\partial}{\partial - 1} - 1)L_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中, 下标 1、2 分别为 B_1 与 B_2 频点; M 为伪距多径误差; m 为相位多径误差; P 与 L 分别为伪距与相位观测值; $\partial = (f_1/f_2)^2$ 。 B_1 、 B_2 的计算式分别为:

$$\begin{cases} B_1 = (\frac{2}{1 - \partial} - 1)n_1 \cdot \lambda_1 + (\frac{2}{\partial - 1})n_2 \cdot \lambda_2 \\ B_2 = (\frac{2\partial}{1 - \partial})n_1 \cdot \lambda_1 + (\frac{2\partial}{\partial - 1} - 1)n_2 \cdot \lambda_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中, n 为整周模糊度; λ 为载波波长。当观测值无周跳或周跳修复后, B 为常数。采用 TEQC 软件计算多径效应时, 取 MP 的均值作为常量予以

线增益、接收机跟踪环路相关器特性以及多径效应等。采用硬件质量可靠的接收机, 同时禁用接收机内信号优化算法后, 信号 SNR 值则主要受多径效应的影响。

已有学者基于 GPS 双频 SNR 频间差数据探测多径效应并取得不错的效果^[14], 但需要注意的是, 尽管多径效应对于同颗卫星不同频率影响有所差异, 但当多径效应对于两个频率信号的影响相近时, 基于双频 SNR 频间差数据难以有效地探测多径效应, 即基于双频 SNR 数据无法保证全频段多径效应的有效探测。因此, 考虑采用三频 SNR 差分数据探测多径效应, 较之双频 SNR 数据, 多径效应对于 3 个频率信号影响值较为接近的概率大为降低, 所以基于三频 SNR 频间差数据探测多径效应具有更高的可靠性, 其频间差计算式为:

$$\Delta S_r^i =$$

$$\sqrt{(S_r^{i,1} - S_r^{i,2} - \Delta S_r^{1,2})^2 + (S_r^{i,1} - S_r^{i,3} - \Delta S_r^{1,3})^2} \quad (5)$$

式中, 上标 i 为观测卫星; 下标 r 为接收机; 1、2、3 分别代表频点 B_1 、 B_2 、 B_3 ; S 为实测信噪比, $\Delta S_r^{1,2}$ 与 $\Delta S_r^{1,3}$ 分别为开阔环境下计算的 SNR 频间差 ($S_1 - S_2$, $S_1 - S_3$)。由于 ΔS_r^i 由 ($S_1 - S_2$, $S_1 - S_3$) 两个频差序列得到, 依误差传播率可知, 其序列中误差为两序列平方和的中误差。

为验证该方法的有效性, 采用 TEQC 处理软件多径误差计算公式评估伪距多径误差, 作为评判新方法探测准确与否的指标, 其数值可由伪距与相位观测值线性组合得到^[15-16]:

剔除, 剩余 MP 值反映多径误差的变化量。由于多径误差具有时变特性, 因此, 计算时采用分段数据平滑的方法消除 MP 常量影响。同时, 考虑到伪距多径误差明显大于相位多径误差, 计算 M 时可忽略 m 。

2 数据处理与结果分析

2.1 观测数据

采用天宝接收机(Trimble Net R9)在中南大学校本部采矿楼楼顶固定观测墩上采集 BDS 三频数据, 时间为 2014 年 11 月 1 日, 时间间隔为

30 s,为最大限度地获取观测数据,截止高度角设定为 0° 。为验证新方法的有效性,两台天宝接收机同步采集,一台位于开阔环境(Open-Sky),另一台则放置于强多径环境(High-Multipath),如图 1 所示。图 1 中,墙体上的光滑反射镜面可制造强多径效应。由于 BDS 卫星大多处于测站南方,因此,发射面置于测站北向,会对 BDS 卫星尤其是 GEO 卫星产生明显的多径效应。



图 1 实际测量环境

Fig.1 Observation Environment

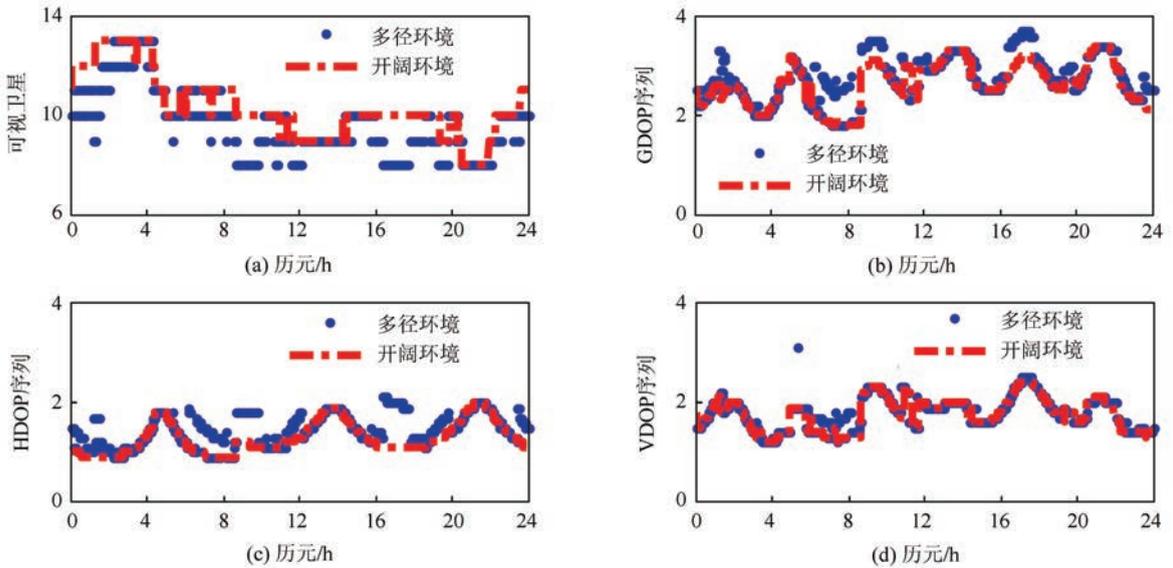


图 2 开阔环境(红)与多径环境(蓝)空间可视卫星几何结构

Fig.2 Dops of Available Satellites in the Open-sky Environment (red) and High Multipath Environment (blue)

VDOP 均值为 1.81)。由于 DOP 值仅与可视卫星方位角与高度角有关,仅表征卫星空间几何结构,而无法有效反映观测数据质量。GNSS 高精度定位中,系统性误差可通过差分或建模等方法予以削弱或消除,多径误差成为高精度定位的主要误差源。鉴于此,有必要设计指标探测多径误差,对该数据进行降权或剔除,保证观测数据质量。

图 3 为开阔环境与多径环境下北斗 GEO 卫星 (PRN:C01 与 C04) SNR 频间差序列 (S_1-S_2 ,

2.2 结果分析

开阔环境与多径环境空间可视卫星几何结构如图 2 所示。图 2(a)为可视卫星数,图 2(b)、2(c)、2(d)分别表示 GDOP、HDOP 与 VDOP 序列。由图可知,由于遮挡物的遮挡作用,多径环境下部分历元(如 $0\sim 4$ h, $6\sim 12$ h, $16\sim 20$ h 等)可视卫星数减少 $1\sim 2$ 颗,导致对应历元 HDOP 明显增大,而对应的 VDOP 值变化相对较小,主要原因在于水平 DOP 值对于卫星数的变化更为敏感,所以多径环境与开阔环境下 VDOP 序列具有较好的一致性。唯有在测段 $6:00-8:30$ 时,二者差异较为明显,其主要原因在于 1 颗 MEO 卫星 (PRN:C14) 运行到测站东北方向(方位角: $30^\circ\sim 70^\circ$),其观测信号被遮挡,导致 VDOP 值有所增加。

由于北斗 GEO 与 IGSO 卫星主要分布于测站南方,测站北向的遮挡物导致可视卫星数变动有限,DOP 值较小,可见,多径环境下空间可视卫星仍具有良好的几何结构(HDOP 均值为 1.47,

S_1-S_3)。由图可知,开阔环境下,GEO 卫星 SNR 频间差序列较为平稳,无明显的波动趋势。而多径环境下,SNR 频间差序列波动明显,尤其是高度角较高的 C01 卫星。可见,由于多径环境的影响,SNR 频间差序列有明显的波动趋势,可依据 SNR 频间差序列探测定位多径效应。

由于 SNR 发生变化与多种因素有关,为验证其是否为多径效应影响,采用 TEQC 软件计算北斗 GEO 卫星 (RPN:C01) 伪距多径误差变化量 (式(6)与(7)),结果如图 4 所示。由于篇幅限制,

仅列 B_1 与 B_3 频间 SNR 差分序列与其对应的 MP 序列。由图可知, 开阔环境下(图 4(a)、4(c)), SNR 频差(S_1-S_3)序列随卫星高度角的微小起伏也有所变化, 但整体趋势较为平缓, 无趋势性波动, 与之对应的 MP1 与 MP3 序列亦无明显

波动, 呈现为零线附近的随机波动。多径环境下(图 4(b)、4(d)), SNR 频间差序列呈现明显波动, MP 序列也具有相应的变化趋势。由此可见, 采用 SNR 频差序列可用于有效地探测多径效应。

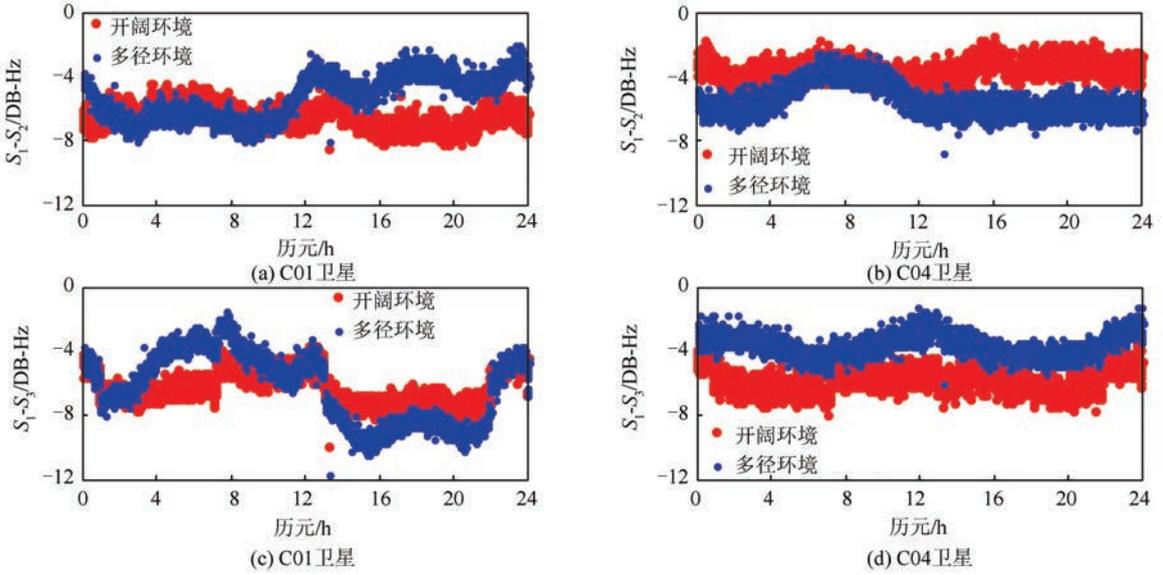


图 3 北斗 GEO 卫星 SNR 频间差序列

Fig.3 SNR Differences of Different Frequencies for BDS GEO Satellites
(Red: Open-sky; Blue: High Multipath; Unit: dB-Hz)

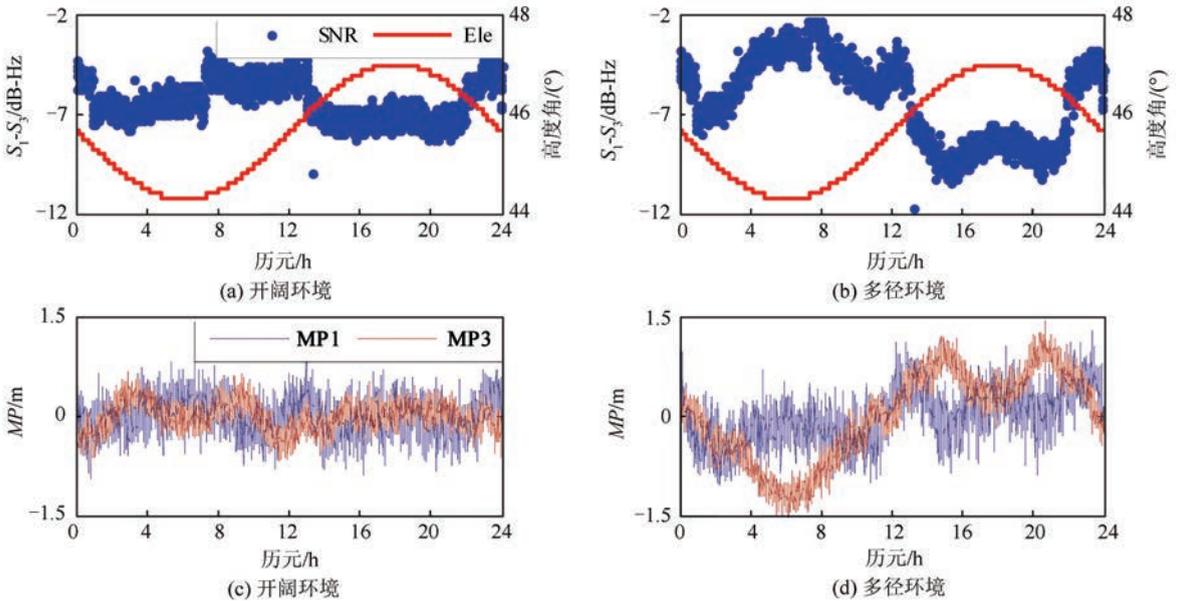


图 4 B_1 与 B_3 频点 SNR 频差序列及 MP 序列 (PRN: C01)

Fig.4 Sequences of the SNR Differences and MP Values for B_1 and B_3 Frequency (PRN: C01)

采用式(5)计算多径环境下北斗 4 颗 GEO 卫星 SNR 频间差序列(C05 无数据接收), 并依据开阔环境 SNR 观测值设定相应的阈值, 结果如图 5 所示。图 5(a)、5(b)、5(c)、5(d)分别表示 C01、C02、C03、C04 这 4 颗 GEO 卫星计算的 SNR 频

间差序列。绿线为置信度为 95%的阈值(两倍中误差, 降权处理), 红线为置信度为 99%的阈值(3 倍中误差, 数据剔除)。采用开阔环境 SNR 频差序列计算中误差, 其数值为 0.9031 dB-Hz。由图可知, 强多径环境下, 4 颗 GEO 卫星观测数据均

有明显的多径误差,其 SNR 频差序列波动明显,尤其是 C01、C03 与 C04 这 3 颗卫星,其超过 3 倍中误差历元比例分别为 26.9%、25.8%、21.1%,而超过两倍中误差的历元比例分别为 43.0%、26.2%、70.9%。由于 C04 卫星高度角较低,更易受多径效应影响,超过 70% 的历元数据质量较差,需剔除其对应的观测数据。C02 卫星 SNR 频差序列波动平缓,即受到的多径误差较小,超过两倍与 3 倍中误差的历元比例仅为 23.9% 与 2.0%。

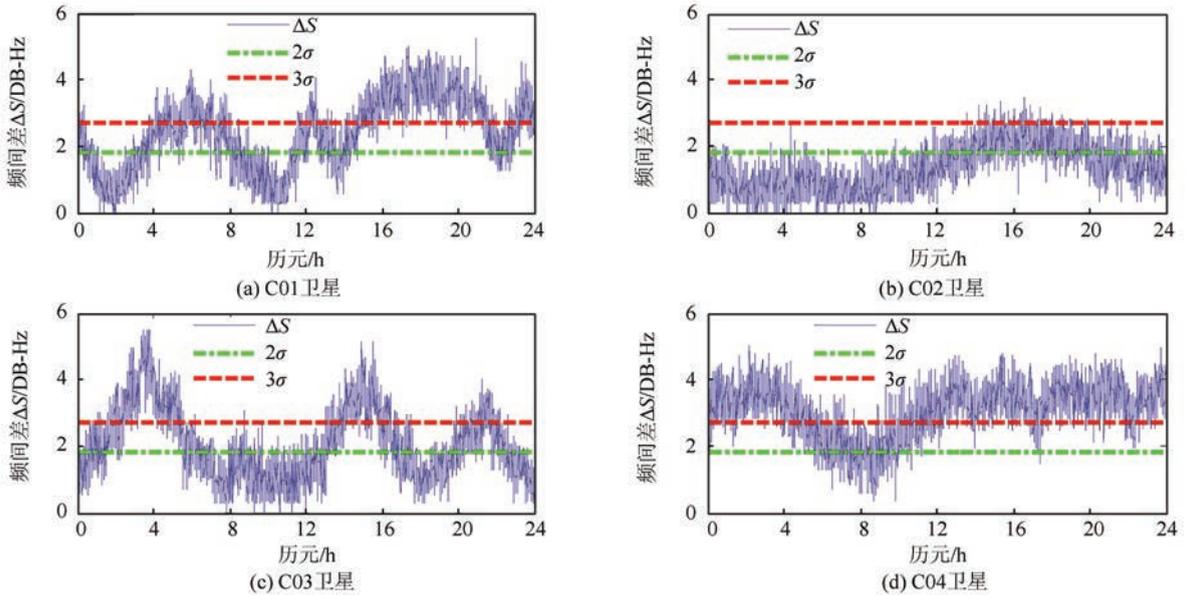


图 5 北斗 GEO 卫星多径效应探测

Fig.5 Multipath Detection Statistics and Thresholds in Multipath Environment

3 结 语

GNSS 数据处理时,系统性误差可通过差分或建模方法予以削弱或消除,多径误差成为高精度 GNSS 定位的主要误差源。由于多径效应机理复杂,具有时变特性且受环境影响,多径误差难以有效探测与剔除。多径效应对于不同频率及不同卫星影响不同,导致其信噪比 SNR 测量值发生变化,因此可采用 SNR 频间差数据探测多径误差。本文基于北斗三频 SNR 频间差数据探测多径效应,并用 MP 序列验证该方法的可靠性。同时,依据开阔环境 SNR 频间差序列设定探测阈值。实验结果表明,三频 SNR 频差序列可有效探测多径效应,可应用于实时定位领域。由于该方法需三频数据,因此,该方法具有一定的局限性,可作为补充方案用于 GNSS 数据质量控制。

参 考 文 献

- [1] Langley R B. GPS Receivers and the Observables [M]//Kleusberg A, Teunissen P J G, et al. GPS for Geodesy, New York: Springer Press, 1998
- [2] Hofman-Wellenhof B, Lichtenegger H, Wasle E. Global Navigation Satellite Systems-GPS, GLO-NASS, Galileo & More [M]. New York: Springer Press, 2008
- [3] Irsigler M. Characterization of Multipath Phase Rates in Different Multipath Environments [J]. *GPS Solut*, 2010, 14:305-317
- [4] Nee R D J. Multipath Effects on GPS Code Phase Measurements [J]. *Navigation*, 1992, 39(2):177-190
- [5] Ray J K, Cannon M E, Fenton P C. Mitigation of Static Carrier-phase Multipath Effects Using Multiple Closely Spaced Antennas [J]. *Navigation*, 1999, 46(3):193-201
- [6] Phan Q H, Tan S L, McLoughlin I. GPS Multipath Mitigation: A Nonlinear Regression Approach [J]. *GPS Solut*, 2013, 17:371-380
- [7] Dickman J, Zhu Z, Bartone C. Carrier Phase Multipath Error Characterization and Reduction in Sin-

- gle Aircraft Relative Positioning [J]. *GPS Solut*, 2010, 14:141-152
- [8] Lau L, Cross P. Development and Testing of a New Ray-tracing Approach to GNSS Carrier-phase Multipath Modelling[J]. *J Geod*, 2007, 81:713-732
- [9] Jin S G, Cardellach E, Xie F Q. GNSS Remote Sensing: Theory, Methods and Applications [M]. New York: Springer Press, 2014
- [10] Li Zhenghang, Huang Jinsong. GPS Surveying and Data Processing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005(李征航,黄劲松. GPS 测量与数据处理 [M]. 武汉:武汉大学出版社,2005)
- [11] Roddy D. Satellite Communications [M]. New York: McGraw-Hill, 2002
- [12] Groves P D, Jiang Z, Height A. C/N_0 Weighting and Consistency Checking for GNSS NLOS and Multipath Mitigation in Urban Areas [J]. *J Navig*, 2013, 66(5):653-659
- [13] Wu Yuhang, Chen Xiuwan, Wu Caicong. Mitigation of Multi-path Effect Using SNR Values [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(8): 842-845(吴雨航,陈秀万,吴才聪. 利用信噪比削弱多路径误差的方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2008,33(8):842-845)
- [14] Wanninger L. Carrier Phase Multipath Mitigation Based on GNSS Signal Quality Measurements: Journal of Applied Geodesy [J]. *Journal of Applied Geodesy*, 2009, 3(2): 81-87.
- [15] Estey L H, Meertens C M. TEQC: the Multi-purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data [J]. *GPS Solut*, 1999, 3 (1):42-49
- [16] Cai C S, Gao Y, Pan L, et al. An Analysis on Combined GPS/COMPASS Data Quality and its Effect on Single Point Positioning Accuracy Under Different Observing Conditions [J]. *Advances in Space Research*, 2014, 54(5): 818-829

BDS GEO Satellites Multipath Detection Using Three-frequency Signal-to-Noise Measurements

GAO Xiao^{1,2} YANG Zhiqiang¹ KANG Junmei¹ WANG Jun¹

1 College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 Northwest Electric Power Design Institute Co., LTD. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710032, China

Abstract: Multipath interference is a main source of GNSS positioning errors in real-time applications as the majority of the systematic errors can be effectively removed through modeling and differential technologies. Because multipath-error has time-varying characteristics closely related to the observation environment, it is difficult to detect and eliminate, especially in dynamic positioning. Because the multipath effect on the different frequencies is quite different, this paper introduces a new method to detect BeiDou GEO satellite multipath-error based on the frequency-difference data of the triple-frequency SNR observables. Three-frequency SNR-based multipath detector was developed using the observables from the BDS GEO satellites in the open-sky environment. The GNSS data in the high-multipath environment was used to verify the reliability and validity of the new method. The results show that BeiDou GEO satellites are easily affected by the multipath-error, and ordinary methods cannot easily detect this error. The new method proposed in this paper effectively detectz GEO multipath error, and reduces or eliminates the weight of the observables based on a threshold. It can be applied in GNSS data quality control.

Key words: multipath; signal-to-noise; three-frequency; BDS; GEO; real-time; detection threshold

First author: GAO Xiao, PhD candidate, specializes in combined GNSS positioning algorithm research and data processing. Email: 834606637@qq.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (No. 41504001).