

北斗卫星伪距信号质量评估及偏差校正*

倪少杰¹, 王耀鼎¹, 封欣², 王飞雪¹

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 中国卫星导航定位应用管理中心, 北京 100088)

摘要:针对北斗卫星信号存在系统性伪距偏差的问题,从多路径角度评估北斗三频信号的质量,验证了该项偏差与卫星轨道类型、卫星仰角及信号频率有关。为消除这一系统性偏差的影响,采用连续分段线性函数建立北斗三频伪距偏差校正模型。与现有的改正模型所不同,所提模型不仅采用了更长时间范围内的北斗实测数据,更为重要的是它顾及了改正数的精度信息。基于动态精密单点定位的实验结果表明,采用所提方法修正后,接收机定位性能有明显提升。

关键词:北斗卫星导航系统;伪距偏差;多路径;随机模型;精密单点定位

中图分类号:TN967.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)04-087-05

Quality assessment and error correction of BeiDou satellite pseudorange signal

NI Shaojie¹, WANG Yaoding¹, FENG Xin², WANG Feixue¹

(1. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. China National Administration of GNSS and Applications, Beijing 100088, China)

Abstract: Regarding the problem of systematic pseudorange bias in BeiDou navigation system application, the pseudorange observations quality of Beidou triple frequency was analyzed from the multipath angle. The analysis results verified that the bias was related to the type of satellite orbit, satellite elevation angle and the signal frequency. In order to eliminate the effects of this systematic bias, a correction model for triple-frequency pseudorange bias was established with the continuous piecewise linear function. Compared with the traditional correction model, the proposed model used the Beidou measured data from a longer range and considered the accuracy of information of corrections. The correctness and superiority of the proposed model were verified by the experimental results on the basis of the dynamic precise point positioning.

Key words: BeiDou navigation satellite system; pseudorange error; multipath; stochastic model; precise point positioning

北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite System, BDS)是中国正在实施的自主发展、独立运行的卫星导航系统,是继美国、俄罗斯两国全球卫星导航系统之后第三个成熟的卫星导航系统。从2010年开始,北斗卫星进入密集发射期,并将持续至2020年。2012年年底初步建成了由4颗中轨道(Medium Earth Orbit, MEO)卫星、5颗倾斜轨道(Inclined Geosynchronous Satellite Orbit, IGSO)卫星和5颗地球同步(Geostationary Orbit, GEO)卫星组成的北斗区域卫星导航系统,正式向亚太地区提供定位、导航和授时以及短报文通信服务。2015年3月底,首颗新型(新一代)北斗卫星发射成功标志着北斗卫星导航系统全球化征程(组网)正式开启,预计

2020年将建成由5颗同步卫星和30颗中轨道卫星构成的全球卫星导航系统。

北斗独特的轨道设计及其丰富的频率资源为卫星定位、导航和授时(Position, Navigation and Timing, PNT)领域创造了新的机遇和发展空间,同时,它也带来了一些新的问题和挑战^[1-2]。尤其是在卫星信号质量方面, Hauschild 等于2012年最早发现了北斗卫星数据质量异常的情形,但未对其原因进行深究^[3];此后, Montenbruck 等通过多路径效应分析探测到了北斗伪距观测值中的系统性偏差,并得出这种系统性偏差的影响主要来自卫星端,且与卫星仰角相关,其数值影响达到0.4~0.6 m^[4]。2015年, Wanninger 和 Beer 对这一现象进行了更加全面的分析,得出了类似的结

* 收稿日期:2016-01-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61403413)

作者简介:倪少杰(1978—),男,山东莱阳人,副研究员,博士研究生, E-mail: nishaojie123@126.com

论,并给出了北斗伪距系统偏差校正的经验模型^[5]。需要指出的是,文献[5]仅对短期内 2 组连续 10 天(2 组数据的间隔仅为 3 个月)的观测数据进行了分析,并在此基础上建立了改正模型。同时,该模型仅顾及了该项偏差的确定性分量,而完全忽视了其随机变化分量。

为了更加准确地反映北斗伪距观测值的质量,提高北斗导航与位置服务的性能,本文拟在更大时间尺度上分析北斗伪距系统性偏差的变化情况。在此基础上,建立一个顾及该项偏差随机变化部分的伪距偏差校正模型。

1 北斗伪距偏差分析及建模方法

1.1 伪距多路径效应

对于北斗双频或三频观测值,伪距多路径效应可用式(1)表征^[6-7]:

$$MP_i(i, j) = P_i - \frac{f_i^2 + f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} \lambda_i \varphi_i + \frac{2f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} \lambda_j \varphi_j \quad (1)$$

式中, MP_i 为第 i 频点的多路径, P 和 φ 分别代表伪距和相位观测值, f 为载波频率, λ 为载波相位波长。

在忽略观测噪声的前提下,式(1)消除了电离层延迟和与几何距离有关项的影响,仅剩伪距多路径和载波相位模糊度。在未发生周跳时, MP 序列将在某一常数附近变化。因此,对该序列去均值化处理即可得到伪距的多路径效应。

需要说明的是,任一频点上的多路径可基于三频数据构造两个不同的 MP 序列。例如, B1 频点的多路径可通过 (B1, B2) 或 (B1, B3) 频率组合构造。但从噪声最小的角度考虑,应优先选择噪声更小的 (B1, B2) 组合。图 1 所示为 JFNG 测站 B1 频点对应的北斗伪距多路径随卫星仰角的变化关系。其余频点具有类似的现象,故不再单独

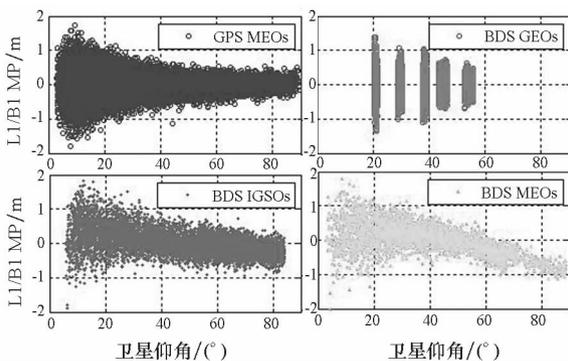


图 1 JFNG 站北斗 B1 伪距多路径
随卫星仰角变化关系

Fig.1 Change relationship between BeiDou B1 pseudorange multipath and satellite altitude angle at JFNG station

给出。为方便比较,北斗卫星根据不同的轨道类型分成 GEO、IGSO 和 MEO 三类,同时给出了 GPS 卫星的结果进行对比分析。

分析图 1 发现,与 GPS 所不同,北斗卫星,特别是 MEO 卫星在仰角较大时,其对应的伪距多路径存在明显的系统性偏差,其数值接近 -1 m。采用式(2)计算伪距多路径与卫星仰角之间的相关性,得到表 1 所示的相关系数。

$$\rho_{MP,E} = \frac{\sum MP \cdot E - \frac{\sum MP \sum E}{N}}{\sqrt{\left(\sum MP^2 - \frac{(\sum MP)^2}{N}\right)\left(\sum E^2 - \frac{(\sum E)^2}{N}\right)}} \quad (2)$$

式中, E 为卫星仰角, N 为样本容量, $\rho_{MP,E}$ 为相关系数。

表 1 伪距多路径与卫星仰角相关系数统计

Tab.1 Correlation coefficient between pseudorange multipath and satellite altitude angle

	GPS	BDS		
		GEO	IGSO	MEO
MP1	-0.04	-0.01	-0.49	-0.61
MP2	0.08	0.00	-0.48	-0.60
MP3	0.12	-0.02	-0.39	-0.36

由表 1 可知, GPS 和北斗 GEO 卫星的伪距多路径与卫星仰角的相关性较弱,几乎可以忽略。对于北斗 IGSO 和 MEO 卫星,其伪距多路径与卫星仰角存在较为显著的负相关性。因此,本文仅对北斗 IGSO 和 MEO 卫星的伪距偏差进行建模和校正。

1.2 连续分段线性函数

给定伪距多路径序列 (E_i, MP_i) , 采用分段线性函数进行拟合,同时对相邻节点的连续性进行约束,即:

$$\begin{cases} S = \min \left[\sum_{j=1}^{m-1} \sum_{i=1}^{n_j} (f_{j,i} - MP_{j,i})^2 \right] \\ \text{s. t. } f_j(a_j) - f_{j+1}(a_j) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, n$ 为节点索引, n 为采样数; $j = 1, 2, \dots, m-1$ 为分段索引, m 为节点数; $f_{j,i} = f_j(E_{j,i}, b_1, b_2, \dots, b_m)$ 为第 j 段的拟合函数, a_j 和 b_j 分别为第 j 段最末点对应的卫星仰角和多路径。

采用最小二乘法可计算所有分段的拟合系数,此外,估值的精度可通过其均方根差(Root Mean Square, RMS)表征,即:

$$RMS_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} (f_{j,i} - MP_{j,i})^2}{n_j - 1}} \quad (4)$$

为了确保拟合系数的可靠性,卫星仰角的范围选取为 5°~85°,分段间隔设置为 10°。

2 北斗伪距偏差建模

2.1 实验数据描述

选取全球均匀分布的 10 个 MGEX (multi-GNSS experiment) 跟踪站从 2014 年 1 月至 2015 年 10 月的北斗卫星观测数据进行建模,其中 6 个站采用 Trimble 三频接收机,另外 4 个站则采用 Septentrio 双频接收机。测站的接收机类型及地理分布如图 2 所示^[8-9]。

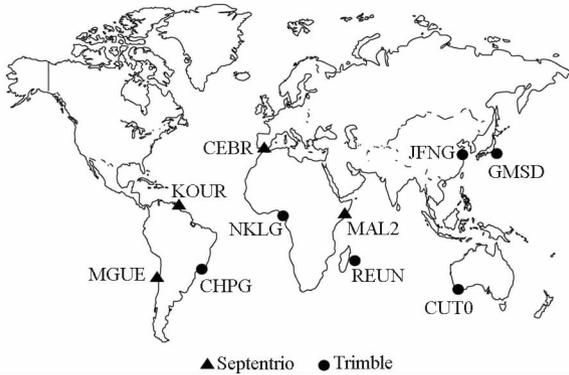


图 2 跟踪站地理位置分布及其接收机类型

Fig. 2 Tracking station location distribution and receiver type

2.2 拟合结果及分析

图 3 给出了 JFNG 单站的 MP 拟合结果,图 4 为所有测站的 MP 拟合结果。图中各节点处的离散点代表利用单天数据拟合得到的结果(为使图表清晰未连线),曲线连接则表示利用建模时段内所有数据建模得到的连续分段线性函数。

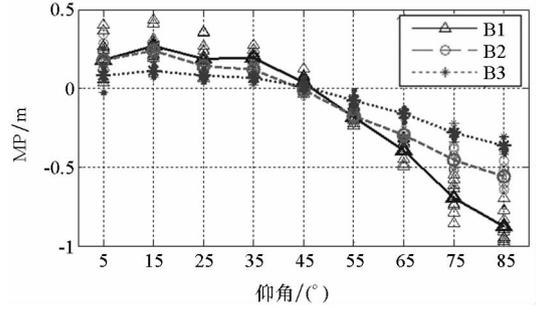
分析图 3 和图 4 不难发现,北斗伪距偏差与卫星轨道类型、信号频率和仰角相关,这与文献[4]的结论一致。对于北斗 MEO 卫星,其 B1 频点上的伪距偏差效应在仰角大于 70°时达到 0.5~1.0 m,其余卫星(IGSO)其余频点(B2 和 B3)的伪距观测值偏差具有相似的特性,但其数值明显较小。

2.3 伪距偏差改正模型

采用 1.2 节的建模方法,根据 2.2 节的拟合结果,即可建立北斗卫星伪距偏差的数值改正模型。表 2 给出了改正模型在不同轨道类型、不同节点、不同频点对应的具体数值。

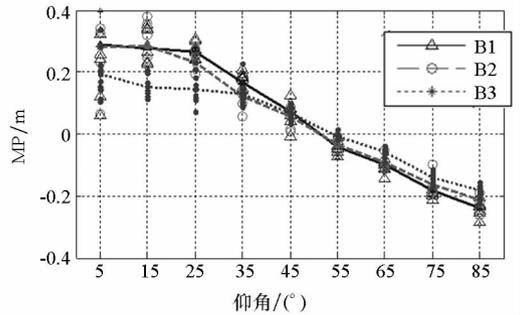
模型使用方面,当卫星仰角低于 5°和高于 85°时,选择最近的节点的数值进行改正。其余仰

角则选择所在的分段区间,采用线性内插求解伪距偏差改正数及其方差。



(a) MEO 卫星拟合结果

(a) Fitting results of MEO satellite

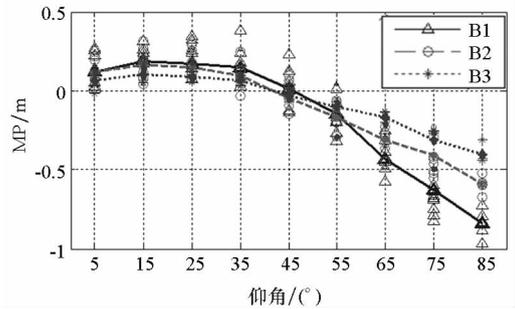


(b) IGSO 卫星拟合结果

(b) Fitting results of IGSO satellite

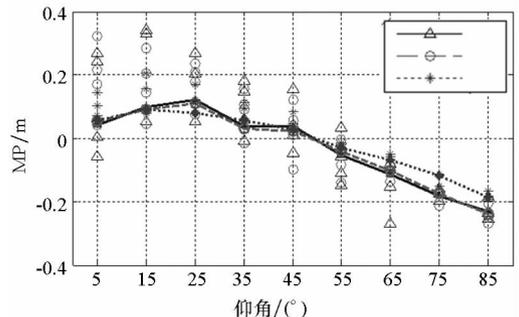
图 3 基于 JFNG 单站的 MP 拟合结果

Fig. 3 MP fitting results based on JFNG single station



(a) MEO 卫星拟合结果

(a) Fitting results of MEO satellite



(b) IGSO 卫星拟合结果

(b) Fitting results of IGSO satellite

图 4 基于所有测站数据的 MP 拟合结果

Fig. 4 MP fitting results based on all station data

表 2 北斗 MEO/IGSO 卫星伪距偏差改正模型

Tab. 2 Correction model for MEO/IGSO satellite pseudorange error

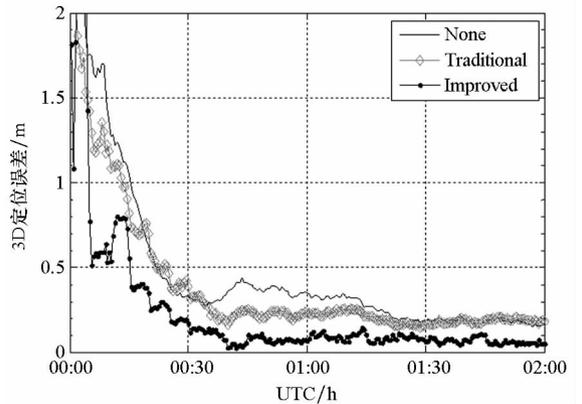
仰角/(°)	伪距偏差改正数/m						改正数方差/m					
	MEOs			IGSOs			MEOs			IGSOs		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3
5	-0.109	-0.140	-0.060	-0.101	-0.148	-0.065	0.721	0.588	0.580	0.709	0.564	0.576
15	-0.169	-0.148	-0.087	-0.203	-0.250	-0.162	0.605	0.480	0.499	0.651	0.532	0.582
25	-0.150	-0.121	-0.070	-0.222	-0.224	-0.168	0.476	0.373	0.401	0.500	0.371	0.409
35	-0.105	-0.062	-0.053	-0.123	-0.110	-0.078	0.388	0.291	0.290	0.403	0.297	0.303
45	0.004	0.047	0.022	-0.066	-0.043	-0.049	0.333	0.254	0.258	0.389	0.278	0.244
55	0.181	0.185	0.096	0.036	0.044	0.021	0.293	0.220	0.241	0.308	0.230	0.223
65	0.411	0.326	0.180	0.107	0.106	0.068	0.275	0.194	0.211	0.262	0.210	0.208
75	0.674	0.477	0.280	0.163	0.178	0.130	0.261	0.188	0.206	0.251	0.213	0.212
85	0.853	0.600	0.373	0.245	0.260	0.208	0.233	0.173	0.198	0.217	0.195	0.190

3 模型验证

从定位的角度,采用精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)对本文的模型进行验证,数据选取时点为 2014 年 2 月 16 日。本文设计了三种验证方案:方案一对伪距偏差不作任何处理(None);方案二采用文献[5]的方法进行改正(Traditional);方案三采用本文提出的模型进行改正(Improved)。值得一提的是,在 PPP 解算中,伪距观测值的权重比相位观测值低 2~3 个数量级,PPP 定位的精度主要取决于相位观测值。因此经过一段时间的收敛后,三种方案对应的定位误差基本一致,其差异主要体现在初始化过程。为了进一步分析该项偏差对 PPP 初始化的影响,图 5 给出了 CUTO 和 JFNG 站前 2 h 的三维定位结果。

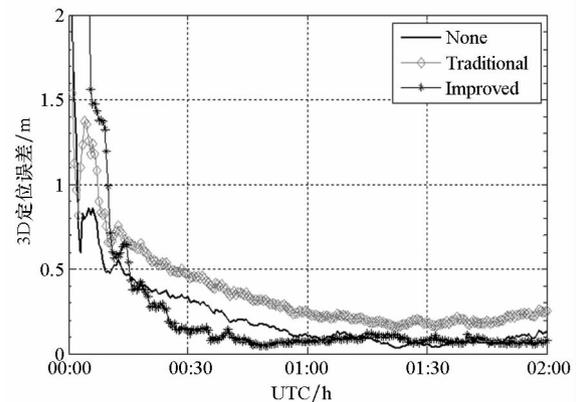
由图 5 可知,起始阶段三种方案之间的定位结果差异较大,达到分米至米级。对于 CUTO 站,经历 15~30 min 的初始化后,方案二和方案三的定位精度得到一点改善,特别是方案三改善最为显著。对于 JFNG 站,方案二对应的定位精度非但没有改善,反而有所降低;而采用本文的模型——方案三能够同样提高其定位精度。究其原因,一方面是现有的改正模型仅是利用非常有限的数据库建立的经验模型,其数值准确性不高;另一方面,现有的模型仅顾及了伪距偏差的确定性分量,忽视了该项偏差的随机项。

因此,利用不够精确的改正数对北斗伪距观测值进行改正,必然会带来新的误差影响,进而导致定位精度下降。与现有模型所不同,本文提出的模型是基于较长时间范围内(近 2 年时间跨



(a) CUTO 站定位误差时序

(a) Positioning error based on CUTO station



(b) JFNG 站定位误差时序

(b) Positioning error based on JFNG station

图 5 动态 PPP 定位误差时序

Fig. 5 Dynamic PPP positioning error

度)建立的,同时顾及了改正数的精度信息。因此,在利用本文模型进行改正时,即使改正数的数值不够准确,通过随机模型约束(改正数的方差)也仍然能够较为准确地反映观测值的真实精度状

况,从而保证定位结果的精度和可靠性。

4 结论

与其他的导航卫星所不同,北斗(IGSO和MEO)卫星码观测值存在系统性偏差。本文通过构造多路径观测量分析了该项偏差与卫星轨道类型、信号频率和卫星仰角之间的关系,结果表明,北斗MEO卫星B1频点受伪距系统偏差的影响最大,在仰角较大时达到0.5~1.0 m,其余卫星其余频点具有相似的特性,但受到的偏差影响较小。尽管如此,其影响仍然不可忽略。为此,本文采用连续分段线性函数,利用全球均匀分布的10个测站近2年的北斗实测数据建立了北斗三频伪距偏差校正模型。与传统的模型相比,新模型不仅在时间尺度上更合理,更重要的是它考虑了改正数的随机模型。最后,通过动态PPP进一步验证了本文模型的准确性和有效性。

参考文献(References)

- [1] 宁津生,姚宜斌,张小红. 全球导航卫星系统发展综述[J]. 导航定位学报, 2013, 1(1): 3-8.
NING Jinsheng, YAO Yibin, ZHANG Xiaohong. Review of the development of global satellite navigation system[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2013, 1(1): 3-8. (in Chinese)
- [2] 杨元喜, 李金龙, 徐君毅, 等. 中国北斗卫星导航系统对全球PNT用户的贡献[J]. 科学通报, 2011, 56(21): 1734-1740.
YANG Yuanxi, LI Jinlong, XU Junyi, et al. Contribution of the Compass satellite navigation system to global PNT users[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(21): 1734-1740. (in Chinese)
- [3] Hauschild A, Montenbruck O, Sleewaegen J M, et al. Characterization of Compass M-1 signals [J]. GPS Solutions, 2012, 16(1): 117-126.
- [4] Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P, et al. Initial assessment of the COMPASS/BeiDou-2 regional navigation satellite system[J]. GPS Solutions, 2013, 17(2): 211-222.
- [5] Wanninger L, Beer S. BeiDou satellite-induced code pseudorange variations: diagnosis and therapy [J]. GPS Solutions, 2015, 19(4): 639-648.
- [6] Bakker P F, Tiberius C C, Marel H, et al. Short and zero baseline analysis of GPS L1 C/A, L5Q, GIOVE E1B, and E5aQ signals[J]. GPS Solutions, 2012, 16(1): 53-64.
- [7] Wang G, Jong K D, Zhao Q, et al. Multipath analysis of code measurements for BeiDou geostationary satellites [J]. GPS Solutions, 2015, 19(1): 129-139.
- [8] 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, 2008, 83(3/4): 191-198.
- [9] Montenbruck O, Steigenberger P, Khachikyan R, et al. IGS-MGEX: preparing the ground for multi-constellation GNSS science[J]. Inside GNSS, 2014, 9(1): 42-49.