

DOI:10.13203/j.whugis20160062



文章编号:1671-8860(2017)10-1461-07

北斗卫星伪距偏差模型估计及其对精密定位的影响

李 昕¹ 张小红¹ 曾 琪¹ 潘 林¹ 朱 锋¹

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

摘 要:现阶段北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)的同步地球轨道(geostationary orbits, GEO)卫星、中倾斜地球同步轨道(inclined geo-synchronous orbits, IGSO)卫星和中圆地球轨道(medium earth orbit, MEO)卫星均存在伪距偏差,该伪距偏差的存在对精密定位的研究及其应用产生了较大的影响。根据北斗 IGSO 和 MEO 卫星的伪距偏差与高度角和频率相关的误差特性,本文分析了测站数目及分布,以及观测时长对建模的影响,选择 18 个测站 2015 年全年的数据作为 MEO 卫星的建模数据,其中可以连续观测到全弧段 IGSO 卫星的 4 个测站用于 IGSO 卫星的建模,采用加权分段线性拟合联合抗差估计的方法建立了北斗卫星伪距偏差改正模型。模型改正后,北斗 IGSO 和 MEO 卫星的伪距偏差得到明显的削弱,相比于传统的伪距偏差改正模型,精密单点定位(precise point positioning, PPP)的定位精度和收敛时间均得到提升。

关键词:北斗卫星导航定位系统;伪距偏差;模型估计;MP 组合;PPP

中图法分类号:P228

文献标志码:A

北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)是中国自主研发、独立运行的卫星导航系统,在经历了“北斗一代”到“北斗二代”的发展后,现已基本实现亚太地区的导航、定位、授时等服务,并计划在 2020 年完成全球系统的建设。现阶段可以正常提供导航定位服务的 13 颗北斗卫星分别是 5 颗同步地球轨道(geostationary orbits, GEO)卫星、5 颗中倾斜地球同步轨道(inclined geo-synchronous orbits, IGSO)卫星和 3 颗中圆地球轨道(medium earth orbit, MEO)卫星,经研究发现这 13 颗卫星的伪距观测值均存在明显的系统偏差,因此针对北斗伪距偏差的分析和改正对提高北斗卫星导航定位精度和应用性能有着重要意义。

自从 Hauschild 等提出北斗伪距偏差的存在后,国内外学者进行了广泛的研究, Montenbruck 等发现了伪距偏差与高度角和频率相关的特性,由于不同的测站和不同的接收机类型计算得到的伪距偏差对于同一颗卫星具有一致性,因此认为伪距偏差的误差来源于北斗卫星端的多路径^[1-5]。张小红等通过对北斗卫星非差、单差和双

差宽巷组合(melbourne-wübbena, MW)的系统偏差进行研究进一步确定了伪距偏差的产生归因于卫星端的多路径,其存在对宽巷模糊度的固定有重大的影响^[6-9]。为了削弱北斗卫星伪距偏差的影响, Wanninger 等根据伪距偏差与高度角相关的特性建立了北斗 IGSO 和 MEO 卫星的伪距改正模型,该模型的建立对 BDS 的单频定位精度有较为明显的提高^[10]。但是该模型仅采用了 2014 年 3 月 10~20 日、7 月 10~20 日共 20 d 的数据进行建模,没有具体分析测站因素和时间因素对建模的影响,建模数据量较少不足以得到适用于全球的高精度模型。

本文通过分析测站数目及分布,以及观测时长对建模的影响后,采用全球 18 个测站对 MEO 卫星的伪距偏差进行拟合,利用其中 4 个可以观测到较为完整的 IGSO 卫星弧段的测站对 IGSO 卫星进行拟合,以高度角每隔 5°为间隔进行加权分段线性拟合联合抗差估计得到改进后的伪距改正模型,并测试其对不同测站的精密单点定位(precise point positioning, PPP)精度提高情况,证明了模型的有效性。

收稿日期:2016-06-02

项目资助:国家自然科学基金(41474025);湖北省自然科学基金重点项目(杰青)(2015CFA039)。

第一作者:李昕,硕士,主要从事 GNSS 精密定位算法研究。lixinsgg@whu.edu.cn

通讯作者:张小红,博士,教授。xzhzhang@sgg.whu.edu.cn

1 北斗卫星伪距偏差分析

多路径组合(multipath combination, MP)由单频伪距和双频相关观测值组合得到,具体表示为^[11]:

$$\begin{aligned} M_{P_i} &= P_i - \frac{f_i^2 + f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} L_i + \frac{2f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} L_j \\ &= M_i - \frac{f_i^2 + f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} m_i + \frac{2f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} m_j + B_i + \varepsilon_i \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $i, j (i \neq j)$ 表示不同的信号频率; M_{P_i} 是伪距多路径组合; P, L 是伪距观测值和相位观测值; f 对应信号的频率; M 是伪距观测值的多路径误差;而 m 是相位观测值的多路径影响; B 包含了相位的模糊度和信号延迟信息,如果在连续观测且没有发生周跳的情况下 B 保持常数特性; ε 是组合观测值的噪声。

由式(1)可知,MP组合消除了卫星到地球的

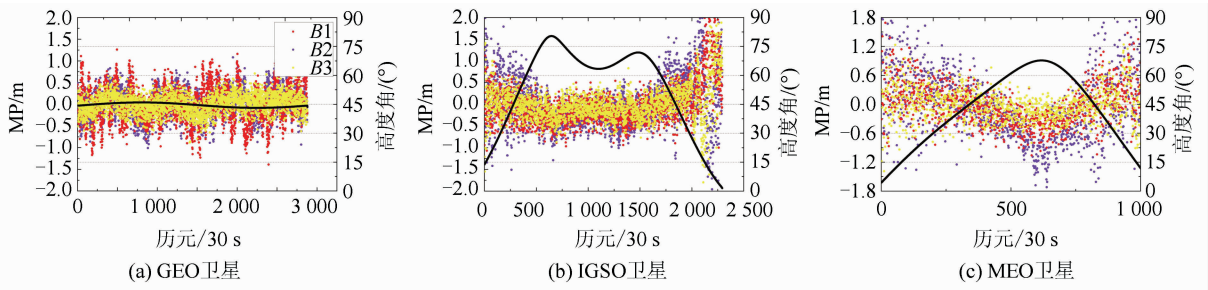


图1 不同频率上的北斗卫星多路径误差序列与高度角序列

Fig. 1 BDS MP Series and Elevation Series on B1/B2/B3 Frequency

2 北斗 IGSO 和 MEO 卫星的伪距偏差模型分析

截止2015年12月,全球定位系统实验中心(MultiGNSS Experiment, MGEX)提供了全球可以接收北斗信号的约70个测站的观测信息,大多数测站使用的Trimble Net R9接收机可以提供三频观测值(B1/B2/B3),部分测站的接收机如Septentrio POLARX4,仅提供北斗双频观测数据(B1/B2)。本文选择了18个观测到较多北斗卫星的测站不同时间长度的数据作为采样数据进行模型分析和建模处理,数据的采样间隔是30 s,在数据处理之前已对观测数据中的周跳进行了探测和修复。

2.1 伪距偏差模型的估计方法

根据北斗 IGSO 和 MEO 卫星的伪距偏差与高度角大小相关的特性,文章选择加权分段线性

几何距离、钟差、各项误差改正和大气延迟改正,仅残余模糊度和通道时延、多路径误差和噪声相关。模糊度和通道时延当作常数值平滑后,MP组合仅与多路径误差和噪声有关^[12-13]。

选取CUT0站2015年3月1日的观测数据计算得到北斗卫星的MP序列与高度角序列,图1给出了不同频率下北斗GEO、IGSO、MEO卫星的MP时间序列以及高度角序列,可以看出IGSO和MEO卫星的MP序列中存在随着高度角的增大而减小的系统误差,即伪距偏差。GEO卫星受到伪距偏差的影响在一天的范围内MP序列呈现波动现象,但由于轨道高度角的变化范围较小,伪距偏差的大小与高度角的关系并不显著。图中不同频率对应的MP序列存在着比较明显的区别,说明伪距偏差的大小与频率相关。下文将主要根据IGSO和MEO卫星伪距偏差与高度角相关的特性,针对不同的频率进行模型估计。

拟合联合抗差估计的方法进行高度角建模,具体方法如下。

首先将MP序列按高度角 5° 间隔划分弧段,高度角范围是 $5^\circ \sim 85^\circ$,每一个弧段进行最小二乘线性拟合,分段的节点具备连续性,对应的目标函数 S 为:

$$\begin{cases} S = \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{i=1}^{n_j} P_{j,i} (f_{j,i} - M_{j,i})^2 = \min \\ f_j(e_j) - f_{j+1}(e_j) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $j=1,2,\dots,m-1$,其中 m 是分段节点总数; $i=1,2,\dots,n$, n 是对应弧段上MP观测值总数; $f_{j,i}, M_{j,i}$ 和 $P_{j,i}$ 分别对应于第 j 弧段上第 i 个点的拟合函数值、MP观测值和权重; e_j 是第 j 个节点上的高度角; f_j, f_{j+1} 是第 j 和 $j+1$ 弧段上与高度角相关的拟合函数。由于MP序列中包含了测站多路径和伪距偏差,在低高度角情况下测站的多路径尤其严重,考虑到不同高度角下MP观测值精度不同,在分段拟合过程中对不同的高度角

对应的 MP 观测值设置了不同的权重。文章选择的权重设定方案具体为:

$$P_{j,i} = a^2 + a^2 / \sin^2(e_{j,i}) \quad (3)$$

式中, a 是指北斗观测值的伪距精度, 通常取 0.3 m; $e_{j,i}$ 指第 j 弧段上第 i 个点对应的高度角。

另一方面, 最小二乘估计后的估值精度 R 的计算式为:

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m-1} \sum_{i=1}^{n_j} (f_{j,i} - M_{j,i})^2}{n-1}} \quad (4)$$

式中, n 表示样本的总量, 其他符号的含义与式(2)相同。利用式(2)、式(3)、式(4)可以计算出每一颗 IGSO 和 MEO 卫星的伪距偏差模型和模型精度, 同类卫星最终的模型精度通过所有卫星取均值得到。选择 CUT0 测站 2015 年 3 月 1~10 日的观测数据进行拟合建模和精度评估, IGSO 和 MEO 卫星的伪距偏差的模型精度分别是 0.35 m 和 0.41 m, 相比于北斗伪距的常用精度信息 0.3 m 精度偏低, 因此为了控制北斗伪距的精度和抵抗粗差的影响, 本文使用了抗差估计进行质量控制, 所使用的抗差方法是 IGGIII 方案^[14]。

2.2 测站数目和测站分布对模型估计的影响

通常每个测站观测到同一颗卫星的高度角范围并不相同, 这与北斗 IGSO 卫星和 MEO 卫星的运行轨迹密切相关。IGSO 卫星的星下点轨迹主要分布于亚太区域, 在此范围的少数测站可以观测到高度角范围为 5°~85° 的 IGSO 卫星, 大部分测站观测到 IGSO 卫星的高度角范围较小, 在此范围外的测站基本观测不到 IGSO 卫星。而大多数测站都可以观测到 MEO 卫星完整的观测弧段, 且每个测站的观测到的卫星高度角范围仍有

差异。本文统计了 18 个测站可以观测到的北斗 IGSO 和 MEO 卫星最大的高度角范围后发现, 对于 IGSO 卫星, 只有 CUT0、GMSD、JFNG 和 ADE2 测站能够观测到基本完整的弧段, 所有测站均可观测到较大高度角范围的 MEO 卫星。为了验证测站数目和分布对模型估计的影响, 分别用 4 个测站(CUT0、GMSD、JFNG 和 ADE2)、12 个测站、18 个测站在 2015 年 7 月 1~10 日共 10 d 的数据对北斗卫星建模, 然后测试不同改正模型对 SIN1 测站(SIN 测站没有参与建模)MP 序列的精度提高情况。图 2 给出了 B2 频率上的 IGSO 卫星的建模结果和精度提高情况, 从图中可以看出, 对于 IGSO 卫星, 用 4 个测站建立的高度角模型与用 12、18 个测站计算的结果有较为明显的差异, 而 12 个测站和 18 个测站的建模结果整体吻合, 仅在某些节点处有所差异; 从精度提升情况来看, 相比 12、18 个测站的建模结果, 4 个测站的建模结果更好, 主要是因为如果不能在一天的时间范围内连续观测到较为完整的卫星弧段, MP 序列中包含的测站多路径和噪声的均值不为 0, 在进行去均值的平滑处理时会导致 MP 值的大小产生较大的偏差, 从而降低模型估计的精度。图中的 4 个测站全部可以观测到全弧段的 IGSO 卫星, 12 个测站和 18 个测站中由于加入了大量没有全弧段观测的数据, 降低了模型的精确度, 因此, 测站的分布也会影响到 IGSO 卫星的模型估计。对于 MEO 卫星, 18 个测站建立的改正模型的改正效果优于 4 个测站和 12 个测站的结果, 主要是因为不同测站对应的高度角范围不同, 测站数目太少会导致部分高度角范围缺少相应的观测值, 因此测站数目越多, 外符合精度越高。

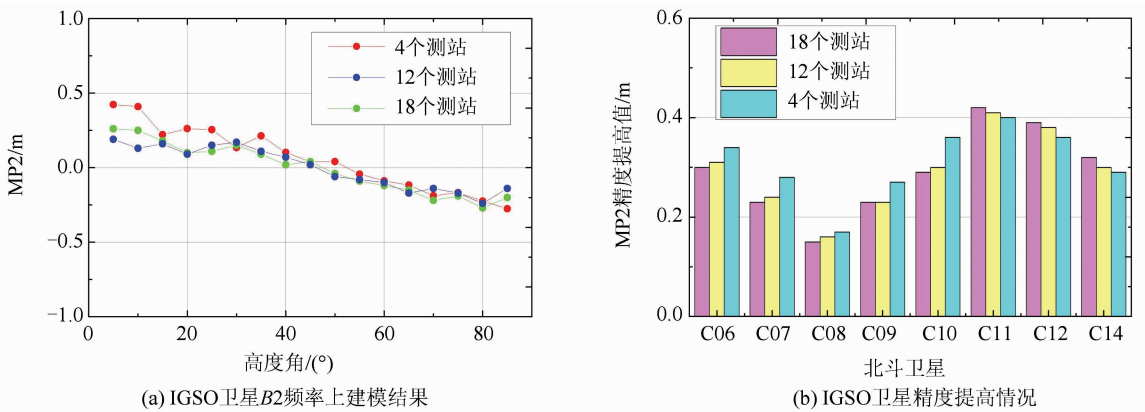


图 2 不同测站数目和分布建立的模型对 SIN1 站 MP2 序列的精度提高情况
Fig. 2 The Improved Value of MP2 Series 's Accuracy in SIN1 Station by Different Model Considering the Number and Distribution of Stations

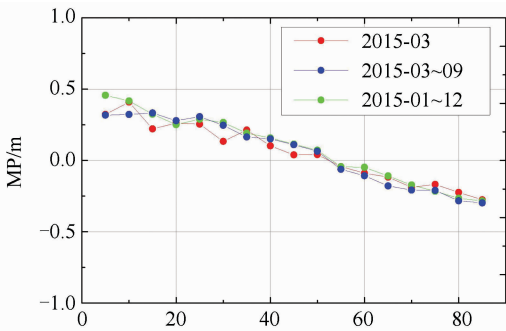
2.3 观测时间对模型估计的影响

考虑到测站数目以及测站分布对模型估计的影响,选择的测站基本可以观测到北斗 IGSO 和 MEO 的完整弧段,但是受到卫星轨道的影响,单天可以观测到的低高度角和高高度角下的观测值较少,为了能够更加准确的估计两个极端高度角时的伪距偏差,因此需要考虑观测时间对模型估计的影响。图 3 给出了不同时段观测数据 1 个月(2015 年 3 月)、6 个月(2015 年 1~6 月)、12 个月(2015 年 1~12 月)的 B1 频率上的建模结果对比,以及对伪距偏差的改正程度。图 3(a)是 4 个测站 IGSO 卫星的建模结果,可以看出仅用 1 个月的数据建模后的估计值波动较大,采用了 6 个月的数据和 12 个月的数据后,模型不再展现出强烈的波动性,模型改正值也基本接近。图 3(b)是不同模型对 JFNG 测站 MP 序列精度的提高情况,可以看出采用 6 个月的数据相对于仅采用 1 个月的数据建模对 MP 序列的精度提高了 1~2 cm,选择 12 个月的数据建模结果进一步提高了 MP 序列的精度,但是提高幅度已不明显,接近饱和状态。说明适当增加观测数据的时间可以削弱

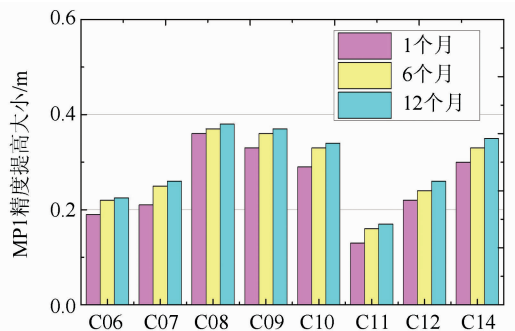
随机误差的影响,提高模型的估计精度。

2.4 建模结果及模型精度

在分析了测站数目与分布以及观测时间对模型建立的影响后,本文选择了 18 个测站 2015 年全年共 12 个月的数据对北斗 MEO 卫星的伪距偏差建模,其中 4 个测站(CUT0、GMSD、JFNG 和 ADE2)的数据对北斗 IGSO 卫星进行建模,建模的方法选择加权分段线性拟合,得到北斗 IGSO 卫星和 MEO 卫星在高度角 $5^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 范围内以 5° 为间隔的伪距改正值,具体结果如表 1。由于每一段的伪距偏差与高度角具有线性关系,可以内插得到任意高度角下的伪距改正值。图 4 给出了 CUT0、WHHN、KHAJ、DRAG 测站改正前后 IGSO 卫星和 MEO 卫星 B3 频率上 MP 序列的精度信息对比,其中 WHHN、KHAJ、DRAG 3 个测站没有参与建模,可以看出,伪距偏差的改正可以修正伪距的系统误差,提高了伪距的精度,将北斗伪距的精度基本控制在 0.3 m 左右,B1 频率和 B2 频率对应的 MP 序列结果与之相符,说明模型的改正的是合理的。



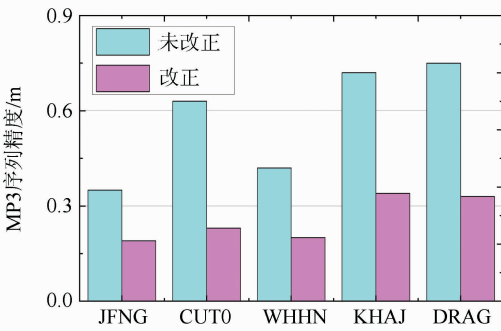
(a) 4个测站IGSO卫星的建模结果



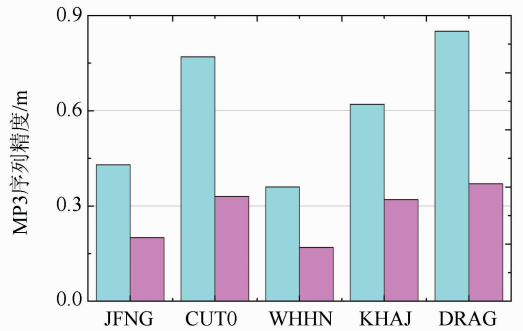
(b) 不同模型对JFNG测站MP序列精度的提高情况

图 3 根据不同时间的数据建立的估计模型及对应模型改正对 MP1 序列的精度提高情况

Fig. 3 The Improved Value of MP1 Series's Accuracy by Different Model Considering the Observation Time



(a) IGSO卫星



(b) MEO卫星

图 4 不同测站伪距偏差改正前后的 MP3 序列精度

Fig. 4 The Accuracy of MP3 Series of Different Stations After Correction

表 1 改进模型对应的节点伪距改正值

Tab. 1 Piecewise Linear Correction Values for BeiDou Code Measurements for Improved Model

高度 角/(°)	改正值/m					
	IGSO 卫星			MEO 卫星		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3
5	-0.238	-0.246	-0.406	-0.375	-0.400	-0.134
10	-0.540	-0.421	-0.211	-0.405	-0.238	-0.174
15	-0.430	-0.296	-0.169	-0.314	-0.213	-0.112
20	-0.274	-0.272	-0.157	-0.220	-0.228	-0.131
25	-0.255	-0.260	-0.138	-0.180	-0.131	-0.047
30	-0.265	-0.227	-0.253	-0.144	-0.113	-0.052
35	-0.168	-0.154	-0.089	-0.179	-0.114	-0.081
40	-0.137	-0.115	-0.118	-0.091	-0.065	-0.030
45	-0.064	-0.068	-0.073	0.005	0.006	0.044
50	-0.019	-0.041	-0.010	0.081	0.068	0.048
55	0.025	0.037	-0.008	0.222	0.187	0.083
60	0.130	0.079	0.049	0.322	0.224	0.133
65	0.175	0.116	0.084	0.463	0.326	0.201
70	0.238	0.167	0.127	0.631	0.440	0.287
75	0.234	0.202	0.152	0.716	0.485	0.288
80	0.272	0.250	0.207	0.918	0.583	0.367
85	0.302	0.259	0.155	0.955	0.628	0.393

3 北斗卫星伪距偏差改正对精密定位的影响

通过实验分析北斗卫星伪距偏差改正对精密单点定位的影响,验证改进模型的有效性并与 Wanninger 等建立的伪距偏差改正模型(传统模型)进行比较,采用 3 种策略处理北斗 PPP:(1)不进行伪距偏差改正,直接进行 PPP 处理;(2)利用传统模型改正伪距偏差后进行 PPP 处理;(3)利用改进模型改正伪距偏差后进行 PPP 处理。

表 2 3 种 PPP 处理策略的定位结果精度

Tab. 2 Positioning Errors for BeiDou PPP with Three Different Strategies

定位精度/m	无改正	传统模型	改进模型
E 方向	0.189	0.172	0.156
N 方向	0.157	0.143	0.127
U 方向	0.429	0.414	0.295

选择了 5 个可以观测到较多北斗卫星的测站(CUT0/GMSD/JFNG/SIN1/WARK)2014 年 10 月 15~20 日和 2015 年 3 月 1~5 日共 10 d 的数据进行 PPP 解算,表 2 统计了 3 种 PPP 处理策略后的平均定位精度,结果表明改进模型相对于传统模型的定位精度在 E、N、U 方向有 8.4%、10.1%、8.5% 的提高,相比于未加伪距改正进行

PPP 处理的定位精度,E、N、U 方向平均提高了 17.4%、19.1%、9.5%。由于 PPP 主要依赖高精度载波相位观测值的作用,伪距观测值的改正对提高 PPP 的精度能力有限,PPP 解算初始阶段模糊度还未收敛,伪距观测值在此时起决定性作用,改正伪距偏差可以有效得提高 PPP 的收敛速度,当初始阶段伪距偏差的影响剧烈时,甚至会引起结果难以收敛的状态,此时伪距偏差改正模型的改进效果尤为明显^[15-17]。图 5 分别给出了 GMSD 测站和 JFNG 测站在 DOY122/2015 和 DOY293/2014 的单天坐标偏差序列。两个测站的结果有明显的差异,主要是由于初始阶段这两个测站的北斗卫星受到伪距偏差的影响程度不同,根据 GMSD 测站和 JFNG 测站当天北斗卫星的高度角序列,发现在前 4 h(480 个历元),GMSD 测站的 IGSO 和 MEO 卫星多处于高高度角状态,JFNG 测站的 IGSO 和 MEO 卫星在初始阶段多处于中低高度角状态。伪距偏差值在低高度角和高高度角下最为明显,尤其是 MEO 卫星在高高度角情况下偏差值甚至达到 1 m,因此造成了 GMSD 测站在 PPP 解算时难以收敛的结果,经过传统模型的伪距偏差改正后基本缓解了系统误差,而改进模型在传统模型的基础上大大改善了收敛效果和定位精度。JFNG 测站受到伪距偏差的影响较弱,但仍可以看出改进模型相对与传统模型的定位精度已有所提高。

4 结 语

与其他卫星系统相比较,北斗卫星的伪距观测值中存在明显的系统偏差,需要通过模型改正的方法消除该系统偏差的影响,文章分析了测站数目和分布以及观测时间的长短对模型估计的影响,选择全球 18 个测站全年 12 个月的数据对北斗 MEO 卫星进行建模,4 个可以观测到全弧段 IGSO 卫星的测站对 IGSO 卫星建模,在高度角范围 5°~85°内,以 5°为间隔进行分段,通过加权分段线性拟合联合抗差估计的方法,得到 IGSO 卫星和 MEO 卫星的伪距偏差的高度角模型。进一步测试了改正模型对 PPP 定位结果的影响,结果表明与不加模型改正的结果对比,定位精度在 E、N、U 方向平均提高了 17.4%、19.1%、9.5%,相对传统模型 E、N、U 方向有 8.4%、10.1%、8.5% 的提高。

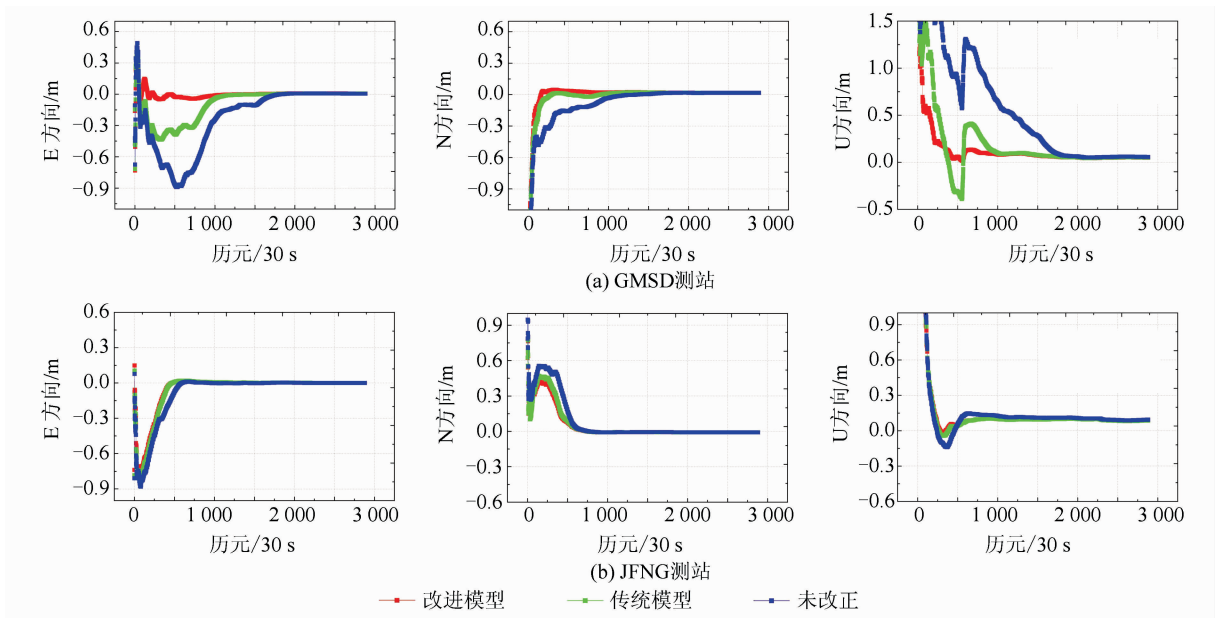


图5 GMSD测站和JFNG测站3种PPP解算的结果对比

Fig. 5 Positioning Result for BeiDou PPP with Three Different Strategies in GMSD and JFNG Station

参 考 文 献

- [1] Hauschild A, Montenbruck O, Sleewaegen J M, et al. Characterization of Compass M-1 Signals[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(1):117-126
- [2] Hauschild A, Montenbruck O, Thoelet S, et al. A Multi-technique Approach for Characterizing the SVN49 Signal Anomaly, Part 1: Receiver Tracking and IQ Constellation[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(1):19-28
- [3] Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P, et al. Three's the Challenge: A Close Look at GPS SVN62 Triple-frequency Signal Combinations Find Carrierphase Variations on the New L5[J]. *GPS World*, 2010(8):8-19
- [4] Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P, et al. A Compass for Asia: First Experience with the BeiDou-2 Regional Navigation System[C]. Poster at IGS Workshop in Olsztyn, Poland, 2012
- [5] Montenbruck O, Rizos C, Weber R, et al. Getting A Grip on Multi-GNSS: The International GNSS Service MGEX Campaign[J]. *GPS World*, 2013, 24(2013-07):44-49
- [6] Zhang X H, He Xiyang. BDS Triple-frequency Carrier-phase linear Combination Models and Their-characteristics[J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(06):896-905
- [7] Li X, Ge M, Zhang H, et al. The GFZ Real-time GNSS Precise Positioning Service System and Its Adaption for Compass[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(6):1 008-1 018
- [8] Li X, Ge M, Zhang H, et al. A Method for Improving Uncalibrated Phase Delay Estimation and Ambiguity-fixing in Real-time Precise Point Positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(5):405-416
- [9] Li X X, Ge M R, Dai X L, et al. Real-time Multi-GNSS Precise Positioning System: GPS, GLO-NASS, BeiDou, and Galileo[J]. *German Navigation*. 2015,89:607-635
- [10] Wanninger L, Beer S. BeiDou Satellite-induced Code Pseudorange Variations: Diagnosis and Therapy[J]. *GPS Solutions*, 2015,19(4):639-648
- [11] Bakker P F D, Tiberius C C J M, Marel H V D, 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
- [12] Zhang Xiaohong, Guo Fei, Li Pan, et al. Real-time Quality Control Procedure for GNSS Precise Point Positioning. [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(8):940-944 (张小红, 郭斐, 李盼, 等. GNSS精密单点定位中的实时质量控制[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(8):940-944)
- [13] Zhang Xiaohong, Ding Lele. Quality Analysis of the Second Generation Compass Observables and Stochastic Model Refining[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013,38(7):832-835 (张小红, 丁乐乐. 北斗二代观测值质量分析及随机模型精化[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013,38(7):832-835)
- [14] Yao Yibin. Research on the Algorithm and Realization of Post-processing for GPS Precise Positioning

and Orbit Determination [D]. Wuhan University, 2004 (姚宜斌. GPS 精密定位定轨后处理算法与实现[D]. 武汉大学, 2004)

- [15] Li M, Qu L, Zhao Q, et al. Precise Point Positioning with the BeiDou Navigation Satellite System [J]. *Sensors*, 2014, 14(1):927

[16] Wu X, Hu X, Wang G, et al. Evaluation of COM-PASS Ionospheric Model in GNSS Positioning [J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(6):959-968

- [17] Wu J T, Wu S C, Hajj G A, et al. Effects of Antenna Orientation on GPS Carrier Phase [J]. *Astrodynamics*, 1992; 1 647-1 660

The Estimation of BeiDou Satellite-induced Code Bias and Its Impact on the Precise Positioning

LI Xin¹ ZHANG Xiaohong¹ ZENG Qi¹ PAN Lin¹ ZHU Feng¹

¹ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: The code-phase divergences, which are absent for GPS, GLONASS, and Galileo, are commonly found in BDS geostationary (GEO), Inclined GeoSynchronous Orbit (IGSO) and Medium Earth Orbit (MEO) satellites. Several precise applications that use code observations are severely affected by these code biases; therefore, it is necessary to correct biases in BDS code observations. Since the BeiDou satellite-induced code bias is confirmed to be orbit type-, frequency-, and elevation-dependent, an improved code bias correction model for IGSO and MEO satellites based on a large amount of the data was developed. To obtain the best fitting results, we analyzed the effect of the number and distribution of stations and observation time on model estimation, and also considered the different influence of multipath at different elevations. A robust estimation method controlled the observation quality. A dataset from 18 stations during one year period in 2015 was employed to estimate the correction model for MEO satellites and four stations for IGSO satellite. To validate the improved correction model, the effect of the code bias on precise point positioning (PPP) before and after correction is analyzed and compared. Results show that systematic variations were eliminated more clearly after applying the improved correction model as compared to the traditional model. After correction, the positioning accuracy of PPP solution was improved and the convergence time decreased showing a better performance than results using the traditional model as proposed by Wanninger and Beer.

Key words: BeiDou satellite navigation system; code bias; model estimation; multipath combination; precise point positioning

First author: LI Xin, postgraduate, specializes in algorithm and application of GNSS precision positioning. E-mail: lixinsgg@whu.edu.cn

Corresponding author: ZHANG Xiaohong, PhD, professor. E-mail: xhzhang@sgg.whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41474025; the Key Projects of Natural Science Foundation in Hubei Province, No. 2015CFA039