

DOI:10.13203/j.whugis20160275



文章编号:1671-8860(2018)11-1661-06

北斗 IGSO/MEO 卫星伪距码偏差精化建模方法研究

邹璇¹ 李宗楠¹ 陈亮¹ 李敏¹ 唐卫明¹ 施闯¹

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

摘要:北斗倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit, IGSO)卫星和中轨(medium earth orbit, MEO)卫星的伪距码观测值存在系统性偏差,针对该偏差的现有建模方法(两步法)包含模糊度消除策略的误差,提出了一种基于历元间差分的一步建模方法,建立了同类型卫星整体的伪距码偏差三次多项式改正模型,并与现有的离散点改正模型进行对比。同时,针对每颗 IGSO/MEO 卫星的独特性,利用一步法逐卫星建模并评估其改正效果。结果表明,相对于现有的离散点改正模型,精化模型将 IGSO/MEO 卫星的 Melbourne-Wübbena(MW)值的稳定性平均提高了 23.88%,C08 卫星的提高幅度最大,约为 32.26%。

关键词:北斗;IGSO/MEO;伪距码偏差;历元间差分;逐卫星建模

中图分类号:P228

文献标志码:A

中国北斗导航定位系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)是一个以全球定位服务为目的并对亚太地区重点增强的系统^[1]。现有研究表明,与 GPS 相比,BDS 存在伪距码偏差,该偏差会导致 Melbourne-Wübbena(MW)组合观测值的稳定性下降,从而使 BDS 系统的模糊度难以有效固定^[2-6]。国内外多位学者对 BDS 卫星伪距码偏差进行了研究^[7-8]。Wanninger 等通过分析多个测站、不同类型的接收机观测数据,得到了 IGSO(inclined geosynchronous orbit)/MEO(medium earth orbit)卫星与高度角及频率相关的伪距码偏差改正模型^[9]。该模型基于两步法实现:①对所有观测弧段分别估计伪距码偏差改正值,由于各弧段包含不同的模糊度参数,其估计量难以处于同一基准;②通过增加基准获得最终的模型参数^[10]。实现过程中,为将不同弧段的估计值统一到同一基准,需增加所有弧段估计的各颗卫星伪距码偏差均值为零这一约束,而该约束难以保证所有弧段精确对齐,且当出现新发射或失效的卫星时,基准会发生变化,从而引入建模误差。此外,不同 BDS 卫星即使处于同一类卫星轨道,其伪距码偏差由于硬件设备及环境的差异仍存在不一致性,而现有方法未对此加以考虑。

针对此,本文提出一种基于历元间差分的一

步建模方法。该方法既可准确消去未知的模糊度参数,又能依据高度角、建模历元数分别确定不同历元、不同测站的观测值权重,从而提高建模结果的可靠性。考虑到每颗 IGSO/MEO 卫星所处状态的差异性,建立了每颗卫星的改正模型。利用广东省连续运行卫星定位服务系统(continuously operating reference station network of Guangdong province, GDCORS)10 个未参与建模测站的实测三频数据,通过与现有模型的改正效果进行对比,验证了本文方法的正确性和结果的有效性。

1 伪距码偏差特性及建模原理

码观测值的部分特性可由码观测值和相位观测值的线性组合反映。其中,多路径(multipath, MP)组合、MW 组合是用于分析卫星各频率伪距码偏差特性以及验证模型改正效果的两种常用的组合观测值。

1.1 BDS 卫星伪距码偏差特性

MP 观测值由单频伪距码观测值 P (单位为 m) 和双频相位观测值 φ (单位为周) 组成。记 i, j, k 为不同频率, $\lambda_i, \lambda_j, \lambda_k$ 为不同频率对应的波长, $\tilde{N}, b_i^s, b_r, m_{MP}, \delta_{MP}$ 分别为模糊度、卫星端伪距码偏

收稿日期:2017-02-20

项目资助:国家重点研发计划(2018YFB0505201, 2017YFB0503702);三峡工程鱼类资源保护重点实验室基金(SXSN/4008);水力学与山区河流开发保护国家重点实验室基金(SKHL1723);中央高校基本科研业务费专项资金(2042018gf0001)。

第一作者:邹璇,博士,主要从事非差网络 RTK 及高精度数据处理方面的研究。supermanzx1982@sina.com

差、接收机端伪距码偏差、MP 观测值的多路径和观测噪声,则 MP 组合观测值的具体表达式为:

$$MP_i = P_i + (m_{ijk} - 1)\lambda_j\varphi_j - m_{ijk}\lambda_k\varphi_k = \tilde{N} - b_i^s + b_r + m_{MP} + \delta_{MP} \quad (1)$$

式中, m_{ijk} 为根据不同频率波长计算得到的系数,

$$m_{ijk} = \frac{\lambda_i^2 + \lambda_j^2}{\lambda_j^2 - \lambda_k^2} \quad (2)$$

实际应用中,通常选取 $i = j$ 或 $i = k$ 。基于式(1),以国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS)全球观测网 GMSD 站跟踪的 C10 卫星为例,图 1 显示了 2014 年第 72 天(即年积日为 72)的 MP_1 观测值随卫星高度角变化的时序图,采样间隔为 30 s。可知,BDS 的 MP_1 值存在系统性偏差,且该偏差与高度角相关。

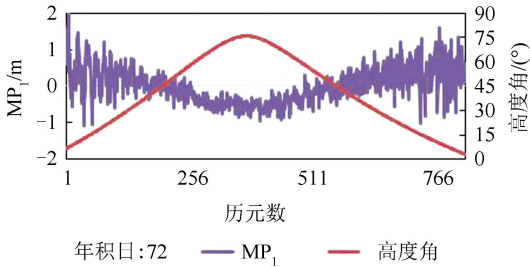


图 1 C10 卫星 MP_1 观测值随高度角变化的时序图
Fig.1 Variations of MP_1 Observations with Corresponding Elevation Angles on Time Domain of C10 Satellite

1.2 一步法建模原理

由式(1)可知,MP 观测值中包含模糊度参数、卫星端伪距码偏差、接收机端伪距码偏差、MP 组合观测值的多路径和观测噪声。Wanninger 等指出,不同接收机类型对卫星端伪距码偏差无影响^[9],且本文所建建模数据均源自 IGS 测站,观测环境良好,接收机端伪距码偏差及多路径在本文建模中予以忽略,因此只需通过历元间差分准确消除公共的模糊度参数,即可直接进行建模。记 $MP_i(t_0)$ 为 t_0 时刻、频率为 i ($i = 1, 2, 3$) 的 MP 组合观测值,该时刻对应的卫星高度角为 $x(t_0)$,多项式模型系数记为 a_m ($m = 1, 2, 3$),则此时的卫星端伪距码偏差与 t_0 时刻对应的卫星高度角之间的函数关系为:

$$b_i^s(t_0) = -MP_i(t_0) + \tilde{N} = a_1x(t_0) + a_2x(t_0)^2 + a_3x(t_0)^3 \quad (3)$$

同理,卫星端伪距码偏差与 t_p ($p = 1, 2 \dots n$) 时刻对应的卫星高度角之间的函数关系为:

$$b_i^s(t_p) = -MP_i(t_p) + \tilde{N} = a_1x(t_p) + a_2x(t_p)^2 + a_3x(t_p)^3 \quad (4)$$

选取 t_0 时刻为参考历元,若 t_p 时刻相位观测值未

发生周跳,则与参考历元作差可得:

$$b_i^s(t_p - t_0) = a_1[x(t_p) - x(t_0)] + a_2[x(t_p)^2 - x(t_0)^2] + a_3[x(t_p)^3 - x(t_0)^3] \quad (5)$$

作差后,消去公共的模糊度参数,忽略接收机端伪距码偏差及观测噪声,式(5)左端仅保留不同高度角对应的卫星端伪距码偏差之差 $b_i^s(t_p - t_0)$,可由式(1)计算得到;式(5)右端的高度角 $x(t_p)$ 、 $x(t_0)$ 均可由测站坐标和卫星位置计算得到,因此只需估计伪距码偏差改正模型系数 a_m ($m = 1, 2, 3$)。若某历元发生周跳,则变换该历元为参考历元,后续历元依上述方法处理。记 W 为权重, E 为高度角,则依高度角的定权策略为:

$$W = \begin{cases} 4 \sin^2 E, & E < 30^\circ \\ 1, & E \geq 30^\circ \end{cases} \quad (6)$$

对 IGSO/MEO 同类型卫星整体建模时,将式(5)对应的同类型卫星观测方程按照式(6)定权,并进行法方程叠加综合解算待估参数。同理,逐卫星建模时,则对各颗卫星进行法方程叠加求解待估参数。本文所述一步法有效规避了基准选择问题,通过历元间差分可精确消除模糊度参数。同时,在进行法方程叠加求解待估参数时,同一测站的不同历元观测值依据高度角定权,不同测站则根据参与解算的观测值个数体现其权重。

2 测试数据说明

为验证一步法建模方法的正确性,本文选取两组测试数据进行建模,并采用一组未参与建模数据进行验证分析。

2.1 建模数据

图 2 为本文采用的全部测站分布图。Data1 采用与 Wanninger 等^[9]进行建模时相同的观测数据,测站为图 2 中的红色标记+蓝色标记,时段为 2014 年第 070~079 天、160~169 天;Data2 的

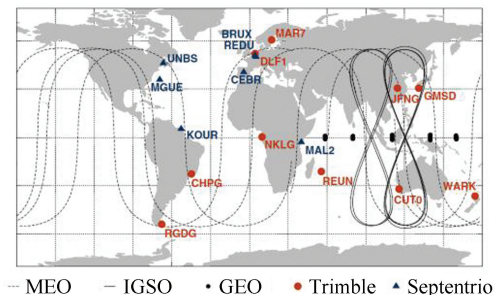


图 2 建模数据测站分布示意图
Fig.2 Distribution of Ground Tracking Stations Used to Model

观测时长为 Data1 的 3 倍, 测站为图 2 中的红色标记+蓝色标记, 时段为 2014 年第 070~099 天、160~169 天。

2.2 验证数据

为验证所建模型的有效性, 选取未参与建模的 GDCORS 内 10 个测站, 2015 年年积日为 315~324 的实测数据进行验证, 测站分布如图 3 所示。

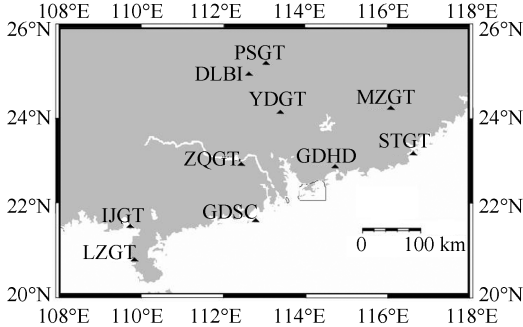


图 3 验证数据测站分布示意图

Fig.3 Distribution of Ground Tracking Stations Used to Validate

3 模型验证及分析

本文从 3 个方面验证 IGSO/MEO 卫星伪距码偏差建模结果的有效性。

3.1 一步法建模较两步法的性能改善

利用 Data1, 基于一一步法进行 IGSO/MEO 卫星整体建模的改正模型系数如表 1 所示, B1、B2、B3 为 BDS 的 3 种频率。

表 1 一步法同类型 IGSO/MEO 卫星整体建模结果/m

Tab.1 Correction Models for IGSO/MEO Satellite Group with One-Step Method/m

系数	IGSO			MEO		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3
a_1	1.19	0.53	0.98	0.53	0.07	-0.05
a_2	-0.95	0.23	-0.92	0.23	0.87	0.33
a_3	0.40	-0.16	0.40	0.15	-0.28	0.02

以 2 h 以上连续观测弧段的 MW 值的平均值作为真值, 计算各测站每颗卫星在 10° 高度角

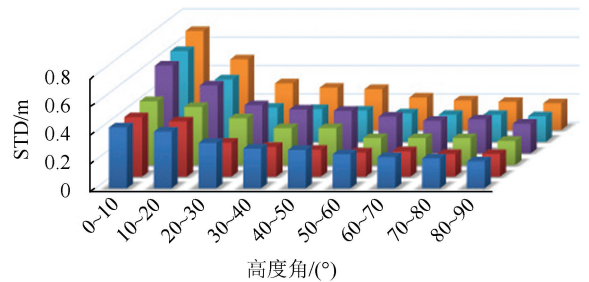
表 2 每颗 IGSO/MEO 卫星一步法模型系数/m

Tab.2 Elevation-Dependent Correction Models for Each IGSO/MEO Satellite with One-Step Method/m

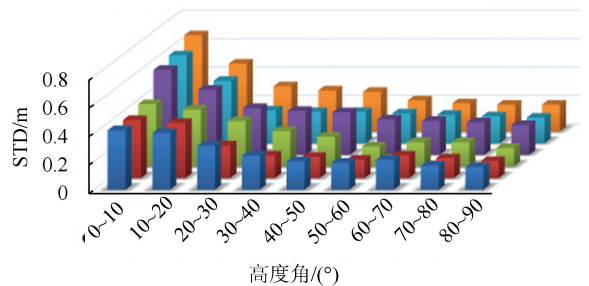
频率	系数	卫星号									
		C06	C07	C08	C09	C10	C11	C12	C13	C14	
B1	a_1	1.53	2.15	0.29	1.25	1.02	1.19	0.79	0.28	-0.10	
	a_2	-1.45	-2.44	-0.20	-1.06	-0.62	-1.01	0.22	0.62	0.97	
	a_3	0.61	0.99	0.15	0.51	0.27	0.73	0.05	-0.06	-0.03	
B2	a_1	0.15	0.53	-0.12	1.25	1.16	0.08	0.38	0.27	-0.29	
	a_2	0.84	-0.10	0.54	-0.09	-0.78	0.49	0.45	0.85	1.17	
	a_3	-0.41	-0.02	-0.12	-0.18	0.28	-0.03	-0.10	-0.36	-0.31	
B3	a_1	0.27	0.37	-0.23	0.91	1.45	0.15	-0.65	0.04	0.18	
	a_2	-0.30	0.27	1.34	-1.52	-1.29	0.15	1.33	0.35	-0.27	
	a_3	0.22	-0.18	-0.64	0.88	0.39	0.09	-0.48	-0.003	0.25	

区间内的 MW 值的标准差 (standard deviation, STD), 并统计 10 个测站的均值。记本文一步法建模改正效果为 A_i ($i=12, 23, 13$), 两步法建模改正效果为 B_i ($i=12, 23, 13$), i 表示由 B1 与 B2、B2 与 B3、B1 与 B3 构建的 MW 组合观测值。

图 4 为采用 Data1 的一步法和两步法建模改正效果对比图。由图 4 可知, 一步法模型的改正效果明显优于两步法。一步法相对于现有的两步法改正模型, 对 MW 值的稳定性平均提高约 19.24%, 在 50°~60° 高度角区间内最大提高约 35%。



(a) IGSO STD对比



(b) MEO STD对比



图 4 采用 Data1 的一步法和两步法建模改正效果对比

Fig.4 Comparison of Models Correction Effect of One-Step and Two-Step Methods Using Data1

3.2 单卫星建模较同类型卫星整体建模的性能改善

利用 Data1 对每颗 IGSO/MEO 卫星分别建立改正模型, 各颗卫星的改正模型系数如表 2 所示。

图5显示了各颗IGSO/MEO卫星及同类型卫星整体的伪距码偏差改正模型曲线,黑色趋势线为整体建模结果。由图5可知,不同IGSO卫星(C06、C07、C08、C09、C10)的伪距码偏差改正

模型存在差异,不同频率的差异量也不一致,单颗卫星与同类型卫星统一模型也存在明显差异;而不同MEO卫星(C11、C12、C13、C14)间的差异相对较小。

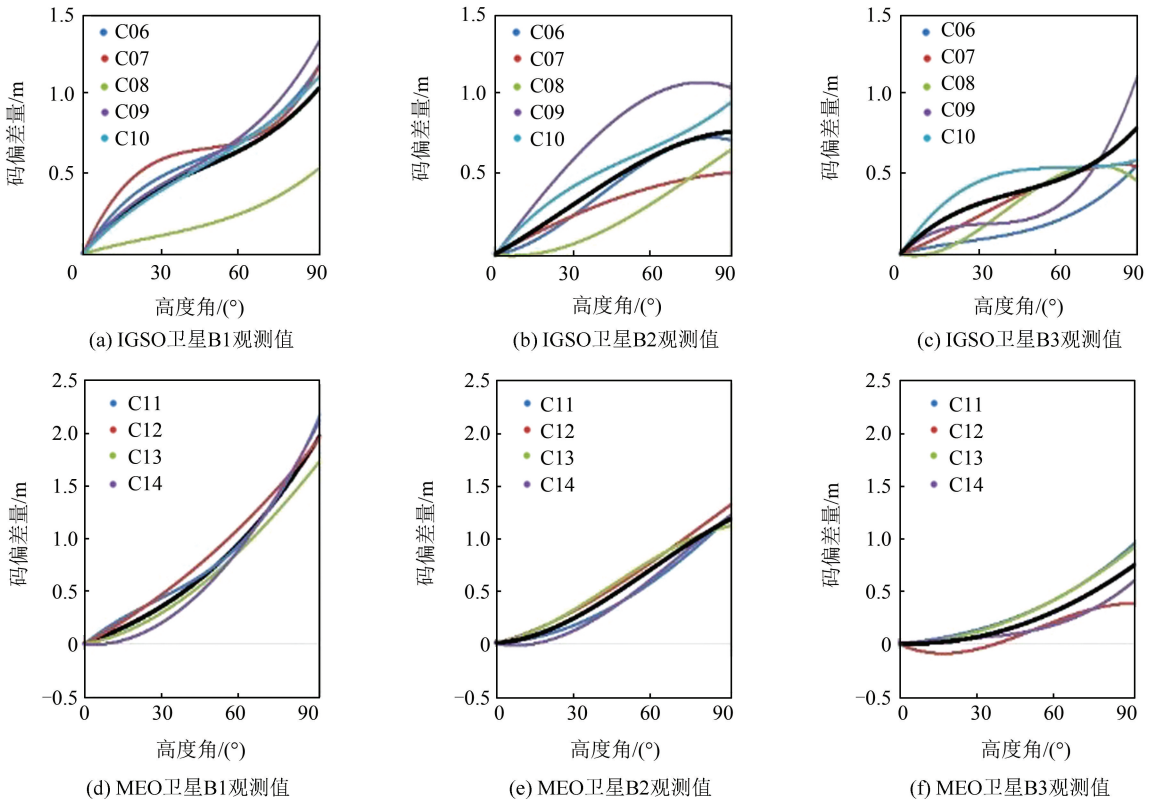


图5 Data1 单星建模与同类型卫星整体建模曲线

Fig.5 Models Curves of Each Satellite and the Group One Using Data1

图6为每10°高度角区间上各颗IGSO/MEO卫星模型及同类型卫星整体模型改正伪距观测值后 MW_{12}/MW_{23} 组合观测值的STD。图7为IG-

SO/MEO卫星单星建模相对于整体结果 MW_{12} 的提升比例。其中,C13卫星在测试时段内未能正常工作。

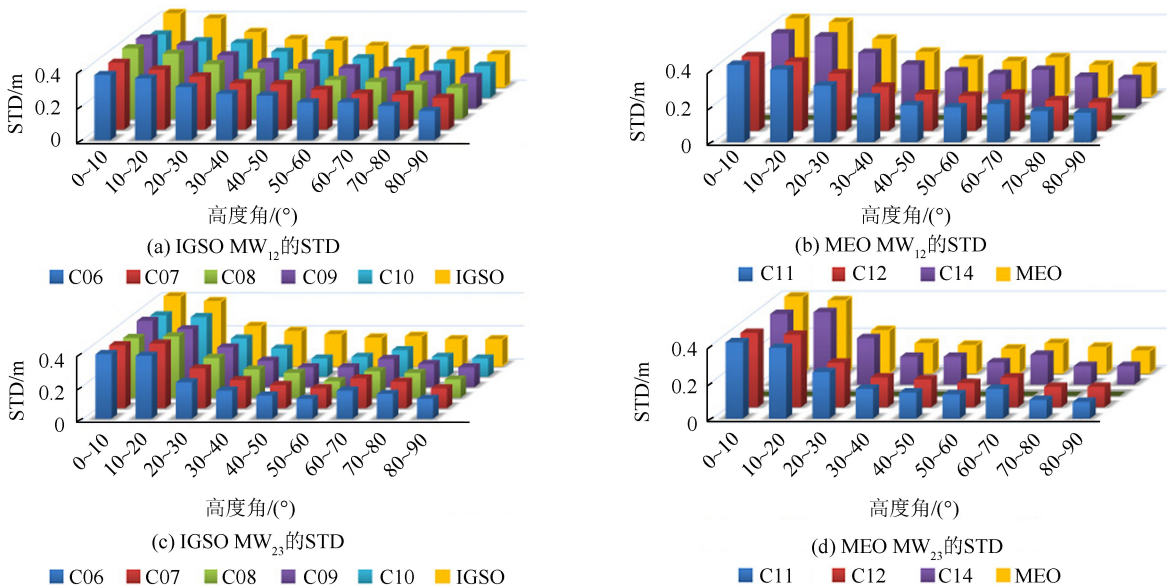


图6 采用Data1逐卫星建模与同类型卫星整体建模改正效果对比

Fig.6 Comparison of Models Correction Effect of Each IGSO/MEO Satellite and the Group One Using Data1

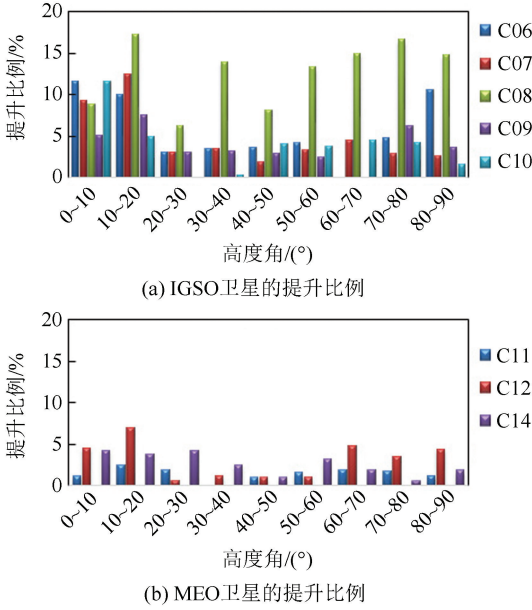


图 7 IGSO/MEO 单星建模相对同类型卫星整体建模 MW 值的 STD 提升比例
Fig.7 STD Improvement Proportions of MW Observations with Each Satellite Model Relative to IGSO/MEO Satellite Group with One-Step Method

由图 6 可知,采用单星建模后,各颗 IGSO 卫星 MW 值的稳定度相对于采用整体统一改正模型均得到了提高。当分别采用本文一步建模方法的单星改正模型参数以及现有离散模型的改正参数,由各颗卫星 MW 观测值的 STD 对比结果可知,利用表 2 提供的最终精化改正模型后,所有 IGSO/MEO 卫星的 MW 观测值的 STD 可平均提高约 23.88%,其中 C08 卫星尤为显著,提高比例可达 32.26%。

由图 7 可见,所有 IGSO 卫星在 0°~90°高度角区间平均提高了 11.12%。其中,C08 卫星尤为显著,平均提高了 14.64%;C10 卫星在 0°~10°高度角区间提高了约 13.21%;C06 卫星在 0°~20°及 80°~90°高度角区间提高了 12.64%;其余各颗卫星在不同高度角区间的提升比例均在 5%左右。MEO 卫星的改善效果有限,平均提高了 3.12%,最大提高了 7.16%。

3.3 参与建模数据量对建模结果的影响

为分析参与建模数据量对结果的影响,增加两倍观测时长(Data2),采用本文一步法对逐颗 IGSO/MEO 卫星建模,并与 § 3.2 单星改正模型对比。图 8 给出了增加建模数据前后 IGSO/MEO 单颗卫星改正后 MW₁₂值的 STD 统计值之差。

由图 8 可知,Data2 相对于 Data1 的建模结果而言,IGSO 部分卫星 MW 值的 STD 有了 0.01

m 的改善,最大仅减小了 0.03 m,平均改善率为 0.5%;MEO 各卫星 MW 值的 STD 则最大减小了 0.01 m。鉴于伪距码观测值的精度,厘米级的差异基本不会对利用 MW 值解算模糊度造成影响,因此认为建模数据由 Data1 增加到 Data2,模型改正效果有限。由此可见,利用数据 Data1 和 Data2 进行建模的结果均较为可靠,无需进一步增加参与建模的数据量。

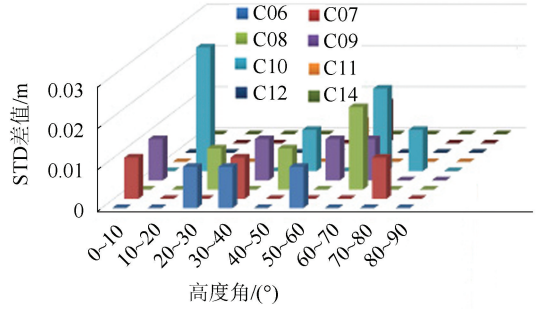


图 8 采用 Data1 和 Data2 一步法单星建模改正效果差异
Fig.8 Comparison of Models Correction Effect of Each IGSO/MEO Satellite Using Data1 and Data2 with One-Step Method

4 结 语

基于 IGSO 和 MEO 卫星伪距码偏差特性,针对现有分弧段拟合后多弧段平均的两步建模方法中存在的模糊度消除策略不精确问题,本文提出了一种基于历元间差分的一步建模法。模型验证结果表明,采用本文最终的精化改正模型,所有 IGSO/MEO 卫星的 MW 值的稳定性平均提高了 23.88%,C08 卫星的改善效果最为显著,提高比例可达 32.26%。此外,增加两倍观测时长的数据参与建模,IGSO 卫星的 STD 平均仅改善了 0.5%,而 MEO 卫星则基本不变,因此认为本文建模结果可靠,无需为提高伪距码偏差建模精度而进一步增加参与建模的数据量。

参 考 文 献

[1] China Satellite Navigation Office (CSNO). BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document: Open Service Signal (Version 2.0)[S]. Beijing, 2013(中国卫星导航系统管理办公室.北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件——公共服务信号(2.0版)[S].北京,2013)

[2] Yang Y X, Li J L, Wang A B, et al. Preliminary Assessment of the Navigation and Positioning Performance of BeiDou Regional Navigation Satellite System[J].*Science China Earth Science*, 2014, 57

- (1):144-152
- [3] Liu Yanyan, Ye Shirong, Jiang Peng, et al. Instantaneous Ambiguity Resolution of Short Baselines Using BeiDou Triple Frequency Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(2):209-213(刘炎炎,叶世榕,江鹏,等. 基于北斗三频的短基线单历元模糊度固定[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(2):209-213)
- [4] He Jun, Liu Wanke, Zhang Xiaohong. Single Epoch Ambiguity Resolution of BDS Triple Frequency Measured Data Under Short Baseline[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(3):361-365(何俊,刘万科,张小红. 北斗短基线三频实测数据单历元模糊度固定[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(3):361-365)
- [5] Yao Yibin, Peng Wenfei, Kong Jian, et al. Analysis of Ambiguity Fixing in Precise Point Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(11):1 281-1 285(姚宜斌,彭文飞,孔建,等. 精密单点定位模糊度固定效果分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(11): 1 281-1 285)
- [6] 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):832-836(张小红,丁乐乐. BDS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):832-836)
- [7] Hauschild A, Montenbruck O, Sleewaegen J M, et al. Characterization of Compass M-1 Signals[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(1):117-126
- [8] 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
- [9] Wanninger L, Beer S. BeiDou Satellite-Induced Code Pseudorange Variations: Diagnosis and Therapy[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(4):639-648
- [10] Lou Y, Gong X, Gu S, et al. Assessment of Code Bias Variations of BDS Triple-Frequency Signals and Their Impacts on Ambiguity Resolution for Long Baselines[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(1):177-186

Modeling BeiDou IGSO and MEO Satellites Code Pseudorange Variations

ZOU Xuan¹ LI Zongnan¹ CHEN Liang¹ LI Min¹ TANG Weiming¹ SHI Chuang¹

¹ GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Variations of code pseudorange observations of BeiDou satellites in inclined geosynchronous orbit (IGSO) and medium earth orbit (MEO), lead to systematic deviation in code-phase combination observations. The one-step method based on single-difference between epochs, is proposed to modify the above errors, and the corresponding correction model has also been given. It is shown that, comparing with the existing modeling proposed by Wanninger et al, the final optimized models in this paper using one-step method can improve the stability of Melbourne-Wübbena (MW) observables of all IGSO/MEO satellites with the proportion of 23.88% on average. It is worthy to mention that C08 satellite performs the most remarkable improvement with the proportion up to 32.26%.

Key words: BDS; IGSO/MEO; code pseudorange variations; epoch difference; modeling for each satellite

First author: ZOU Xuan, PhD, specializes in undifferenced network RTK and high accuracy data processing. E-mail: supermanzx1982@sina.com

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China, Nos. 2018YFB0505201, 2017YFB0503702; the Open Fund of Hubei Key Laboratory of Three Gorges Project for Conservation of Fishes, No. SXSXN/4008; the Open Fund of State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, No. SKHL1723; the Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 2042018gf0001.