

北斗伪距码偏差对基线解算的影响分析

唐卫明^{1,2} 刘 前¹ 高柯夫^{1,3} 邓辰龙¹ 崔健慧¹ 沈明星¹

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079
2 导航与位置服务国家测绘地理信息局重点实验室,湖北 武汉,430079
3 地球空间信息技术协同创新中心,湖北 武汉,430079

摘 要:北斗二代系统伪距码中存在与高度角相关的系统性偏差,该偏差会影响高精度的数据处理。基于 Melbourne-Wübbena(MW)组合,分别利用现有的伪距码偏差改正模型和实测基线的双差宽巷模糊度残差,分析了伪距码偏差对基线解算的影响。理论分析表明,随着基线长度的增加,伪距码偏差对 MW 组合确定双差宽巷模糊度的影响越来越大,对 300 km 基线的影响可达 0.36 周。实际算例表明,无论基线长短,地球同步轨道(geostationary earth orbit, GEO)卫星的双差宽巷模糊度残差中始终存在偏差;而对于倾斜地球同步轨道(inclined geostationary orbit, IGSO)和中轨(medium earth orbit, MEO)卫星而言,当基线小于 300 km 时,双差基本可以消除伪距码偏差,其双差宽巷模糊度固定率基本和 GPS 一致,但当基线超过 300 km 时,部分卫星的双差宽巷模糊度残差就会存在明显偏差,其双差宽巷模糊度固定率也较低,此时需考虑伪距码偏差的影响。
关键词:伪距码偏差;MW 组合;双差宽巷模糊度;基线解算
中图分类号:P228 **文献标志码:**A

中国自主研发的北斗卫星导航系统目前已经实现了亚太地区的高精度定位、导航和授时服务,开始逐步由区域服务系统向全球服务系统发展^[1]。一些学者在研究北斗伪距过程中,发现伪距码中存在与高度角相关的系统性偏差,并指出该偏差可能是由卫星内部引起的系统性偏差^[2-4]。后来,不少学者对北斗伪距码偏差进行了详细的分析研究,并建立了相应的伪距码偏差改正模型,同时也分析了该偏差对定位的影响^[5-12]。但是,目前研究该偏差对基线解算影响的文献还比较少,其中文献[10]分析了该偏差对长基线双差宽巷模糊度固定成功率的影响,文献[13]论述了非差、单差和双差观测值中伪距码偏差的特性,并分析了该偏差对双差宽巷模糊度解算的影响。然而,这些文献均未系统分析伪距码偏差对不同长度基线解算的影响。本文基于 MW(Melbourne-Wübbena)组合^[14-15],利用伪距码偏差改正模型,从理论上计算了不同长度的基线在双差后残留的最大伪距码偏差,分析了该偏差对 MW 组合确定

双差宽巷模糊度的影响,并结合实测基线的双差宽巷模糊度残差及其固定率,分析讨论了伪距码偏差对基线解算的影响大小。

1 高精度基线解算理论基础

高精度基线解算的关键在于准确可靠地固定载波模糊度,而模糊度的确定又依赖伪距观测值,因此伪距观测值对于高精度基线解算至关重要。由于北斗伪距观测值存在系统性偏差,这将会对基线解算产生影响。基线解算一般采用双差方程求解,就此展开分析。

伪距非差观测方程一般可表示为:

$$P_i^p = \rho_i^p + c \cdot (\text{dtr}_i - \text{dts}^p) + I_i^p + T_i^p + O_i^p + \text{br}_i + \text{bs}^p + \epsilon \tag{1}$$

式中, P 表示伪距观测值; ρ 表示卫星到测站的几何距离; c 表示光速; dtr 表示接收机钟差; dts 表示卫星钟差; I 表示电离层延迟; T 表示对流层延迟; O 表示卫星轨道误差; br 表示接收机端硬件

延迟;bs 表示卫星端硬件延迟;ε 表示伪距测量噪声和多路径等误差;下标 i 表示测站编号;上标 p 表示卫星编号。

在基准站和流动站间求差,可得站间单差观测方程:

$$\begin{aligned} \Delta P_{ij}^p &= \Delta \rho_{ij}^p + c \cdot \Delta \text{dtr}_{ij} + \Delta I_{ij}^p + \Delta T_{ij}^p + \\ &\Delta O_{ij}^p + \Delta \text{br}_{ij} + \Delta \text{bs}_{ij}^p + \Delta \epsilon \end{aligned} \tag{2}$$

式中,Δ 表示单差算子; i,j 表示测站编号;其余符号与式(1)相同。由于北斗卫星端的硬件延迟中包含了与高度角相关的伪距码偏差,因此当基准站和流动站的高度角存在较大差异时,站间差分不能完全消除卫星端硬件延迟中与高度角相关的偏差量。

在卫星间再次求差,可得伪距双差观测方程:

$$\begin{aligned} \Delta \nabla P_{ij}^{pq} &= \Delta \nabla \rho_{ij}^{pq} + \Delta \nabla I_{ij}^{pq} + \Delta \nabla T_{ij}^{pq} + \\ &\Delta \nabla O_{ij}^{pq} + \Delta \nabla \text{bs}_{ij}^{pq} + \Delta \nabla \epsilon \end{aligned} \tag{3}$$

式中,Δ∇表示双差算子; p,q 表示卫星编号;其余符号与式(2)相同。星间差分消除了接收机端的硬件延迟,但是不同卫星的伪距码偏差对同一个测站也不相同,因此星间差分也不能够消除卫星端的伪距码偏差,并且还有可能加重伪距码偏差的影响^[13]。

MW 组合能够消除卫星钟差、电离层延迟、对流层延迟、接收机钟差以及站星几何距离等,其组合观测值仅受测量噪声和多路径的影响^[16]。在双频基线解算过程中,也通常先利用伪距和载波的 MW 组合确定双差宽巷模糊度,再在宽巷模糊度的基础上解算原始载波模糊度^[17-19]。因此,正确固定双差宽巷模糊度是高精度基线解算的前提。但是,由于北斗伪距码偏差的存在,采用 MW 组合解算可能导致双差宽巷模糊度固定错误或无法固定^[8]。因此,通过分析伪距码偏差对双差宽巷模糊度固定的影响,可以间接分析该偏差对基线解算的影响。本文以北斗 B1 和 B2 双频数据为例,详细分析讨论伪距码偏差对基线解算的影响。MW 组合表示为:

$$\begin{aligned} \text{MW} &= \Delta \nabla \varphi_1 - \Delta \nabla \varphi_2 - \\ &\frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} \left(\frac{\Delta \nabla P_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta \nabla P_2}{\lambda_2} \right) \end{aligned} \tag{4}$$

式中,MW 表示双差宽巷模糊度; λ_1,λ_2 分别为 B1、B2 的波长; f_1,f_2 分别为 B1、B2 的频率; $\Delta \nabla P_1,\Delta \nabla P_2$ 为双差伪距观测值; $\Delta \nabla \varphi_1,\Delta \nabla \varphi_2$ 为双差相位观测值。

2 基于伪距码偏差改正模型的理论分析

为进一步定量分析双差后残留的伪距码偏差对基线解算的影响,本文分别利用文献[10]和文献[11]中的多项式伪距码偏差改正模型(分别称为模型 1 和模型 2)进行了定量分析。多项式改正模型的形式一般为^[10,11]:

$$C = a_0 E + a_1 E^2 + a_2 E^3 \tag{5}$$

式中, C 表示伪距码偏差改正值; a_0,a_1,a_2 表示由建模获得的经验模型系数; E 表示卫星高度角。但多项式模型中一般没有常数项,因为常数项可以被卫星钟差吸收,故在改正模型中通常不加考虑^[20]。

由于多项式改正模型是与高度角相关的函数,为分析双差后残留的伪距码偏差大小,本文首先分析了基线长度与高度角变化的关系,如图 1 所示。图 1 中, H 表示北斗卫星的轨道高度, R 表示地球半径, B 表示基准站, A 和 A' 表示流动站, L 表示基线长度, S 表示卫星位置。 $\angle 1$ 表示基线对应的地心转角, $\angle 2$ 表示测站 A 的卫星高度角, $\angle 3$ 表示过 B 的切线与过 A 的切线的交角, $\angle 4$ 表示基线对应卫星的旋转角, $\angle 5$ 表示过 B 点作 AS 的平行线与 BS 的夹角, $\angle 6$ 表示过 B 点作 A 点切线的平行线与过 B 点的 AS 平行线的夹角, $\angle 7$ 表示在 B 点作 A 点切线与 B 的切线的夹角, $\angle 8$ 表示测站 A' 的卫星高度角。

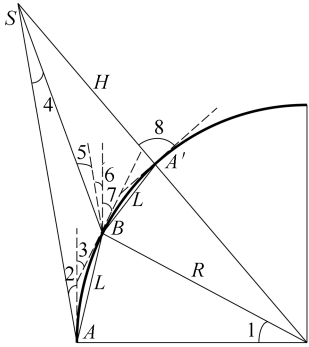


图 1 基线长度与高度角关系

Fig.1 Relationship Between Baseline Length and Elevation Angle

由图 1 中的几何关系可以看出, $\angle 1 = \angle 3 = \angle 7$, $\angle 2 = \angle 6$, $\angle 4 = \angle 5$ 。假设基准站的卫星高度角已知,设其为 α_0 ,则有:

$$\alpha_0 = \angle 5 + \angle 6 + \angle 7 = \angle 4 + \angle 2 + \angle 1 \tag{6}$$

则可得流动站高度角的极小值为：

$$E_{\min} = \angle 2 = \alpha_0 - \angle 4 - \angle 1 \tag{7}$$

由于卫星轨道高度远大于基线长度,可认为卫星 S 到基准站和流动站的距离相等,则有：

$$\angle 4 \approx L/H \tag{8}$$

又由图 1 中的几何关系有：

$$\angle 1 = 2\arcsin \frac{L}{2R} \tag{9}$$

故流动站高度角的极小值可表示为：

$$E_{\min} = \angle 2 \approx \alpha_0 - \frac{L}{H} - 2\arcsin \frac{L}{2R} \tag{10}$$

同理,可得流动站高度角的极大值为：

$$E_{\max} = \angle 8 \approx \alpha_0 + \frac{L}{H} + 2\arcsin \frac{L}{2R} \tag{11}$$

当给定基准站卫星高度角和基线长度后,由式(10)和式(11)即可求出高度角差异的变化范围

$[E_{\min}, E_{\max}]$ 。考虑到高度角取值范围为 $0 \sim \frac{\pi}{2}$,

故当 $E_{\min} < 0$ 时,取 $E_{\min} = 0$,当 $E_{\max} > \frac{\pi}{2}$ 时,取

$E_{\max} = \pi - E_{\max}$ 。再结合经验模型系数,即可计算

出每颗卫星在某一长度的基线条件下,站间单差后残留的最大伪距码偏差值。由于伪距码偏差改正模型与高度角以及高度角与基线长度的关系都是非线性的,为计算站间单差后残留的最大伪距码偏差值,本文直接采用搜索法计算极值。

首先,给定基线长度,并设卫星截止高度角为 20° ,让基准站卫星高度角在 $20^\circ \sim 90^\circ$ 范围内按照 0.1° 的步长进行搜索,每给定一个基准站卫星高度角后,由式(10)和式(11)可确定流动站卫星高度角的范围,并限制流动站高度角范围为 $20^\circ \sim 90^\circ$,然后在流动站高度角范围内按照 0.1° 的步长搜索出每颗卫星站间单差残留的最大伪距码偏差。由模型 1 和模型 2 在基线长度分别为 100 km、200 km、300 km、500 km 时的计算结果如图 2 和图 3 所示。其中,模型 1 针对北斗 GEO(geostationary earth orbit)、IGSO (inclined geostationary orbit)、MEO (medium earth orbit) 这 3 类卫星建立改正模型,而模型 2 对 IGSO 和 MEO 的每颗卫星建立改正模型。

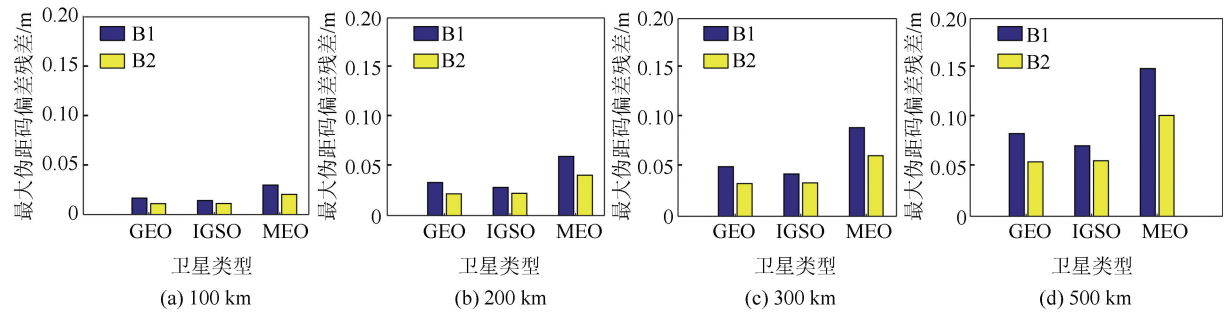


图 2 模型 1 计算的站间单差后残留的最大码偏差

Fig.2 Maximum Code Biases of Single Differencing Between Stations Calculated by Model One

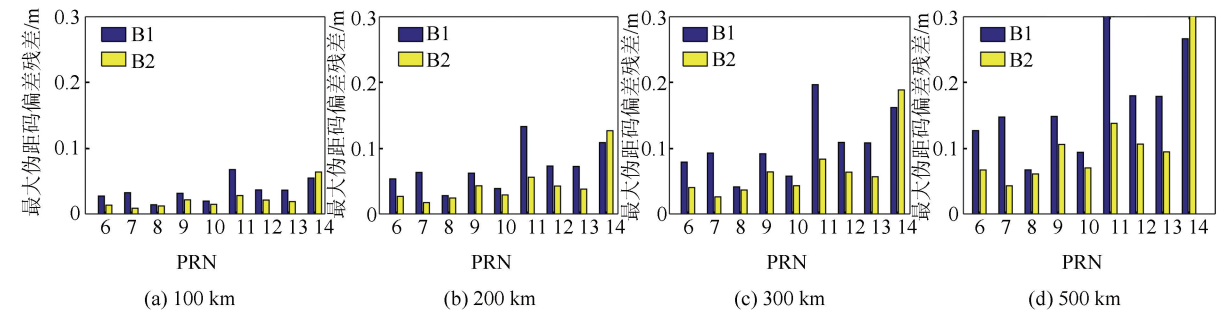


图 3 模型 2 计算的站间单差后残留的最大码偏差

Fig.3 Maximum Code Biases of Single Differencing Between Stations Calculated by Model Two

统计表明,除了 PRN 7 卫星的 B2 频率和 PRN8 卫星的 B1 频率的计算值外,由模型 1 计算的最大站间单差残留的码偏差均小于模型 2 计算值。这主要是由于建模时使用的数据和方法不

同,导致建立的多项式伪距码偏差改正模型的系数不同,故最后由不同模型计算的最大站间单差残留码偏差存在差异。

考虑到不同卫星站间差分后的最大伪距码偏

差残差各不相同,在最不理想的情况下,双差后残留的最大伪距码偏差是不同卫星同一频率上的最大单差残留值之和。同时,由于双差 MW 组合中使用了双频伪距观测值,故 MW 组合中残留的最大偏差值应考虑两个频率上残留的最大伪距码偏差。结合图 2 和图 3 的结果,由式(4)计算可得理论上双差后残留的最大伪距码偏差对 MW 组合确定双差宽巷模糊度的影响,其结果见表 1。由计算结果可知,随着基线长度的增加,伪距码偏差对 MW 组合确定双差宽巷模糊度的影响越来越大,对于 300 km 基线的影响可达 0.36 周。同时必须指出,这里的计算结果是从理论上推导出的最大影响,在实际基线解算中伪距码偏差的影响一般会小于该极值。

表 1 伪距码偏差对双差宽巷模糊度的最大影响

Tab.1 Maximum Influence of Code Biases on the Double Differenced Wide-Lane Ambiguity Resolution

基线长度/km	模型 1 计算值/周	模型 2 计算值/周
100	0.06	0.12
200	0.12	0.24
300	0.17	0.36
500	0.29	0.60

3 实例分析

为进一步验证双差后残留的伪距码偏差对基

表 2 双差宽巷模糊度固定率/%

Tab.2 Fixing Rate of Double Differenced Wide-lane Ambiguity/%

基线名称	数据来源	基线长度/km	G01-G08	C01-C02				C06-C07				C11-C14	
			G08	C02	C03	C04	C05	C07	C08	C09	C10	C12	C14
ZQGT-GMG	广东 CORS	45	97	69	61	63	28	84	89	89	90	92	98
HZHY-HYGT	广东 CORS108	96	71	71	38	43	85	92	94	94	94	98	
HZHY-FSGH	广东 CORS	194	96	79	60	79	73	85	90	91	92	84	100
HYGT-FSGH	广东 CORS	244	100	48	63	52	35	86	92	88	93	94	98
HYGT-GDLD	广东 CORS	337	100	49	56	23	45	82	76	90	91	88	98
XNGT-FSGH	广东 CORS	363	97	64	78	80	44	93	90	80	89	74	99
XNGT-LJGT	广东 CORS	679	93	23	86	59	40	91	86	78	79	87	75
HKQT-JFNG	香港 CORS+MGEX	911	100	63	87	66	20	63	49	95	74	46	64

为了更加直观地显示伪距码偏差对双差宽巷模糊度的影响,图 4 画出了小于 300 km 基线中 G01-G08、C01-C02、C06-C10 和 C11-C14 的双差宽巷模糊度残差序列图。图 5 画出了大于 300 km 基线的 G01-G08、C01-C02 以及双差宽巷模糊度固定率最低的 IGSO 和 MEO 的双差宽巷模糊度残差序列图。

从表 2 可以看出,对于 GPS 卫星来说,其双差宽巷模糊度固定率不受基线长度的影响,始终保持在 90%以上。而对于北斗卫星,结合图 4 和

线解算的影响,实验选取了 8 条不同长度的实测基线,这些数据分别来源于广东 CORS(continuously operating reference system)网、香港 CORS 网和 MGEX (Multi-GNSS Experiment Campaign)网,观测日期为 2015 年年积日第 326 天,采样间隔为 30 s,观测时长为 24 h,详细情况见表 2。

为分析北斗不同类型卫星在不同基线长度情况下双差宽巷模糊度的固定情况,实验分别选取 C01、C06 和 C11 卫星作为参考卫星,并由式(4)计算 C01 与其他 GEO 卫星、C06 与其他 IGSO 卫星以及 C11 与其他 MEO 卫星的双差宽巷模糊度。同时,每条基线也计算了一组 GPS 卫星(G01-G08)的双差宽巷模糊度作为参照。在得到双差宽巷模糊度后,用连续多个无周跳历元的平均值取整后作为双差宽巷模糊度真实值,并将双差宽巷模糊度减去该真值得到残差值^[21]。考虑到卫星在低高度角时测站多路径影响较大,在数据处理时设卫星截止高度角为 20°。由于伪距噪声较大,利用 MW 组合确定双差宽巷模糊度时,一般需通过多历元平滑取整来固定,当平滑后的模糊度残差小于给定阈值时,认为可以固定双差宽巷模糊度^[22]。本文将双差宽巷模糊度残差序列进行了 40 个历元的平滑,并给定阈值为 0.2,统计了此时的双差宽巷模糊度固定率,结果见表 2。

图 5 发现,GEO 卫星的双差宽巷模糊度始终较低,即使在 45 km 的基线情况下,通过多历元平滑后,GEO 卫星的双差宽巷模糊度残差序列仍存在偏差。这表明,无论基线长短,双差都不能较好地消除 GEO 卫星中的偏差,故偏差中可能存在不是与高度角相关的偏差量。目前,对于 GEO 卫星的伪距码偏差问题还存在一些争议,其对基线解算的影响也还需更进一步研究。但对于 IGSO 和 MEO 卫星而言,当基线长度小于 300 km 时,虽然北斗双差宽巷模糊度固定率略低于 GPS,

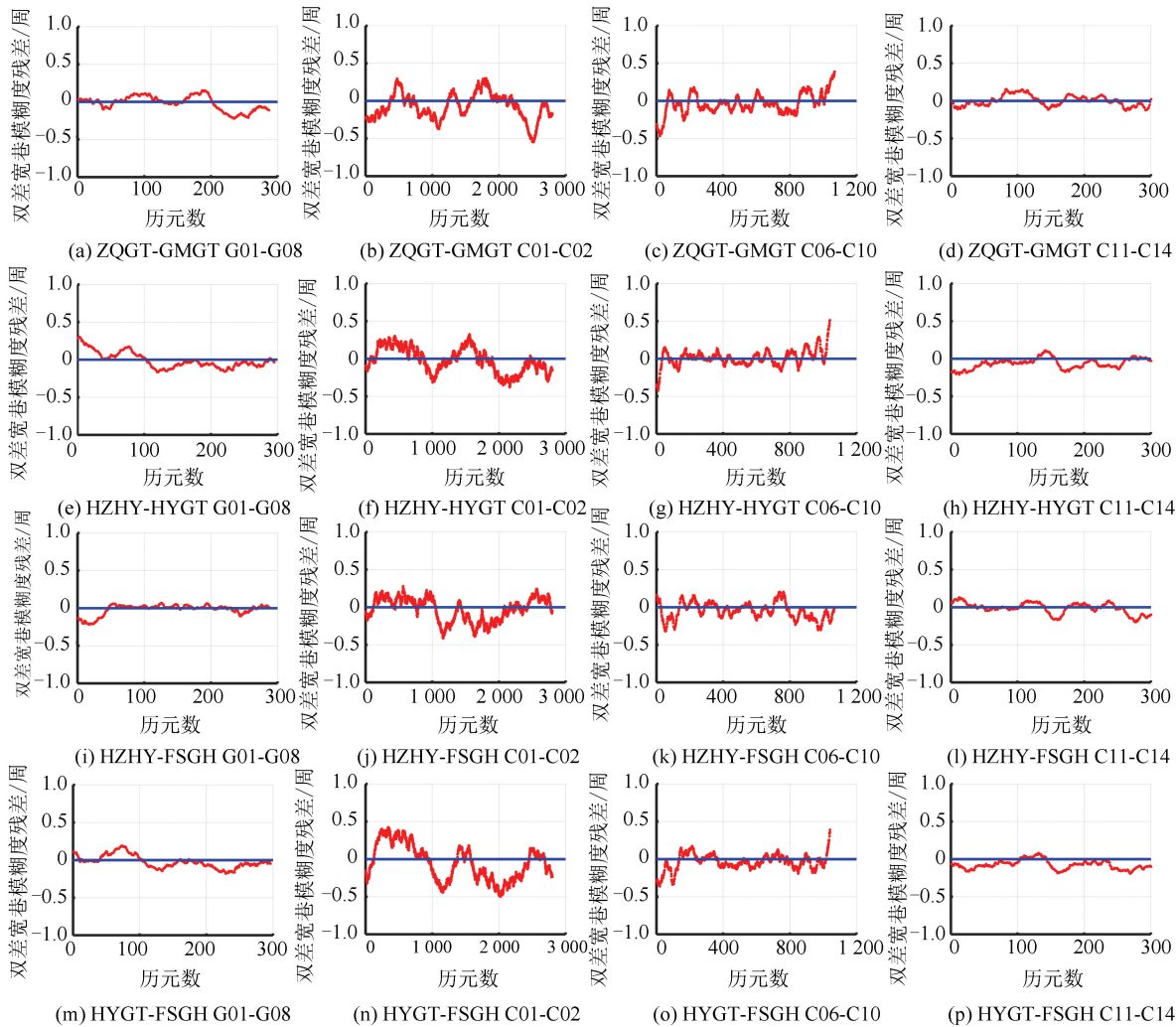


图 4 小于 300 km 基线的双差宽巷模糊度残差

Fig.4 Residuals of Double Differenced Wide-Lane Ambiguity with the Baseline Within 300 km

但基本和 GPS 保持一致,最低不会低于 84%。结合图 4 的残差序列图可以看出,对于 300 km 以内的基线,IGSO 和 MEO 卫星的双差宽巷模糊度残差序列都比较平稳,不存在明显的系统性偏差。这表明,对于 300 km 以内的基线,双差可以较好地消除 IGSO 和 MEO 卫星的伪距码偏差。

然而,当基线长度大于 300 km 时,从表 2 可以看出,部分 IGSO 和 MEO 卫星的双差宽巷模糊度固定率低于 80%,且基线越长,这样的卫星数越多。结合图 5 的残差序列图发现,此时这些卫星的双差宽巷模糊度残差序列也出现了不同程度的系统性偏差,且基线越长,系统性偏差越明显。这表明,当基线长度大于 300 km 时,双差并不能完全消除每颗 IGSO 和 MEO 卫星的伪距码偏差,残留的伪距码偏差会影响 MW 组合确定双差宽巷模糊度,且基线越长,影响越大。

实验同时比较了理论计算的伪距码偏差对 MW 组合确定双差宽巷模糊度的最大影响与实

测基线的双差宽巷模糊度的平均固定率,如图 6 所示。图 6 中,黑色和蓝色实线分别表示模型 1 和模型 2 计算的理论结果,红色虚线是表 2 中 IGSO 和 MEO 的平均固定率。由于 GEO 卫星的伪距码偏差无论基线长短都不能消除,本文不作讨论。从图 6 可以看到,随着基线长度的增加,理论上残留的最大伪距码偏差对 MW 组合确定双差宽巷模糊度的影响越来越大,同时,实测基线的双差宽巷模糊度固定率的平均值也越来越低。但对 300 km 以内的基线,北斗 IGSO 和 MEO 卫星的双差宽巷模糊度平均固定率基本都保持在 90%左右。这就验证了理论分析与实测结果的一致性。

4 结 语

本文利用伪距码偏差改正模型计算了双差后残留的最大伪距码偏差,分析了其对 MW 组合确

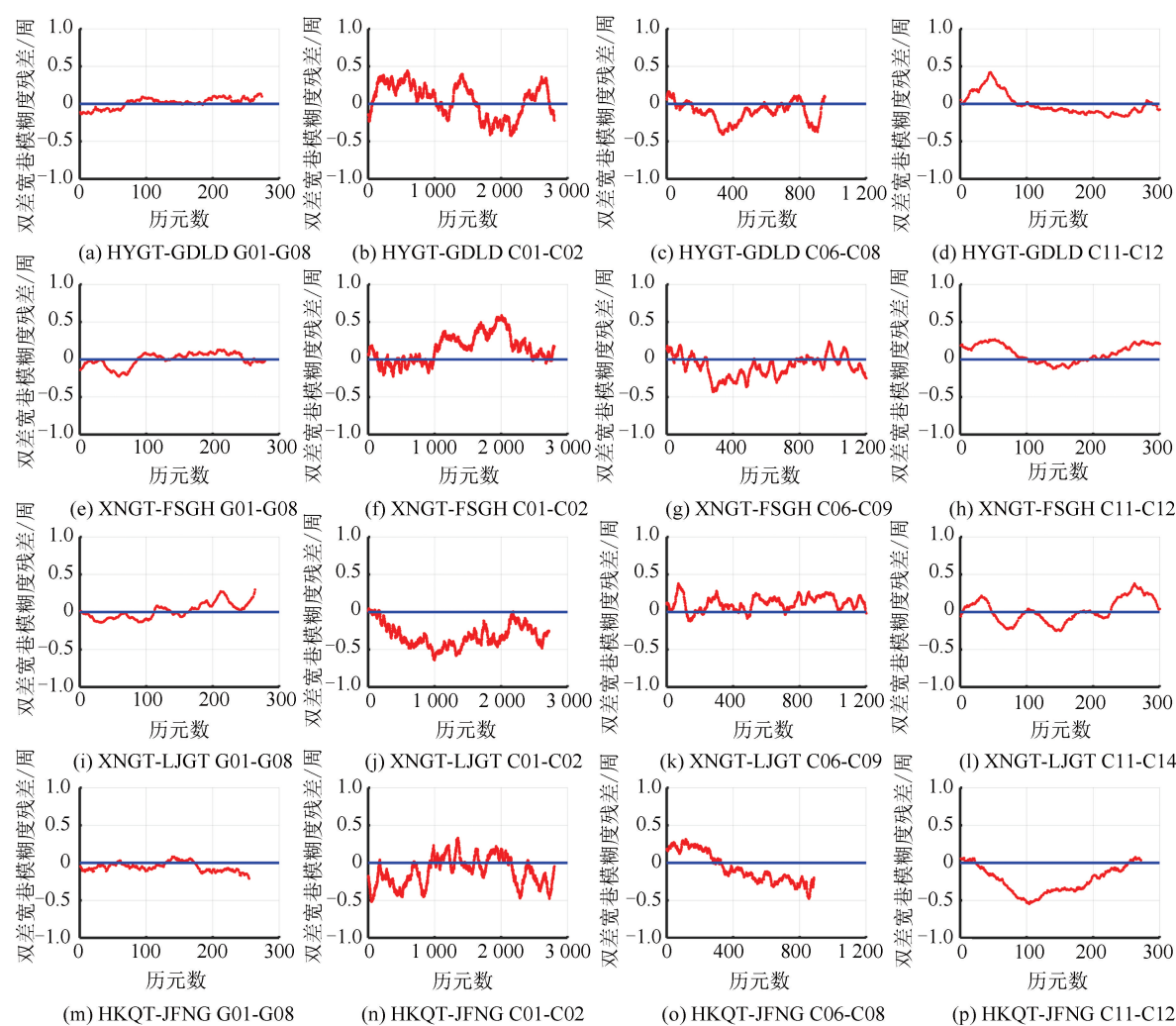


图 5 大于 300 km 基线的双差宽巷模糊度残差

Fig.5 Residuals of Double Differenced Wide-Lane Ambiguity with the Baseline over 300 km

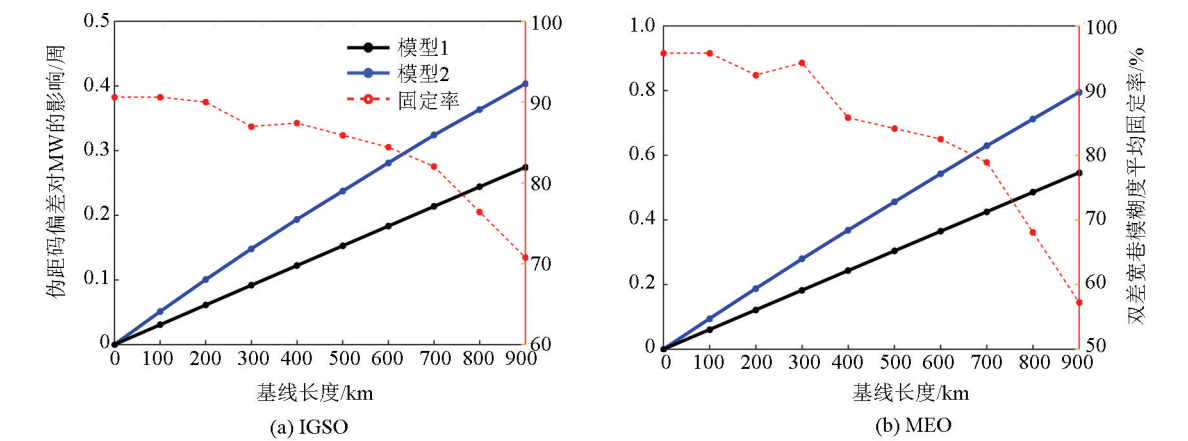


图 6 理论最大影响与双差宽巷模糊度平均固定率比较

Fig.6 Comparison of Theoretical Maximum Influence and Average Fixing Rate of Double Differenced Wide-Lane Ambiguity

定双差宽巷模糊度的影响。结果表明,随着基线长度的增加,伪距码偏差对 MW 组合确定双差宽巷模糊度的影响越来越大,对 300 km 基线的影响可达 0.36 周。本文还分析了实测基线的双差宽巷模糊度残差及其固定率的影响。结果表明,无论基线长短,GEO 卫星的双差宽巷模糊度残差

中始终存在系统偏差,且其双差宽巷模糊度的固定率也都较低,这表明双差并不能消除 GEO 卫星的伪距码偏差。而对于 IGSO 和 MEO 卫星而言,当基线长度小于 300 km 时,北斗双差宽巷模糊度残差中基本不存在系统性偏差,其双差宽巷模糊度固定率基本和 GPS 一致,故此时可以忽略伪距码偏差对基线解算的影响;但当基线超过 300 km 后,部分北斗卫星的双差宽巷模糊度残差序列中就存在系统性偏差,且其双差宽巷模糊度固定率也较低,这说明此时双差并不能完全消除每颗卫星的伪距码偏差,故需考虑伪距码偏差对基线解算的影响。

参 考 文 献

- [1] China Satellite Navigation Office. Report on the Development of BeiDou Navigation Satellite System (Version 2.2)[R]. Beijing: China Satellite Navigation Office, 2013(中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统发展报告(2.2 版)[R]. 北京:中国卫星导航系统管理办公室, 2013)
- [2] Hauschild A, Montenbruck O, Sleewaegen J M, et al. Characterization of Compass M-1 Signals[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(1):117-126
- [3] 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(7):44-49
- [4] 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. 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): 832-836)
- [5] Wang Guangxing, Jong K, Zhao Qile, et al. Multipath Analysis of Code Measurements for BeiDou Geostationary Satellites[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(1):129-139
- [6] Wanninger L, Beer S. BeiDou Satellite-Induced Code Pseudorange Variations: Diagnosis and Therapy[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(4):639-648
- [7] Ning Yafei, Yuan Yunbin, Chai Yanju, et al. Analysis of the Bias on the Beidou GEO Multipath Combinations[J]. *Sensors*, 2016, 16(8):1 252
- [8] Li Xin, Zeng Qi, Guan Shoukui. Methods of BeiDou Pseudorange Multipath Deviation Correction[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2016, 36(8): 727-731(李昕, 曾琪, 管守奎. 北斗卫星伪距多路径偏差改正研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(8):727-731)
- [9] Lou Yidong, Gong Xiaopeng, Gu Shengfeng, et al. The Characteristic and Effect of Code Bias Variations of BeiDou[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(8):1 040-1 046(楼益栋, 龚晓鹏, 辜声峰, 等. 北斗卫星伪距码偏差特性及其影响分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(8):1 040-1 046)
- [10] Lou Yidong, Gong Xiaopeng, Gu Shengfeng, 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
- [11] Zou Xuan, Li Zongnan, Li Min, et al. Modeling BDS Code Pseudorange Variations and Models Assessment[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(3):1-8
- [12] Geng Tao, Xie Xin, Zhao Qile, et al. Improving BDS Integer Ambiguity Resolution Using Satellite-Induced Code Bias Correction for Precise Orbit Determination[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(3):1 191-1 201
- [13] Zhang Xiaohong, He Xiyang, Liu Wanke. Characteristics of Systematic Errors in the BDS Hatch-Melbourne-Wübbena Combination and Its Influence on Wide-Lane Ambiguity Resolution[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(1):265-277
- [14] Melbourne W. The Case for Ranging in GPS-Based Geodetic Systems[C]. 1st International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Rockville, USA, 1985
- [15] Wübbena G. Software Developments for Geodetic Positioning with GPS Using TI-4100 Code and Carrier Measurements[C]. 1st International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Rockville, USA, 1985
- [16] Li Zhenghang, Huang Jinsong. GPS Surveying and Data Processing[M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2010(李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 2 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2010)
- [17] Tang Weiming, Deng Chenlong, Gao Lifeng. Preliminary Results of Single Epoch Baseline Solution Based on BeiDou Navigation Satellite System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(8): 897-901(唐卫明, 邓辰龙, 高丽峰. 北斗单历元基线解算算法研究及初步结果[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(8): 897-901)
- [18] Tang Weiming, Liu Jingnan, Shi Chuang, et al. Three Steps Method to Determine Double Difference Ambiguities Resolution of Network RTK Reference Station[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(4): 305-308(唐卫明,

- 刘经南,施闯,等. 三步法确定网络 RTK 基准站双差模糊度[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(4): 305-308)
- [19] Shi Xiaofei, Sheng Renjun, Gao Chengfa, et al. Dynamic Relative Positioning of GPS/BDS Based on Wide Lane Ambiguity[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2013, 43(s2):446-450(时小飞, 生仁军, 高成发, 等. 基于宽巷模糊度约束的 GPS/BDS 动态相对定位[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(s2):446-450)
- [20] Gu Shengfeng, Shi Chuang, Lou Yidong, et al. Generalized-Positioning for Mixed-Frequency of Mixed-GNSS and Its Preliminary Applications[C]. China Satellite Navigation Conference (CSNC 2013), Wuhan, China, 2013
- [21] Deng Chenlong. Theory and Approach of Multi-frequency and Multi-constellation GNSS Real Time Double Differenced Ambiguity Resolution[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016(邓辰龙. 多频多系统 GNSS 实时双差模糊度解算理论与方法研究[D]. 武汉:武汉大学, 2016)
- [22] Zhu Huizhong, Liu Jingnan, Tang Weiming, et al. An Algorithm of Instantaneous Double Difference Ambiguity Resolution for Long-Range Reference Stations of Network RTK[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(6): 688-692(祝会忠, 刘经南, 唐卫明, 等. 长距离网络 RTK 参考站间双差模糊度快速解算算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(6): 688-692)

Influence of BDS Pseudorange Code Biases on Baseline Resolution

TANG Weiming^{1,2} LIU Qian¹ GAO Kefu^{1,3} DENG Chenlong¹ CUI Jianhui¹ SHEN Mingxing¹

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

2 Key Laboratory of Navigation and Location Based Service, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Wuhan 430079, China

3 Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

Abstract: Pseudorange code biases will influence high precision data processing in BeiDou navigation satellite system (BDS). Based on Melbourne-Wübbena (MW) combination, we have analyzed the effect of code biases on baseline resolution according to the code biases correction models and the residuals of double differenced wide-lane ambiguity of baselines, respectively. The results show that the influence of code biases on double differenced wide-lane ambiguity resolution with MW combination is gradually obvious as the baseline becomes longer. Moreover, the impact on the 300 km baseline may reach up to 0.36 cycles. In addition, the results suggest that the code biases of geostationary earth orbit(GEO) have great influence over both short and long baselines. For inclined geostationary orbit (IGSO) and medium earth orbit (MEO), the code biases have little effect on baseline solution when the baseline is within 300 km, however, the residuals of wide-lane ambiguity of partial satellites have obvious biases when the baseline is over 300 km. Furthermore, the fixing rates of wide-lane ambiguity of these satellites are lower, so we should take into account the influence of code biases on baseline resolution at this time.

Key words: pseudorange code biases; MW combination; double differenced wide-lane ambiguity; baseline resolution

First author: TANG Weiming, PhD, professor, main research interests include application development and system integration of GNSS real-time kinematic positioning. E-mail: wmtang@whu.edu.cn

Corresponding author: GAO Kefu, PhD. E-mail: gao@whu.edu.cn

Foundation support: The National Key Research and Development Plan, No. 2016YFB0501800; the Fundamental Research Funds for the Central Universities, Nos. 2042017kf0043, 2042016kf0051; Basic Research Application Program of Wuhan, No.2017010201010112.