

# 北斗导航卫星相位中心修正

常志巧<sup>1,2</sup> 胡小工<sup>1</sup> 郭 睿<sup>2</sup> 周善石<sup>1</sup> 何 峰<sup>2</sup>  
董恩强<sup>1</sup> 李晓杰<sup>1</sup> 董文丽<sup>1</sup>

1 中国科学院上海天文台,上海,200030  
2 北京卫星导航中心,北京,100094

**摘 要:**北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)发播电文时利用卫星钟差  $a_0$  参数修正了 B3 频点相位中心与质心差异的大部分偏差,利用卫星群延时间参数(timing group delay, Tgd)修正不同频点相位中心的差异部分。该方法实质是利用各向同性的卫星钟差修正具有各向异性的天线相位中心偏差,改正精度有限。为进一步提高广播星历精度,提出了先对卫星位置进行相位中心改正,再对相位中心的轨迹进行广播星历拟合的处理方法,分别比较了两种改正方法对用户距离误差(user range error, URE)以及精密单点定位精度的影响。分析表明,两种方法都能使 URE 和定位精度得到提高,且新方法比利用卫星钟差  $a_0$  参数的修正精度提高了约 76%,定位精度提高了约 12.5%,同时新方法的改正精度不受时空因素影响。利用广播星历拟合修正天线相位中心与不进行天线相位中心比较,定位精度提高约 38.1%。最后分析了 Tgd 参数修正各频点天线相位中心不一致的残差,影响在毫米级,可以用于修正相位中心的频间差异。

**关键词:**北斗卫星导航系统;卫星天线相位中心;广播星历拟合;卫星钟差;Tgd

**中图分类号:**P228                      **文献标志码:**A

卫星导航系统的实时导航用户通过测量卫星天线相位中心到接收机相位中心的距离以及卫星发播的导航电文实现实时定位、导航和授时(positioning, navigation and timing, PNT)服务。GPS 系统基于伪距和相位数据的处理模式,实现卫星轨道与钟差的一体化解算,形成了 P1/P2 伪距无电离层组合  $P_{LC}$  的虚拟天线相位中心,它既是卫星钟差表述的时间参考点,也是 GPS 卫星广播星历表述的空间参考点。由于卫星上各个频点导航信号发射链路时延并不完全相同,对于单独采用 P1 或 P2 伪距的用户需要利用卫星发播的卫星群延时间参数 Tgd 进行改正<sup>[1-2]</sup>。IGS(International GPS Service,国际 GPS 服务组织)及其分析中心提供的精密星历是卫星质心的位置<sup>[3]</sup>,将其采用的天线模型发布在 ANTEX(antenna exchange)格式的文件中<sup>[4]</sup>,用户根据该模型计算天线相位中心在地固系中的位置。ANTEX 文件显示 GPS 卫星 L1 和 L2 频点具有相同天线相位中心改正,且天线相位中心偏差集中在

卫星本体坐标系的 Z 方向,也即卫星对地方向,表明利用 GPS 广播星历计算的卫星位置同时代表了 L1 和 L2 频点相位中心的位置。

北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)时空参考点并未在官方发布的接口控制文件中明确定义<sup>[5]</sup>,但公开发表的文献表明卫星钟差参考点定义为 B3 频点的天线相位中心<sup>[2,6]</sup>,利用卫星星历参数计算出的卫星轨道为卫星质心在 CGCS2000 坐标系中的位置<sup>[6]</sup>。北斗卫星相位中心具有与质心不重合,且不同频点相位中心也不重合的情况,这给播发基于相位中心的广播星历造成一定复杂性。目前 BDS 发播电文时采用卫星钟差参数  $a_0$  修正 B3 频点相位中心的大部分误差,同时,利用 Tgd 参数修正不同频点相位中心的差异部分。由于天线相位中心偏差引起的用户距离误差(user range error, URE)具有各向异性,且同一地点、不同时间引入的用户距离误差也不为常数,因此采用卫星钟差  $a_0$  项不能完全消除卫星质心至天线相位中心的

误差。北斗卫星天线相位中心在卫星本体坐标系中除  $Z$  方向外  $X$  方向也有数十厘米的偏差<sup>[4,7]</sup>,导致卫星天线相位中心各向异性和时变特性更加显著。鉴于卫星天线相位中心改正具有显著的周期特性,而广播星历参数包含参考时刻的开普勒根数、长期项改正参数和短周期改正参数,本文提出了先将卫星质心位置修正至卫星天线相位中心再进行广播星历拟合的方法。

## 1 修正相位中心的模型比较

### 1.1 相位中心修正方法

北斗卫星导航系统星座由地球静止轨道卫星 (geostationary orbits, GEO)、倾斜地球同步轨道卫星 (inclined geostationary orbits, IGSO)、中地球轨道卫星 (medium earth orbits, MEO) 组成。BDS 对各类型卫星采用了各不相同的卫星姿态控制模式。不同的姿态模式使得针对不同类型卫星需采用不同的卫星天线相位中心改正模型<sup>[4]</sup>。GEO 卫星采用了零偏航模式 (orbit-normal), 即  $Z$  轴指向地心,  $Y$  轴正交于轨道运动平面,  $X$  轴与  $Y/Z$  轴正交。IGSO/MEO 卫星采用了动偏航模式 (yaw-steering), 即  $Z$  轴指向地心,  $Y$  轴正交于太阳-地心-卫星平面,  $X$  轴与  $Y/Z$  轴正交<sup>[8]</sup>。导航电文中表述的卫星轨道是预报轨道, 无法利用实测的卫星姿态进行卫星天线相位中心改正, 因此本文采用名义姿态计算卫星天线相位中心改正, 其算法如下<sup>[8]</sup>。

1) IGSO/MEO 卫星的参考坐标系模型:

$$\boldsymbol{e}_z = -\frac{\boldsymbol{r}}{|\boldsymbol{r}|}, \boldsymbol{e}_y = \boldsymbol{e}_z \times \frac{\boldsymbol{r}_{\text{sun}} - \boldsymbol{r}}{|\boldsymbol{r}_{\text{sun}} - \boldsymbol{r}|}, \boldsymbol{e}_x = \boldsymbol{e}_y \times \boldsymbol{e}_z \quad (1)$$

其中,  $\boldsymbol{r}$ 、 $\boldsymbol{r}_{\text{sun}}$  为惯性系中卫星位置向量和太阳位置向量。

2) GEO 卫星的卫星参考坐标系模型:

$$\boldsymbol{e}_z = -\frac{\boldsymbol{r}}{|\boldsymbol{r}|}, \boldsymbol{e}_y = \boldsymbol{e}_z \times \frac{\boldsymbol{v}}{|\boldsymbol{v}|}, \boldsymbol{e}_x = \boldsymbol{e}_y \times \boldsymbol{e}_z \quad (2)$$

其中,  $\boldsymbol{r}$  和  $\boldsymbol{v}$  分别为卫星在惯性系下的位置和速度向量。

3) 相位中心改正模型为:

$$\begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = \boldsymbol{R}_{\text{ciscts}} \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{e}_x & \boldsymbol{e}_y & \boldsymbol{e}_z \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{\text{phs}} \\ y_{\text{phs}} \\ z_{\text{phs}} \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中,  $[\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z]^T$  为地固系下卫星质心至相位中心向量;  $\boldsymbol{R}_{\text{ciscts}}$  为惯性系与地固系转换旋转矩阵;  $[x_{\text{phs}} \ y_{\text{phs}} \ z_{\text{phs}}]^T$  为卫星相位中心在卫星

本体坐标系下的位置向量。  
名义姿态的计算误差及其对天线相位中心改正的影响是决定导航电文预报轨道精度的重要因素。北斗导航卫星的遥测系统对卫星的姿态进行了实时监测, 将姿态偏航角监测值与理论计算值进行比较, 可得到名义姿态预报误差。文献[8]的计算表明, GEO 卫星偏航角预报精度优于  $0.2^\circ$ , IGSO 卫星约  $1^\circ$ , MEO 卫星约  $2^\circ$ 。图 1 和图 2 分别给出了 2015-08-26 各卫星利用名义姿态计算的天线相位中心改正对三维位置误差和 URE 影响的时间序列, 不同颜色表示不同卫星。

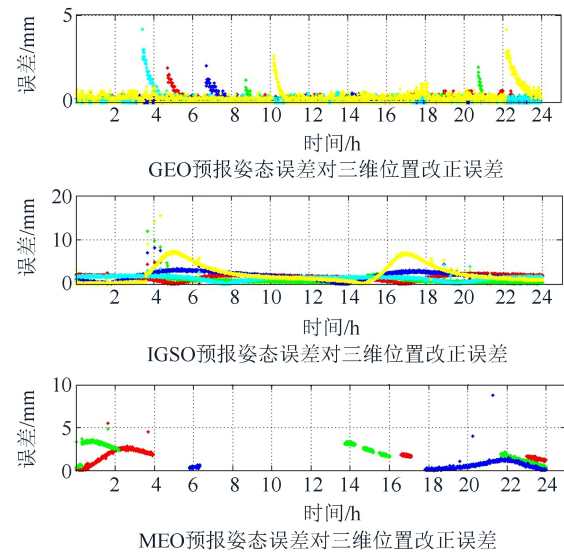


图 1 预报姿态误差对三维位置误差改正的影响  
Fig.1 Influence of Satellite Attitude Prediction Error on Satellite Position

由图 1、图 2 可知, 由预报姿态引起的位置误差不超过 2 cm, 大部分误差在 0~4 mm 之间; GEO 卫星的位置误差较小, IGSO 和 MEO 卫星的位置误差相对较大; 由预报姿态引起的 URE 误差不超过 1 mm。

### 1.2 利用卫星钟差 $a_0$ 参数进行相位中心改正

选取服务区内某个位置已知的点位  $P$ , 按照一定的采样间隔计算卫星天线相位中心在该点位观测方向上的改正值为:

$$d_{\text{phs}} = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}^T \cdot \frac{\boldsymbol{r}_{\text{sta}} - \boldsymbol{r}}{|\boldsymbol{r}_{\text{sta}} - \boldsymbol{r}|} \quad (4)$$

式中,  $d_{\text{phs}}$  为卫星天线相位中心在测站观测方向上的改正值;  $\boldsymbol{r}_{\text{sta}}$  和  $\boldsymbol{r}$  分别为测站和卫星在地固系的位置向量。在一定时间范围内的统计改正值的平均值为:

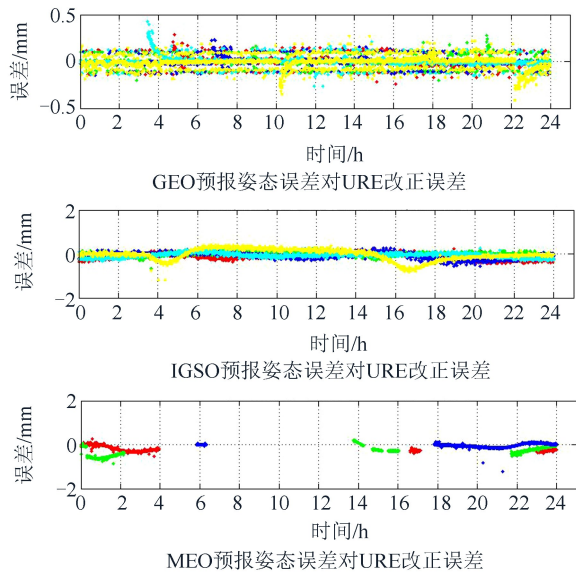


图2 预报姿态误差对 URE 的影响  
Fig.2 Influence of Satellite Attitude  
Prediction Error on URE

$$\Delta a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n d\rho_{\text{phs } i}}{cn} \tag{5}$$

式中, $c$  为光速; $n$  为观测数据总数; $\Delta a_0$  为利用  $P$  点计算的天线相位中心距离改正的平均时延值。利用  $\Delta a_0$  修正卫星钟差参数,可以近似修正服务区内的卫星天线相位中心改正。该方法与 BDS 广域差分的原理类似,即用平均 URE 误差表征服务区的 URE 误差,该方法受限于服务区范围和对地方向误差大小<sup>[9]</sup>。

1.3 利用星历拟合进行相位中心改正

将卫星位置在精密定轨后,广播星历拟合前进行天线相位中心改正。在得到卫星相位中心的位置序列后,需要选择星历拟合模型进行拟合。目前广播星历主要有两种模型:一种是 GPS 采用的基于开普勒根数的广播星历,另一种是 GLO-NASS 采用的基于卫星加速度的广播星历模型<sup>[10]</sup>。BDS 采用了外推能力更强、计算更简单、精度更高的开普勒根数广播星历,具体参数包括参考时刻的开普勒根数 $(\sqrt{A}, e, i_0, \Omega_0, \omega, M_0)$ 、长期项改正参数 $(\Delta n, idot, \dot{\Omega})$ 和短周期改正项振幅 $(C_{rs}, C_{rc}, C_{us}, C_{uc}, C_{is}, C_{ic})$ <sup>[6]</sup>。针对上述模型在 BDS 中的应用,国内已经开展大量相关研究解决了广播星历拟合精度和稳定性问题<sup>[11-12]</sup>。

鉴于导航卫星具有小偏心率的特点,平近点角  $M$  和近地点角  $\omega$  无法严格区分,本文采用无奇点根数模型进行广播星历拟合,消除小偏心率奇异问题。设原始开普勒轨道根数为  $\sigma_0$ , 定义为:

$$\sigma_0 = (\sqrt{A}, e, i_0, \Omega_0, \omega, M_0, \Delta n, idot, \dot{\Omega}, C_{rs}, C_{rc}, C_{us}, C_{uc}, C_{is}, C_{ic}) \tag{6}$$

无奇点根数  $\sigma_1$  的定义为:

$$\sigma_1 = (\sqrt{A}, \xi = e \cos \omega, i_0, \Omega_0, \eta = e \cos \omega, \lambda = \omega + M_0, \Delta n, idot, \dot{\Omega}, C_{rs}, C_{rc}, C_{us}, C_{uc}, C_{is}, C_{ic}) \tag{7}$$

采用无奇点根数模型拟合广播星历,可以消除小偏心率引起的奇点问题,同时该参数能精确转换成开普勒轨道根数,保证用户算法不变。对于 GEO 卫星,为了消除小倾角奇点问题,首先需要对三维位置误差绕  $X$  轴旋转  $55^\circ$ <sup>[11]</sup>,在新坐标系下拟合广播星历<sup>[12]</sup>。

2 结果与讨论

2.1 星历拟合结果

利用国内区域监测网 2015 年 8 月 25—27 日数据进行多星多站联合精密定轨解算,将质心轨道和卫星天线相位中心的轨迹分别进行 16 参数广播星历拟合。对于 GEO、IGSO、MEO 卫星拟合弧长分别取为 4 h、4 h 和 3 h,更新周期设置为 1 h,进行连续 1 d 共 24 组广播星历拟合。表 1 列出了所有在轨卫星改正相位中心前后的拟合 URE 互差,其中 01~05 为 GEO 卫星,06~10 为 IGSO 卫星,11~14 为 MEO 卫星。从拟合 URE 互差看,GEO 卫星的拟合互差量级为  $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-7}$  m,IGSO 和 MEO 卫星的拟合 URE 互差为  $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$  m,GEO 卫星的 URE 拟合互差小于 IGSO 和 MEO 卫星。

由表 1 可知改正卫星相位中心前后的拟合 URE 互差较小,远小于用户设备观测噪声。

表 1 改正相位中心前后的拟合 URE 互差

Tab.1 Fitting URE Difference Between Corrected and Uncorrected Phase Center Offset					
PRN	URE 差/m	PRN	URE 差/m	PRN	URE 差/m
01	$8.9 \times 10^{-8}$	06	$1.5 \times 10^{-4}$	11	$1.9 \times 10^{-4}$
02	$5.4 \times 10^{-8}$	07	$6.5 \times 10^{-4}$	12	$2.0 \times 10^{-4}$
03	$6.2 \times 10^{-8}$	08	$9.4 \times 10^{-5}$	14	$4.6 \times 10^{-4}$
04	$1.5 \times 10^{-7}$	09	$1.0 \times 10^{-4}$		
05	$4.8 \times 10^{-8}$	10	$5.8 \times 10^{-4}$		

2.2 URE 影响分析

采用改正相位中心后的卫星轨道作为导航电文中卫星天线相位中心改正引入 URE 误差的评估标准。具体方法为以精密定轨后改正天线相位中心的卫星位置向量  $r_0$  为基准,分别采用改正相位中心前后的广播星历计算卫星位置向量  $r$ ,设

需要评估的监测点位位置向量为  $\mathbf{r}_{\text{sta}}$ , 则其对 URE 影响  $e_{\text{URE}}$  的评估方法为:

$$e_{\text{URE}} = (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \cdot \mathbf{r}_{\text{sta}} \tag{8}$$

对于修正卫星钟  $a_0$  参数的改正方法, 其对 URE 影响  $e_{\text{URE}}$  的评估方法为:

$$e_{\text{URE}} = (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \cdot \mathbf{r}_{\text{sta}} - c \cdot \Delta a_0 \tag{9}$$

利用 2015-08-26 全天区域监测站解算的数值轨道进行改正相位中心的效果比较, 图 3 为新疆地区某测站不同卫星相位中心修正方法导致的 URE 误差, 不同颜色表示不同卫星。

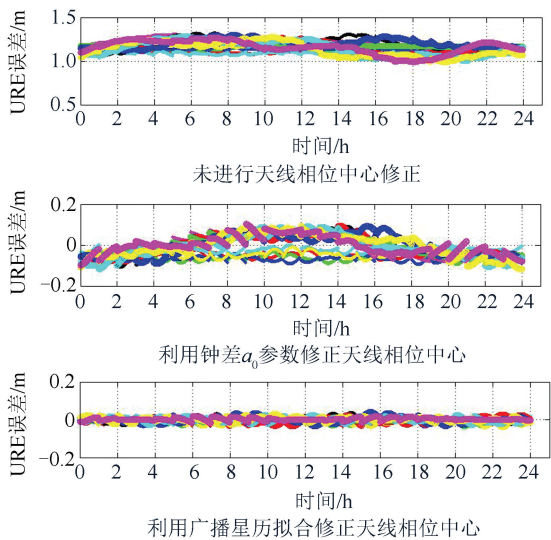


图 3 新疆地区不同相位中心修正方法比较  
Fig.3 Comparison among Different Methods of Correcting Phase Center Offset in Xinjiang Area

图 3 表明利用钟差  $a_0$  参数修正天线相位中心引入的 URE 误差, 不同时刻误差大小不一致, 而利用广播星历拟合修正天线相位中心引入的 URE 误差, 不同时刻误差大小基本一致; 未进行天线相位中心修正引入的 URE 误差达到 1 m 以上, 利用钟差  $a_0$  参数修正天线相位中心引入的 URE 误差为 0.2 m 以内, 利用广播星历拟合修正天线相位中心引入的 URE 误差最小。

表 2 列出了不同地区不同相位中心修正方法的 URE 误差比较统计值。方法 1 表示利用钟差  $a_0$  参数修正天线相位中心引入的 URE 误差, 方法 2 表示利用广播星历拟合修正天线相位中心引入的 URE 误差。从最后一行各颗卫星的 URE 平均值上看, 在未修正相位中心的情况下, 在北京及新疆 URE 分别为 1.177 m 及 1.159 m, 影响量级较大。方法 1 在北京及新疆 URE 分别为 0.015 m 及 0.051 m, 其影响大小与地理位置相关, 由于本文选取了北京地区作为方法 1 计算钟差  $a_0$  参数偏差的标定点, 因此方法 1 在北京站的 URE 影响较小。方法 2 在北京及新疆 URE 大小基本一致, 分别为 0.014 m、0.012 m, 其影响大小与地理位置不相关。因此, 方法 2 引起的 URE 误差显著小于方法 1, 且不受时空因素的影响。

2.3 定位结果

利用国内区域监测网 2015 年 8 月 25—27 日数据进行多星多站联合精密定轨, 利用定轨弧段

表 2 不同相位中心修正方法引起的 URE 误差 RMS 比较  
Tab.2 RMS Comparison of URE Caused by Different Methods of Correcting Phase Center Offset

模式 PRN	北京地区/m			新疆地区/m		
	未修正	方法 1	方法 2	未修正	方法 1	方法 2
01	1.145	0.013	0.013	1.103	0.049	0.013
02	1.189	0.021	0.021	1.137	0.065	0.018
03	1.190	0.018	0.018	1.133	0.069	0.016
04	1.110	0.011	0.011	1.089	0.026	0.012
05	1.210	0.023	0.023	1.173	0.049	0.019
06	1.217	0.007	0.004	1.216	0.055	0.005
07	1.205	0.019	0.017	1.202	0.054	0.015
08	1.172	0.015	0.015	1.170	0.049	0.013
09	1.193	0.008	0.005	1.194	0.044	0.004
10	1.207	0.021	0.019	1.205	0.053	0.016
11	1.155	0.014	0.012	1.148	0.056	0.012
12	1.143	0.014	0.012	1.139	0.055	0.012
14	1.165	0.015	0.008	1.161	0.043	0.007
平均	1.177	0.015	0.014	1.159	0.051	0.012

的轨道和卫星钟差进行精密单点定位试验。卫星天线相位中心改正分别采用不进行修正、方法 1 (利用卫星钟差  $a_0$  参数修正) 和方法 2 (利用广播星历拟合修正), 精密单点定位采用区域监测网

2015-08-26 全天的 B1/B2 伪距相位数据, 采样间隔为 30 s, 监测站坐标事先通过 GPS 静态测量精确测定。解算模式为动态, 估计参数包括接收机位置、接收机钟差、对流层天顶延迟湿分量、消电



离层组合模糊度。

图 4、图 5 分别是中国境内北京和新疆两地不同相位中心修正方法对精密单点定位的比较。图 4、图 5 中的定位误差 RMS 表明方法 1 和方法 2 都提高了定位精度(主要表现在高程方向精度得到提高),对于北京地区方法 1 和方法 2 的定位精度相当,但对于新疆地区方法 2 较方法 1 精度高,RMS 从 0.351 m 降低至 0.307 m,精度提高了 12.5%。利用广播星历拟合修正天线相位中心与不进行天线相位中心修正比较,北京地区精密单点定位误差 RMS 从 0.381 m 降低至 0.236 m,精度提高了 38.1%;新疆地区 RMS 从 0.436 m 降低至 0.307 m,精度提高了 29.6%。

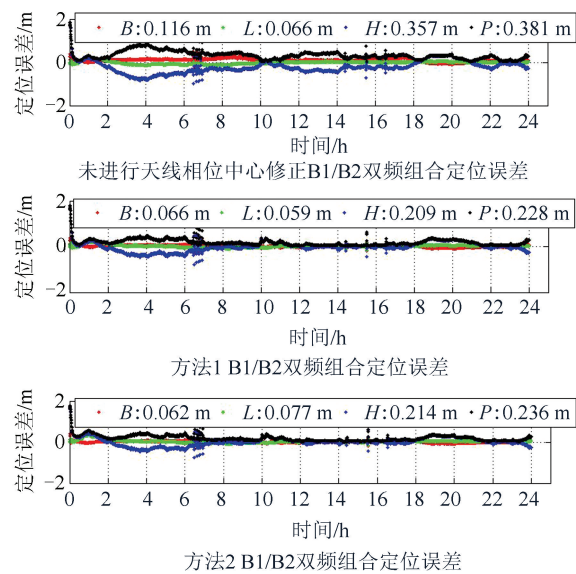


图 4 北京不同相位中心修正方法定位结果比较  
Fig.4 Positioning Results Comparison Between Different Methods of Correcting Phase Center Offset in Beijing Area

### 2.4 讨论分析

考虑到 BDS 不同频点具有不同相位中心的特点,而不同频点具有不同 Tgd 参数,Tgd 参数能吸收部分频点间相位中心不一致引起的误差,由于 Tgd 参数具有各向同性的特点,因此不能完全吸收各向异性误差。计算所有在轨卫星在一个回归周期内 Tgd 参数修正天线相位中心不一致的残差,影响在毫米量级(如图 6、图 7 所示),RMS 统计值在亚毫米及毫米级,该量级为相位观测量的噪声水平,因此即使采用相位数据进行精密定位,也能满足定位精度需求。

本文的结果表明,在星历拟合前对卫星位置进行天线相位中心改正,能获得较高的定位精度,前提是需要已知卫星的姿态。在常规的姿态控制模式下,预报姿态误差对相位中心改正 URE 的

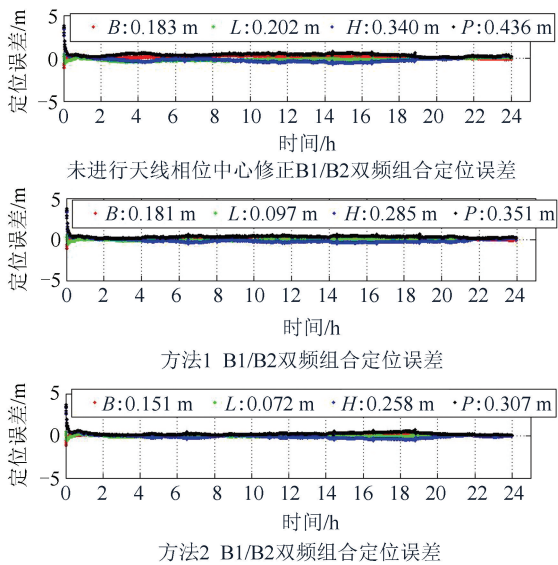


图 5 新疆不同相位中心修正方法定位结果比较  
Fig.5 Positioning Results Comparison Between Different Methods of Correcting Phase Center Offset in Xinjiang Area

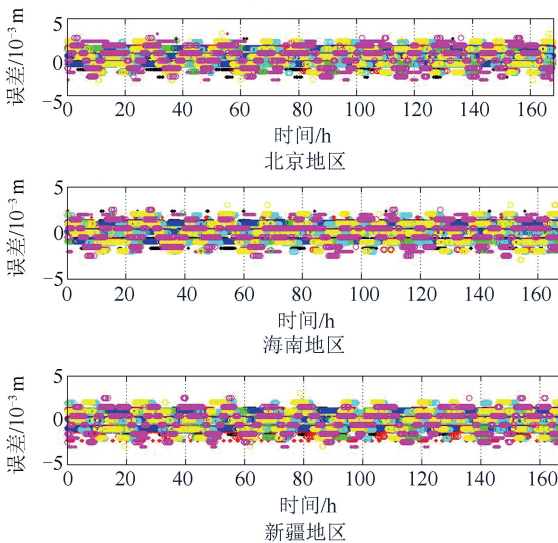


图 6 利用 Tgd 修正 B1 频点相位中心不一致引起的误差  
Fig.6 Error Caused by Using Tgd to Correct Disagreement of B1 Phase Center Offset

影响小于 1 mm。但当太阳方向与轨道面的夹角小于或大于某一界限,IGSO、MEO 进行动偏转零偏、零偏转动偏的姿态转换控制<sup>[7,13]</sup>,为了对用户的影响足够小,IGSO、MEO 卫星姿态控制的过程时间较短,姿态转换时刻为卫星理论偏航姿态与实际偏航姿态最为接近时开始进行姿态控制<sup>[7]</sup>,因此即使在卫星姿态控制模式下也能保证较高的姿态预报精度,此外在卫星姿态控制过程中,偏航姿态保持连续,从而相位中心轨迹也连续,不影响广播星历的拟合精度。

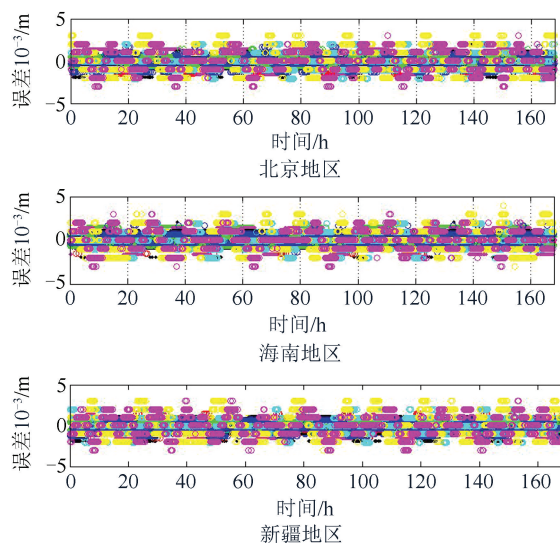


图 7 利用 Tgd 修正 B2 频点相位中心不一致的误差

Fig.7 Error Caused by Using Tgd to Correct Disagreement of B2 Phase Center Offset

### 3 结 语

本文针对北斗卫星天线相位中心修正问题,提出了直接对天线相位中心轨迹进行广播星历拟合的方法。基于实测数据对该方法进行分析与论证,获得以下结论:

1)导航电文中表述的卫星轨道是预报轨道,无法利用实测的卫星姿态进行卫星天线相位中心改正,本文利用遥测数据分析了卫星名义姿态预报误差,结果表明北斗卫星的名义姿态预报精度较高,预报姿态引起的位置误差不超过 2 cm;由预报姿态引起的 URE 误差不超过 1 mm,满足广播星历拟合对卫星位置的精度要求。

2)在星历拟合前对卫星质心进行天线相位中心改正,拟合结果表明广播星历拟合能拟合出表达天线相位中心轨迹的星历参数,拟合 URE 与改正前精度相当,最大差异在亚毫米量级。

3)分析两种方法对 URE 的影响表明:对天线相位中心进行广播星历拟合引入的 URE 误差显著小于利用钟差  $a_0$  参数的方法,且改正精度不受时空因素的影响。

4)两种改正天线相位中心的方法都提高了定位精度,在与标定点北京地区及东西跨度较大的新疆地区,利用广播星历拟合的方法比利用卫星钟差  $a_0$  参数修正的方法精度提高了 12.5%。利用广播星历拟合修正天线相位中心与不进行天线相位中心改正比较,定位精度提高约 38.1%。

致谢:感谢上海天文台唐成盼、张益泽博士提

供的技术支持。

### 参 考 文 献

- [1] Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces(ICD-GPS-200D), Revision D[S]. USA:GPS Joint Program Office, 2004
- [2] Dai Wei, Jiao Wenhai, Jia Xiaolin. Application Research for Compass Navigation Satellite Interfrequency Bias Correction Terms[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2009, 26(5): 367-369(戴伟, 焦文海, 贾小林. Compass 导航卫星频间偏差参数使用方法[J]. 测绘科学技术学报, 2009, 26(5): 367-369)
- [3] Kouba J. A Guide to Using International GPS Service(IGS) Product[EB/OL]. [ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/resource/pubs/Guide to Using IGS Products. pdf](ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/resource/pubs/Guide%20to%20Using%20IGS%20Products.pdf), 2009
- [4] Montenbruck O. ANTEX Considerations for Multi-GNSS Work[C]. Antenna WG Meeting, IGS Workshop, Olsztyn, Poland, 2012
- [5] China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document[EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn>, 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[EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn>, 2013)
- [6] Liu Li, Shi Xin, Li Jing, et al. The Definition and Using Method of the COMPASS Basic Navigation Message [J]. *Sci Sin-Phys, Mech & Astron*, 2015, 45: 079509-1-079509-7(刘利, 时鑫, 栗靖, 等. 北斗基本导航电文定义与使用方法[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45(7): 079509-1-079509-7)
- [7] Guo Jing. The Impacts of Attitude, Solar Radiation and Function Model on Precise Orbit Determination for GNSS Satellites[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014(郭靖. 姿态、光压和函数模型对导航卫星精密定轨影响的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014)
- [8] Zhou S S, Hu X G, Zhou J H, et al. Accuracy Analyses of Precise Orbit Determination and Timing for COMPASS/BeiDou-2 4GEO/5IGSO/4MEO Constellation[C]. Proceeding of CSNC, Wuhan, China, 2013
- [9] Cao Y L, Hu X G, Wu B, et al. The Wide-area Difference System for the Regional Satellite Navigation System of COMPASS[J]. *Sci China-Phys, Mech & Astron*, 2012, 55(7): 1 307-1 315
- [10] Hu Songjie. Research on the Broadcast Ephemeris Parameters of GPS and GLONASS[J]. *Journal of Spacecraft TT & C Technology*, 2005, 24(3): 5-8

- (胡松杰. GPS 和 GLONASS 广播星历参数分析及算法[J]. 飞行器测控学报, 2005, 24(3): 5-8)
- [11] Ruan Rengui, Jia Xiaolin, Wu Xianbing, et al. Broadcast Ephemeris Parameters Fitting for GEO Satellites Based on Coordinate Transformation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(S): 145-150(阮仁桂, 贾小林, 吴显兵, 等. 关于坐标旋转法进行地球静止轨道导航卫星广播星历拟合的探讨[J]. 测绘学报, 2011, 40(S): 145-150)
- [12] Huang Hua. Study on Broadcast Ephemeris Model and Fitting Algorithm of Navigation Satellite[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012(黄华. 导航卫星广播星历参数模型及拟合算法研究[D]. 南京: 南京大学, 2012)
- [13] Tan Hongli, Li Xiaojie, Wu Shan, et al. Analyze the Solar Radiation Pressure in the Transition of Yaw Steering Mode to Orbit Normal Mode[C]. The 5th China Satellite Navigation Conference (CSNC), Nanjing, 2014(谭红力, 李晓杰, 吴杉, 等. 导航卫星动态偏航转零偏航状态的太阳光压分析[C]. 第5届北斗导航年会, 南京, 2014)

## Antenna Phase Center Correction for BeiDou Navigation Satellite

CHANG Zhiqiao<sup>1, 2</sup> HU Xiaogong<sup>1</sup> GUO Rui<sup>2</sup> ZHOU Shanshi<sup>1</sup> HE Feng<sup>2</sup>  
DONG Enqiang<sup>1</sup> LI Xiaojie<sup>1</sup> DONG Wenli<sup>1</sup>

1 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;  
2 Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China

**Abstract:** Presently, much of the errors caused by the B3 frequency, antenna phase center offset is corrected by the satellite clock  $a_0$  parameter. Errors caused by the variance of different frequencies are corrected by timing group delay (Tgd) parameter for BeiDou navigation satellite system (BDS) through navigation messaging. In order to improve the broadcast ephemeris, we put forward a satellite antenna phase center offset correction and fitting broadcast ephemeris methods. The two approaches are compared in two ways, including the influence on user ranging error and precise point positioning. The results show that the two methods can correct most errors caused by antenna phase center offset. The correction accuracy of the new method was improved by 76% compared with the method using satellite clock  $a_0$  parameter, and the positioning accuracy was improved by 12.5%. Accuracy is not affected by time-space factor. The positioning accuracy when correcting the satellite position before ephemeris fitting is about 38.1% higher than when satellite antenna, phase center offset is not corrected. The correction Tgd residuals of the variance of different frequencies of the antenna phase center are analyzed. The results show that the influence is at the mm order, so we can correct the variance by Tgd parameter.

**Key words:** BDS; satellite antenna phase center; ephemeris fitting; satellite clock error; Tgd

**First author:** CHANG Zhiqiao, PhD, specializes in the theories and methods of GNSS data processing. E-mail: zhiqiaochang@163.com  
**Corresponding author:** HU Xiaogong, PhD, professor. E-mail: hxg@shao.ac.cn  
**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41274043, 41204022, 41574029; the Opening Project of Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Position Techniques, No.14DZ2276100.