

引文格式:陈俊平,杨赛男,周建华,等.综合伪距相位观测的北斗导航系统广域差分模型[J].测绘学报,2017,46(5):537-546. DOI:10.11947/j.AGCS.2017.20160299.
CHEN Junping, YANG Sainan, ZHOU Jianhua, et al. A Pseudo-range and Phase Combined SBAS Differential Correction Model [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(5): 537-546. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20160299.

综合伪距相位观测的北斗导航系统广域差分模型

陈俊平^{1,2}, 杨赛男^{1,2}, 周建华³, 曹月玲¹, 张益泽^{1,4}, 巩秀强¹, 王君刚⁵

1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京卫星导航中心, 北京 100094; 4. 同济大学测量与国土信息工程系, 上海 200092; 5. 德国地学研究中心, 波茨坦 14473

A Pseudo-range and Phase Combined SBAS Differential Correction Model

CHEN Junping^{1,2}, YANG Sainan^{1,2}, ZHOU Jianhua³, CAO Yueling¹, ZHANG Yize^{1,4}, GONG Xiuqiang¹, WANG Jungang⁵

1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China; 4. College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 5. German Research Center for Geosciences, Potsdam 14473, Germany

Abstract: BeiDou Navigation Satellite System (BDS) integrates legacy PNT service and authorized SBAS service, where SBAS service provides differential corrections and integrity information for authorized users. Current BDS differential corrections include one-dimensional equivalent satellite clock and ionospheric grids corrections, which is derived based on CNMC-smoothed pseudo-range observations. To improve the performance of BDS SBAS service, an algorithm is developed to estimate the real-time satellite clock and orbit corrections. In the algorithm, phase smoothed pseudo-range observation is used to define absolute value, and epoch differenced phase observation is used to define epoch-wise variation of the satellite clock/orbit corrections. It is analyzed that the impact of data sampling rate and station number on the correction parameter estimation. Real-time data of the BDS tracking network in China is used to validate the new algorithm. Compared with the current system performance: ① mean UDRE using the new algorithm is reduced by 27%, 35% and 27% for GEO, IGSO and MEO satellites, ② mean positioning error using the new algorithm is reduced by 23%, 32% and 52% in the North, East and Up components, respectively. Implementing the new algorithm, BDS SBAS service supports the user positioning requirement with accuracy better than 1 m.

Key words: wide area differential service; phase observation; satellite clock correction; satellite orbit correction; UDRE

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Nos. 11673050; 41674041; 11403112); The National High-tech Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2014AA123102); The Opening Project of Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques (No. ZZTX-201401)

摘 要:我国区域北斗卫星导航系统为用户提供开放服务和授权服务两种服务方式,其中授权服务主要提供一维等效钟差改正数和完好性信息,实现更高精度的服务性能。北斗卫星导航系统提供的实时差分信息是基于 CNMC 平滑后的伪距观测数据计算,其精度受到残余伪距噪声的限制。为提升系统广域差分服务性能,本文提出了一种广域差分新模型。该模型综合了伪距及相位观测数据,并新增了轨道改正数。模型中经相位平滑的伪距观测值用于定义钟差改正数和轨道改正数的基准,而相位历元间差分观测值用于计算约束差分改正数的高精度相对变化。论文分析了数据采样率、测站个数等因素对新模

型的影响,并采用中国区域内的观测站数据对新模型进行精度验证。试验结果表明:①基于新广域差分模型的 GEO 卫星 UDRE 指标相对原有模型提升了 27%,IGSO 卫星指标提升了 35%,MEO 卫星指标提升了 24%;②基于新的广域差分模型,用户在南北、东西、高程方向的伪距定位精度分别提升了 23%、32%和 52%,实现了北斗系统用户导航定位三维定位精度优于 1 m 的指标。

关键词:广域差分;相位观测;钟差改正数;轨道改正数;UDRE

中图分类号:P228.4

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2017)05-0537-10

基金项目:国家自然科学基金(11673050;41674041;11403112);国家 863 计划(2014AA123102);上海市空间导航与定位技术重点实验室基金(ZZTX-201401)

中国自主发展和建立的北斗卫星导航系统(BDS)于 2012 年底向亚太部分地区提供服务。北斗卫星导航系统采用了不同于 GPS 等系统的独特系统设计,采用更适用于区域卫星导航服务的地球静止轨道(geostationary earth orbit, GEO)卫星和倾斜地球同步轨道(inclined geostationary earth orbit, IGSO)卫星,联合中高轨(medium earth orbit, MEO)卫星的星座设计^[1-4]。受限于监测站分布的约束,主控站数据处理对于 MEO 卫星的可视弧段较短,IGSO 卫星也存在出入境情况,GEO 卫星几何位置相对于地球静止,使得卫星轨道^[5-10]和卫星钟差^[11]解算高度相关。以上情况对北斗系统数据处理及高精度服务提出了很高的挑战。

北斗卫星导航系统在系统设计时就融合考虑了基本服务与广域差分的一体化,给用户开放以及授权服务。其中,开放服务为用户免费提供基本导航信息,而授权服务为授权用户提供差分完好性等信息以提高其服务性能^[3,13-14]。北斗广域差分系统在基本导航参数的基础上,利用服务区域内均匀分布的地面监测站数据,计算差分改正数并通过 GEO 卫星向用户进行广播^[15]。

目前北斗广域差分系统播发的参数包括等效钟差改正数以及服务单频授权用户的电离层格网模型^[15-17]。其中,等效钟差的处理利用了 CNMC(code noise and multipath correction)^[18-19]平滑后的伪距观测数据,其包含了卫星轨道的径向误差的改正以及卫星钟差的改正。等效钟差的精度受到伪距残余噪声的限制,并且无法包含卫星轨道误差切向和法向分量的影响。为尽量降低伪距观测值噪声的影响,需要采用相位观测数据。而相位观测数据的引入涉及复杂的模糊度参数计算。相位历元间差分能够消除模糊度参数^[20-22],文献^[20-21]采用该方法进行低轨卫星的后处理精密定轨;文献^[22]采用相位历元间差分实时估

计卫星钟差历元间变化及其累加值,同时利用伪距估计钟差的初始偏差,并将该初始偏差加到历元间差分累加值上获取卫星钟差。基于非差伪距数据和相位历元间差分综合的基本思想,本文建立了钟差改正和轨道改正统一处理的广域差分新模型。该模型利用了高精度相位观测值,并新增了轨道改正数。

考虑到现有的用户接收机在不进行协议改造的情况下,只能使用钟差改正数,无法使用轨道改正数。为不影响现有用户的使用,在利用新模型进行广域差分数据处理时,对轨道改正数径向分量进行约束为 0,从而得到的轨道改正数包含了轨道误差在轨道切向和法向的改正,其表示在地固坐标系下为包含三维分量的改正数。同时,钟差改正数仍然包含了轨道改正数的径向分量,与现有等效钟差一致。

1 现有广域差分卫星钟差模型

任意测站对一颗卫星 sat 的无电离层组合伪距、相位观测方程为^[23-25]

$$\left. \begin{aligned} P_i &= \rho(x^{\text{sat}}) + c(\tau_{\text{rec}} - \tau^{\text{sat}}) + (b_{\text{ifb}} - b^{\text{tgd}}) + \\ &\quad mZTD + \zeta \\ L_i &= \rho(x^{\text{sat}}) + c(d\tau_{\text{rec}} - d\tau^{\text{sat}}) + N + \\ &\quad mZTD + \epsilon \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, P_i 、 L_i 分别伪距、相位观测值; ρ 为星地理论距离,受卫星轨道 x^{sat} 误差的影响; i 为频点标识; τ_{rec} 、 τ^{sat} 分别为测站和卫星钟差; b_{ifb} 、 b^{tgd} 分别为测站和卫星伪距的硬件延迟; N 为模糊度参数; m 和 ZTD 为对流层投影函数以及天顶对流层延迟; ζ 、 ϵ 为包含多路径误差等的噪声。

在式(1)中,卫星伪距硬件延迟频间偏差参数 b^{tgd} 的残余误差会被吸收到卫星钟差中,而测站伪距硬件延迟频间偏差参数 b_{ifb} 的残余误差会被吸收到测站钟差参数中。距离测量中的卫星钟差误

差与方向无关,而卫星星历误差对不同用户视线方向投影的影响主要为卫星轨道径向方向,如图 1 所示。图中 R 为卫星距离地心的距离, dR 为轨道径向误差, dR^\perp 为径向垂直方向的轨道误差。从图中可以得出:忽略 dR^\perp 的影响,如果卫星轨道在径向 \vec{R} 方向存在一个偏差 dR ,则该偏差在卫星天底角 z' 视向方向的观测改正量 $dR(z')$ 可以表示为^[26]

$$dR(z') = \cos(z')dR \quad (2)$$

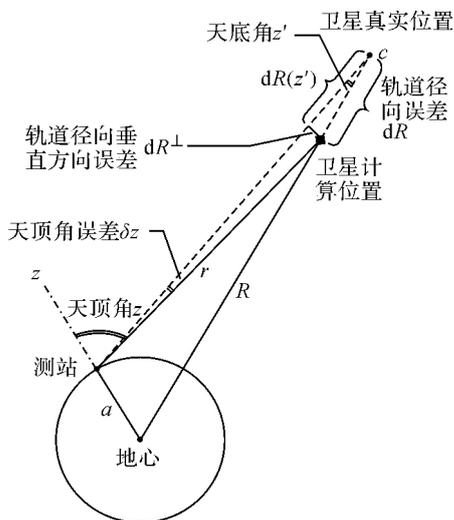


图 1 卫星轨道误差对测站测距影响示意图

Fig.1 The satellite orbit errors impact on the ranging of a station

超过 95% 以上轨道径向误差 dR 会被钟差参数吸收^[27],因此轨道误差对用户定位的影响主要是由于不同视向上观测改正的差值 $\Delta dR(z')$ ^[28]

$$\Delta dR(z') = (1 - \cos z')dR \quad (3)$$

根据卫星星座参数, GPS 卫星最大天底角约为 14° , GLONASS 卫星最大天底角约为 14.3° , 北斗 GEO/IGSO 卫星最大天底角约为 8.7° , 而北斗 MEO 卫星最大天底角约为 13.5° 。从而以上卫星轨道径向误差在不同天底角引起的测距误差占轨道径向误差的比例为 $1.2\% \sim 3.1\%$ 。考虑到目前米级的轨道精度,轨道径向误差在不同方向造成的测距误差在厘米量级。

基于以上讨论,轨道径向误差不同方向造成的测距误差为厘米量级。因此,目前北斗系统采用的广域差分模型忽略了卫星星历在不同方向投影误差的影响,也即式(1)待求参数只为测站钟差以及卫星钟差。由于卫星钟差参数包含了卫星轨道误差在各站视线方向的平均误差,因此被称为

等效钟差。

目前北斗系统采用的广域差分处理中只用到了伪距观测值,首先采用 CNMC 算法,进行伪距数据多路径误差的实时处理。在此基础上利用导航电文中提供的卫星轨道、钟差以及卫星硬件延迟频间偏差参数对相关误差进行修正;对流层的修正采用监测站实测气象参数,结合经验的大气模型进行修正。计算采用双频无电离层组合观测值,固定测站精确坐标以及一个参考站钟,实时获取其他站钟及卫星等效钟差。

2 伪距相位综合的广域差分新模型

2.1 基本模型

等效钟差所采用的计算数据为监测站的伪距观测值,其计算精度受到伪距噪声的影响。虽然 CNMC 能够减小多路径的误差,但是该算法的有效性较大程度上依赖于相位数据的连续性。在相位观测存在新模糊度时, CNMC 需要重新收敛。并且等效钟差模型忽略了轨道在垂直于径向方向的误差影响。图 2 表示了轨道各个方向误差引起的用户测距误差,图中,轨道径向方向对用户测距的影响由式(3)计算。而轨道法向和切向综合方向的误差为 dR^\perp ,其对用户测距的影响 $dR^\perp(z')$ 为

$$dR^\perp(z') = \sin(z')dR^\perp \quad (4)$$

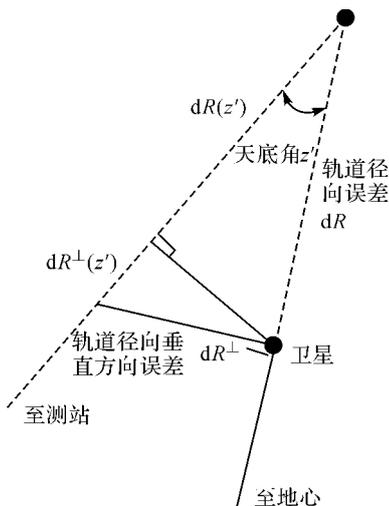


图 2 轨道各分量误差对测站测距影响示意图

Fig.2 Each component of the orbit errors impact on the ranging of a station

测站若位于卫星对地径向方向则测距不受轨道误差 dR^\perp 的影响,而在卫星高度角为 0° 的时候 dR^\perp 的影响达到最大。根据北斗卫星星座参数,

卫星轨道径向垂直方向的误差在不同天底角引起的测距误差占轨道误差 dR^\perp 的比例, GEO/IGSO 卫星最大可达 15%, MEO 卫星最大可达 23%。目前北斗 GEO 卫星轨道切向误差在 8~10 m, 轨道法向误差约为 1~2 m, IGSO/MEO 卫星轨道切向和法向误差均为 1~2 m^[29]。从而轨道法向以及切向的误差在不同视线方向影响较大, 全球范围内 GEO 卫星法向以及切向轨道误差投影差异最大可达到米级, IGSO/MEO 卫星法向以及切向轨道误差投影差异最大可达到分米级。对于更高精度的广域差分定位需求, 需要在广域差分中考虑轨道在除径向外其他方向上的误差。

基于几何法定轨的原理, 定义式(1)待求参数为 $dp = (dx^{\text{sat}}, dy^{\text{sat}}, dz^{\text{sat}}, d\tau_{\text{rec}}, d\tau^{\text{sat}})$ 。以伪距观测值为例, 将式(1)展开为

$$P = \rho^0 + \frac{\partial P(x)}{\partial p} dp + \zeta = \rho^0 - \frac{x^{\text{sat}} - x}{|\mathbf{r}^{\text{sat}} - \mathbf{r}|} dx^{\text{sat}} - \frac{y^{\text{sat}} - y}{|\mathbf{r}^{\text{sat}} - \mathbf{r}|} dy^{\text{sat}} - \frac{z^{\text{sat}} - z}{|\mathbf{r}^{\text{sat}} - \mathbf{r}|} dz^{\text{sat}} + c d\tau_{\text{rec}} - c d\tau^{\text{sat}} + \zeta = \rho^0 + \mathbf{A} dp + \zeta \quad (5)$$

式中, ρ^0 为修正了公共误差的星地几何距离; $(x^{\text{sat}}, y^{\text{sat}}, z^{\text{sat}})$ 为基于广播星历获取的该历元卫星轨道, 而 $\mathbf{r}_i^{\text{sat}}$ 为其矢量; $(dx^{\text{sat}}, dy^{\text{sat}}, dz^{\text{sat}})$ 为待求的轨道改正数; (x, y, z) 为测站的坐标; \mathbf{r} 为其矢量; $d\tau_{\text{rec}}, d\tau^{\text{sat}}$ 分别为测站、卫星钟差改正数; \mathbf{A} 为系数阵。

2.2 相位历元间差分模型

为提高广域差分参数求取的精度, 需要在伪距观测值处理的基础上增加相位观测值。式(1)中的相位观测值处理包含了模糊度参数。在实时逐历元处理模式下, 模糊度参数的存在将造成实时差分参数存在较长时间的收敛过程; 此外在出现数据中断或者周跳的情况下, 模糊度参数需要重新收敛。

对式(1)相邻历元 t_i, t_{i-1} 的相位观测值作差分

$$\Delta L(t_{i-1}, t_i) = \Delta \rho(x_{i-1}^{\text{sat}}, x_i^{\text{sat}}) + c(\Delta \tau_{\text{rec}} - \Delta \tau^{\text{sat}}) + \Delta m \cdot \text{ZTD} + \Delta \epsilon \quad (6)$$

式中, Δ 为差分算子。可以看到历元间差分后, 在没有周跳的情况下, 模糊度得到了消除; 历元间对流层延迟的差异体现在投影函数的差异上, 在轨道改正数更新的周期内(一般为 6 min)该项影响

可忽略。式(6)中的待求参数包括卫星轨道、钟差改正数以及测站钟差改正数, 由于没有模糊度参数, 因此以上方程解算不存在收敛性的问题。并且在相位数据丢失或者发生周跳的情况下, 只影响当前历元相位历元间差分数据的处理, 不影响后续连续历元。

定义 $p = (p_i, p_{i-1})$ 为式(6)的待求参数, 应用最小二乘, 在 p_0 处将式(6)写成误差方程的形式

$$\Delta L(t_{i-1}, t_i) - \Delta L^0(t_{i-1}, t_i) = \mathbf{A}_i dp_i - \mathbf{A}_{i-1} dp_{i-1} \quad (7)$$

式中, $\mathbf{A}_i, \mathbf{A}_{i-1}$ 为 t_i, t_{i-1} 的系数矩阵。定义 $d\Delta p_i = dp_i - dp_{i-1}$ 为轨道和钟差参数在历元间的变化, 同时定义 $l = \Delta L(t_{i-1}, t_i) - \Delta L^0(t_{i-1}, t_i)$, 则式(7)可以重新写为

$$\mathbf{A}_i d\Delta p_i - \delta \mathbf{A}_i dp_{i-1} = l \quad (8)$$

式中, $\delta \mathbf{A}_i = \mathbf{A}_i - \mathbf{A}_{i-1}$, $-\delta \mathbf{A}_i$ 中钟差改正数的对应系数为 0。轨道改正数对应系数与历元间隔以及卫星运动速度有关, 根据文献[21]的分析, 忽略

$\delta \mathbf{A}_i dp_{i-1}$ 引起的最大误差约为 $\sqrt{\frac{3}{2}} dp_{i-1} d\theta$, 其中

$d\theta$ 为卫星运动弧段相对地面的角度变化。北斗导航卫星的最大运动速度小于 4 km/s, 在采用间隔为 20 s, 基于目前轨道精度, 忽略 $\delta \mathbf{A}_i \cdot dp_{i-1}$ 产生的误差不超过 1 cm。因此, 对于轨道和钟差改正参数的求取, 式(8)中的 $\delta \mathbf{A}_i \cdot dp_{i-1}$ 项可忽略, 式(8)可重新写为

$$\mathbf{A}_i d\Delta p_i = l \quad (9)$$

以上即为基于相位历元间差分的广域差分改正数模型。模型采用了高精度的相位观测值, 消除了模糊度参数, 简化了相位观测数据处理的复杂度, 提高了广域差分改正数解算的精度。

2.3 伪距相位综合的广域差分改正数

利用式(9)计算的是历元间轨道、钟差改正数的变化量。基于伪距观测值利用式(5)解算的是卫星轨道、钟差改正数的绝对值。在卫星轨道、钟差历元间变化结果中, 只要已知其中任意一个历元的绝对值, 所有与该历元一起形成连续观测的卫星轨道、卫星钟差也被确定, 这在测量平差领域就归结为基准问题。

将历元 t_i 基于伪距的卫星轨道、钟差为 $x_{c,i}$ 作为实际参数的虚拟观测值

$$\hat{x}_i - x_{c,i} = v_{c,i} \quad (10)$$

式中, \hat{x}_i 为历元 t_i 参数的真实值; $v_{c,i}$ 为残差。

定义历元 t_i 基于相位的卫星轨道、钟差变化为 $x_{\phi,i} - x_{\phi,i-1}$, 将其也作为虚拟观测值, 可写为

$$(\hat{x}_i - \hat{x}_{i-1}) - (x_{\phi,i} - x_{\phi,i-1}) = v_{\Delta\phi,i} \quad (11)$$

式中, \hat{x}_i, \hat{x}_{i-1} 为历元 t_i, t_{i-1} 参数的真实值; $v_{\Delta\phi,i}$ 为残差。

以每个历元的方差阵 P_i 作为权阵, 伪距相位权重比取 1 : 2000。对处理弧段的所有 n 个历元叠加, 式(10)写为法方程的形式为

$$E^T P_c E \hat{x} = E^T P_c x_c \quad (12)$$

式中, E 为单位阵。式(11)写为法方程的形式

$$C^T P_\phi C \hat{x} = C^T P_\phi \Delta x_\phi \quad (13)$$

式中, C 为式(11)对应的系数阵

$$C = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & 1 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (14)$$

式中, P_c 和 P_ϕ 为伪距和相位的分块权矩阵, 且有

$$\begin{aligned} \hat{x} &= [\hat{x}_1 \quad \hat{x}_2 \quad \cdots \quad \hat{x}_n]^T \\ x_c &= [x_{c,1} \quad x_{c,2} \quad \cdots \quad x_{c,n}]^T \\ \Delta x_\phi &= [x_{\phi,2} - x_{\phi,1} \quad x_{\phi,3} - x_{\phi,2} \quad \cdots \quad x_{\phi,n} - x_{\phi,n-1}]^T \end{aligned} \quad (15)$$

联合式(12)、(13)就可以得到基于伪距相位综合的卫星轨道、钟差改正数, 并且实现轨道改正、钟差改正的分离。在实时系统连续处理时, 可采用实时滑动窗口的处理模式, 即每次处理采用固定弧长的数据, 每来一个新数据原弧段内最早的一个数据将被剔除。

以上钟差改正数的使用方式与现有等效钟差一致, 而用户对于新增轨道改正数的使用需要更新其接收协议, 并且轨道改正数需与钟差改正数叠加使用。现有的用户接收机在不进行协议改造的情况下, 无法使用轨道改正数, 只能使用钟差改正数, 在此情况下, 为不影响现有用户的改正效果, 钟差改正数仍然需要包含轨道改正数中径向分量。因此以上数据处理中, 对轨道改正数径向分量增加值为 0 的约束。在此基础上, 计算得到的钟差改正数包含了轨道改正径向分量, 与现有等效钟差一致; 而表示在地固坐标系下包含三维分量的轨道改正数, 则仅包含轨道误差的轨道切向和法向的改正。

3 模型分析

选用 2016-04-08—2016-04-17 10 d 的北斗观

测数据, 对以上广域差分新模型进行分析验证。按照北斗广域差分信息播发协议, 轨道改正数的计算频度为 6 min, 钟差改正数的计算频度为 18 s^[30]。以下分别从观测数据采样率、监测站个数等方面对新模型进行分析。参与计算验证的测站分布如图 3 所示, 其中不同颜色的测站用于 3.3 节验证测站个数对模型参数的影响。所选测站坐标已精密测定, 位置精度优于 5 cm, 可以作为准确值用于评估区域卫星导航系统的定位误差。

3.1 改正数结果

图 4 表示了 2016-04-08 采用图 3 红色 7 个测站数据计算的 3 号、7 号卫星差分改正数结果时间序列。上部子图中红色曲线为伪距数据解算的等效卫星钟差结果, 蓝色曲线为综合伪距相位数据解算的卫星钟差结果, 下部子图为新模型中解算的卫星轨道改正数。可看到伪距解算的等效钟差结果包含了伪距噪声, 而伪距相位综合解算的等效钟差更为平滑, 减少了伪距噪声的影响。图 4 也可以看到, 在广播星历更新的时候, 卫星钟差会发生分米级甚至米级的跳变, 这是由于相邻的两条卫星广播星历轨道、钟差预报误差跳变引起的; 而卫星的轨道误差改正数变化较为平稳, 在广播星历更新后变化较小。同时, IGSO、MEO 移动卫星在出入境时, 受到观测几何条件的影响, 轨道误差改正数会出现较大的噪声。

3.2 采样率对改正数精度的影响分析

北斗广域差分系统采用的观测数据为 1 Hz 的高频数据, 每秒计算一组等效钟差改正数, 在此基础上按照北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件 ICD(interface control document)的规定每 18 s 播发一次。基于论文提出的广域差分新模型, 数据处理增加了相位观测数据的处理以及伪距相位结果的综合, 因此大大增加了数据处理的计算量。为保证数据处理实时性的冗余, 需要将处理的频度降低为每 3 s 处理一次。测站采样率的不同将造成数据量的差异, 从而可能对改正数的改正效果产生影响, 因而需要评估不同采样率数据对广域差分改正数解算精度的影响。

采用用户差分距离误差 UDRE(user differential ranging error)对星基增强系统空间信号的精度进行评估。UDRE 计算公式^[25]为

$$UDRE = P - \rho - c(\tau_{rec} - \tau^{sat}) - corr - \delta_{SBAS} \quad (16)$$

式中, P 为伪距观测值; ρ 为几何距离; τ_{rec} 、 τ^{sat} 分别为测站和卫星钟差, corr 为公共误差, 包含对流层延迟、电离层延迟及卫星和接收机硬件延迟等, 对流层延迟使用测站实测气象数据和经验模型进行估计, 电离层延迟利用双频数据组合消除, 卫星和接收机硬件延迟利用北斗给出的 DCB 参数进行消除; δ_{SBAS} 为星基改正数信息。通常对不同历元的 UDRE 进行 RMS 统计, 反映系统空间信号的精度, 其值越小则表示系统精度越高。

采用图 3 红色 7 个测站数据分析采样率对改正数解算精度的影响。测站数据采样率分别设为 1 s、3 s、10 s 和 20 s。图 5 为采用 CNMC 的伪距观测值在不同采样率情况下新广域差分模型下卫星差分距离误差 UDRE 的 RMS 统计结果。

通过图 5 的比较分析, 可以看到卫星 UDRE 的 RMS 随采样率的变大而增大。当采样率在 1 s、3 s、10 s 和 20 s 时的卫星 UDRE 的 RMS 统计值分别是 0.420 m、0.422 m、0.422 m、0.447 m。可看到当采样率在 10 s 以内时, 与采样率为 1 s 时的 UDRE 相比变化不大; 从而将采样率调整为 3 s 既满足了系统处理时效的要求, 同时基本上不影响参数求取的精度。图 5 中, 当数据采样率在 20 s 时, 解算的差分改正数的改正精度增大了约 2.5 cm, 这主要是受到采样数据量减少的影响。

3.3 监测站个数对改正数精度的影响分析

广域差分改正数的计算中, 测站分布也是影响参数计算精度的一个因素。以下分别采用 7 个、14 个、21 个测站计算广域差分改正数。测站分布如图 3 所示; 其中 7 个测站为红色测站, 基本上实现了的中国服务区域的整体覆盖; 14 个测站的情况采用了红色和蓝色测站, 在 7 个站的基础上主要在西南以及北部方向进行了补充; 21 个测站则包含了图中所有测站, 主要在中部以及南海进行了补充。以上测站网络中, 随着测站个数增加以及观测网络的扩大, 移动卫星的跟踪弧段也相应得到了延长, 从而广域差分系统中相应卫星的可用差分服务时间也得到了增加。

图 6 统计了使用不同测站网络进行广域差分各颗卫星 UDRE 的 RMS 统计。在以上观测网络下, 北斗卫星 UDRE 的 RMS 平均值基本一致, 分别为 0.449 m、0.485 m、0.442 m。文中的 7 个站是目前系统观测数据最好的测站(I 类), 其他测站为 II 类测站。不同类别的测站设备的要求不同, 目前 II 类站的数据质量普遍低于 I 类站。

14 个站的统计结果比 7 个站略差的原因是有 3 个 II 类站的数据质量较差, 从而导致了卫星的 UDRE 稍微偏大。在采用 21 个站的情况下也有个别星的结果变差, 这也是由于测站数据质量的原因。以上结果表明: 在相同覆盖范围的情况下, 测站个数的增加对于广域差分服务精度影响不大。不过从系统服务来说, 测站网络的增加对于广域差分系统的作用在于扩展差分服务的时间, 增加了观测数据, 从而能够提高服务的可靠性以及稳健性。

4 综合伪距相位观测的广域差分服务精度分析

4.1 系统空间信号精度

为分析伪距相位观测综合的广域差分新模型的精度, 首先比较现有基于伪距等效钟差模型以及新模型广域差分系统的卫星 UDRE 的结果, 如图 7 所示。

图 7 中, 卫星编号 1—5 为 GEO 卫星, 6—10 为 IGSO 卫星, 11—14 为 MEO 卫星; 模型 1 代表等效钟差模型, 模型 2 代表综合伪距相位的新模型。对于 GEO 卫星, 模型 1 平均 UDRE 为 0.48 m, 模型 2 平均 UDRE 为 0.35 m, 提高百分比为 27%; 对于 IGSO 卫星, 模型 1 平均 UDRE 为 0.56 m, 模型 2 平均 UDRE 为 0.36 m, 提高百分比为 35%; 对于 MEO 卫星, 模型 1 平均 UDRE 为 0.69 m, 模型 2 平均 UDRE 为 0.52 m, 提高百分比为 24%。

MEO 移动卫星的 UDRE 结果较大, 原因是 MEO 卫星入境弧度过短, 入境过程中 CNMC 伪距中残余的多路径误差以及出入境时几何构型差影响了差分改正数的精度。以上结果表明综合伪距相位的广域差分模型能显著改善卫星 UDRE。

4.2 用户实时动态定位

基于以上分析的结果, 利用 2016-04-08—2016-04-17 10 d 的实测数据进行伪距相位综合的广域差分新模型下系统的服务精度的评估。比较了基于伪距等效钟差模型以及新模型的广域差分服务系统, 测站伪距双频动态定位的结果。在定位计算中, 观测数据使用了 CNMC 平滑的双频伪距无电离层组合值, 对流层、固体潮、相对论、卫星和接收机天线相位中心改正等采用模型计算扣除, 采用逐历元实时动态的策略进行用户最小二乘定位解算。

统计动态坐标与精确坐标的差异, 图 8 表示

了中国国土范围内 8 个测站在测站站心地平坐标系中东西、南北及高程方向的定位精度 (RMS)。模型 1 代表等效钟差模型,模型 2 代表综合伪距相位的广域差分新模型。

图 8 中,3 个子图分别显示了不同测站在南北、东西、高程方向 10 d 定位结果的统计情况。两种差分服务下用户定位三维精度分别达到了 1.17 m 和 0.85 m。对于不同测站,增强服务下模型 2 相对于模型 1,用户定位精度在南北、东西,特别是高程方向都得到了显著提高。根据表 1 中不同测站的定位统计结果,基于本文提出的新广域差分模型,双频用户伪距定位在南北、东西、高程方向的定位精度分别提升了 23%、32% 和 52%。测站三维定位精度由 1.17 m 提升到 0.85 m,提

高 27%。

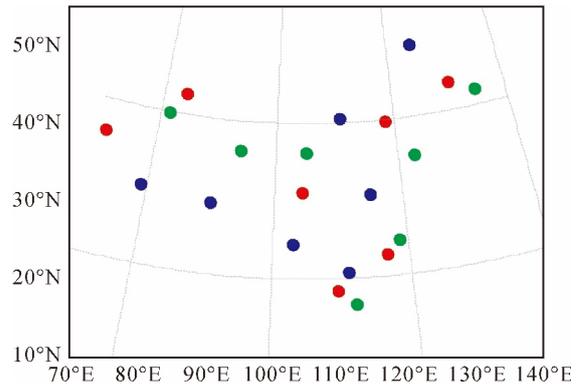


图 3 选取的北斗观测站分布

Fig.3 Distribution of the selected BeiDou observation stations

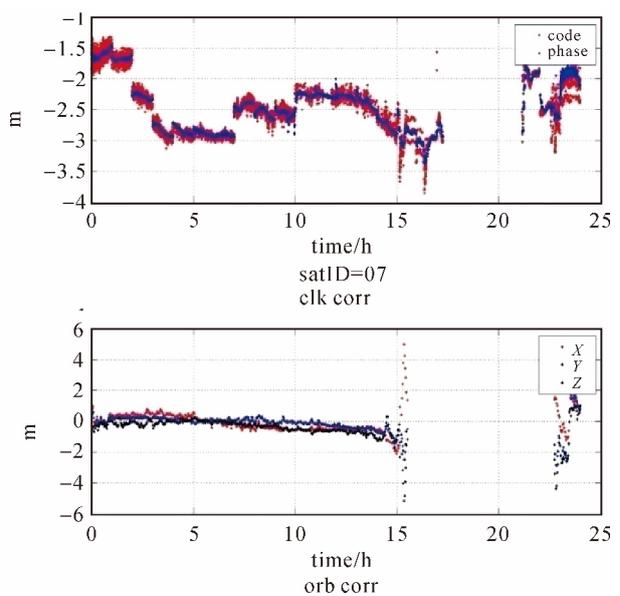
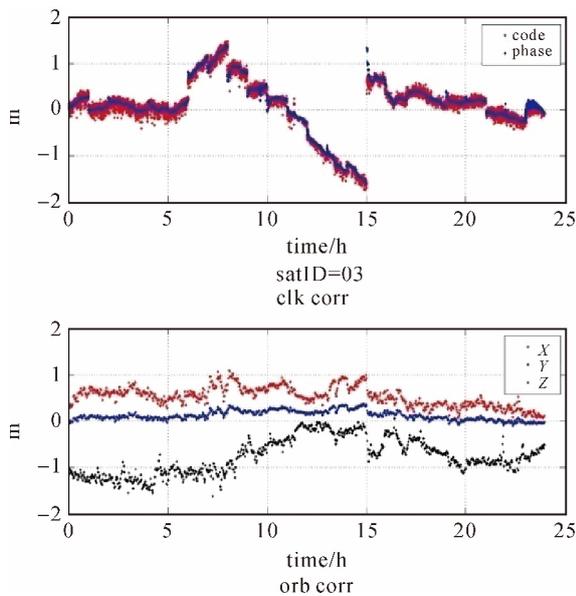


图 4 3 号、7 号卫星差分改正数时间序列图

Fig.4 Differential corrections of C03 and C07

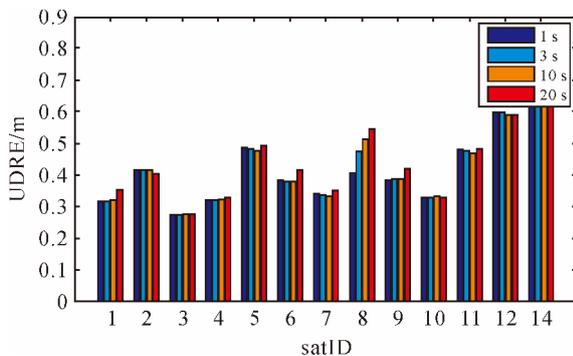


图 5 不同数据采样率北斗卫星 UDRE 的 RMS 统计图
Fig.5 BeiDou satellite UDRE results with different data sample rate

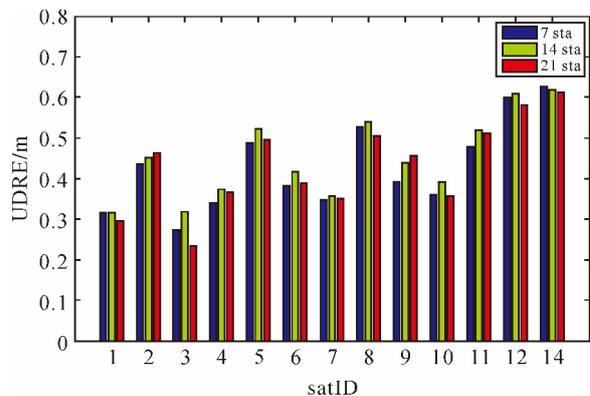


图 6 不同测站个数分布北斗卫星 UDRE 统计图
Fig.6 BeiDou satellite UDRE results with different station numbers

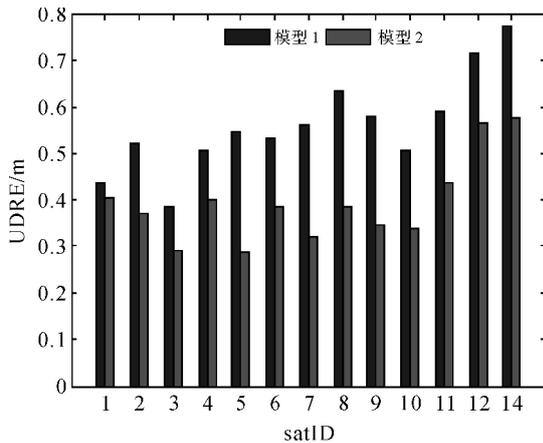


图7 2016-04-08—2016-04-17 各颗卫星 UDRE 结果统计
Fig.7 BeiDou satellite UDRE results during 2016-04-08—2016-04-17

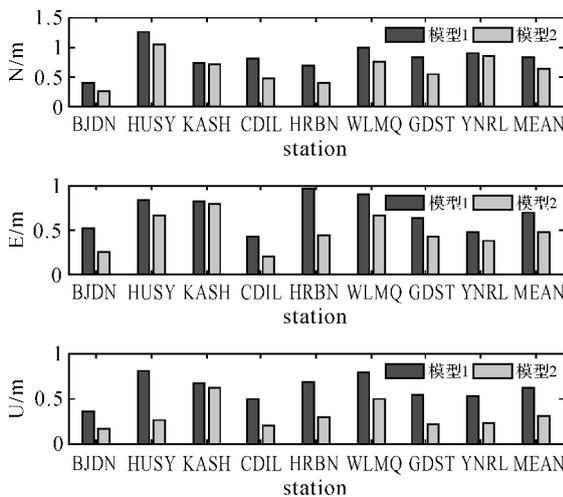


图8 2016-04-08—2016-04-17 用户站差分服务下定位结果统计
Fig.8 SPP results of two differential models for user stations during 2016-04-08—2016-04-17

表1 用户站两种差分模型定位平均结果统计

Tab.1 SPP results of two differential models of user stations in North, East and Up component m

模型	N	E	U	3D
模型1	0.82	0.69	0.65	1.17
模型2	0.63	0.47	0.31	0.85
提升比率/(%)	23	32	52	27

5 结论

本文首先介绍了等效钟差的计算模型,并从采用的观测数据精度以及改正数参数形式两方面对其进行提升。首先,数据处理引入了更高精度

相位观测数据。考虑到相位观测数据的模糊度参数处理复杂,直接使用将大大增加实时处理系统设计的复杂性;本文利用相位历元间差分数据,通过历元间差分消除了模糊度参数,简化了处理的复杂性。其次,新模型还增加了轨道改正数的计算,用于改正目前等效模型中没有考虑的轨道切向和法向分量上的误差。

论文阐述了广域差分新模型的详细模型,并从数据采样率、监测站个数分布等角度对模型进行了分析。最后利用北斗的实测数据对该模型进行了精度测试,得到以下结论:

(1) 当数据采样率在 1 s、3 s、10 s 和 20 s 的时候,随着数据采样率的增加,卫星 UDRE 基本上随采样率的变大而增大,当采样率小于 10 s 时,UDRE 基本没影响;选取分布较为均匀的测站,用少量的测站就可以实现星基增强的效果。

(2) 利用相位历元间差分数据和伪距数据,综合解算差分改正数,提高了差分信息的解算精度。对于 GEO 卫星,卫星 UDRE 提高百分比为 27%,对于 IGSO 卫星,提高百分比为 35%,对于 MEO 卫星,提高百分比为 24%。

(3) 采用新模型得到的广域差分改正数显著改善了用户定位精度。南北、东西、高程方向的定位精度分别提升了 23%、32%和 52%。测站三维定位精度提高了 27%。

参考文献:

[1] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 1-6.
YANG Yuanxi. Progress, Contribution and Challenges of Compass/BeiDou Satellite Navigation System [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(1): 1-6.

[2] 杨元喜, 李金龙, 王爱兵, 等. 北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(1): 72-81.
YANG Yuanxi, LI Jinlong, WANG Aibing, et al. Preliminary Assessment of the Navigation and Positioning Performance of BeiDou Regional Navigation Satellite System [J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(1): 144-152.

[3] 胡志刚. 北斗卫星导航系统性能评估理论与试验验证[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
HU Zhigang. BeiDou Navigation Satellite System Performance Assessment Theory and Experimental Verification [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.

[4] 北斗卫星导航系统简介[EB/OL]. http://www.beidou.gov.cn/xtjs.html.
BeiDou Satellite Navigation System [EB/OL]. http://

- www.beidou.gov.cn/xtjs.html.
- [5] ZHOU Shanshi, HU Xiaogong, WU Bin, et al. Orbit Determination and Time Synchronization for a GEO/IGSO Satellite Navigation Constellation with Regional Tracking Network [J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2011, 54(6): 1089-1097.
- [6] 施闯, 赵齐乐, 李敏, 等. 北斗卫星导航系统的精密定轨与定位研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(6): 854-861.
SHI Chuang, ZHAO Qile, LI Min, et al. Precise Orbit Determination of BeiDou Satellites with Precise Positioning [J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(7): 1079-1086.
- [7] 刘伟平, 郝金明, 李建文, 等. 多 GNSS 融合的北斗卫星精密定轨[J]. 测绘学报, 2014, 43(11): 1132-1138. DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0186.
LIU Weiping, HAO Jinming, LI Jianwen, et al. Multi-GNSS Joint Precise Orbit Determination of BeiDou Navigation Satellite System [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(11): 1132-1138. DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0186.
- [8] 雷辉, 李志刚, 杨旭海, 等. 基于转发式的北斗卫星导航系统地球静止轨道卫星精密定轨试验[J]. 测绘学报, 2011, 40(S): 31-33.
LEI Hui, LI Zhigang, YANG Xuhai, et al. Precise Orbit Determination Experiment of Compass-GEO Based on Transponder Ranging [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(S): 31-33.
- [9] 耿涛, 刘经南, 赵齐乐, 等. 星地监测网下的北斗导航卫星轨道确定[J]. 测绘学报, 2011, 40(S): 46-51.
GENG Tao, LIU Jingnan, ZHAO Qile, et al. Compass Precise Orbit Determination Based on Space-ground Monitoring Network [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(S): 46-51.
- [10] 刘伟平, 郝金明, 田英国, 等. 北斗卫星导航系统双差动力法精密定轨及其精度分析[J]. 测绘学报, 2016, 45(2): 131-139. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20150190.
LIU Weiping, HAO Jinming, TIAN Yingguo, et al. Solution Method and Precise Analysis of Double-difference Dynamic Precise Orbit Determination of BeiDou Navigation Satellite System [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(2): 131-139. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20150190.
- [11] 陈良, 耿长江, 周泉. 北斗/GPS 实时精密卫星钟差融合解算模型及精度分析[J]. 测绘学报, 2016, 45(9): 1028-1034. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20150296.
CHEN Liang, GENG Changjiang, ZHOU Quan. Estimation Model and Accuracy Analysis of BeiDou/GPS Real-time Precise Satellite Clock Error Integrated Resolving [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(9): 1028-1034. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20150296.
- [12] 陈俊勇, 刘经南, 张燕平, 等. 分布式广域差分 GPS 实时定位系统[J]. 测绘学报, 1998, 27(1): 1-8.
CHEN Junyong, LIU Jingnan, ZHANG Yanping, et al. On Distributed Wide Area Differential GPS Real Time Kinematic Positioning System [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1998, 27(1): 1-8.
- [13] 邢楠. 广域差分技术在 COMPASS 系统定位服务中的应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
XING Nan. Research on the Application of Wide Area Differential Technique to Compass System [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [14] CAO Yueling, HU Xiaogong, ZHOU Jianhua, et al. Kinematic Wide Area Differential Corrections for Beidou Regional System Basing on Two-way Time Synchronization [C]// SUN J, JIAO W, WU H, et al. Proceedings of China Satellite Navigation Conference (CSNC). Berlin: Springer, 2014: 277-288.
- [15] CAO Yueling, HU Xiaogong, WU Bin, et al. The Wide-area Difference System for the Regional Satellite Navigation System of Compass [J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2012, 55(7): 1307-1315.
- [16] WU Xiaoli, ZHOU Jianhua, TANG Bo, et al. Evaluation of Compass Ionospheric Grid [J]. GPS Solutions, 2014, 18(4): 639-649.
- [17] WU Xiaoli, HU Xiaogong, WANG Gang, et al. Evaluation of Compass Ionospheric Model in GNSS Positioning [J]. Advances in Space Research, 2013, 51(6): 959-968.
- [18] WU Xiaoli, ZHOU Jianhua, GANG Wang, et al. Multipath Error Detection and Correction for GEO/IGSO Satellites [J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2012, 55(7): 1297-1306.
- [19] 常志巧, 胡小工, 郭睿, 等. CNMC 与 Hatch 滤波方法比较及其在北斗相对定位中的精度分析[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45(7): 079508.
CHANG Zhiqiao, HU Xiaogong, GUO Rui, et al. Comparison between CNMC and Hatch Filter & Its Precision Analysis for BDS Precise Relative Positioning [J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2015, 45(7): 079508.
- [20] BOCK H. Efficient Methods for Determining Precise Orbits of Low Earth Orbiters Using the Global Positioning System [D]. Berne: Astronomical Institute, University of Berne, 2003.
- [21] 陈俊平. 低轨卫星精密定轨研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
CHEN Junping. On Precise Orbit Determination of Low Earth Orbiters [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [22] GE Maorong, CHEN Junping, DOUŠA J, et al. A Computationally Efficient Approach for Estimating High-rate Satellite Clock Corrections in Realtime [J]. GPS Solutions, 2012, 16(1): 9-17.
- [23] TSAI Y J. Wide Area Differential Operation of the Global Positioning System: Ephemeris and Clock Algorithms [D].

- Palo Alto, CA: Stanford University, 1999.
- [24] 陈刘成, 胡小工, 封欣, 等. 区域导航系统实时广域差分修正模型与方法[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2010(1): 45-53.
- CHEN Liucheng, HU Xiaogong, FENG Xin, et al. The Models and Arithmetic for WADS Real-time Corrections of Regional Satellite Navigation System[J]. Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica, 2010(1): 45-53.
- [25] 曹月玲. BeiDou 区域导航系统广域差分及完好性监测研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- CAO Yueling. Studies on The Wide-Area Differential Correction and Integrity Monitoring for the Regional Satellite Navigation System of BeiDou [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [26] ZHU S Y, MASSMANN F H, YU Y, et al. Satellite Antenna Phase Center Offsets and Scale Errors in GPS Solutions[J]. Journal of Geodesy, 2003, 76(11-12): 668-672.
- [27] GE M, GENDT G, DICK G, et al. Impact of GPS Satellite Antenna Offsets on Scale Changes in Global Network Solutions[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(6). DOI: 10.1029/2004GL022224.
- [28] SCHMID R, STEIGENBERGER P, GENDT G, et al. Generation of a Consistent Absolute Phase-center Correction Model for GPS Receiver and Satellite Antennas [J]. Journal of Geodesy, 2007, 81(12): 781-798.
- [29] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, HAUSCHILD A. Broadcast Versus Precise Ephemerides: A Multi-GNSS Perspective[J]. GPS Solutions, 2015, 19(2): 321-333.
- [30] 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开服务信号(2.0版)[R]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2013.
- China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Open Service Signal (Version 2.0)[R]. Beijing: China Satellite Navigation Office, 2013.

(责任编辑: 宋启凡)

收稿日期: 2016-06-15

修回日期: 2017-03-27

第一作者简介: 陈俊平(1980—), 男, 研究员, 研究方向为卫星大地测量。

First author: CHEN Junping (1980—), male, professor, majors in satellite Geodesy.

E-mail: junping@shao.ac.cn

通信作者: 周建华

Corresponding author: ZHOU Jianhua

E-mail: julianma@263.net.cn

欢迎订阅《测绘学报》

《测绘学报》创刊于1957年,是由中国科协主管、中国测绘地理信息学会主办、《测绘学报》编辑部编辑、测绘出版社出版的反映我国测绘地理信息科学技术发展水平的综合性学术刊物,影响因子和被引频次居中文核心期刊测绘地理信息类前列,是美国《工程索引》(Ei)核心期刊,曾荣获百种中国杰出学术期刊、中国精品科技期刊、中国国际影响力优秀学术期刊、全国优秀测绘期刊等称号,连续多年入选中国科协精品科技期刊工程项目,并被国内外多个重要数据库收录,是我国测绘地理信息科学领域具有重要影响力的学术期刊。

《测绘学报》着重报道我国测绘地理信息科技最新的重要研究成果及其应用,内容涉及大地测量与导航、工程测量、摄影测量与遥感、地图学与地理信息、矿山测量、海洋测绘、地籍测绘、地图印刷、测绘仪器、信息传输等测绘地理信息学科及其相关相邻学科。

《测绘学报》设有快报论文、学术论文、博士论文摘要等栏目。

《测绘学报》(月刊)2017年定价:40.00元/期,邮发代号:2-224。

编辑部地址:北京市西城区三里河路50号,邮编:100045,订阅电话:010-68531192(金老师),010-68531317(传真)。

网址: <http://xb.sinomaps.com>