

引文格式:陈俊平,张益泽,周建华,等.分区综合改正:服务于北斗分米级星基增强系统的差分改正模型[J].测绘学报,2018,47(9):1161-1170. DOI:10.11947/j.AGCS.2018.20170156.
CHEN Junping, ZHANG Yize, ZHOU Jianhua, et al. Zone Correction: A SBAS Differential Correction Model for BDS Decimeter-level Positioning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(9): 1161-1170. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170156.

分区综合改正:服务于北斗分米级星基增强系统的差分改正模型

陈俊平^{1,2,3},张益泽¹,周建华⁴,杨赛男^{1,2},胡一帆¹,陈 倩^{1,2}

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. 中国科学院上海天文台上海市空间导航与定位技术重点实验室,上海 200030; 4. 北京卫星导航中心,北京 100094

Zone Correction: A SBAS Differential Correction Model for BDS Decimeter-level Positioning

CHEN Junping^{1,2,3}, ZHANG Yize¹, ZHOU Jianhua⁴, YANG Sainan^{1,2}, HU Yifan¹, CHEN Qian^{1,2}

1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 4. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China

Abstract: To support the requirement of decimeter-level BDS SBAS service, a type of differential correction, the “zone correction”, is developed. It represents the remaining un-modeled errors of pseudo-range and carrier phase observations, and could be encoded into the current broadcast messages. The zone correction is derived using observations of reference stations, where their coordinates are precisely known. Users receiving the broadcast zone corrections covering its region, use them to correct the observations, thus the observation modeling errors are reduced and positioning accuracy can be improved. It is analyzed that the impact of parameter updating rates and the distance between users and the zone center on the user positioning accuracy. Data of the BDS tracking network in the China continent is used to validate the proposed model. Results show that mean positioning accuracy reaches 15 cm and 20 cm for horizontal and height components, respectively.

Key words: satellite based augmentation system; phase observation; zone correction; BDS

Foundation support: The National High-tech Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2014AA123102); The National Natural Science Foundation of China (Nos. 11673050; 11273046)

摘 要: 针对分米级星基增强服务的需求,提出一种满足用户基于相位观测值进行单站定位的分区综合改正模型。该模型利用参考站网的观测数据,实时计算参考站对每颗卫星伪距和相位观测值的综合改正数,并将综合改正数按照分区的方式编排到广播电文并广播给用户使用。本文介绍了模型的原理,并分析了参数播发频度、用户站与分区中心距离等因素对用户定位的影响。建立基于分区综合改正数的星基增强数据处理系统,采用分布于中国不同区域的北斗观测站数据对系统性能进行评估。结果表明,双频用户动态定位平均 10 min 内收敛至误差小于 1 m,平均平面精度能达到 15 cm,高程精度达到 20 cm。

关键词: 星基增强系统; 相位观测值; 分区综合改正数; 北斗导航系统

中图分类号: P228

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2018)09-1161-10

基金项目: 国家 863 计划(2014AA123102); 国家自然科学基金(11673050; 11273046)

卫星导航系统提供的基本导航定位服务已经 广泛应用于日常生活,满足精度为米级的定位需

求。随着用户需求的提高,越来越多的用户要求更高精度的定位服务。为提高卫星导航系统的服务能力,不同国家在 GPS 或者 GLONASS 基本导航服务的基础上发展了星基增强系统。这些系统包括美国的 WAAS(wide area augmentation system)系统,欧洲的 EGNOS(European geostationary navigation overlay Service)系统,日本的 MSAS (multi-functional satellite augmentation system)系统及俄罗斯的 SDCM (system for differential corrections and monitoring)系统等^[1-4]。这些系统独立于 GPS 或 GLONASS 的运行控制系统,基于地面测站的观测数据计算各种差分改正数,用于改正导航电文中的误差。在此基础上利用导航系统星座之外的通信卫星进行改正数的播发,从而实现对用户的增强服务。

北斗卫星导航系统采用了不同于 GPS 等系统的独特设计,除了采用更适用于区域服务的地球静止轨道卫星(geosynchronous orbit,GEO)和倾斜地球同步轨道卫星(inclined geosynchronous satellite orbit,IGSO),联合中高轨卫星(medium earth orbit,MEO)的星座设计外^[5-8],在系统设计层面就统一考虑了开放服务(即基本导航服务)和广域差分服务^[9-12]。

北斗现有广域差分参数主要是等效钟差改正数和格网电离层改正数,其中,等效钟差除了包含卫星钟差改正之外还包含了卫星轨道的径向误差改正^[9-10]。基于北斗现有的广域差分增强参数,用户只能采用伪距观测值进行星基增强定位。考虑到国际竞争的加剧以及系统更高的服务性能的需求,北斗系统开通服务之后,系统持续进行了空间信号精度提升以及分米级星基增强系统的研究工作。其中,空间信号精度提升不对电文格式进行变动,通过提高电文参数的精度来提升系统的性能^[13-14];分米级星基增强系统则在空间信号性能提升的基础上,通过新增星基增强参数,实现用户定位精度的进一步提升。为实现以上分米级星基增强的要求,本文提出了一种适应于基于相位观测值进行单站定位的分区综合改正数模型。首先按照参考站的分布,将北斗重点服务区域划分为若干个分区;其次,在每个分区,利用分区内参考站的伪距/相位观测值,计算该分区每个参考站对每颗卫星的综合改正数,并进行分区内多站综合改正数的归算,获取每个分区对每颗卫星的综合改正数;最后,利用星地链路、地面网等方式将

综合改正数对用户进行广播。在用户端,用户接收其所在分区的伪距/相位综合改正数用于改正其对应的观测值,在此基础上采用精密单点定位的方法,实现实时分米级定位。

本文首先介绍了基于单个参考站的综合改正数模型,在此基础上将其拓展到多参考站的模型,并分析了参数播发频度、用户站与分区中心距离等因素对用户定位的影响;建立了基于分区综合改正数的星基增强数据处理系统,采用分布于中国不同区域的北斗观测站数据对模型的性能进行了验证。

1 单参考站综合改正数模型

1.1 基本原理

导航卫星的观测值包括伪距和相位。与伪距观测值相比,相位观测值的精度高约 2 个量级,但是其存在未知的整周模糊度。实时精密单点定位处理模式下,相位模糊度参数存在较长的收敛时间,在数据中断或者周跳的情况下,模糊度需要重新收敛。考虑到以上相位数据处理的复杂性,星基增强系统通常采用伪距观测值计算增强改正数^[9,11]。在使用现有星基增强参数的条件下,用户如果采用相位观测数据,由于增强参数精度不高,会造成相位观测值中模糊度参数的解算精度不高,这将导致定位不收敛或者收敛时间长。因此,目前星基增强用户采用的观测值仍然为伪距观测值,而其精度只能达到米级的水平^[15-17]。为实现用户采用星基增强参数以及相位观测值进行定位,需要进一步精化系统播发参数的模型误差。

任意历元参考站 i 对卫星 j 在频点 f 的伪距、相位观测值为

$$\left. \begin{aligned} P_i^j(f) &= \rho_i^j + c(dt_i - dt^j) + I_i^j(f) + \text{STD}_i^j + \delta_i^j \\ L_i^j(f) &= \rho_i^j + c(dt_i - dt^j) + N_i^j(f) - I_j^j(f) + \\ &\quad \text{STD}_i^j + \nu_i^j \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $P_i^j(f)$ 、 $L_i^j(f)$ 分别为接收机观测的伪距、相位观测值; f 为频点标识; ρ_i^j 为卫星位置与接收机位置两点间的理论几何距离; c 为光速; dt_i 、 dt^j 分别为未知的测站和卫星钟差; $N_i^j(f)$ 为相位观测值的模糊度; $I_i^j(f)$ 为与频率有关的电离层延迟改正; STD_i^j 为基于理论模型的对流层斜路径延迟; δ_i^j 、 ν_i^j 为剩余误差,包含了多路径、噪声等误差信息。

式(1)中,固定测站已知坐标和广播星历求得

的卫星轨道、钟差,并利用实测的气象数据以及经验模型对对流层延迟进行改正,电离层采用双频无电离层组合进行消除,可得

$$\left. \begin{aligned} P_i^j(f) &= \rho_u^j + d\rho_i^j + c dt_i - c \Delta dt^j + \Delta STD_i^j + \delta_i^j \\ L_i^j(f) &= \rho_u^j + d\rho_i^j + c dt_i - c \Delta dt^j + N_i^j(f) + \Delta STD_i^j + v_i^j \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, $d\rho_i^j$ 、 Δdt^j 分别为参考站 i 受卫星轨道、钟差误差影响造成的观测误差; ΔSTD_i^j 分别为对流层模型改正的剩余误差。从而可求得伪距、相位观测的综合改正 $\Delta P_i^j(f)$ 、 $\Delta L_i^j(f)$

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_i^j(f) &= d\rho_i^j + c dt_i - c \Delta dt^j + \Delta STD_i^j + \delta_i^j \\ \Delta L_i^j(f) &= d\rho_i^j + c dt_i - c \Delta dt^j + N_i^j + \Delta STD_i^j + v_i^j \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中,伪距综合改正主要包含了卫星轨道、卫星钟差、测站钟差及对流层的误差,而相位综合改正则还包含了相位的模糊度信息。

1.2 基于综合改正数的用户相位定位模型

参照式(1),在相同历元,用户站 u 对卫星 j 在频点 f 的伪距、相位观测值为

$$\left. \begin{aligned} P_u^j(f) &= \rho_u^j + c(dt_u - dt^j) + I_u^j(f) + STD_u^j + \delta_u^j \\ L_u^j(f) &= \rho_u^j + c(dt_u - dt^j) + N_u^j(f) - I_u^j(f) + STD_u^j + v_u^j \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中的变量含义同式(1),只是测站由参考站 i 变成了用户站 u 。利用广播星历求得卫星轨道、钟差,代入式(4),并利用经验模型对对流层延迟进行改正,利用双频无电离层组合消除电离层延迟,得到

$$\left. \begin{aligned} P_u^j(f) &= \rho_u^j + d\rho_u^j + c dt_u - c \Delta dt^j + \Delta STD_u^j + \delta_u^j \\ L_u^j(f) &= \rho_u^j + d\rho_u^j + c dt_u - c \Delta dt^j + N_u^j(f) + \Delta STD_u^j + v_u^j \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, ρ_u^j 为基于广播星历计算的星地距离; $d\rho_u^j$ 为用户站 u 受卫星轨道误差影响造成的观测误差。将式(3)得到的伪距相位综合改正数,对式(5)进行进一步修正,得到

$$\left. \begin{aligned} P_u^j(f) &= \rho_u^j + d\rho_u^j + c dt_u - c \Delta dt^j + \Delta STD_u^j - \Delta P_i^j(f) + \delta_u^j \\ L_u^j(f) &= \rho_u^j + d\rho_u^j + c dt_u - c \Delta dt^j + N_u^j(f) + \Delta STD_u^j - \Delta L_i^j(f) + v_u^j \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

经整理得到

$$\left. \begin{aligned} P_u^j(f) &= \rho_u^j + (d\rho_u^j - d\rho_i^j) + c(dt_u - dt_i) + \Delta STD_u^j - \Delta STD_i^j + \delta^j \\ L_u^j(f) &= \rho_u^j + (d\rho_u^j - d\rho_i^j) + c(dt_u - dt_i) + (N_u^j - N_i^j) + \Delta STD_u^j - \Delta STD_i^j + v^j \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中, δ^j 、 v^j 为整理后的剩余误差;卫星钟差误差 $c \Delta dt^j$ 得到了消除;用户站距离参考站如果较近,则 $d\rho_u^j - d\rho_i^j$ 的影响可以忽略;参考站的站钟差 $c dt_i$ 可以被用户站站钟 $c dt_u$ 完全吸收,成为新的站钟 $c \bar{d}t_u$;在参考站和用户站都没有发生周跳的情况下, $N_u^j - N_i^j$ 将重新组合为新的模糊度参数 \bar{N}_u^j 。通过以上分析,重新组合部分项,式(7)可重新写为

$$\left. \begin{aligned} P_u^j(f) &= \rho_u^j + c \bar{d}t_u + \Delta STD_u^j - \Delta STD_i^j + \delta_u^j \\ L_u^j(f) &= \rho_u^j + c \bar{d}t_u + \bar{N}_u^j + \Delta STD_u^j - \Delta STD_i^j + \epsilon_u^j \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

与常规的观测方程(5)相比,通过采用参考站提供的综合改正,式(8)消除了卫星钟差的影响。此外,式(8)中对于参考站 1000 km 以内的测站,卫星轨道误差的差异优于 5% (文献[18]),对流层经模型改正后的差异也在厘米级范围。从而基于参考站提供的综合改正,能够精化用户定位中的误差改正,提高用户定位精度。

2 多参考站分区综合改正数模型

2.1 基本原理

以上基于单个参考站计算伪距/相位综合改正信息,从而提高其周边千公里范围内用户的定位精度。在此基础上,设计以指定点位为中心,按照一定距离划定区域作为一个分区。在该分区内,综合区域内所有参考站观测数据计算每颗卫星的伪距/相位综合改正数即为分区综合改正数。

由于参考站综合改正中包含的参考站钟差能够被用户站钟差吸收,为了减小改正数的量级以便于实际参数播发,可在式(3)残差中扣除钟差概略值,形成新的综合改正数 $\Delta P'^j_i(f)$ 、 $\Delta L'^j_i(f)$

$$\left. \begin{aligned} \Delta P'^j_i(f) &= \Delta P_i^j(f) - c \bar{d}t_i + \delta_i^j \\ \Delta L'^j_i(f) &= \Delta L_i^j(f) - c \bar{d}t_i + v_i^j \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中, $c \bar{d}t_i$ 为参考站的钟差概略值,可基于式(3)中的伪距改正数按照以下公式进行计算

$$c \bar{d}t_i = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta P_i^j(f)}{n} \quad (10)$$

式中, n 为测站 i 观测到的卫星总数。

单个参考站可能存在故障、数据质量不好等问题,从而基于单个参考站的分区综合改正数服务的连续性将受到影响。为提高分区综合改正数服务的可用性、可靠性,在一个分区内可以建立多个参考站,采用多站加权平均的方式计算该分区的分区综合改正数

$$\left. \begin{aligned} \Delta P^j(f) &= \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i \Delta P_i^j(f)}{\sum_{i=1}^m \omega_i} \\ \Delta L^j(f) &= \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i \Delta L_i^j(f)}{\sum_{i=1}^m \omega_i} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中, m 为参考站个数; ω_i 为参考站综合残差的权,在实际应用中,可根据参考站距离给定分区中心距离的倒数进行定权,即

$$\omega_i = \frac{1}{s_i} \quad (12)$$

式中, s_i 为参考站 i 到分区中心的距离。

2.2 多参考站模糊度归算及分区综合改正模型

由于参考站位置的不同以及数据丢失等原因,每颗卫星综合改正数计算中采用的测站个数并不固定。在测站个数变化过程中,分区相位综合改正数将产生变化。假定相同分区内有另外一个参考站 k 也计算了相位综合改正,参照式(8),在任意历元,用户站 u 接收参考站 k 的改正数之后,对卫星 j 在频点 f 的伪距、相位观测值为

$$\left. \begin{aligned} P_u^j(f) &= \rho_u^j + c dt_u + \Delta ZPD_u^j - \Delta ZPD_k^j + \delta' \\ L_u^j(f) &= \rho_u^j + c dt_u + \bar{N}_u^j + \Delta ZPD_u^j - \Delta ZPD_k^j + \epsilon' \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

比较用户观测方程式(8)、式(13),可见除了对流层改正信息有所差异之外,式(13)中的钟差 dt_u 、模糊度信息 \bar{N}_u^j 与式(8)中类似,只是由于组合了不同参考站相关项后的结果,存在差异。站钟由于是每个历元进行求解,因此不同参考站引起的钟差跳变会被用户站钟差吸收,而不会影响用户定位结果,也即多站计算的分区改正中包含的钟差部分不影响用户定位。但需要注意的是,此时的用户站钟包含了参考站的站钟余数部分,并不是实际的用户站钟。

分区综合改正中还包含了模糊度信息,通常每个参考站对同一颗卫星的模糊度并不相同。因

此采用多参考站组合的情况下,根据式(11),参考站个数的变化将造成综合改正数包含的模糊度部分的变化。根据 1.2 节的阐述,参考站模糊度的变化会被用户模糊度参数吸收,当使用参考站个数变化的情况下,将导致用户相位观测数据的周跳,从而造成用户定位结果的跳变。因此在一个参考站存在故障需要从系统中剔除,或者新的参考站加入分区综合改正数的计算时,为保证用户定位的平稳、连续,需要保证模糊度的连续性,也即需要进行模糊度归算。

模糊度的归算是在一个分区内,由于相位观测值存在周跳或者参考站个数变化,造成综合改正数跳变的情况下,需要对分区改正中包含的模糊度进行处理,以保证相位综合改正数的连续性。对于某颗卫星,如果前后历元用于计算其综合改正数的测站个数产生变化,分别得到前后两个历元的分区综合改正数 $\Delta L^j(f)|_t, \Delta L^j(f)|_{t-1}$, 计算其在历元间的变化

$$d\Delta L(f) = \Delta L^j(f)|_t - \Delta L^j(f)|_{t-1} \quad (14)$$

式中, $d\Delta L(f)$ 为参考站个数变化前后相邻历元综合改正数的变化,也即相位综合改正数中的模糊度归算值。测站个数发生变化后,后续历元对该颗卫星的相位综合改正数中减去以上模糊度归算值,得到新的相位综合改正数,就保证了模糊度参数的连续性,因而多参考站相位综合改正数可表示为

$$\Delta L^j(f) = \Delta L^j(f) - d\Delta L(f)|_t \quad (15)$$

若所有历元观测站的个数没有变化,则 $d\Delta L(f) = 0$ 。计算得到多参考站的综合改正数后,则可将其作为该分区的分区综合改正数。在此基础上进行电文的编排,并通过卫星广播电文或者地面网络广播给用户使用。

以上分区综合改正模型可基于单个频率进行处理,也可采用不同频率的组合。由于电离层延迟在空间域和时间域的变化都比较剧烈,因此在系统端计算综合改正数时,需要尽量消除电离层误差的影响。用户定位时,对于多频测站,可同样采用无电离层组合观测值;对单频测站,为了降低电离层格网模型误差对定位的影响^[19],可以采用 UofC 模型(又称为半和法)^[20-21]进行消电离层处理。

此外,以上分区综合改正数模型,参考站处理时采用的星历和钟差输入量可仅基于广播星历,也可以为广播星历叠加现有的星基增强参数。用

户定位采用的星历和钟差输入量需要与参考站保持一致,在此基础上用户接收到分区综合改正数之后,直接对观测值进行修正。

3 模型分析

选用中国境内 29 个北斗测站的观测数据对以上分区综合改正模型进行分析。测站分布如图 1 所示,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基于星基增强的用户定位误差。

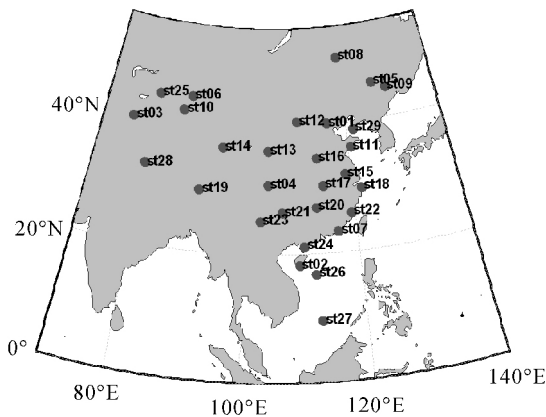


图 1 选用的北斗测站分布图

Fig.1 Sites distribution

模型分析及验证过程如下:①选定其中部分测站作为参考站,进行分区综合改正数的计算;②其他所有测站作为用户站,接收参考站的综合改正数,采用伪距、相位数据进行精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 动态定位^[22]。最终对所有用户站单天相位动态定位的结果进行统计,分别从参数播发频度以及用户站与分区中心的距离分析用户定位性能。分区综合改正数计算、用户定位计算的输入及参数设置如表 1 所示。

3.1 参考站综合改正分析

分区综合改正包含的主要改正量为空间信号 (轨道、钟差) 剩余误差以及对流层延迟等公共误差。其中,空间信号误差对于距离 1000 km 的测站基本相同,而公共误差则与测站以及测站间的距离相关。图 2 为 2016 年 4 月 8 日相距 340 km 的测站 st02 和 st24 共同观测到卫星的相位综合改正数,图中横轴为 st02 对所有卫星的相位综合改正数,纵轴为 st24 对所有卫星的相位综合改正数。图中可看到,两个站对所有卫星的综合改正呈完全线性相关,用其中一个测站的综合改正修

正另一个测站相应的观测值,能够大大减小观测的误差,提高用户定位的收敛速度和精度。图 2 中不同卫星在两个测站上的相位残差还存在大小不同的常量平移,从 1.2 节的论述可知,定位时该常量能被模糊度参数完全吸收。

表 1 数据处理设置与处理策略

Tab.1 Data processing settings and strategies

| 参数 | 配置 | |
|------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 分区综合改正数计算 | 用户星基增强 PPP 定位计算 |
| 观测数据 | B1/B2 双频无电离层组合伪距、相位 | B1/B2 双频无电离层组合伪距、相位 |
| 截止高度角/(°) | 7 | 7 |
| 卫星星历、钟差 | 广播星历 | 广播星历 |
| 星基增强改正信息 | 实时轨道、钟差改正数 | 实时轨道、钟差改正数;分区综合改正数 |
| 对流层延迟 | 实测气象数据+先验模型 | 先验模型+参数估计 |
| 固体潮汐、海潮、相对论、地球自转 | IERS 2010 ^[23] | IERS 2010 ^[23] |
| 测站坐标 | 固定 | 白噪声(逐历元估计) |
| 接收机钟差 | 近似值 | 白噪声(逐历元估计) |
| 模糊度 | 概略值(伪距相位多历元均值差异) | 浮点解 |

3.2 分区综合改正数结果

图 3 为 2016 年 4 月 8 日测站 st02 所在分区的相位分区综合改正数。可看到不同卫星的相位分区综合改正数存在较大差异,整体上 GEO 卫星的改正数比较平稳,而 IGSO/MEO 卫星的相位分区改正数则存在随高度角降低而变化变大的趋势。这也表明卫星在高度角较低(出入境前后)的情况下,由于观测条件以及几何构型较差,基本导航电文以及现有星基增强系统中轨道、钟差存在较大误差,无法精确表达,而分区改正模型正是用于对该剩余误差的修正。

3.3 参数播发频度与模型性能

北斗星基增强系统采用的观测数据的采用率为 1 Hz,从而分区综合改正数的计算频度最高可为 1 s。分区综合改正数的播发要求在北斗现有播发协议的基础上,增加每个分区当前观测到卫星的综合改正数。受限于紧张的星地接口资源,根据所需信息量以及接口剩余信息资源,系统支持的分区综合改正数的播发频度最高为 36 s。考虑到卫星上下行的播发时延以及电文周期,用户使用该参数最少需要预报约 1 min,因而需要评估不同播发频度对分区综合改正数和星基增强用

户定位的影响。

图4为不同播发时延下广播星历钟差和轨道的径向合成误差的变化(0表示没有时延)。图4(a)和(b)从上到下依次为C01、C06、C11共3种不同类型卫星,图4(a)和(b)分别为时延1min和6min的径向合成误差变化,图4(c)为所有卫星在1~6min时延下的径向合成误差变化。由图可知,播发时延越长,轨道和钟差误差变化越大,基本上时间每增加1min,误差便增加1cm。

对2016年4月8日29个测站分区改正数更新频度对服务性能的影响进行离线分析。处理中每次选取一个测站作为分区中心计算分区综合改正数,其余测站都作为用户站进行动态PPP定位计算。选取10个与分区中心距离在1000km范围内的用户站,统计其定位平面和高程坐标的RMS。

计算时,分区综合改正数的更新频率设为从0~6min,也即用户定位中采用的分区综合改正数的预报时间为0~6min,结果如图5所示。从图中可以看到,整体上用户定位精度随播发时延的增加而逐步降低;播发时延小于2min的情况下,精度变化幅度较小,而大于2min后,定位精度降低比较明显。播发时延小于2min的情况下,各站平均平面和高程精度都优于0.2m。

3.4 分区中心距离与模型性能

分区综合改正数的本质是误差模型的精化,也即通过参考站的数据对所在分区内的误差进行改正。因此,分区综合改正数既包含了该区域内卫星轨道、卫星钟差等残余公共误差,也包含了与对流层等与参考站位置相关的误差。因此,理论上用户站与参考站位置越近,其误差的一致性越高,分区综合改正的效果就越好。

采用29个测站的数据,离线分析参考站与用户站距离的远近对用户动态定位精度影响。处理过程中,每次选取一个测站作为分区中心计算分区综合改正数,其余测站都作为用户站进行双频动态PPP定位计算。所有测站进行以上处理后,统计每个测站基于分区综合改正数的动态定位精度和用户站与分区中心距离的对应关系。

图6给出了所有与分区中心距离小于1000km测站动态定位精度与其离分区中心距离的统计关系图。图中结果表明,在1000km距离的范围内,采用分区综合改正数,用户动态定位平均平面

坐标RMS优于0.15m,平均高程坐标RMS可达0.2m。图中除了统计平面和高程方向的精度之外,还采用线性函数对精度与距离的关系进行了拟合。从结果可以看到,用户站的定位精度整体上与其距离分区中心的远近相关性不明显。这表明影响星基增强用户定位精度的主要是各向同性的公共误差,对其进行改正后,距离分区中心较远的用户也能有较好的定位性能。同时,随着用户离分区中心距离的增大,定位解算误差较大的测站比例有所增多。这表明随着距离的增加,用户定位的稳定性受到了影响;其原因可能是随着距离的增加,对流层等与位置相关的误差的差异变大,造成某些时段定位精度降低,从而造成了用户定位结果稳定性降低。

3.5 用户双频定位结果分析

利用29个测站建立基于分区综合改正数的北斗星基增强服务系统。首先按照测站分布、服务区域大小等因素,选定每个分区的中心位置,并将北斗系统的重点服务区划分为若干个分区。每个分区设置一个主参考站,有冗余测站的条件下设置备用参考站。基于以上分区及参考站定义,每个分区每1min提供一组分区综合改正数;用户接收到其所处分区的分区综合改正数之后,采用相位观测值进行实时动态PPP定位。

选取分布于不同分区的st02、st03、st05、st10、st12、st15、st16、st20、st23等9个测站2016年7月17—30日两周的数据对该系统的性能进行评估。图7为2016年7月17日测站st02、st03、st12、st15双频动态PPP定位的结果。从中可以看到每个测站的动态PPP结果在较短时间内都收敛到好于1m的精度,表明采用分区综合改正之后,各种误差已经得到较好消除。收敛之后,定位结果稳定在分米的量级,这表明系统提供的分区综合改正数稳定性较好。

表2统计了所有9个测站2周定位动态PPP定位的收敛(至坐标误差小于1m)时间、收敛后的各个坐标分量(南北N,东西E,高程U)及三维的平均精度。表中还列出了测站距离该分区中心的距离,平均达到了536km。从中可以看到动态PPP平均收敛时间约为9min,平均平面精度约为15cm,高程精度约为20cm,三维定位精度为30cm。

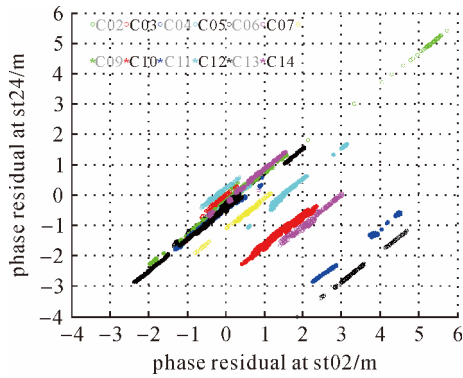


图 2 测站 st02 和 st24 对所有观测到卫星相位综合改正数

Fig.2 Combined carrier phase zone corrections for stations st02 and st24

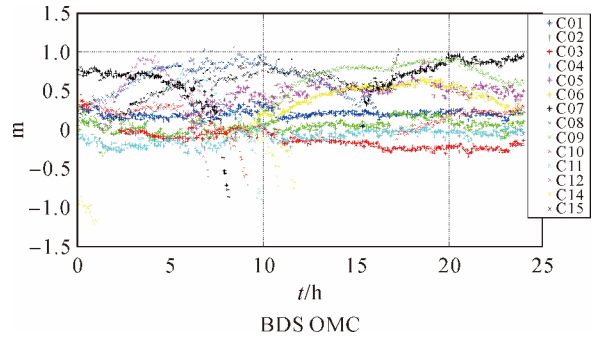


图 3 测站 st02 所在分区的相位分区综合改正数

Fig.3 Combined carrier phase zone corrections for the zone 02

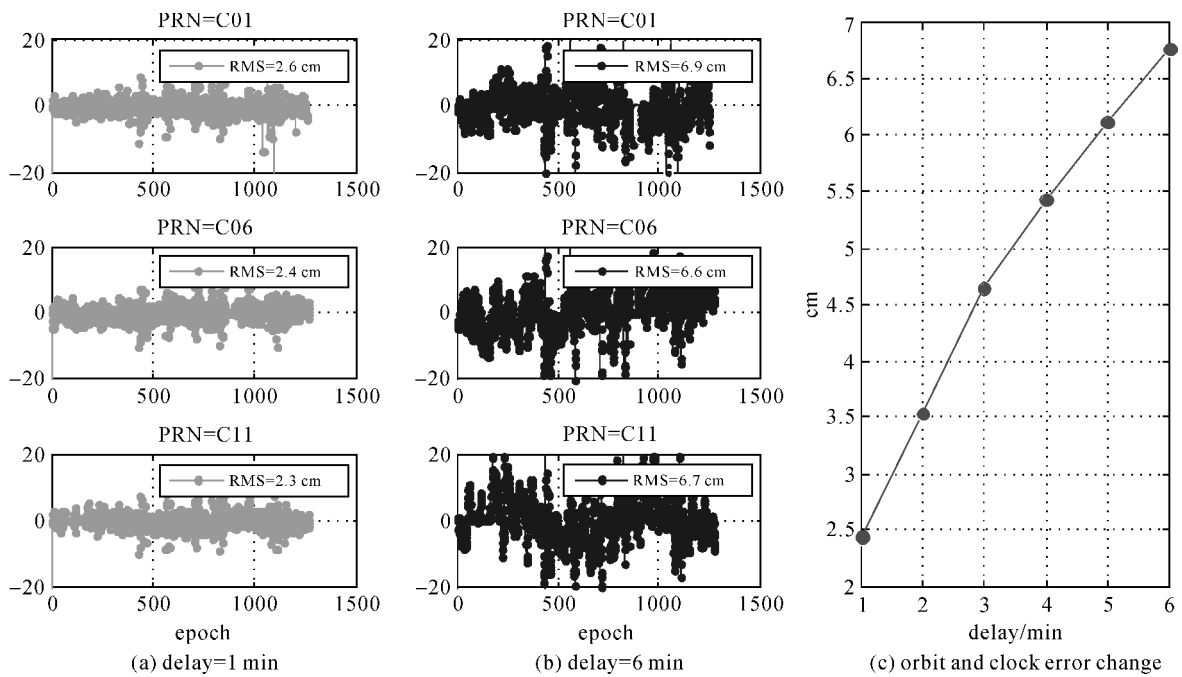


图 4 不同播发时延下的广播星历钟差和轨道的径向合成误差变化

Fig.4 Broadcast clock and radial error change with different updating rates

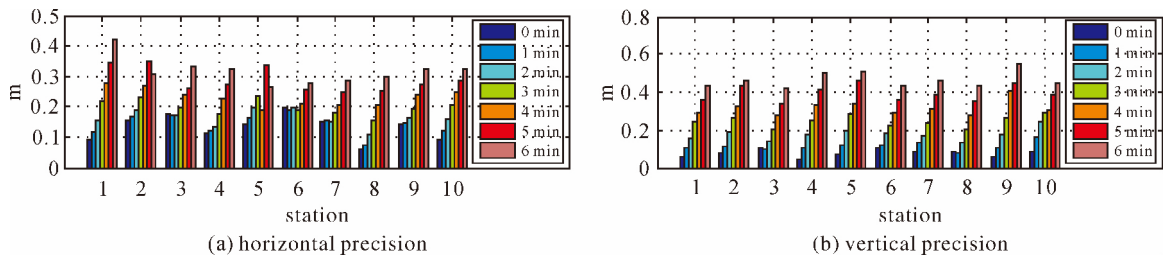


图 5 分区综合改正数不同播发延迟下,用户站定位精度统计

Fig.5 Coordinates precision statistics of user kinematic PPP using zone corrections with different updating rates

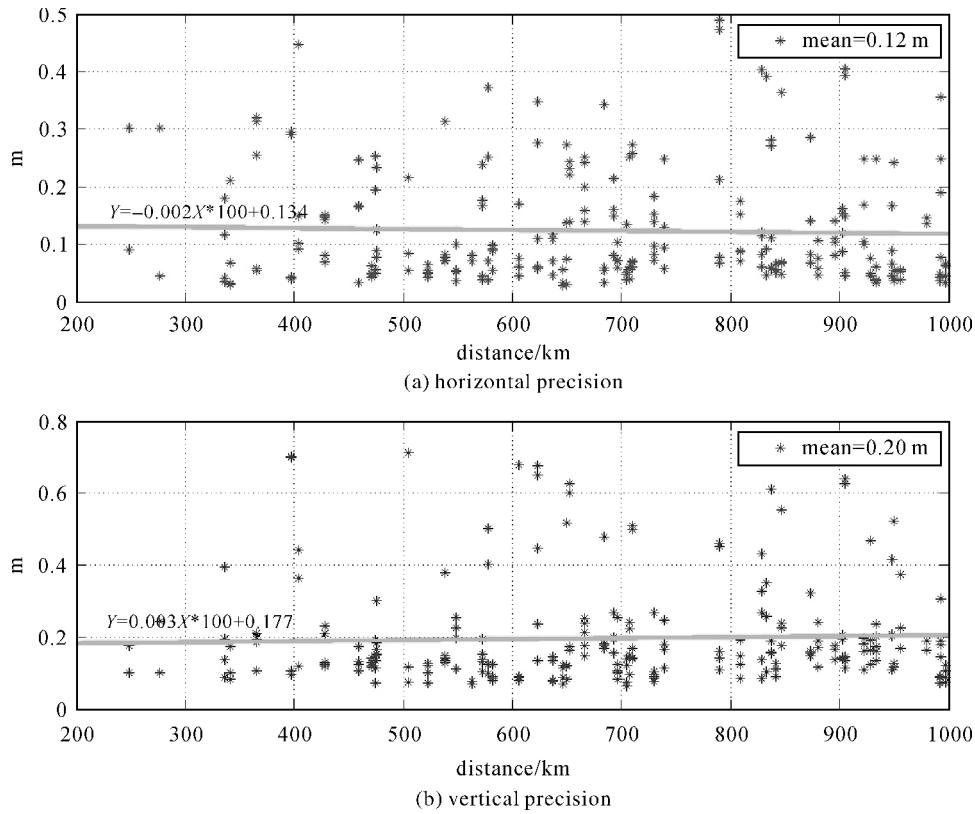


图 6 与分区中心距离不同的用户站定位精度统计

Fig.6 Coordinates precision statistics of user kinematic PPP with different distances from zone center

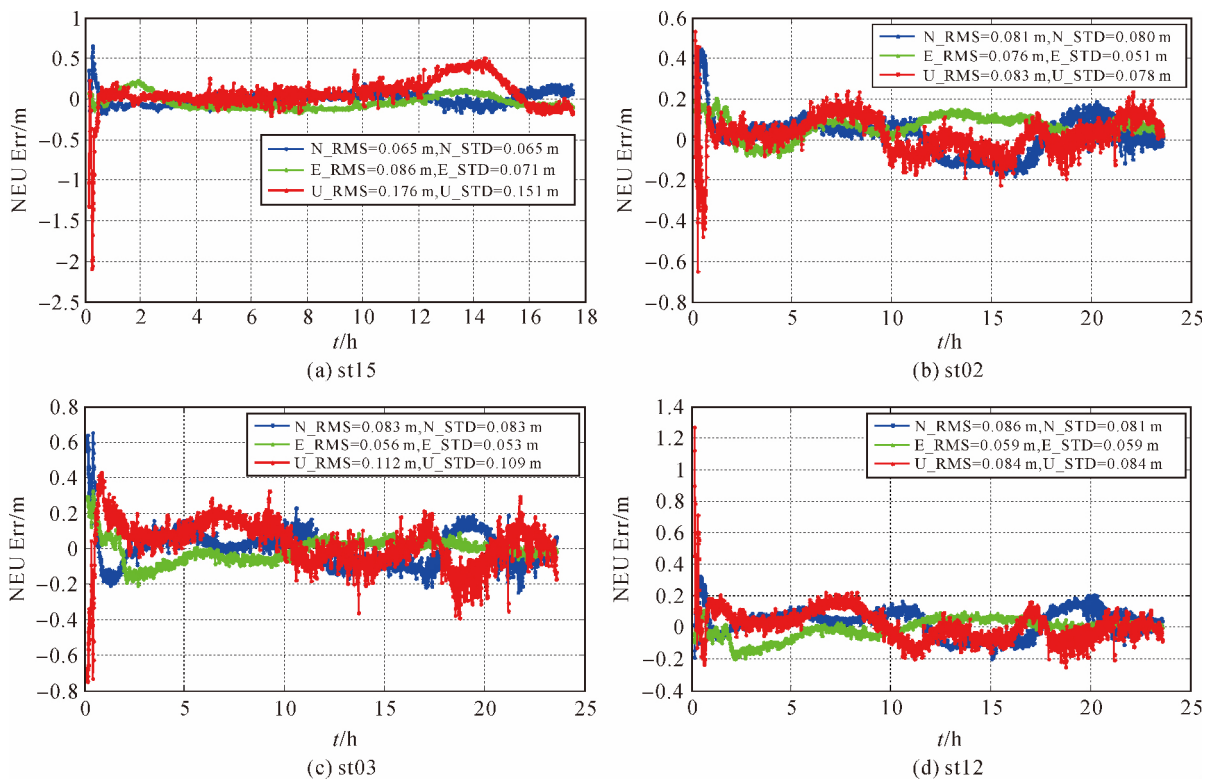


图 7 测站 st02、st03、st12、st15 基于相位分区综合改正数的单天动态相位定位结果

Fig.7 Daily kinematic coordinate estimates using carrier phase observations and the combined carrier phase zone corrections for the stations st02, st03, st12 and st15

表 2 基于分区综合改正数多天动态 PPP 定位精度及收敛时间统计

Tab.2 Coordinate precision and convergence time for kinematic PPP using zone corrections

| site | 收敛 /min | N_RMS /m | E_RMS /m | U_RMS /m | 3d_RMS /m | 距离 /km |
|------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-----------|
| st02 | 5.8 | 0.13 | 0.13 | 0.21 | 0.28 | 471 |
| st03 | 7.9 | 0.10 | 0.12 | 0.23 | 0.28 | 582 |
| st05 | 10.8 | 0.14 | 0.15 | 0.25 | 0.32 | 389 |
| st10 | 9.8 | 0.17 | 0.14 | 0.26 | 0.34 | 736 |
| st12 | 6.6 | 0.11 | 0.09 | 0.18 | 0.23 | 341 |
| st15 | 8.8 | 0.11 | 0.10 | 0.24 | 0.28 | 459 |
| st16 | 10.5 | 0.10 | 0.18 | 0.24 | 0.32 | 536 |
| st20 | 7.3 | 0.13 | 0.14 | 0.20 | 0.28 | 613 |
| st23 | 11.8 | 0.13 | 0.13 | 0.24 | 0.30 | 694 |
| 平均 | 8.81 | 0.12 | 0.13 | 0.23 | 0.29 | 536 |

4 结 论

针对北斗星基增强系统分米级服务的要求,实现用户定位精度的进一步提升,本文提出了一种适合用户基于相位观测值定位的分区综合改正模型。该模型计算参考站的伪距/相位观测值综合改正数,并将综合改正数作为新增的星基增强参数,采用分区的方式编排到北斗广播电文进行播发。在用户端,用户接收其所在分区的综合改正数用于改正其伪距/相位观测值,在此基础上实现基于 PPP 模式的分米级定位。论文先介绍了基于单个参考站的综合改正数模型,在此基础上将其拓展到多参考站的模型,并利用参考站的实测数据进行了验证。

对分区综合改正数更新频度的分析表明,更新时间在 2 min 以内,用户站定位精度相差不明显;更新时间超过 2 min 后,定位精度下降明显。分析用户站定位精度与其距离分区中心的距离关系表明:随着距离的增加,用户定位精度没有明显变差,这说明采用分区综合改正模型,影响用户定位精度主要为区域内的公共误差。同时,随着距离的增加,用户定位的稳定性降低,这是由于距离较远,对流层等与位置相关的误差随距离增加,相关性减弱,因此造成某些时段定位精度的降低。

采用北斗观测网数据进行试验,实测结果表明:用户双频动态 PPP 坐标收敛到 1 m 以内所需的平均时间少于 10 min,PPP 收敛之后水平坐标精度能达到 15 cm,高程坐标精度能达到 20 cm。以上计算结果表明分区综合改正模型有效提高了北斗星基增强系统服务性能,能够满足用户基于

相位观测值的分米级定位精度的需求。

分区综合改正模型可基于单个频率进行处理,也可采用不同频率的组合。受限于北斗系统星地接口资源,在系统设计时只能播发一个频点或者一个频点组合的改正数。目前北斗正在规划专用的星基增强系统,北斗地基增强系统的建设也在稳步推进,这些系统的通信带宽能够满足更多分区、更高频度及更多频点分区综合改正数的播发,从而也能进一步提高其服务性能。

参考文献:

- [1] 宋炜琳, 谭述森. WAAS 技术现状与发展[J]. 无线电工程, 2007, 37(6): 50-52.
SONG Weilin, TAN Shusen. The Current Status and Development of WAAS Technique[J]. Radio Engineering of China, 2007, 37(6): 50-52.
- [2] TSAI Y J. Wide Area Differential Operation of the Global Positioning System: Ephemeris and Clock Algorithms[D]. San Francisco: Stanford University, 1999.
- [3] HEßELBARTH A, WANNINGER L. SBAS Orbit and Satellite Clock Corrections for Precise Point Positioning[J]. GPS Solutions, 2013, 17(4): 465-473.
- [4] 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.
- [5] ZHOU Shanshi, CAO Yueling, ZHOU Jianhua, et al. Positioning Accuracy Assessment for the 4GEO/5IGSO/2MEO Constellation of COMPASS [J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2012, 55 (12): 2290-2299.
- [6] TANG Chengpan, HU Xiaogong, ZHOU Shanshi, et al. Improvement of Orbit Determination Accuracy for Beidou Navigation Satellite System with Two-way Satellite Time Frequency Transfer [J]. Advances in Space Research, 2016, 58(7): 1390-1400.
- [7] 北斗卫星导航系统简介[EB/OL]. (2017-03-16)[2017-03-29]. <http://www.beidou.gov.cn/xtjs.html>.
Beidou Satellite Navigation System [EB/OL]. (2017-03-16)[2017-03-29]. <http://www.beidou.gov.cn/xtjs.html>.
- [8] 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)[EB/OL]. (2014-11-24)[2017-03-29]. <http://www.chinabeidou.gov.cn/tongzhi/371.html>.
China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Open Service Signal (Version 2.0) [EB/OL]. (2014-11-24)[2017-03-29]. <http://www.chinabeidou.gov.cn/tongzhi/>

- 371.html.
- [9] 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(31): 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(31): 45-53.
- [10] 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.
- [11] CAO Yueling, HU Xiaogong, ZHOU Jianhua, et al. Kinematic Wide Area Differential Corrections for BeiDou Regional System Basing on Two-way Time Synchronization [C] // Proceedings of 2014 China Satellite Navigation Conference: Volume III. Nanjing: Springer, 2014(305): 277-288.
- [12] 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.
- [13] 曹月玲, 胡小工, 周善石, 等. 基于星间链路的 BDS 导航系统实时星历和钟差分离修正[J]. 天文学进展, 2015, 33(1): 122-133.
CAO Yueling, HU Xiaogong, ZHOU Shanshi, et al. The Method for Real-time Wide Area Differential Corrections of BDS with Inter Satellite Links[J]. Progress in Astronomy, 2015, 33(1): 122-133.
- [14] 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.AGCS2017.2016299.
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.AGCS2017.2016299.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2016.
LI Zhenghang, HUANG Jingsong. GPS Surveying and Data Processing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2016.
- [19] WU Xiaoli, ZHOU Jianhua, TANG Bo, et al. Evaluation of COMPASS Ionospheric Grid[J]. GPS Solutions, 2014, 18(4): 639-649.
- [20] JONES A V. Coping with the Atmosphere and Ionosphere in Precise Satellite and Ground Positioning[M]//Environmental Effects on Spacecraft Positioning and Trajectories, Volume 73. Washington DC: American Geophysical Union, 2013: 1-16.
- [21] GAO Yang, SHEN Xiaobing. A New Method of Carrier-Phase-based Precise Point Positioning[J]. Journal of the Institute Navigation, 2002, 49(2): 109-116.
- [22] ZUMBERGE J F, HEFLIN M B, JEFFERSON D C, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B3): 5005-5017.
- [23] PETIT G, LUZUM B. IERS Conventions. IERS 2010[R]. Frankfurt: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010.

(责任编辑: 丛树平)

收稿日期: 2017-03-29

修回日期: 2017-09-21

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, research fellow, majors in satellite geodesy.

E-mail: junping@shao.ac.cn

通信作者: 周建华

Corresponding author: ZHOU Jianhua

E-mail: yishu-zhou@263.net