



北斗二号/三号融合的分米级星基增强算法与性能分析

陈俊平^{1,2}, 于超^{1,2*}, 周建华³, 王阿昊^{1,4}, 张益泽⁵, 宋子远^{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. 中国人民解放军32020部队, 武汉 430071;

4. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092;

5. Department of Maritime System Engineering, Tokyo University of Marine Science and Technology, Tokyo 135-8533, Japan

*联系人, E-mail: yuchao171@mailsucas.edu.cn

收稿日期: 2020-08-24; 接受日期: 2020-09-30; 网络出版日期: 2020-12-11

国家自然科学基金(编号: 11673050)、国家重点研发计划(编号: 2018YFB0504300)和上海张江国家自主创新示范区专项发展资金重大项目(编号: ZJ2018-ZD-009)资助

摘要 北斗卫星导航系统星基增强服务通过地球静止卫星向用户播发等效钟差、轨道改正数、电离层格网改正数和分区综合改正数等四重广域差分改正数, 用户在此基础上利用载波相位观测值实现实时分米级的定位性能. 本文介绍了分米级星基增强服务的参数匹配算法以及单频、双频用户精密定位模型. 将系统播发的四重差分改正数应用于北斗二号与三号融合的精密单点定位, 分析了不同频点及定位模型的系统精密定位服务性能. 18个测站7 d的结果表明: 北斗二号/三号融合的星基增强服务双频组合动态精密单点定位平均12.42 min收敛至0.5 m以内, 收敛后的平均定位精度为平面0.15 m, 高程0.2 m; 相比仅使用北斗二号系统, 不同定位模型收敛时间平均缩短了56.7%; 而基于非差非组合的分区定位收敛速度更快, 并且能达到与无电离层组合模型相同的精度水平. 使用北斗电离层格网信息改正的单频动态定位PPP平均11.74 min收敛至0.8 m以内, 收敛后的平均定位精度为平面0.2 m, 高程0.3 m; 相比使用广播星历电离层模型改正的结果, 静态和动态定位平均收敛时间分别缩减了21.4%和25.2%.

关键词 精密单点定位, 北斗卫星导航系统, 星基增强, 分区综合改正数, 电离层格网

PACS: 91.10.Fc, 95.10.Eg, 95.75.Pq, 95.75.Wx

1 引言

北斗三号全球卫星导航系统于2020年7月31日宣布建成并正式开通, 采用三种轨道卫星组成的混合星

座设计, 提供兼容北斗二号信号与新体制信号的多频点导航信号, 具备基本定位导航授时、区域星基增强、区域精密单点定位、短报文通信和国际搜救等多种服务能力^[1]. 其中北斗卫星导航系统星基增强系统

引用格式: 陈俊平, 于超, 周建华, 等. 北斗二号/三号融合的分米级星基增强算法与性能分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 019507
Chen J P, Yu C, Zhou J H, et al. Decimeter-level algorithm for satellite-based augmentation systems and performance analysis of BDS-2/BDS-3 (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 019507, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0327](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0327)

提供了四重广域差分改正数, 包括等效钟差、轨道改正数、电离层格网改正数和分区综合改正数, 为区域用户提供实时分米级精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)服务^[2]. 文献[3]最早提出了服务于北斗分米级星基增强系统的差分改正模型, 并对差分改正数的分区综合改正数的更新周期与服务范围做了相关试验. 文献[4]介绍了基于分区综合改正数计算B1B2双频和单频的定位模型, 同时对两种定位模型定位性能进行评估; 结果表明使用北斗二号星基增强系统改正后的双频用户在25 min内动态定位收敛至0.5 m以内, 收敛后的定位精度平面能达到0.15 m, 高程0.2 m; 而对于单频用户在20 min内收敛至0.8 m以内, 收敛后精度为平面0.3 m, 高程0.5 m. 文献[5]中将北斗广域差分信息与法国宇航中心(CNES)提供的实时GNSS改正信息进行了对比评估, 北斗广域差分的信息连续性和可用性明显优于CNES的实时流改正信息, 使用两者的动态定位精度均能达到分米级, 北斗改正效果略高于CNES的实时改正信息. 文献[6,7]分别从服务端和用户端对分区的切换拟合算法进行了研究, 提出的分区切换算法均能达到较好的定位效果.

以上研究主要围绕B1B2频点的北斗二号系统分米级星基增强系统的相关研究. 北斗三号全球卫星导航系统正式开通服务后, 北斗二号卫星上播发的B2I信号被B2a信号取代, 为实现系统服务的平稳过渡, 北斗三号保留了B1I和B3I信号, 并同时播发北斗二号和北斗三号卫星的四重差分改正数^[8]. 本文将从北斗二号/三号融合的星基增强算法出发, 介绍北斗分米级星基增强系统各类参数的更新周期和匹配算法, 并对北斗二号/三号平稳过渡频点的定位模型展开研究和分析.

2 北斗星基增强精密单点定位模型

对任意接收机观测卫星*s*的伪距和载波相位观测方程可由下式表示:

$$P_i^s = \rho^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + c(d_i - d_i^s) + \text{STD}^s + I_i^s + \varepsilon_p, \quad (1)$$

$$L_i^s = \rho^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + \text{STD}^s - I_i^s + N_i + \varepsilon_L, \quad (2)$$

其中, *i*表示频点; *P*, *L*分别表示伪距和相位观测值; ρ^s

为星地距离; δt^s , δt_r 分别表示卫星钟差和接收机钟差; d_i , d_i^s 分别表示接收机硬件延迟和卫星硬件延迟; STD^s 为对流层斜路径延迟; I_i^s 为频点*i*的电离层延迟; N_i 为相位模糊度, 包含了卫星和接收机端初始相位偏差和硬件延迟; ε_p , ε_L 为观测噪声.

(1) 单频定位模型

对于B1或B3单频用户来说, 分区综合改正数定位通常采用半合法模型^[2,9]消除载波相位方程的电离层延迟误差, 而伪距观测值中的电离层延迟则利用北斗系统基本导航播发的8参数模型改正或格网电离层信息改正^[4]. 观测方程如下:

$$P_i^s = \rho^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + c(d_i - d_i^s) + \text{STD}^s + I_i^s + \text{ESC}_i + \delta_{\text{orb}} + \varepsilon_p, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{P_i^s + L_i^s}{2} = & \rho^s + c(\delta t_r - \delta t^s) \\ & + \frac{c(d_i - d_i^s)}{2} + \text{STD}^s + \text{ESC}_i \\ & + \delta_{\text{orb}} + dL + \frac{N_i}{2} + \frac{(\varepsilon_p + \varepsilon_L)}{2}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, ESC_i 为频点*i*的等效钟差改正数; δ_{orb} 为轨道改正数; *dL*为分区综合改正数.

(2) 双频无电离层组合模型

双频用户可以通过线性组合消除低阶电离层误差的影响, 其观测方程为

$$P_{\text{IF}}^s = \rho^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + c(d_{\text{IF}} - d_{\text{IF}}^s) + \text{STD}^s + \text{ESC}_{\text{IF}} + \delta_{\text{orb}} + \varepsilon_{p,\text{IF}}, \quad (5)$$

$$L_{\text{IF}}^s = \rho^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + \text{STD}^s + N_{\text{IF}} + \text{ESC}_{\text{IF}} + \delta_{\text{orb}} + dL + \varepsilon_{L,\text{IF}}. \quad (6)$$

(3) 非差非组合多频定位模型

相比于双频无电离层组合模型, 非差非组合模型不会放大观测噪声, 有利于单频、双频、三频模型的统一表达, 通过引进电离层参数在参数域保留了电离层延迟信息^[10,11]. 基于北斗系统星基增强参数的非差非组合定位模型可表达为

$$P_i^s = \rho^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + c(d_i - d_i^s) + \text{STD}^s + \alpha_i I_1^s + \text{ESC}_i + \delta_{\text{orb}} + \varepsilon_p, \quad (7)$$

$$L_i^s = \rho^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + \text{STD}^s - \alpha_i I_1^s + N_i + \text{ESC}_i + \delta_{\text{orb}} + dL + \varepsilon_L, \quad (8)$$

式中, $i=1,3$, α_i 为与频点相关的电离层系数, $\alpha_i = (f_1/f_i)^2$,

f_i 为频点*i*的频率.

3 星基增强四重参数匹配算法

北斗系统分米级星基增强四重参数之间存在耦合关系,且各个参数的数据龄期并不同.特别对于分区综合改正数来说,其解算的过程同时使用了等效钟差和轨道改正数^[3,12].表1给出了北斗系统星基增强系统各个参数的更新周期与有效范围.表中显示,1组分区综合改正数有效周期内播发2组等效钟差参数,因此对于北斗系统星基增强用户来说需要考虑不同参数之间的匹配问题.北斗系统星基增强系统多重差分改正数的具体匹配规则如下:当观测时刻的周内秒为*t*时,匹配的分区综合改正数的接收时刻应为 $\text{int}(t/36) \times 36$,匹配的等效钟差的接收时刻为 $(\text{int}(t/36)-1) \times 36$,相应地匹配轨道改正数的接收时刻为 $(\text{int}(t/360)-1) \times 360$.而北斗电离层格网信息覆盖范围为东经 $70^\circ-145^\circ$,北纬 $7.5^\circ-55^\circ$,按照经纬度 $5^\circ \times 2.5^\circ$ 进行划分^[8],共320个格网点,实时播发且与其他参数没有相关性.

此外,北斗系统每小时更新一组基本导航星历参数,当观测时刻在整点前后时,需要考虑新旧两组广播星历参数的匹配问题.根据北斗系统的接口控制文件定义,接收机收齐一组广播星历参数的最快时间是18 s^[8,13].因此整点切换时刻,整点后18 s之前建议使用整点前旧的卫星星历参数匹配旧的一组星基增强参数使用.当收齐最新的星历参数后再使用最新的卫星广播星历与新的星基增强参数匹配进行定位.由于整点时刻广播卫星钟差会发生跳变,文献^[5]表明北斗系统分米级星基增强定位在整点切换时仍然可能导致定位发生微小的跳变.

4 北斗星基增强定位性能评估与分析

4.1 数据处理策略

选取2020年年积日145-151 d中国区域内分布在5个分区范围的18个测站进行北斗星基增强系统PPP服务的性能评估和分析.数据处理采用后处理的方式,采用了仅北斗二号系统以及北斗二号/三号融合的策略.为增加实验数据量,每个测站每天划分为4个定位弧段,每6 h做一次重新收敛.精密单点定位参数配置如表2所示.

表1 北斗星基增强系统的参数信息

Table 1 Parameter information of BDS-SBAS

参数类型	更新周期 (s)	参数范围 (m)
等效钟差	18	-4.096-4.096
轨道改正数	360	-64-64
电离层格网	360	0-63.625
分区综合改正数	36	-2.4-2.4

4.2 可见卫星数量和几何精度因子

以2020年年积日147 d QD01测站为例,该站距离分区参考中心约560 km.图1给出了两种策略下的卫星数量和几何位置精度因子(Position Dilution of Precision, PDOP)的差异.虽然由于该站接收机问题导致部分时段出现卫星数据缺失的现象,但总体上北斗三号卫星可观测到约4-9颗.同时北斗三号卫星的加入也使该站PDOP得到显著改善,PDOP的天内均值由3.3减小至1.8.

4.3 单频定位评估

单频精密单点定位的收敛速度和定位精度主要受电离层延迟误差的影响^[14,15].虽然北斗分米级星基增强系统的单频定位模型利用半合法消除载波相位观测方程的电离层延迟,但同时也放大相位观测方程的噪声,且伪距观测方程仍然受北斗广播电离层8参数或者电离层格网信息的模型精度制约.图2给出了QD01测站仅北斗二号和北斗二号/三号融合的B3单频动态

表2 数据处理策略

Table 2 Data processing strategy

参数	设置或策略
采样率	30 s
高度角阈值	10°
频点组合	B1+B3(双频)/B1(单频)/B3(单频)
对流层模型	GPT2w+SAAS+VMF1
先验权重	伪距(sigP): 0.3 m, 相位(sigL): 0.003 m
电离层先验约束	双频组合: 0, 单频: (sigP+sigL)/10
轨道和钟差	广播星历
测站钟差	白噪声估计, 先验约束0.001 s
测站坐标	估计, 先验约束10000 m
相位模糊度	估计, 浮点解

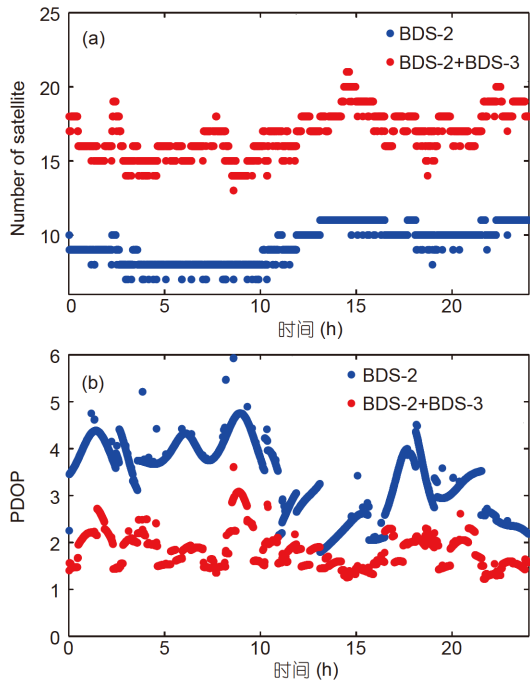


图 1 2020年年积日147 d, QD01测站可见卫星数(a)和PDOP变化(b)

Figure 1 Number of visible satellites (a) and the PDOP (b) of QD01 station, DOY 147, 2020.

星基增强定位结果, 单频定位的收敛条件为三维位置误差优于0.8 m, 该站两种策略单频定位的收敛时间基本一致. 仅北斗二号卫星的单频定位结果虽然达到了收敛阈值, 但其高程方向存在一些明显的波动, 可能由于分区综合改正数改正的对流层残差有限, 但加入

北斗三号卫星单频定位稳定性明显提高, 定位精度也有所提升.

为比较两种策略的收敛情况, 图3对两种策略所有实验数据的收敛时间进行了统计, 受电离层延迟误差改正精度的限制, 两种策略在5 min内收敛的比例相同. 但是由于可用卫星数量的增加, 北斗二号/三号卫星融合定位的单频动态定位在30 min内收敛至0.8 m的比例明显提高, 收敛比例大约为88.7%, 而仅北斗二号卫星定位30 min内达到收敛至0.8 m的比例仅48.3%. 图4统计了两种策略下使用电离层格网改正B3单频动态定位收敛后的三维位置精度分布情况, 总体上看北斗二号/三号融合的动态单频定位收敛后的定位精度为水平0.2 m, 高程0.3 m. 和仅北斗二号卫星的定位结果相比, 收敛后的精度略有提高, 收敛后三维位置精度达到0.1 m的比例也有所增加.

4.4 双频定位评估

图5给出了QD01测站使用北斗星基增强参数的无电离层组合动态定位结果, 与单频动态定位的结果变化趋势相似, 卫星数量的增加和星座几何构型的改善同样提高了定位的稳定性. 将无电离层组合模型和非差分组合模型的PPP定位性能进行对比, 图6给出了两种策略下所有实验数据双频动态定位收敛至0.5 m的百分比. 对于不同的双频定位模型, 非差分组合模型比无电离层组合模型的收敛速度更快. 从非差分组合动态定位结果上看, 仅北斗二号卫星30 min内收敛至

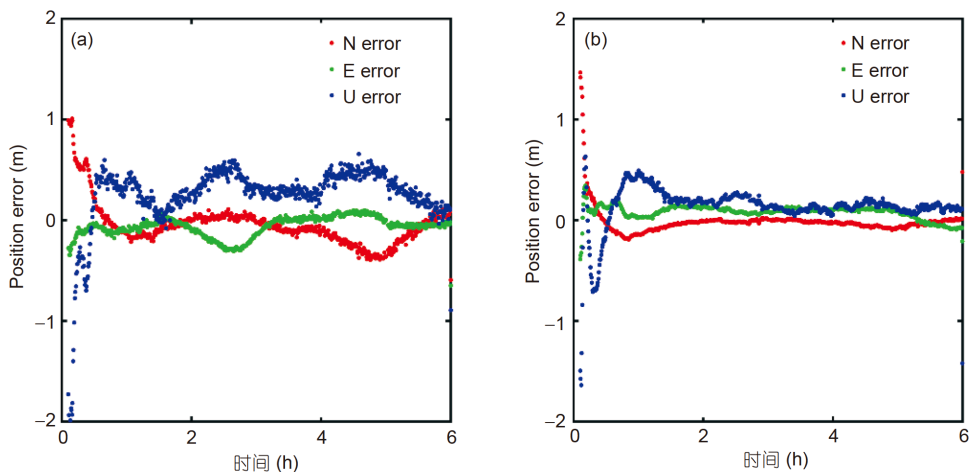


图 2 2020年年积日147 d, QD01测站基于北斗二号(a)以及北斗二号/三号双系统融合(b)的单频动态PPP结果

Figure 2 Single-frequency kinematic PPP of QD01 station in BDS-2 only (a) and BDS-2/BDS-3 combined scenarios (b), DOY 147, 2020.

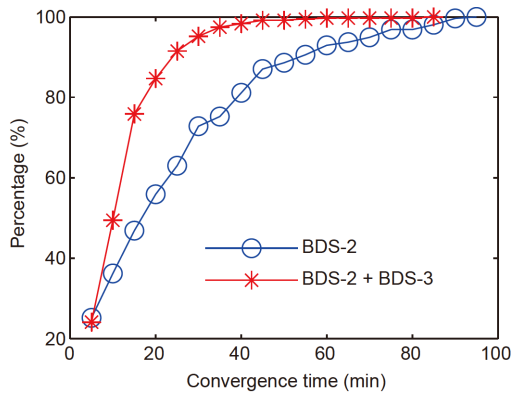


图3 (网络版彩图)北斗二号以及北斗二号/三号双系统融合情况下, B3单频动态PPP收敛至0.8 m所需时间及百分比
 Figure 3 (Color online) Convergence time and percentage of B3 single-frequency kinematic PPP in BDS-2 only and BDS-2/BDS-3 combined scenarios, where convergence is defined when position errors less than 0.8 m.

0.5 m数据约占70.3%, 而北斗二号/三号融合情况下可以达到99.1%, 该结果比无电离层组合模型分别高出了12.0%和7.7%. 图7统计了两种策略下双频动态定位收敛后的三维位置精度分布情况, 基于非差非组合的

分区定位精度分布明显高于无电离层组合模型, 总体上看北斗二号/三号融合的双频动态定位收敛后的定位精度均能达到水平0.15 m, 高程0.2 m.

4.5 收敛时间分析

卫星数量的增加和卫星位置的快速变化能显著提高定位收敛速度^[16], 表3中列出了不同定位模型下两种策略的平均收敛时间, 注意双频和单频的收敛条件分别为三维位置误差达到0.5和0.8 m. 北斗三号卫星的加入使定位收敛时间得到显著的提升, 双频无电离层组合模型动态定位的平均收敛时间从28.67 min缩短至12.42 min, 提升幅度56.7%; 而非差非组合模型的平均收敛时间更快, 从23.78 min缩短至6.67 min, 提升幅度为72.0%. 相比于不同频点的单频动态定位收敛时间提升幅度约45.9%–55.5%.

从收敛时间上看, 两种策略下B1和B3两种频点的单频定位平均收敛时间表现基本一致. 此外, 文献[17,18]表明北斗广播星历8参数与电离层格网信息改正精度均优于0.5 m, 但从收敛统计结果看, 使用电离层格网信息改正的单频定位明显优于使用电离层8参

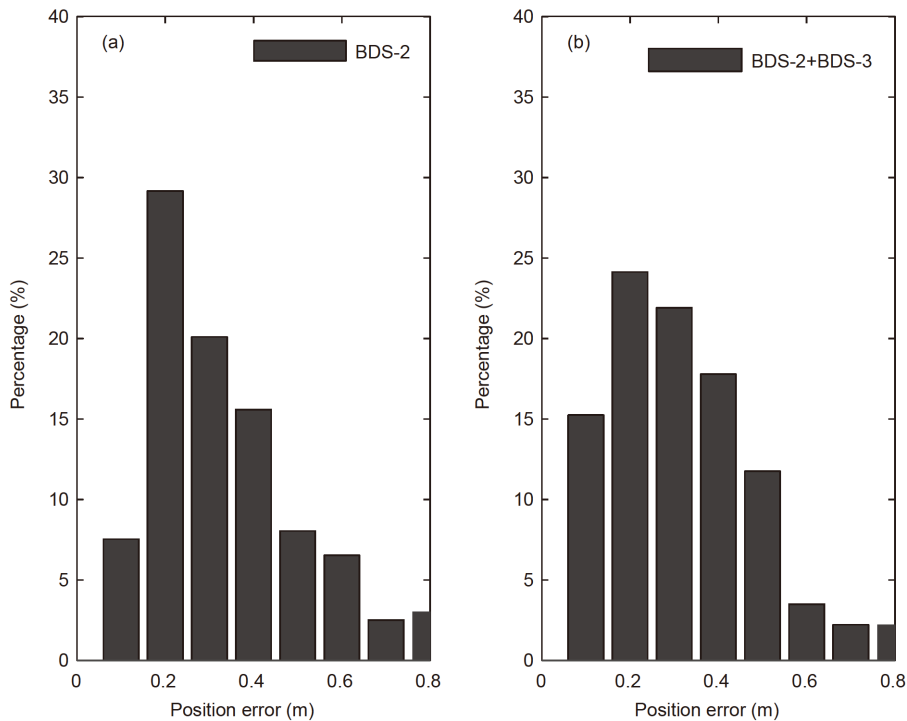


图4 北斗二号(a)以及北斗二号/三号双系统融合(b)情况下, 使用电离层格网改正的B3单频动态定位收敛位置精度统计
 Figure 4 Convergence statistics of B3 single-frequency kinematic PPP using ionospheric grid corrections in BDS-2 only (a) and BDS-2/BDS-3 combined scenarios (b).

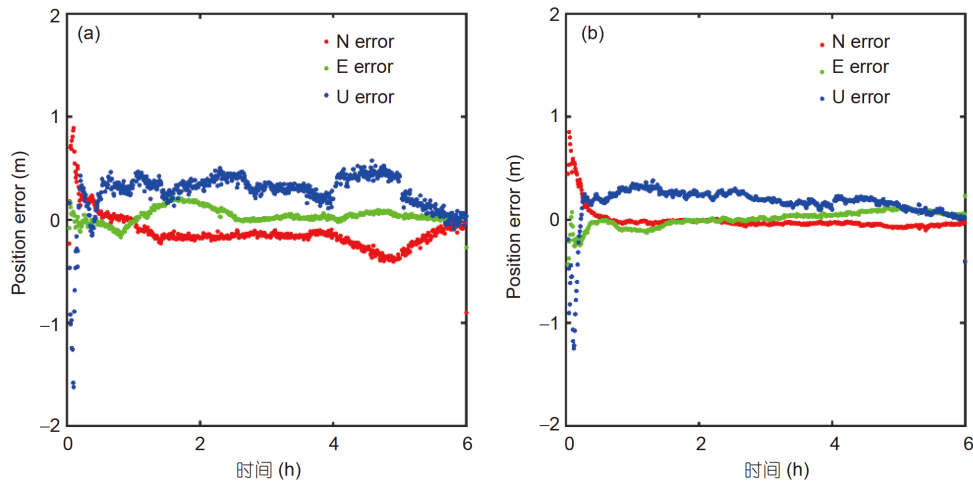


图5 2020年年积日147 d, QD01测站基于北斗二号(a)以及北斗二号/三号融合(b)的双频动态PPP结果
Figure 5 Dual-frequency kinematic PPP of QD01 station in BDS-2 only (a) and BDS-2/BDS-3 combined scenarios (b), DOY 147, 2020.

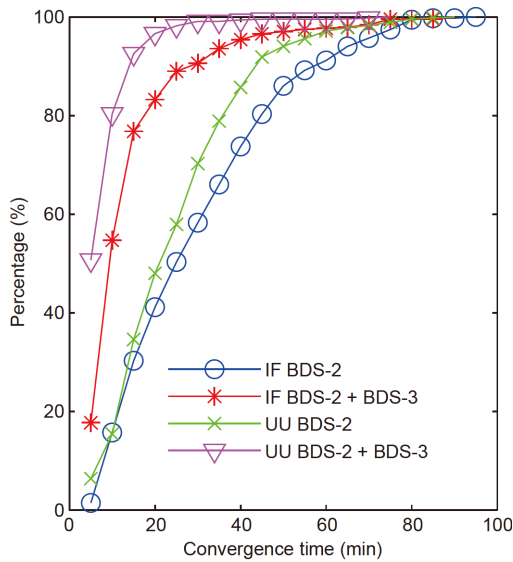


图6 北斗二号以及北斗二号/三号双系统融合情况下, 无电离层组合及非差非组合双频动态PPP收敛至0.5 m所需时间及百分比. IF为无电离层组合结果, UU为非差非组合结果
Figure 6 Convergence time and percentage of dual-frequency kinematic PPP in BDS-2 only and BDS-2/BDS-3 combined scenarios, where convergence is defined when position errors less than to 0.5 m and IF is the ionospheric-free combined solutions, UU is the un-differenced and un-combined solutions.

数的收敛速度. 相比于电离层8参数模型的定位结果, 仅北斗二号卫星和北斗二号/三号融合情况下使用电离层格网改正的B1单频静态定位平均收敛时间分别缩减了29.8%和21.4%, B3单频动态定位的平均收敛时间分别缩减了38.4%和25.2%. 这主要得益于北斗系统

星基增强系统播发电离层格网改正信息的高分辨率与高实时性, 电离层格网改正信息有效地提升了伪距实时电离层延迟的改正精度, 进而提高了单频精密单点定位的收敛速度.

5 结论

本文介绍了北斗卫星导航系统实时分米级星基增强服务的参数匹配算法与定位模型, 并将北斗二号与三号融合的四重星基增强改正数应用于精密单点定位, 讨论分析了在不同频点与模型下仅北斗二号卫星和北斗二号/三号融合的服务性能, 得出以下结论.

(1) 不同频点和定位模型下, 北斗二号/三号融合的星基增强定位收敛后精度比仅北斗二号卫星的定位精度略有提高, 收敛时间明显缩减. 北斗二号/三号融合的双频动态定位平均12.42 min收敛至0.5 m以内, 收敛后的定位精度为平面0.15 m, 高程0.2 m; 基于非差非组合的分区定位收敛速度明显优于无电离层组合模型, 且能达到相同的精度水平. 使用北斗电离层格网信息改正的单频动态定位平均11.74 min收敛至0.8 m以内, 收敛后的定位精度为平面0.2 m, 高程0.3 m; 相比于仅使用北斗二号卫星, 不同单频定位模式的平均收敛时间缩减了45.9%–55.5%.

(2) 对于B1和B3单频用户, 定位收敛效果相近. 得益于北斗星基增强系统播发电离层格网改正数的分辨率与高实时性, 使用电离层格网信息改正的单频定位明

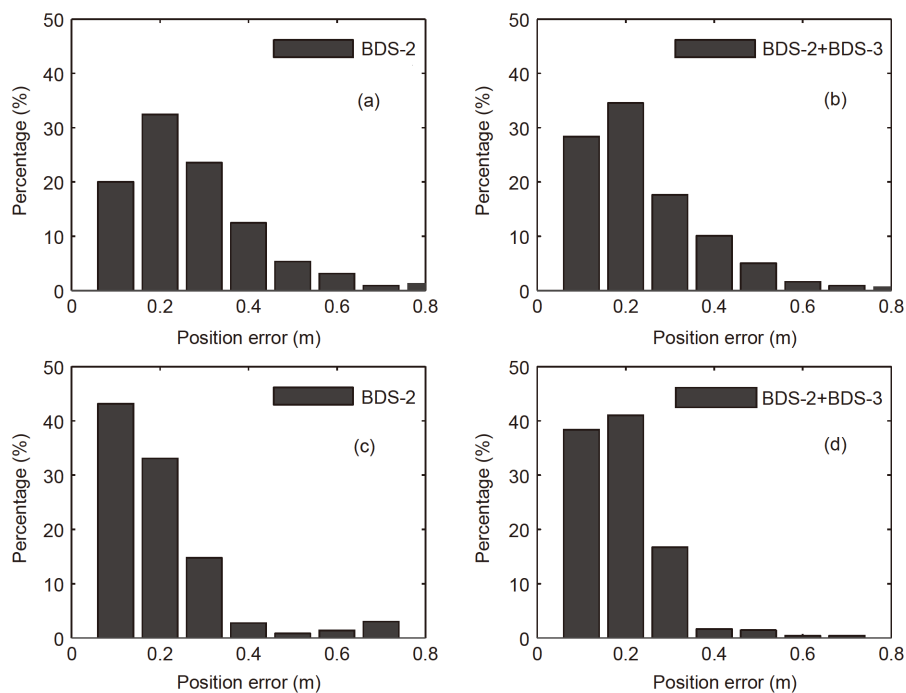


图7 双频动态PPP收敛后的三维位置精度统计. (a) 北斗二号双频组合; (b) 北斗二号/三号融合双频组合; (c) 北斗二号非差非组合; (d) 北斗二号/三号融合非差非组合

Figure 7 3D position error statistics of dual-frequency kinematic PPP. (a) Dual-frequency combined in BDS-2 only scenario; (b) dual-frequency combined in BDS-2/BDS-3 combined scenario; (c) un-differenced and un-combined model in BDS-2 only scenario; (d) un-differenced and un-combined model in BDS-2/BDS-3 combined scenario.

表3 北斗二号以及北斗二号/三号双系统融合情况下, 不同定位模型平均收敛时间(单位: min)

Table 3 Average convergence time in BDS-2 only and BDS-2/BDS-3 combined scenarios for different PPP models (unit: min)

定位模式	静态		动态	
	BDS-2	BDS-2+BDS-3	BDS-2	BDS-2+BDS-3
双频组合	6.23	3.70	28.67	12.42
双频非差非组合	4.07	1.50	23.78	6.67
单频B1+8参数	24.93	11.81	33.32	15.71
单频B1+格网改正	17.63	9.39	22.02	11.41
单频B3+8参数	23.76	11.29	36.23	16.14
单频B3+格网改正	16.68	8.87	22.31	12.07

显优于使用北斗电离层8参数模型的收敛效果. 北斗二号/三号融合的B3单频静态和动态定位平均收敛时间分

别缩减了21.4%和25.2%, 因此使用北斗系统增强定位时建议使用电离层格网信息改善单频定位的收敛效果.

参考文献

- 1 Yang Y, Gao W, Guo S, et al. Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system. *Navigation*, 2019, 66: 7-18
- 2 Chen J, Wang A, Zhang Y, et al. BDS satellite-based augmentation service correction parameters and performance assessment. *Remote Sens*, 2020, 12: 766

- 3 Chen J P, Zhang Y Z, Zhou J H, et al. Zone correction: A SBAS differential correction model for BDS decimeter level positioning (in Chinese). *Acta Geom Cartogr Sin*, 2018, 47: 1161–1170 [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. *测绘学报*, 2018, 47: 1161–1170]
- 4 Zhang Y Z, Chen J P, Yang S N, et al. Analysis of PPP performance based on BDS comprehensive zone corrections (in Chinese). *Geom Inform Sci Wuhan Univ*, 2019, 44: 159–165 [张益泽, 陈俊平, 杨赛男, 等. 北斗广域差分分区综合改正数定位性能分析. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44: 159–165]
- 5 Wang B H, Li Z N, Zhou J H, et al. Comparison and analysis of BDS wide area differential information and CNES real-time corrections (in Chinese). *J Chin Inert Tech*, 2019, 27: 160–166 [王兵浩, 李兆南, 周建华, 等. 北斗广域差分信息与CNES实时改正信息的性能评估对比. *中国惯性技术学报*, 2019, 27: 160–166]
- 6 Wang B H, Zhou J H, Chen J P, et al. A fitting algorithm and positioning analysis of BDS WADS zone correction (in Chinese). *Geom Inform Sci Wuhan Univ*, 2020, 45: 565–573 [王兵浩, 周建华, 陈俊平, 等. 北斗WADS分区综合改正数拟合模型及定位分析. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45: 565–573]
- 7 Chen J P, Wang A H, Zhang Y Z, et al. PPP algorithm using BDS SBAS differential correction (in Chinese). *Acta Geom Cartogr Sin*, 2019, 48: 822–830 [陈俊平, 王阿昊, 张益泽, 等. 北斗广域差分分米级定位的分区切换算法. *测绘学报*, 2019, 48: 822–830]
- 8 China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document open service signal B1I (Version 3.0) (in Chinese). 2019-02. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201902/P020190227592987952674.pdf> [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B1I (3.0版). 2019-02. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201902/P020190227592987952674.pdf>]
- 9 Gao Y, Shen X. A new method for carrier-phase-based precise point positioning. *Navigation*, 2002, 49: 109–116
- 10 Zhou F. Theory and Methodology of Multi-GNSS Undifferenced and Uncombined Precise Point Positioning (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Shanghai: East China Normal University, 2018 [周锋. 多系统GNSS非差非组合精密单点定位相关理论和研究方法研究. 博士学位论文. 上海: 华东师范大学, 2018]
- 11 Liu T. Study on the Algorithms and Ionospheric Applications of Multi-GNSS Uncombined Precise Point Positioning (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics Chinese Academy of Sciences, 2017 [刘腾. 多模GNSS非组合精密单点定位算法及其电离层应用研究. 博士学位论文. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2017]
- 12 Chen J P, Yang S N, Zhou J H, et al. A pseudo-range and phase combined SBAS differential correction model (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2017, 46: 537–546 [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. *测绘学报*, 2017, 46: 537–546]
- 13 Xin J, Chen Q, Guo R, et al. Basic navigation message parameters comparison between BDS-2 and BDS-3 (in Chinese). *Sci Surv Mapp*, 2020, 45: 32–38 [辛洁, 陈茜, 郭睿, 等. 北斗三号与北斗二号基本导航电文参数比较. *测绘科学*, 2020, 45: 32–38]
- 14 Zhang H, Gao Z, Ge M, et al. On the convergence of ionospheric constrained precise point positioning (IC-PPP) based on undifferenced uncombined raw GNSS observations. *Sensors*, 2013, 13: 15708–15725
- 15 Zang N, Li B, Nie L, et al. Inter-system and inter-frequency code biases: Simultaneous estimation, daily stability and applications in multi-GNSS single-frequency precise point positioning. *GPS Solut*, 2020, 24: 18
- 16 Li X, Ma F, Li X, et al. LEO constellation-augmented multi-GNSS for rapid PPP convergence. *J Geod*, 2019, 93: 749–764
- 17 Wu X, Zhou J, Tang B, et al. Evaluation of COMPASS ionospheric grid. *GPS Solut*, 2014, 18: 639–649
- 18 Wu X, Hu X, Wang G, et al. Evaluation of COMPASS ionospheric model in GNSS positioning. *Adv Space Res*, 2013, 51: 959–968

Decimeter-level algorithm for satellite-based augmentation systems and performance analysis of BDS-2/BDS-3

CHEN JunPing^{1,2}, YU Chao^{1,2*}, ZHOU JianHua³, WANG AHao^{1,4},
ZHANG YiZe⁵ & SONG ZiYuan^{1,2}

¹ Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ People's Liberation Army 32020 Unit, Wuhan 430071, China;

⁴ College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

⁵ Department of Maritime System Engineering, Tokyo University of Marine Science and Technology, Tokyo 135-8533, Japan

BeiDou navigation satellite systems and satellite-based augmentation systems (BDS-SBAS) broadcast various wide-area differential corrections, including satellite orbit/clock corrections, ionospheric grids, and partition comprehensive corrections, through geostationary earth orbit (GEO) satellites. Users in the BDS GEO coverage areas can achieve decimeter-level positioning in real time. Based on the positioning parameters and carrier-phase observations, this paper introduces matching algorithms for BDS-SBAS differential corrections and related precise point positioning (PPP) models. Datasets were collected from 18 stations over 7 d in 2020 and were analyzed by PPP in BDS-2 only and combined BDS-2/BDS-3 scenarios. The convergence time was significantly shorter in the combined BDS-2/BDS-3 scenario than in the BDS-2 only scenario, owing to the larger number of satellites and the optimized constellation geometry in the combined case. In the BDS-2/BDS-3 combination, the dual-frequency kinematic PPP converged to 0.5 m in 12.42 min (on average), 56.7% shorter than in the BDS-2 only scenario, and the horizontal and height positioning accuracies after convergence were 0.15 and 0.2 m, respectively. Moreover, the un-differenced and un-combined model converged faster than the ionosphere-free combination model while achieving the same accuracy. Meanwhile, the single-frequency kinematic PPP with ionospheric grid corrections converged to 0.8 m in 11.74 min, and the horizontal and height positioning accuracies after convergence were 0.2 and 0.3 m, respectively. Relative to the broadcast ionospheric model, the ionospheric grids reduce the convergence time of single-frequency static and kinematic PPP by 21.4% and 25.2%, respectively.

PPP, BDS, SBAS, partition comprehensive correction, ionospheric grids

PACS: 91.10.Fc, 95.10.Eg, 95.75.Pq, 95.75.Wx

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0327](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0327)