

# 北斗星基增强系统增强定位方法和效果研究

于敬巨, 张如伟, 张彦超, 胡彩亮  
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

**摘要:** 北斗星基增强系统 BDSBAS 通过地球同步轨道卫星实时播发导航卫星星历改正数等增强信息, 提高用户全球导航卫星系统定位精度, 提升服务水平, 是北斗全球卫星导航系统的重要组成部分。根据相关标准协议文件研究了 BDSBAS 增强定位算法, 并在自主研发的北斗星基增强系统监测接收机上设计实现了 BDSBAS 增强信号的接收, 完成了单频和双频实时增强定位解算。实测结果表明: BDSBAS-B1C 增强信号能有效提高 GPS L1C/A 的单频定位精度, 相比于标准服务单频定位结果, 水平和高程方向精度分别提升了 45.18% 和 70.61%, 提升后定位精度在 1 m 左右; BDSBAS-B2a 增强信号能一定程度提高 BDS B1C-B2a 的双频无电离层组合定位精度, 相比较于标准服务双频定位结果, 水平和高程方向精度分别提升了 6.15% 和 5.83%, 提升后定位精度达到分米级。

**关键词:** BDSBAS; 增强定位; 北斗星基增强系统监测接收机

中图分类号: TN967.1 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)05-0053-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211117002

引用格式: 于敬巨, 张如伟, 张彦超, 等. 北斗星基增强系统增强定位方法和效果研究[J]. 遥测遥控, 2022, 43(5): 53–60.

## Study on enhanced positioning method and effect of BDSBAS

YU Jingju, ZHANG Ruwei, ZHANG Yanchao, HU Cailiang  
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

**Abstract:** BDSBAS is an important part of BDS. It improves the positioning accuracy and service level of GNSS by broadcasting the ephemeris corrections and other augmentation information through geostationary earth orbit satellites in real time. This paper studies the enhanced positioning algorithm of BDSBAS according to the relevant standard protocol files, designs and realizes the receiving of the signal of BDSBAS on the BDSBAS monitor receiver, and completes the real-time enhanced positioning solution of single frequency and dual frequency. The results show that BDSBAS-B1C signal can effectively improve the single-frequency positioning accuracy of GPS L1C/A. Compared with the standard service single-frequency positioning, the positioning accuracy of horizontal direction and elevation direction is increased by 45.18% and 70.61%, and the positioning accuracy is about 1m after the enhancement. BDSBAS-B2a signal can improve the positioning accuracy of BDS B1C-B2a dual-frequency ionosphere-free combination to a certain extent. Compared with the standard service dual-frequency positioning, the positioning accuracy of horizontal direction and elevation direction is improved by 6.15% and 5.83%, and the positioning accuracy reaches decimeter level after the enhancement.

**Key words:** BDSBAS; Enhanced positioning; BDSBAS monitor receiver

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211117002

**Citation:** YU Jingju, ZHANG Ruwei, ZHANG Yanchao, et al. Study on enhanced positioning method and effect of BDSBAS[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(5): 53–60.

## 引 言

不同于一般大众应用领域, 航空业等关乎生命安全的行业领域对卫星导航系统的定位精度、完好性和连续性等指标提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。星基增强系统 SBAS 是重点面向此类行业领域用户的广域差分 and 完好性增强技术。作为北斗全球卫星导航系统六大服务之一<sup>[2,3]</sup>, 北斗星基增强系统 BDSBAS 与北斗三

号全球卫星导航系统一体化设计和规划, 是北斗全球卫星导航系统的重要组成部分, 能够提高全球导航卫星系统 GNSS 定位精度, 提升服务水平, 是满足我国民航、铁路、航运等关键行业领域高精度和高完好性需求的重要手段<sup>[4]</sup>。

随着北斗三号全球卫星导航系统的正式开通, 北斗卫星导航系统 BDS 的重点工作已从工程建设转移到维护稳定运行、提高服务水平上来, 北斗星基增强系统已成为后阶段的工作重心之一<sup>[5]</sup>。BDSBAS 通过地球同步轨道卫星 GEO 的 BDSBAS-B1C 和 BDSBAS-B2a 增强信号播发各个 GNSS 系统的卫星轨道改正数、卫星钟差以及电离层延迟改正数等修正信息, 向中国及周边地区用户提供符合国际民航组织 ICAO 标准的单频 SF (Single-Frequency) 服务和双频多星座 DFMC (Double-Frequency Multi-Constellation) 服务, 提高原有卫星导航系统的定位精度<sup>[6]</sup>。

本文根据中国卫星导航系统管理办公室发布的接口控制文件和 SBAS 国际标准对 BDSBAS 单频和双频增强定位方法进行了研究, 在自主研发的 BDSBAS 监测接收机平台上设计实现了增强定位解算, 并就 BDSBAS 增强信号对 GPS L1C/A 单频和 BDS B1C-B2a 双频实时增强定位进行了实测, 对定位增强效果进行了初步分析。

## 1 BDSBAS 简介

BDSBAS 与 BDS 一体化设计与建设, 系统主要由空间段、地面段和用户段 3 部分组成, 如图 1 所示<sup>[7,8]</sup>。空间段由 3 颗 GEO 卫星组成, 通过 BDSBAS-B1C 和 BDSBAS-B2a 信号播发增强电文信息, 提供覆盖亚太地区的 SF 和 DFMC 增强服务。地面段由运行控制中心、数据处理中心、注入站和监测站组成。地面监测站对导航卫星进行连续跟踪监测, 获取伪距、载波相位和导航电文等信息, 通过专用通信网络传输至主控站数据处理中心, 数据处理中心处理、生成广域差分修正信息等星基增强数据, 经由主控站运行控制中心接收比对后上注北斗 GEO 卫星, 播发至服务区内供用户使用<sup>[9]</sup>。用户段包括面向航空、航海、铁路等行业应用的 BDSBAS 设备。

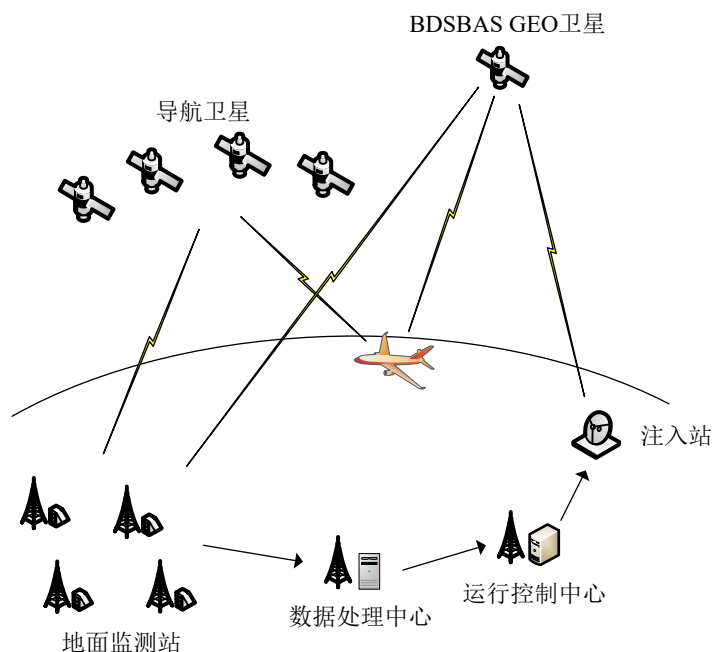


图 1 BDSBAS 系统架构组成

Fig. 1 BDSBAS system architecture composition

BDSBAS 按照国际民航组织标准和规范要求开展设计与建设, 与美国的广域增强系统 (WAAS)、俄罗斯的差分校正和监测系统 (SDCM)、欧洲的地球静止导航重叠服务 (EGNOS)、印度 GPS 辅助

地球静止轨道卫星增强导航 (GAGAN) 及日本的多功能增强系统 (MSAS) 等星基增强系统实现兼容与互操作<sup>[10-12]</sup>。BDSBAS 系统播发 BDSBAS-B1C 和 BDSBAS-B2a 两个频段的增强信号, 其中 BDSBAS-B1C 频点采用 ICAO 所明确的 SBAS SF L1 标准信号体制, BDSBAS-B2a 频点采用目前正在联合设计的 SBAS DFMC L5 标准信号体制<sup>[2]</sup>。两个频点增强信号对应 BDSBAS 提供两种增强服务: 单频增强服务, 由 BDSBAS-B1C 频段的信号将 GPS 和 GLONASS 系统的卫星轨道改正数、卫星钟差和电离层改正数等各类修正参数播发给用户<sup>[6]</sup>; 双频增强服务, 由 BDSBAS-B2a 频段的信号将 BDS、GPS、GLONASS 和 Galileo 系统的卫星轨道改正数和钟差改正数等各类修正参数播发给用户<sup>[13]</sup>。

## 2 定位解算设计

自主研发的 BDSBAS 监测接收机支持所有 GNSS 系统及 SBAS 信号的实时接收解算, 同时设计实现了实时 SF 和 DFMC SBAS 增强定位。本设计可以根据上位机监控设置的配置参数, 选择不同 GNSS 系统数据和不同 SBAS 系统播发的增强信息, 实现实时单频增强定位或双频无电离层组合增强定位, 且能在选择的 SBAS 系统服务不可用时, 自动转为标准服务单频定位或双频无电离层组合定位, 具体定位解算流程图如图 2 所示。

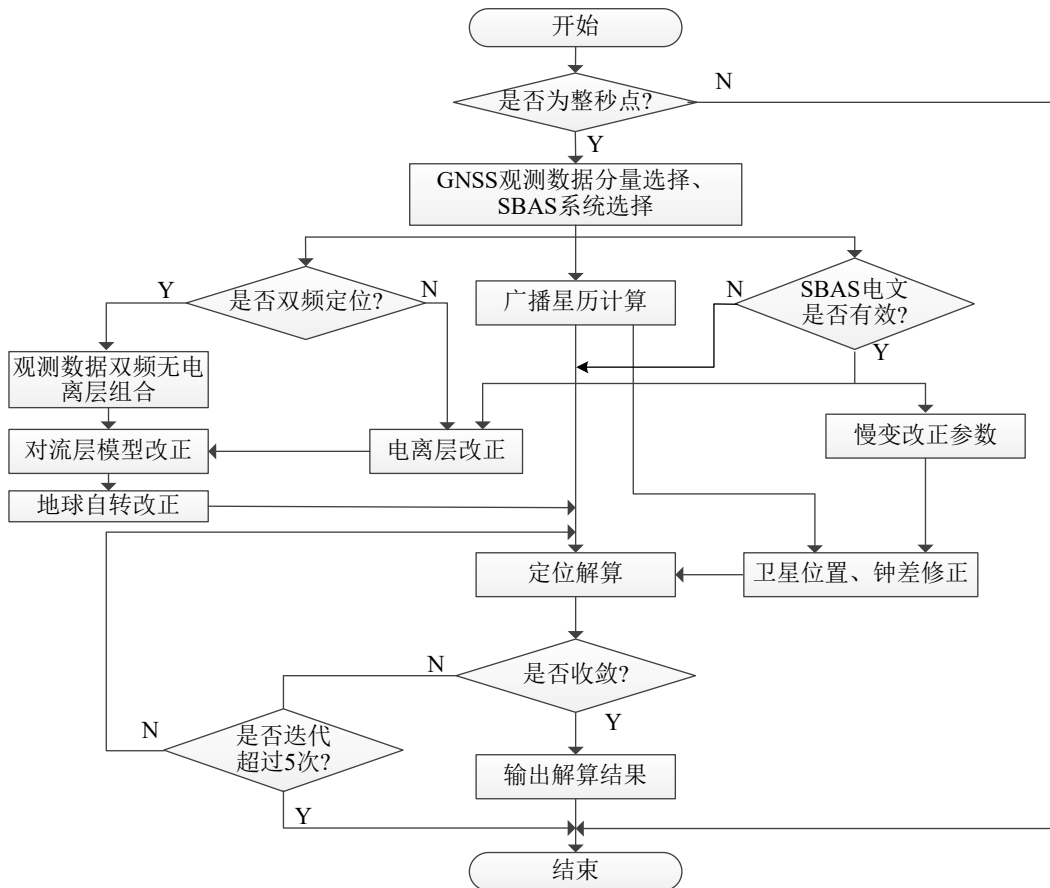


图 2 BDSBAS 监测接收机定位解算流程图

Fig. 2 BDSBAS monitor receiver locating solution flow chart

### 2.1 单频增强算法

BDSBAS-B1C 频点播发单频增强信息, 用于修正 GNSS 的单频定位精度。单频增强信息提供电离层延迟、卫星轨道位置和钟差相应的修正参数。

电离层延迟误差是影响用户单频定位精度的重要误差源之一, BDSBAS 播发电离层格网掩码、格网点处电离层垂直延迟和格网电离层垂直误差索引 GIVEI 等参数, 用于穿刺点处电离层改正数解算。

用户根据 BDSBAS 播发的相关参数, 选择周围合适的格网点, 计算得到穿刺点处电离层垂直延迟  $\tau_{vpp}$ :

$$\tau_{vpp}(\phi_{pp}, \lambda_{pp}) = \sum_{i=1}^n W_i(x_{pp}, y_{pp}) \tau_{vi} \quad (1)$$

其中,  $\phi_{pp}$  和  $\lambda_{pp}$  分别为穿刺点处的纬度和经度;  $n$  为选择的穿刺点周边有效格网点数, 取值为 3 或 4;  $W_i(x_{pp}, y_{pp})$  为格网点的权重函数;  $\tau_{vi}$  为格网点处的电离层垂直延迟。

将穿刺点处电离层垂直延迟乘以倾斜因子  $F_{pp}$  转换得到穿刺点处电离层改正数  $I_{ci}$ 。

$$I_{ci} = -F_{pp} \cdot \tau_{vpp}(\phi_{pp}, \lambda_{pp}) \quad (2)$$

$$F_{pp} = \left[ 1 - \left( \frac{R_e \cos E}{R_e + h_l} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式 (3) 中,  $R_e$  为近似地球半径, 取 6 378.136 3 km;  $E$  为卫星高度角;  $h_l$  为最大电子密度层的近似高度, 取 350 km。

卫星位置修正参数包括慢变改正参数  $(\delta x, \delta y, \delta z)^T$  和慢变改正参数变化率  $(\dot{\delta x}, \dot{\delta y}, \dot{\delta z})^T$ ,  $t$  时刻卫星  $k$  的卫星位置增强修正量为:

$$\begin{bmatrix} \delta x_k \\ \delta y_k \\ \delta z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\delta x} \\ \dot{\delta y} \\ \dot{\delta z} \end{bmatrix} (t - t_0) \quad (4)$$

其中  $t_0$  为播发的增强修正参数对应的广播时间。

设  $t$  时刻基于 GNSS 广播星历解算得到卫星  $k$  的位置坐标为  $(x_{k0}, y_{k0}, z_{k0})^T$ , 增强修正后的卫星位置坐标  $(x_k, y_k, z_k)^T$  为:

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{k0} \\ y_{k0} \\ z_{k0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta x_k \\ \delta y_k \\ \delta z_k \end{bmatrix} \quad (5)$$

钟差修正参数包括钟差改正参数  $\delta a_{f0}$  (单位 s) 和钟漂改正参数  $\delta a_{f1}$  (单位 s/s),  $t$  时刻卫星  $k$  的钟差修正量为:

$$\delta \Delta t_k(t) = \delta a_{f0} + \delta a_{f1}(t - t_0) + \delta a_{fG0} \quad (6)$$

其中,  $t_0$  为播发的增强修正参数对应的广播时间,  $\delta a_{fG0}$  为 GLONASS 卫星改正参数, 仅对 GLONASS 系统有效。

设  $t$  时刻基于 GNSS 广播星历解算得到卫星  $k$  的钟差为  $\Delta t_{k0}$ , 增强修正后的卫星钟差  $\Delta t_k$  为:

$$\Delta t_k = \Delta t_{k0} + \delta \Delta t_k(t) \quad (7)$$

## 2.2 双频增强算法

随着全球导航卫星系统的发展, SBAS 的双频多系统增强服务成为可能, 国际民航组织正积极推进双频多系统的 SBAS 标准制定<sup>[14]</sup>。以采用 B1C 和 B2a 导频分量双频无电离层组合伪距算法修正电离层延迟的影响为例, 双频无电离层组合伪距计算方法为:

$$P_{B1Cp-B2ap} = \frac{P_{B2ap} - f_{12} \cdot P_{B1Cp} - c(T_{GDB2ap} - f_{12} \cdot T_{GDB1Cp})}{1 - f_{12}} \quad (8)$$

其中,  $f_{12} = \left( \frac{1575.42}{1176.45} \right)^2$ ,  $c$  为光速,  $P_{B1Cp}$  和  $P_{B2ap}$  分别为 B1C 和 B2a 导频分量观测伪距,  $T_{GDB1Cp}$  和  $T_{GDB2ap}$  分别为 B1C 和 B2a 导频分量时延差。

BDSBAS-B2a 频点播发双频增强信息, 用于修正 GNSS 的双频定位精度。双频增强信息提供卫星轨

道位置和钟差相应的修正参数。卫星位置修正参数包括慢变改正参数 $(\delta x, \delta y, \delta z)^T$ 和慢变改正参数变化率 $(\dot{\delta}x, \dot{\delta}y, \dot{\delta}z)^T$ ,  $t$ 时刻卫星 $k$ 的卫星位置增强修正量为:

$$\begin{bmatrix} \delta x_k \\ \delta y_k \\ \delta z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\delta}x \\ \dot{\delta}y \\ \dot{\delta}z \end{bmatrix} (t - t_D) \quad (9)$$

其中,  $t_D$ 为播发的增强修正参数对应的广播时间。

设 $t$ 时刻基于GNSS广播星历解算得到卫星 $k$ 的位置坐标为 $(x_{k0}, y_{k0}, z_{k0})^T$ , 增强修正后的卫星位置坐标 $(x_k, y_k, z_k)^T$ 为:

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{k0} \\ y_{k0} \\ z_{k0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta x_k \\ \delta y_k \\ \delta z_k \end{bmatrix} \quad (10)$$

钟差修正参数包括钟差改正参数 $\delta B$  (单位 m) 和钟漂改正参数 $\dot{\delta}B$  (单位 m/s),  $t$ 时刻卫星 $k$ 的钟差修正量为:

$$\delta \Delta t_k = \frac{\delta B + \dot{\delta}B(t - t_D)}{c} \quad (11)$$

其中,  $t_D$ 为播发的增强修正参数对应的广播时间。

设 $t$ 时刻基于GNSS广播星历解算得到卫星 $k$ 的钟差为 $\Delta t_{k0}$ , 增强修正后的卫星钟差 $\Delta t_k$ 为:

$$\Delta t_k = \Delta t_{k0} + \delta \Delta t_k(t) \quad (12)$$

### 3 实验及效果分析

采用自研的 BDSBAS 监测接收机进行静态测试实验, 实验地点位于北京某办公楼。天线架设在该办公楼楼顶, 周边环境无遮挡, 坐标事先经过 PPP 计算得到, 实验设备如图 3 所示。自研的 BDSBAS 监测接收机能够完成 BDSBAS 信号的实时接收处理及增强定位解算, 且同时支持任意两种模式的定位解算, 故分两次分别进行单频和双频定位各两种方案的实验, 保存定位结果, 采样频率为 1 Hz。



图 3 自研 BDSBAS 监测接收机及天线架设图

Fig. 3 BDSBAS monitor receiver and antenna erection plan

#### 3.1 单频增强定位实验及分析

本文通过 BDSBAS 监测接收机实时接收处理 BDSBAS-B1C 信号, 发现目前 BDSBAS-B1C 频点仅播发了针对 GPS L1C/A 的增强信息, 对此本文采用两种实验方案进行实时定位解算。方案一采用 GPS 广播星历进行单点定位解算, 方案二采用 BDSBAS-B1C 信号播发的增强信息修正 GPS 卫星轨道、钟差和电离层延迟误差进行单点定位解算, 两种方案均采用标准对流层模型。

在 BDT 的 819 W 348 500S~349 500S 测试时间段内, 两种方案的水平误差 delP 和高程误差 delH 随时间变化如图 4 所示, 方案一在水平方向上定位精度优于 3.99 m, 在高程方向上定位精度优于 3.84 m; 方案二在水平方向上定位精度优于 2.91 m, 在高程方向上定位精度优于 3.04 m。

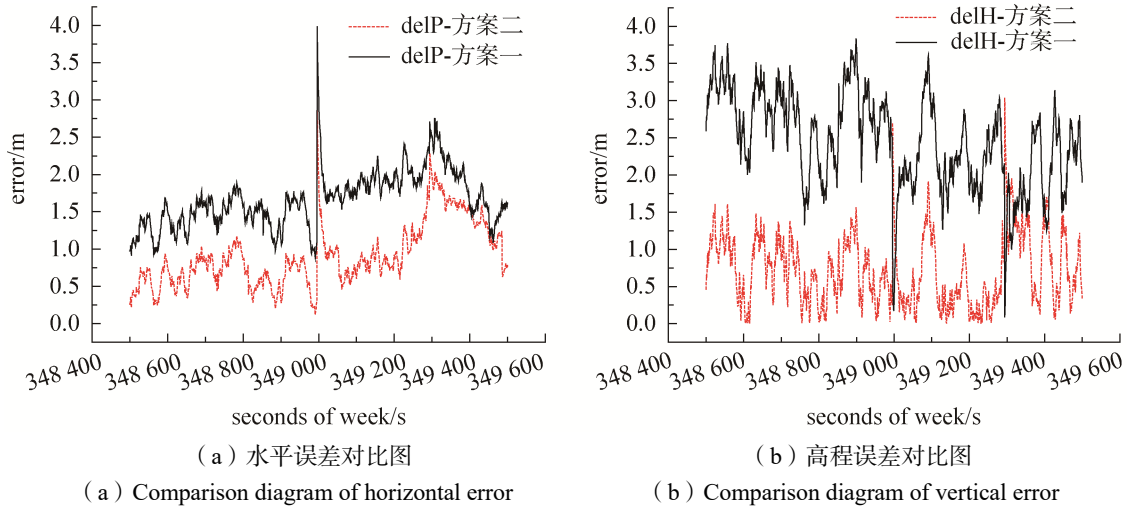


图 4 单频定位两种方案定位结果对比图

Fig. 4 Comparison diagram of positioning results of two single frequency positioning schemes

在测试时间段内两种方案定位结果的均值和方差如表 1 所示, 方案二增强定位的水平和高程定位精度分别为 0.91 m 和 0.72 m, 结果较方案一常规单点定位在水平方向上提高 45.18%, 在高程方向上提高 70.61%, 定位结果提高幅度较大, 且变化幅度较低, 表明 BDSBAS 单频增强服务性能在北京地区稳定且良好。将本文结果与文献[15]实验结果进行比较, 如表 2 所示, 由于定位算法和数据处理策略的不同, 故本文与文献[15]的定位结果差别较大, 但增强定位相对于标准定位的提升幅度较一致, 说明 BDSBAS 单频增强服务较为稳定。上述结果表明, BDSBAS-B1C 提供的单频增强服务能有效提高 GPS 的单点定位精度, 满足民航用户一类垂直引导进近 APV-I 精度要求(水平 16 m, 95%误差; 垂直 20 m, 95%误差: )。

### 3.2 双频增强定位实验及分析

目前 BDSBAS-B2a 频点播发 GPS L1C/A-L5 和 BDS B1C-B2a 的增强信息服务测试信号, 本文采用两种方案通

过 BDSBAS 监测接收机对 BDSBAS-B2a 信号进行实时接收处理, 并完成实时 BDS B1C-B2a 双频定位解算。方案一采用常规双频无电离层组合进行单点定位解算, 方案二采用 BDSBAS-B2a 信号播发的增强信息修正 BDS 卫星轨道、钟差后进行双频无电离层组合单点定位解算, 两种方案均采用标准对流层模型。

在 BDT 的 808 W 434 500 s~435 500 s 测试时间段内两种方案的水平误差 delP 和高程误差 delH 随时间变化, 如图 5 所示, 方案一在水平方向上定位精度优于 1.76 m, 在高程方向上定位精度优于 2.49 m; 方案二在水平方向上定位精度优于 1.55 m, 在高程方向上定位精度优于 2.39 m。在测试时间段内两种方案定位结果的均值和方差如表 3 所示, 方案二增强定位的水平和高程定位精度分别为 0.61 m 和 0.97 m, 结果较方案一常规双频无电离层组合定位在水平方向上提高 6.15%, 在高程方向上提高 5.83%, BDSBAS 提供的双频增强服务能一定程度上提高 BDS 的双频无电离层组合定位精度, 满足民航用户一类精密进近 CAT-I 精度要求(水平 16 m, 95%误差, 垂直 4 m, 95%误差)。

表 1 单频定位两种方案定位结果

Table 1 Positioning results of two single frequency positioning schemes

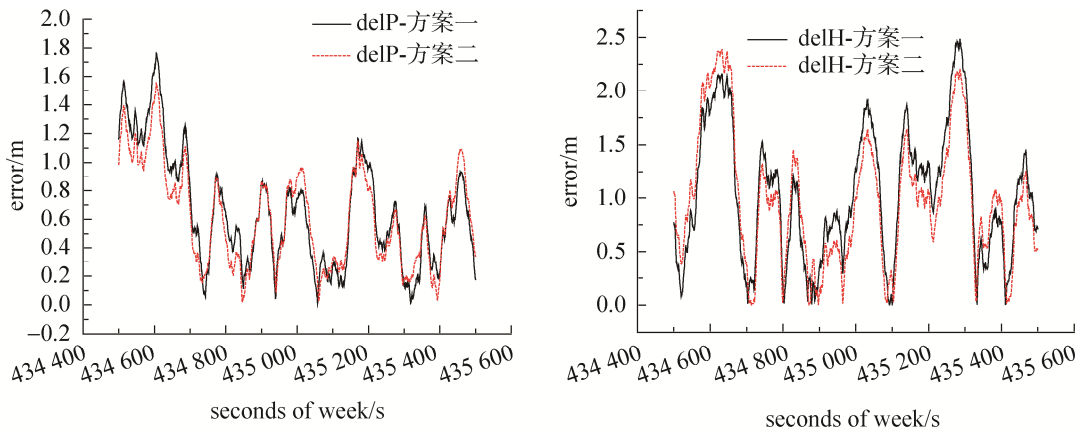
	水平误差 delP/m		高程误差 delH/m	
	均值	方差	均值	方差
方案一	1.66	0.38	2.45	0.63
方案二	0.91	0.42	0.72	0.47

表 2 定位结果比较

Table 2 Comparison of positioning results

	本文		文献[15] IGS 北京站		文献[15] BDS 北京站	
	delP/m	delH/m	delP/m	delH/m	delP/m	delH/m
标准定位	1.66	2.45	2.84	4.42	2.56	6.31
增强定位	0.91	0.72	1.13	2.38	1.39	2.82
精度提升	45.18%	70.61%	60.21%	46.1%	45.7%	55.31%





(a) 水平误差对比图

(b) 高程误差对比图

(a) Comparison diagram of horizontal error

(b) Comparison diagram of vertical error

图5 双频定位两种方案定位结果对比图

Fig. 5 Comparison diagram of positioning results of two double frequency positioning schemes

表3 双频定位两种方案定位结果

Table 3 Positioning results of two double frequency positioning schemes

	水平误差 delP/m		高程误差 delH/m	
	均值	方差	均值	方差
方案一	0.65	0.39	1.03	0.62
方案二	0.61	0.34	0.97	0.61

### 4 结束语

本文基于 BDSBAS 监测接收机设计实现了 BDSBAS 增强信号的实时接收解算,并完成了 GPS 单频和 BDS 双频增强定位的实时解算。结果表明:

① BDSBAS-B1C 增强信号能有效提高 GPS 的单频定位精度,水平和高程方向精度分别提升了 45.18%和 70.61%,达到水平 2.91 m (95%误差)和垂直 3.04 m (95%误差),满足民航用户一类垂直引导进近 APV-I 精度要求;

② BDSBAS-B2a 增强信号能一定程度提高 BDS 的双频无电离层组合定位精度,水平和高程方向精度分别提升了 6.15%和 5.83%,提升后实时定位精度在分米级,达到水平 1.55 m(95%误差)和垂直 2.39 m (95%误差),满足民航用户一类精密进近 CAT-I 精度要求。

③ 标准服务的双频无电离层组合定位精度已经接近或达到分米级,所以双频增强定位精度提升幅度较小,且由于双频无电离层组合噪声系数变大,导致变化幅度较大。

### 参考文献

[1] 郑金华, 第五兴民. 星基增强系统技术发展及应用研究[J]. 现代导航, 2020, 11(3): 157-162.  
ZHENG Jinhua, DIWU Xingmin. Research on SBAS technology development and application[J]. Modern Navigation, 2020, 3: 157-162.

[2] 陈谷仓, 刘成, 卢黎. 北斗星基增强系统服务等级与系统性能分析[J]. 测绘科学, 2021, 46(1): 42-46.  
CHEN Gucang, LIU Cheng, LU Jun. Service level and system performance analysis of BDSBAS[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(1): 42-48.

[3] 蔡洪亮, 孟轶男, 耿长江, 等. 北斗三号全球导航卫星系统服务性能评估: 定位导航授时、星际增强、精密单点定位、短报文通信与国际搜救[J]. 测绘学报, 2021, 50(4): 427-435.  
CAI Hongliang, MENG Yinan, GENG Changjiang, et al. BDS-3 performance assessment: PNT, SBAS, PPP, SMC and SAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(4): 427-435.

- [4] 蒲俊宇, 李晓杰, 郭瑞, 等. 北斗全球系统 GEO 卫星 SBAS 信号质量评估[J]. 天文学进展, 2020, 38(4): 448–456.  
PU Junyu, LI Xiaojie, GUO Rui, et al. SBAS signal quality assessment of Beidou global system[J]. Progress in Astronomy, 2020, 38(4): 448–456.
- [5] 马岳鑫, 唐成盼, 胡小工, 等. 基于残差统计特性的中国区域格网电离层 GIVE 算法优化[J]. 测绘学报, 2021, 50(3): 304–314.  
MA Yuexin, TANG Chengpan, HUXiaogong, et al. Optimization of GIVE algorithm for grid-based single shell ionospheric model over Chinese region based on residual statistics[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(3): 304–314.
- [6] 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星基增强服务信号 BDSBAS-B1C(1.0 版)[S]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2020.
- [7] 吕吉方. 北斗星基增强系统的完好性分析与仿真[D]. 天津: 中国民航大学, 2019.
- [8] 张键, 邵搏, 熊帅, 等. 北斗星基增强系统单频服务区域可用性评估[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(3): 137–145.  
ZHANG Jian, SHAO Bo, XIONG Shuai, et al. Regional single frequency service availability evaluation of BDSBAS[J]. Navigation Positioning & Timing, 2021, 8(3): 137–145.
- [9] 辛洁, 郭睿, 郭靖蕾, 等. 北斗民用双频星基增强电文性能的初步评估[J]. 测绘科学, 2021, 46(8): 8–13.  
XIN Jie, GUO Rui, GUO Jinglei, et al. Preliminary analysis of the BDSBAS dual-frequency civil service message[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(8): 8–13.
- [10] 杜娟. 星基增强系统互操作及其关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2015.
- [11] 邵搏, 耿永超, 丁群, 等. 国际星基增强系统综述[J]. 现代导航, 2017(3): 157–161.  
SHAO Bo, GENG Yongchao, DING Qun, et al. Summarize of international satellite based augmentation system[J]. Modern Navigation, 2017(3): 157–161.
- [12] 金彪, 魏巍, 陈姗姗, 等. SBAS 星历改正数及 UDRE 参数生成算法分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(1): 111–117.  
JIN Biao, WEI Wei, CHEN Shanshan, et al. Analysis of SBAS ephemeris correction and UDRE generation algorithm[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(1): 111–117.
- [13] Satellite Based Augmentation System Interoperability Working Group. SBAS L5 DFMC Interface control document. issue 1, Rev 3[S]. Dakar: SBAS IWG, 2016: 35.
- [14] DFMC SBAS SARPs Sub-group. DFMC SBAS SARPs Part B Draft[S]. 2018.10.
- [15] 熊帅, 张键, 邵搏, 等. 北斗星基增强系统用户单频增强定位方法和精度评估[C]//第十二届中国卫星导航年会. 南昌, 2021.

#### [作者简介]

于敬巨 1991 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为 GNSS 信号监测和星基增强技术。

张如伟 1980 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为 GNSS 总体设计及高精度算法研究。

张彦超 1989 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为 GNSS 高精度定位。

胡彩亮 1982 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为 GNSS 总体设计及抗干扰设计。

(本文编辑: 潘三英)