0254-6124/2023/43(4)-0736-11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LIU Ruihua, GENG Haichao, LIU Liang. Beidou Satellite-based Augmentation System Performance Evaluation Analysis (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(4): 736–746. DOI:10.11728/cjss2023.04.2022–0039

北斗星基增强系统性能评估*

刘瑞华[1] 耿海潮[1] 刘 亮[2]

1(中国民航大学电子信息与自动化学院 天津 300300)

2(中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050081)

摘 要 以实际广播星历、精密星历和北斗星基增强系统 (BDSBAS) 增强报文为实验数据，通过计算 BDSBAS 轨道误差、卫星钟差、空间信号测距误差和 BDSBAS 格网电离层有效点、播发时间和电离层延迟误差 6 个指标，评估分析了 BDSBAS 空间信号的性能。结果显示：BDSBAS 增强后的 GPS 卫星轨道误差在切向、法向、径向分别降低了 34.57%，40.57%，30.90%；卫星钟差均方根降低了 24.31%，卫星钟差标准差降低了 16.8%；空间信号测距误差相比增强前降低了 32.75%；BDSBAS 格网电离层有效点覆盖了中国及周边地区；BDSBAS 各点电离层延迟播发间隔均达到 ICAO 对精确差分定位的要求；电离层延迟在 0°－5°N 范围内误差在 0.4 m 以上，可信度均达到 99.9%，在 5°－55°N 范围内误差小于 0.4 m，可信度均为 100%；BDSBAS 水平定位误差提升超过 25%，垂直定位误差提升超过 50%，完好性均在 99.9% 以上。

关键词 北斗星基增强系统，轨道误差，卫星钟差，空间信号测距误差，电离层延迟

中图分类号 P228

Beidou Satellite-based Augmentation System Performance Evaluation Analysis

LIU Ruihua[1] GENG Haichao[1] LIU Liang[2]

1(*College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin* 300300)

2(*The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang* 050081)

Abstract In this paper, the performance of the BDSBAS space signal was evaluated and analyzed by calculating six indicators: BDSBAS orbit error, satellite clock difference, space signal ranging error and BDSBAS grid ionospheric effective point, broadcast time and ionospheric delay error, using actual broadcast ephemeris, precision ephemeris and augmentation messages of Beidou Satellite-Based Augmentation System (BDSBAS) as experimental data. Results showed that the orbital errors of GPS satellites after BDSBAS enhancement were reduced by 34.57%, 40.57% and 30.90% in tangential, normal and radial di-

* 国家重点研发计划项目资助（2021YFF0603903）

2022-08-09 收到原稿，2022-11-23 收到修定稿

E-mail：ghc_cauc@163.com

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

rections respectively; the root mean square of satellite clock deviation was reduced by 24.31%, and the standard deviation of satellite clock deviation was reduced by 16.8%; the spatial signal ranging error was reduced by 32.75% compared with that before enhancement; the effective ionospheric points of BDSBAS grid. The ionospheric delay broadcast interval of all BDSBAS points meets ICAO's requirements for accurate differential positioning; the ionospheric delay error in the range of 0°—5°N is more than 0.4 m with a confidence level of 99.9%, and in the range of 5°—55°N, the error is less than 0.4 m with a confidence level of 100%; the horizontal positioning error of BDSBAS is improved by more than 25% improvement in horizontal positioning error and over 50% improvement in vertical positioning error, all with an integrity of 99.9% or more.

Key words Beidou satellite-based augmentation system, Orbital error, Satellite clock error, Signal in space range Error, Ionospheric delay

0 引言

卫星导航定位系统空间段主要误差包括卫星轨道误差、卫星钟差、大气传播误差(例如电离层误差)。北斗星基增强系统(Beidou Satellite-Based Augmentation System, BDSBAS)利用差分技术,通过地球静止轨道卫星向用户播发差分修正信息,提高基本卫星导航定位系统的定位精度和完好性,满足民航这类对定位精度需求高的用户[1–3]。

中国民用航空局在 2019 年开始了 BDSBAS 民航应用验证评估工作,2020 年开始电文测试,计划在 2023 年向中国及周边地区提供符合 ICAO 标准的增强服务,服务等级为一类精密进近[4]。截至目前,对国际上其他星基增强系统的性能评估相对全面[5–7],但是对 BDSBAS 的系统性能评估大多处于定位层面[8–10],很少有对 BDSBAS 空间信号的评估分析。鉴于空间信号是卫星导航提供各类服务的基础,决定着卫星导航系统的性能,因此验证 BDSBAS 性能尤为重要。

由于目前 BDSBAS 处于测试阶段,只对外开放了 B1 C 频点,该频点只针对 GPS 系统进行增强,因此这里选取 2021 年一年的 GPS 广播星历、精密星历、IGS 电离层数据和 BDSBAS-B1 C 增强报文。参考美国广域增强系统(WAAS)空间信号性能评估报告[11,12]和对星基增强系统的评估方法[13,14],采用 GPS 广播星历经 BDSBAS 报文增强前后与精密星历对比的方法[15,16],通过计算 GPS 卫星被 BDSBAS 增强前后的轨道误差、卫星钟差、SISRE 完成 BDSBAS 空间信号性能评估,通过统计 BDSBAS 格网电离层的有效点和播发时间,以武汉大学 IGS 电离层数据为基准计算 BDSBAS 格网电离层延迟误差,完成对 BDSBAS 格网电离层的性能评估。

1 数据源

1.1 广播星历

采用 IGS 网站发布的 GPS 广播星历,数据频率为 每条 2 h,格式为 RINEX3.04,时间基准采用 GPS 时(GPST),空间坐标基准为 WGS-84 坐标系。

1.2 精密星历

采用 IGS 网站发布的最终精密星历数据,数据频率为每条 15 min,为了评估实时误差,对精密星历进行拉格朗日插值处理。该精密星历时间基准采用 GPST,空间基准采用 IERS 发布的 ITRF 坐标框架,与 WGS-84 坐标系的差异很小,可以完全忽略[17]。为与广播星历计算的卫星位置有相同的位置参考点,将精密星历计算的卫星三维位置进行相位中心改正[18],GPS 卫星天线相位中心改正 ANTEX 文件从 IGS 网站*下载得到。

1.3 IGS 电离层

电离层基准采用武汉大学 IGS 电离层分析中心事后全球电离层模型数据,该电离层数据穿刺点处的电离层垂直电子含量(Vertical Total Electron Content, VTEC)利用监测站双频实测 GNSS 下行数据得到,以 IONEX 格式提供,数据范围为 87.5°N 至

* https://cddis.nasa.gov

87.5°S, 180°W 至 180°E, 其经纬度的空间分辨率分别为 5°和 2.5°[19–22], 可从武汉大学 IGS 电离层分析中心网站*下载得到, 该电离层数据使用了中国区域多个监测站的 VTEC 生成, 符合中国地区的电离层特点, 在中国区域具有精度高、信息完整并且大于 BDSBAS 格网点分辨率的特点。需要注意的是, IGS 电离层数据提供的是每个格网点的 VTEC, 需将 VTEC 转换成格网电离层垂直延迟 GIVD(Grid Ionospheric Vertical Delay , 定义符号 D), 其转换计算公式为

$$D_{\mathrm{GIVD}_{(\lambda,\varphi)}} = 40.28 \times \frac{C_{\mathrm{VTEC}_{(\lambda,\varphi)}} \times 10^{16}}{(f_{\mathrm{L1}})^2}. \tag{1}$$

式中, $D_{\mathrm{GIVD}_{(\lambda,\varphi)}}$是经度为$\lambda$纬度为$\varphi$点的格网电离层垂直延迟, 单位 m; $C_{\mathrm{VTEC}_{(\lambda,\varphi)}}$为直接读取 IGS 电离层文件得到的经度为$\lambda$纬度为$\varphi$点的格网电离层垂直总电子含量; f_{L1} 为L1频点的频率, 取 1575.42 MHz。

1.4 BDSBAS 报文

播发 BDSBAS 增强报文的三颗 GEO 卫星的伪随机噪声(PRN)码为 130, 143, 144, 分别分布在 140°E, 110.5°E 和 80°E。因系统处于测试阶段, 目前只能得到 GEO130 和 GEO144 播发的 B1 C 频点的单频增强报文, 仅包含 GPS 卫星增强信息, 且 GEO130 号和 GEO144 播发内容相同, 报文播发频率均为每条 1 s。BDSBAS 的单频服务网络时(SNT=BDT+14 s)与 GPST 的同步精度保持在 50 ns 内, 坐标基准为 WGS-84 坐标系[23]。BDSBAS 增强报文取自中国卫星导航系统。为清晰显示 BDSBAS 电文结构, 表 1 给出了电文类型及对应的电文内容。

表 1 BDSBAS-B1 C 频点播发电文类型
Table 1 BDSBAS-B1 C frequency broadcast message types

电文类型	电文内容
0	系统测试
1	PRN掩码
2～5	快变改正数
6	完好性信息
7	快变改正数降效因子
9	GEO卫星星历
10	降效参数
12	SNT与UTC偏差
17	GEO卫星星历
18	电离层格网掩码
24	快慢变混合改正数
25	慢变改正数
26	电离层延迟改正数
28	卫星时钟/星历协方差矩阵
62	内部测试信息
63	空白信息

2 空间信号性能指标计算

2.1 卫星轨道误差

进行 BDSBAS 卫星轨道修正, BDSBAS 在电文 24, 25 中播发 GPS 卫星轨道慢变改正数, 采用速度 0 模式(即每条报文只包含 4 颗卫星的卫星位置慢变改正值、相应的数据龄期和掩码版本号 IODP(Issue of Data, PRN mask), 不包含卫星速度改正值), 慢变改正值的数据龄期与被改正值的时间要对应, 并且电文 25 的 IODP 值与电文 1 的 IODP 值应保持一致, 否则不能使用该改正数[23]。具体卫星轨道改正计算方法为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\mathrm{L1}} + \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix}. \tag{2}$$

式中, $\begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$为 BDSBAS 改正后的卫星位置; $\begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}_{\mathrm{L1}}^{\mathrm{T}}$为广播星历解算出的卫星位置; $\begin{bmatrix} \delta x & \delta y & \delta z \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$为广播星历的慢变改正数, 以上计算参数参考坐标系均为 WGS-84 ECEF 坐标系。需要注意的是, 卫星轨道改正值的数据龄期应与广播星历时间相对应。

卫星轨道误差常用卫星轨道坐标系中径向$\boldsymbol{R}$、切向 $\boldsymbol{T}$ 和法向$\boldsymbol{N}$ 方向的分量进行描述, 计算方法为

$$\begin{cases} \boldsymbol{T} = \dfrac{\boldsymbol{v}_x \boldsymbol{v}_y \boldsymbol{v}_z}{|\boldsymbol{v}_x \boldsymbol{v}_y \boldsymbol{v}_z|}, \\ \boldsymbol{R}' = \dfrac{\boldsymbol{xyz}}{|\boldsymbol{xyz}|}, \\ \boldsymbol{N} = \boldsymbol{R}'\boldsymbol{T}, \\ \boldsymbol{R} = \boldsymbol{TN}. \end{cases} \tag{3}$$

* ftp://igs.gnsswhu.cn/pub/whu/MGEX/ionosphere

式中, $\boldsymbol{x}$, $\boldsymbol{y}$, $\boldsymbol{z}$为地心惯性坐标系下的三维坐标矢量; $\boldsymbol{v}_x$, $\boldsymbol{v}_y$, $\boldsymbol{v}_z$ 为地心惯性坐标系下的卫星质心速度矢量, $\boldsymbol{R}'$为旋转矩阵; $\boldsymbol{R}$, $\boldsymbol{T}$, $\boldsymbol{N}$分别为卫星轨道在径向、切向和法向上的分量矢量。

2.2 卫星钟差

进行卫星钟差慢变和快变修正, 其中慢变修正数在电文 25 中播发, 快变修正数在电文 2、电文 3、电文 4、电文 5 和电文 24 中播发。卫星钟差修正同时也需要注意数据龄期和掩码版本号(Issue of Data PRN mask, IODP), 卫星钟差修正的计算方法如下:

$$\delta\Delta t_{\mathrm{Lsv}}(t)=\delta a_{f0}+\delta a_{f1}(t-t_0). \tag{4}$$

式中, $\delta\Delta t_{\mathrm{Lsv}}(t)$为卫星钟差慢变修正数, δa_{f0}为时钟偏差, δa_{f0}为钟漂, t_0 为修正数的参考时刻。

$$\delta\Delta t_{\mathrm{Fsv}}(t)=[P(t_{\mathrm{of}})+R(t_{\mathrm{of}})(t-t_{\mathrm{of}})]/c. \tag{5}$$

式中, $\delta\Delta t_{\mathrm{Fsv}}(t)$为卫星钟差快变修正数, c为光速, $R(t_{\mathrm{of}})$为t_{of}时刻用户计算的测距速率修正数, 计算方法如下:

$$R_c(t_{\mathrm{of}})=\frac{P_{\mathrm{c}}-P_{\mathrm{p}}}{\Delta t}. \tag{6}$$

式中, $\Delta t=t_{\mathrm{of}}-t_{\mathrm{of,p}}$; P_{c}为最新接收到的快变修正值(由 MT2-5, MT24 播发); P_{p}为P_{c}之前接收到的快变修正值; t_{of}为P_{c}的参考时刻; $t_{\mathrm{of,p}}$为P_{p}的参考时刻。

$$t_{i,\mathrm{SBAS}}=t_{i,\mathrm{L1}}-D^{G}_{\mathrm{L1}}+\delta\Delta t_{\mathrm{Lsv}}(t)+\delta\Delta t_{\mathrm{Fsv}}(t). \tag{7}$$

式中, $t_{i,\mathrm{SBAS}}$为经 BDSBAS 快变和慢变修正后的卫星钟差; $t_{i,\mathrm{L1}}$为 L1 频点广播星历计算的卫星钟差; D^{G}_{L1}为 L1 频点广播星历中给出的群延迟。

由于广播星历和精密星历采用的时间基准和时间尺度不同, 解算的卫星钟差会带有系统误差, 求一次差去除系统误差后再计算卫星钟差。具体卫星钟差计算方法如下:

$$t_{\mathrm{bdrc}}=a_0+a_1(t-t_{\mathrm{oc}})+a_2(t-t_{\mathrm{oc}})^2+\Delta t_{\mathrm{r}}, \tag{8}$$

$$\mu_{\mathrm{bdrc}}=\left(\sum_{i=1}^{n}T_i-t_{i,\mathrm{bdrc}}\right)/n, \tag{9}$$

$$\mathrm{d}T_{\mathrm{bdrc}}=T_i-t_{i,\mathrm{bdrc}}-\mu_{\mathrm{bdrc}}, \tag{10}$$

$$\mu_{\mathrm{SBAS}}=\left(\sum_{i=1}^{n}T_i-t_{i,\mathrm{SBAS}}\right)/n, \tag{11}$$

$$\mathrm{d}T_{\mathrm{SBAS}}=T_i-t_{i,\mathrm{SBAS}}-\mu_{\mathrm{SBAS}}. \tag{12}$$

式中, t_{bdrc}为利用广播星历参数得到的卫星钟差; a_0为广播卫星钟差; a_1为卫星钟漂移; a_2为卫星钟漂移速率; t为当前时刻, t_{oc}为星历广播时刻; Δt_{r}为相对论校正项; $\mathrm{d}T_{\mathrm{bdrc}}$为 BDSBAS 改正前的卫星钟差; $\mathrm{d}T_{\mathrm{SBAS}}$为 BDSBAS 改正后的卫星钟差; T_i为某一时刻第 i 颗卫星的精密钟差; $t_{i,\mathrm{bdrc}}$为相同时刻广播星历计算得到的第i颗卫星的钟差; $t_{i,\mathrm{SBAS}}$为经 BDSBAS 快变和慢变改正后第i颗卫星的钟差; μ_{bdrc}为 GPS 广播星历所有卫星钟差一次差的均值。μ_{SBAS}是 GPS 卫星钟差经 BDSBAS 修正后所有卫星一次钟差的均值。

2.3 空间信号测距误差

卫星导航系统定位是由空间信号测距实现的, 且空间信号测距误差 SISRE (Signal-In-Space Range Error, 定义符号 E_{SISRE})包含了卫星轨道误差和卫星钟差, 是评估卫星导航空间信号相对全面的指标, 其具体计算公式为

$$E_{\mathrm{SISRE}}=\sqrt{(\alpha\cdot\Delta R-c\cdot\mathrm{d}T)^2+(\Delta A^2+\Delta C^2)/\beta}. \tag{13}$$

式中, c为光速; ΔR为卫星轨道径向误差; ΔA为卫星轨道切向误差; ΔC为卫星轨道法向误差; $\mathrm{d}T$ 为卫星钟差; 不同的 GNSS 系统α和β取值不同, GPS 系统卫星的α取值为 0.98, β 取值为 49, 该参数由中国北斗卫星导航系统管理办公室测试评估研究中心得到。

3 空间信号性能

利用上述空间信号各误差的计算方法, 结合 2021 年一年的广播星历、精密星历和 BDSBAS 报文数据, 以 IGS 精密星历为基准分别计算了 BDSBAS 增强前后 GPS 32 颗卫星的轨道误差、卫星钟差和 SISRE, 评估 BDSBAS 空间信号性能。

3.1 卫星轨道误差

对 GPS 32 颗卫星轨道误差分别进行为期 1 年的评估, 其中 2021 年 2 月 1 日 GPS PRN1 卫星在 RTN 坐标系下的卫星轨道误差如图 1 所示。

从图 1 可以看出, 通过 BDSBAS 增强后的切向和法向轨道误差较增强前更加贴近 0 值, 径向轨道误差增强不明显, 但部分时刻也可以明显看出有增强效果。经过计算得到增强前的切向轨道的均方根误差为 0.724 m, 增强后的均方根误差为 0.474 m, 降低了 34.39%; 增强前法向轨道均方根误差为 0.35 m, 增强后均方根误差为 0.208 m, 降低了 40.57%; 增强前的径向轨道均方根误差为 0.156 m, 增强后均方根误差

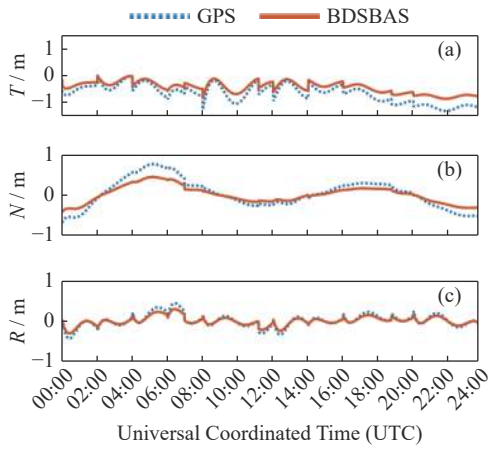

图 1 PRN 1 号卫星轨道误差

Fig. 1 Orbital error of PRN 1 satellite

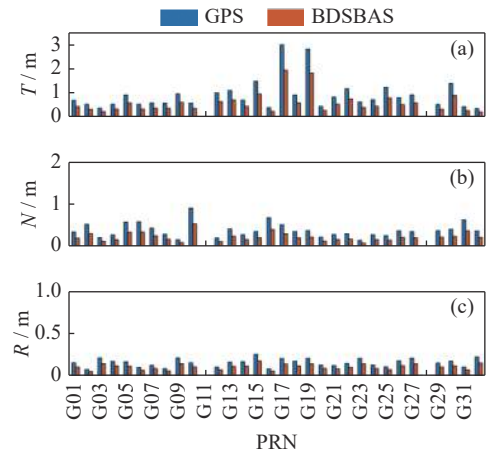

图 2 轨道误差统计

Fig. 2 Statistics of orbital errors

为 0.108 m, 降低了 30.77%。因为 GPS PRN 11, 28 卫星在 2021 年健康状态未知, 因此这里只对 GPS 其他 30 颗卫星的轨道误差结果进行统计, GPS 30 颗卫星 2021 年一年的 RTN 坐标系下轨道误差计算方法如下:

$$E_{\mathrm{rms}}(\mathrm{d}x)=\left[\sum_{i=1}^{n}\mathrm{RMS}(\mathrm{d}x_i)\right]/n. \tag{14}$$

式中, $E_{\mathrm{rms}}(\mathrm{d}x)$为该卫星一年的轨道均方根误差; i为第i天; n为总天数, 这里是 365 天; $\mathrm{RMS}(\mathrm{d}x_i)$为第$i$天轨道的均方根误差。计算结果如图 2 所示, 本文后面的统计结果也由此式计算得到。

从图 2 可以看出, 在切向、法向和径向上每颗卫星轨道经 BDSBAS 增强后的误差较增强前均有不同程度的减小。经计算 GPS 全星座轨道切向误差增强前为 1.131 m, 增强后为 0.74 m, 降低了 34.57%; 法向误差增强前为 0.424 m, 增强后为 0.252 m, 降低了 40.57%; 径向误差增强前为 0.165 m, 增强后为 0.114 m, 降低了 30.9%。这表明 BDSBAS 慢变改正数对 GPS 卫星轨道三个方向均有增强作用, 可以减小定位过程中的轨道误差。

3.2 卫星钟差

卫星钟差作为基本卫星导航系统空间信号重要的一部分, 其误差会直接影响测距精度, 在评估空间信号精度时常常作为重点评估对象。对 2021 年 2 月 1 日 GPS PRN1 星的数据进行处理, 计算增强前后的卫星钟差, 结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 增强后的卫星钟差明显变小,

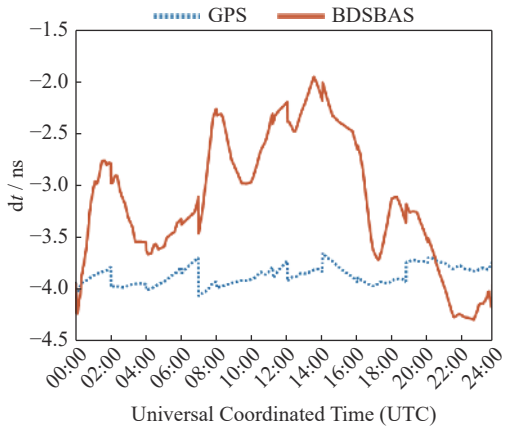

图 3 PRN 1 号卫星钟差

Fig. 3 Error of PRN 1 satellite clock

提升了 1～2 ns。其中 0 时刻和 22:00 时刻都出现了反向修正的情况, 这是由于 GPS 卫星相对于 BDSBAS 监测站不可见时, 卫星钟差改正数沿用了之前的改正数, 改正数不准确而造成的, 在实际定位中该时间段不会利用该颗卫星进行定位, 因此可以忽略。经计算, 该卫星被用于定位时段增强前的卫星钟差 STD 为 0.26 ns, 增强后为 0.22 ns, 提升了 15.38%。从图 3 中可以看出卫星钟差出现跳变情况, 这是由于星载原子钟在轨道运行期间受到外部环境和设备老化的影响, 导致其输出的钟差序列中存在粗差、钟跳等异常情况, 并且广播星历每两个小时广播一次, 每次之间存在跳变, 这里评估卫星钟差采用的基准为精密星历, 其卫星钟差是经过事后处理的, 很连续且没有跳变[24]。

卫星钟差的均方根(RMS)误差主要反映卫星时钟的精度, 卫星钟差的标准差(STD)反映其对定位精度的影响。为直观展示 BDSBAS 对卫星时钟精度和定位精度的影响, 统计了 30 颗 GPS 卫星一年内被用作定位时段的卫星钟差 RMS 和 STD, 如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 每颗 GPS 卫星的卫星钟差 RMS 和 STD 经 BDSBAS 增强后都有明显降低, GPS 星座卫星钟差的 RMS 平均降低 24.31%, 表明 BDSBAS 可有效提升 GPS 卫星时钟精度; GPS 星座卫星钟差的 STD 平均降低 16.8%, 表明 BDSBAS 可有效减小因卫星钟差导致的定位误差。随着 GPS 卫星的不断发展, GPS 卫星改用了更精准的原子钟, 广播的卫星钟差已很小, BDSBAS 对卫星钟差的增强幅度有限。

3.3 空间信号测距误差

为了总体分析 BDSBAS 对 GPS 测距误差的增强效果, 计算 GPS 每颗卫星增强前后的 SISRE, 2021 年 2 月 1 日 GPS PRN1 卫星的 SISRE 结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出增强后的 SISRE 明显减小, 振荡幅度也有所减小, 这种振荡是由轨道误差和卫星钟差共同导致的, 其中轨道误差呈周期性变化, 卫星钟差有小幅振荡和跳变, 其原因在分析卫星钟差时已给出。计算得到 BDSBAS 增强前的 SISRE 均方根误差为 0.798 m, 最大误差为 1.174 m, 增强后的 SISRE 均方根误差为 0.594 m, 最大误差为 0.974 m, 降低了 25.56%。给出 2021 年 GPS 30 颗卫星的 SISRE 统计结果, 如图 6 所示。

从图 6 可以看出, GPS 所有卫星的 SISRE 均有不同程度增强, 其中增强效果最明显的 8 号卫星, 其增强前 SISRE 均方根为 2.02 m, 增强后为 1.14 m, 增强了 43.56%; 增强效果最差的 3 号卫星, 增强前 SISRE 均方根为 0.061 m, 增强后为 0.041 m, 增强了 32.7%; GPS 全星座增强前, 平均 SISRE 均方根为 0.803 m, 增强后的平均 SISRE 均方根为 0.540 m, 降低了 32.75%, 表明 BDSBAS 对 GPS SISRE 增强效果明显, 能够有效减小空间信号测距误差, 减小定位过程中产生的误差, 提高定位精度。

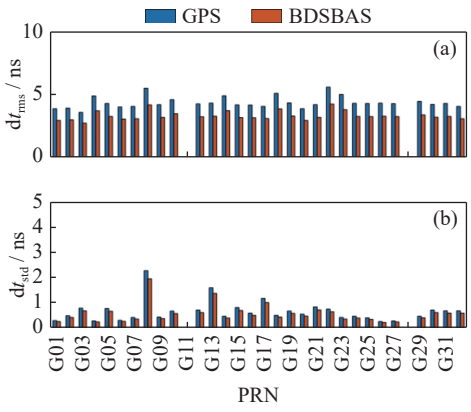

图 4 卫星钟差统计

Fig. 4 Statistics of satellite clock errors

4 电离层误差修正性能

电离层延迟是对定位影响最大的因素之一。以下结合 2021 年一年的 IGS 电离层数据和 BDSBAS 报文数据, 计算了 BDSBAS 格网电离层有效点

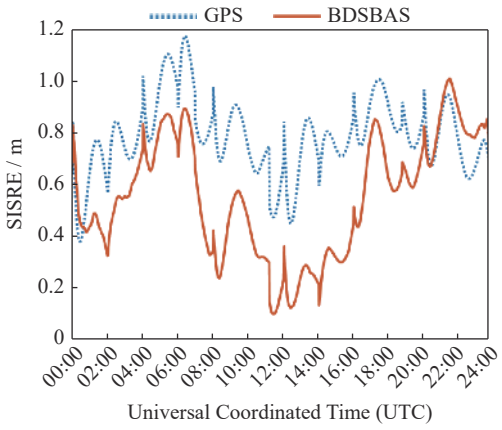

图 5 PRN 1 号卫星 SISRE

Fig. 5 SISRE of PRN 1 satellite

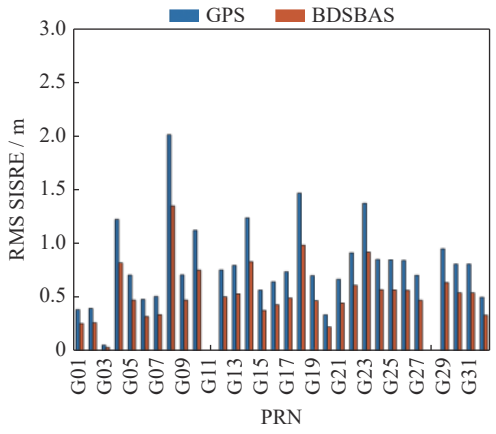

图 6 SISRE 统计

Fig. 6 Statistics of SISRE

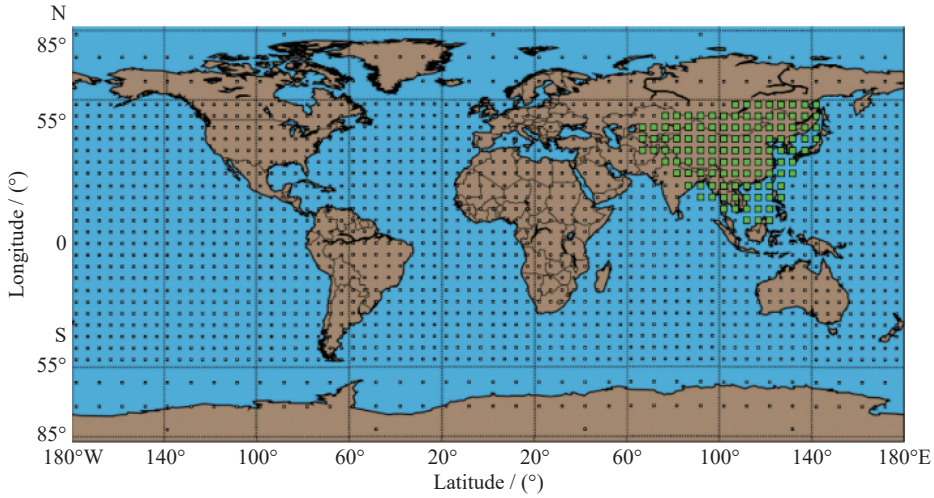

图 7 BDSBAS 格网电离层有效点（绿色点为 BDSBAS 格网电离层有效点）

Fig. 7 BDSBAS grid ionospheric effective point (Green points are valid ionospheric points for the BDSBAS grid)

表 2 数据广播间隔和所支持的功能

Table 2 Data broadcast interval and supported features

数据类型	最大广播间隔	基本差分校正	精确差分校正
电离层网格掩码	300 s	—	√
电离层校正, GIVEI	300 s	—	√

注 “√”表示支持该功能必须广播的数据。

覆盖、播发时间和电离层延迟误差, 评估 BDSBAS 电离层性能。

4.1 格网电离层有效点

通过解析 2022 年的 BDSBAS 报文 18 的有效点数据, 得到 BDSBAS 格网电离层有效点的覆盖情况如图 7 所示。

图 7 中所有绿色点为 BDSBAS 格网电离层有效点, BDSBAS 格网电离层播发信息时将全球按经纬度分为 10 个格网带, 从图 7 可以看出, 2021 每天的有效点涉及 6, 7, 8 三个格网带, 有效点纬度覆盖区域为 0°－55°N, 经度范围为 65°－140°E, 覆盖了中国及周边地区, 符合 BDSBAS 系统建设的预期。

4.2 格网电离层播发间隔

根据 ICAO 对 SBAS 数据播发间隔要求, 电离层修正信息播发时间间隔必须在规定的最大时间间隔范围内, 才能提供符合 ICAO 要求的精确差分校正功能, 表 2 给出了 ICAO 要求的电离层数据广播间隔和支持的功能[4]。

以带为单位对 2021 年的平均格网电离层延迟播发间隔进行统计, 结果如图 8 所示。

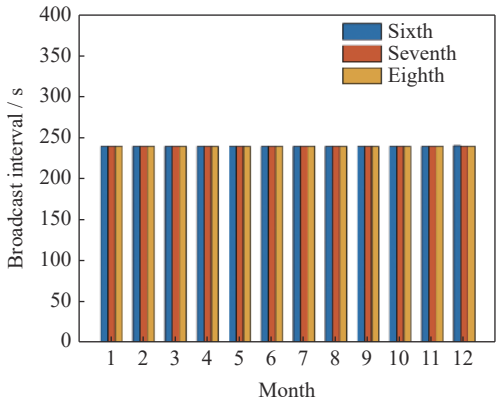

图 8 电离层播发间隔统计

Fig. 8 Statistics of ionospheric broadcast interval

由图 8 可以看出, 统计时段内的 6, 7 和 8 带电离层网格延迟播发间隔在各个月份的均值均为 240 s, 小于 300 s, 符合 ICAO 对精确差分校正的电离层信息最大播发时间间隔要求。

4.3 格网电离层延迟误差

对 BDSBAS 网格点电离层有效点和电离层信息播发间隔分析可以看出, 在保证能及时播发的前提下, 电离层延迟修正率更加重要。通过解析 MT26 电离层延迟信息, 对 BDSBAS 格网电离层延迟误差进行了分析, 图 9 为具有代表性的 4 个格网点的电离层延迟误差结果。

图 9 分别给出了一天内的 IGS 电离层延迟, 用蓝色实线表示, 作为评估电离层延迟误差的基准, BDS-

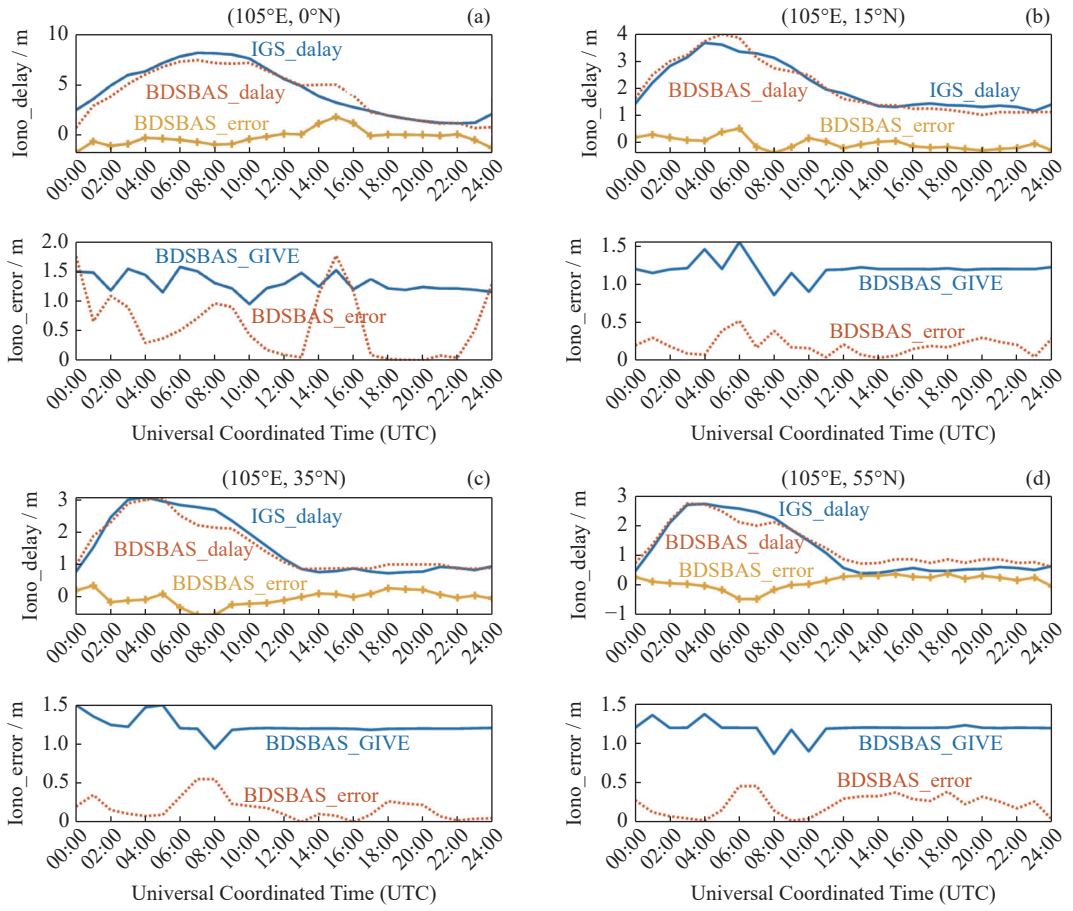

图 9 BDSBAS 格网电离层延迟

Fig. 9 BDSBAS grid ionospheric delay

BAS 计算的可用电离层延迟用红色虚线表示(可用电离层延迟即格网电离层垂直误差索引 GIVE(Grid Ionospheric Vertical Error)小于 14 情况时的电离层延迟),对前两者作差得出的 BDSBAS 电离层延迟误差用黄色加号线表示,BDSBAS 播发的格网电离层垂直误差用蓝色实线表示,BDSBAS 电离层延迟误差绝对值用红色虚线表示。BDSBAS 电离层延迟误差绝对值大小可以体现 BDSBAS 电离层的性能,其大于 BDSBAS-GIVE 时表示 BDSBAS 播发的电离层延迟信息不可信,从图 9 可以看出,0°N 处出现了电离层延迟信息不可信的情况,说明此处电离层性能较差。统计 2021 年不同纬度的平均电离层延迟误差,结果见表 3,其中可用格网电离层延迟可信度的计算公式为

$$C = \frac{K_{\mathrm{ABS(E)<GIVE}}}{K_{\mathrm{GIVE}}} \times 100\% \tag{15}$$

式中, C 为 BDSBAS 格网电离层延迟可信度; $K_{\mathrm{ABS(E)<GIVE}}$ 为基于 IGS 电离层数据计算的 BDS-

表 3 BDSBAS 格网电离层延迟误差统计

Table 3 Statistics of BDSBAS grid ionospheric delay error

纬度 N /(°)	$E_{\max}$ / m	E_{rms} / m	C/(%)
0	1.72	0.81	95
5	0.75	0.42	100
10	0.52	0.34	100
15	0.47	0.26	100
20	0.50	0.22	100
25	0.46	0.23	100
30	0.55	0.25	100
35	0.53	0.24	100
40	0.54	0.23	100
45	0.50	0.26	100
50	0.51	0.23	100
55	0.46	0.26	100

BAS 电离层误差绝对值小于 BDSBAS 播发的 GIVE 的样本数; K_{GIVE} 为统计样本总数。

从表 3 可以看出, 5°—55°N 的电离层延迟均方根误差在 0.4 m 以下, 可信度均为 100%, 证明 BDSBAS 播发的电离层信息在此范围内完全可信, 且误差较小, 能够为民航飞行提供精确电离层延迟校正功能; 0°到 5°N 电离层延迟误差较大, 在 0.4 m 以上, 可信度较低, 未达到 100%, 说明此范围内 BDSBAS 电离层校正不是非常理想, 未达到民航规定的电离层延迟校正要求, 需进行改进, 合理布局监测站的位置, 加强监测。

5 单频定位性能

从评估结果可以看出, BDSBAS-B1 C 频点播发的增强报文对 GPS 各空间信号有不同程度的增强作用, 并且 BDSBAS 播发的格网电离层延迟信息对电离层延迟校正有着相对不错的性能。为更好地说明 BDSBAS 可有效提升卫星导航系统在飞机航路和进近阶段的定位性能, 结合中国及周边北京房山站(BJFS)、武汉站(JFNG)、香港站(HKSL)、台湾站(TNML)和吉尔吉斯斯坦站(POL2)5 个观测站的数据计算 BDSBAS 定位精度和完好性。

5.1 单频定位精度

统计 5 个站点 BDSBAS 增强前后的单点定位精度, 其中北京房山站 2021 年 2 月 1 日水平和垂直方向增强前后的定位精度结果如图 10 所示。

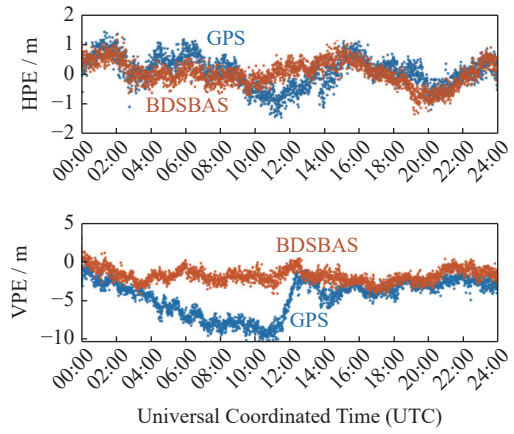

图 10 BDSBAS 单频定位精度

Fig. 10 BDSBAS single frequency positioning accuracy

从图 10 可以看出, BDSBAS 的定位误差明显更小。通过计算得到增强前后定位误差的均方根值: 水平方向增强前为 0.507 m, 增强后为 0.416 m, 误差减少了 17.9%; 垂直方向增强前为 4.947 m, 增强后为 2.002 m, 误差减少了 59.5%。

为统计中国及周边地区的定位误差, 计算了 5 个站点 2021 年增强前后定位误差的均方根值, 结果列于表 4。表 4 中 HPE 为水平定位误差, VPH 为垂直定位误差, 单位 m。从表 4 可以看出, 各站点定位精度增强后都有明显提升, BDSBAS 水平定位误差在 1 m 以下, 相比 GPS 精度提升 25% 以上; 垂直定位误差在 5.5 m 以下, 相比 GPS 精度提升 50% 以上, 可以有效提升卫星导航系统在飞机航路和进近阶段的定位精度, 同时验证了空间信号的增强可以使得定位精度有所提升。

5.2 单频定位完好性

为验证 BDSBAS 的定位完好性, 分别计算了水平和垂直定位误差保护级, 统计 5 个站点的完好性情

表 4 BDSBAS 定位精度

Table 4 BDSBAS positioning accuracy

Station	Error/m	GPS	BDSBAS	误差减少/(%)
BJFS	HPE	0.63	0.46	26.9
	VPE	4.86	2.24	53.9
JFNG	HPE	0.68	0.45	33.8
	VPE	3.86	1.98	48.7
HKSL	HPE	0.87	0.54	37.9
	VPE	5.12	2.33	54.5
TNML	HPE	1.12	0.79	29.5
	VPE	4.64	2.24	51.7
POL2	HPE	0.73	0.51	30.1
	VPE	4.96	2.16	56.5

表 5 2021 年 BDSBAS 定位完好性

Table 5 BDSBAS positioning integrity in 2021

台站	水平方向/(%)	垂直方向/(%)
BJFS	100	100
JFNG	100	100
HKSL	100	100
TNML	99.9	99.9
POL2	100	99.9

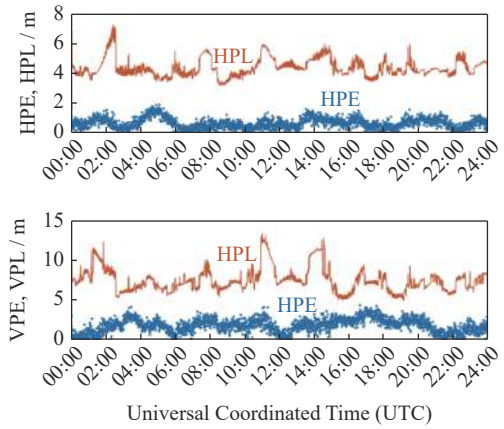

图 11 北京房山站 2021 年 2 月 1 日的 BDSBAS 定位完好性

Fig. 11 BDSBAS positioning integrity at Beijing Fangshan Station on 1 February 2021

况, 结果见表 5, 其中北京房山站 2021 年 2 月 1 日的完好性情况如图 11 所示。

从图 11 可以看出, 评估时段内没有出现定位误差超过保护级的情况, 说明 BDSBAS 定位误差保护级对定位误差的包络达到 100%, BDSBAS 完好性为 100%。

表 5 统计了 2021 年的 BDSBAS 定位完好性情况, 可以看出 BDSBAS 定位完好性在水平和垂直方向均达到 99.9% 以上, 符合民航对定位导航系统的完好性要求。

6 结论

为更好地验证 BDSBAS 在民航应用中的性能, 从空间信号、电离层修正、定位精度和完好性方面评估了 BDSBAS 的性能, 得出结论如下。

(1) BDSBAS 空间信号性能方面: BDSBAS 对 GPS 轨道精度起到明显的增强作用, 在切向、法向、径向上的轨道误差分别降低了 34.57%, 40.57%, 30.9%; 对 GPS 卫星钟差也起到一定增强作用, 整体卫星钟差 RMS 降低了 24.31%, STD 卫星钟差降低了 16.8%; SISRE 降低了 32.75%。

(2) BDSBAS 格网电离层性能方面: BDSBAS 格网电离层播发覆盖区域为 0°－55°N, 65°E－140°E, 完全覆盖到了中国区域, 符合 BDSBAS 系统建设预期; 统计的 12 个格网点的电离层延迟播发间隔均小于 300 s, 符合 ICAO 的最大广播间隔规定; 0°到 5°N 范围内的电离层延迟误差均方根在 0.4 m 以上, 可信度没有达到 100%, 5°－55°N 范围内在 0.4 m 以下, 且可信度较高, 可信度均达到了 100%。

(3)BDSBAS 定位方面: 各站 BDSBAS 水平定位误差小于 1 m, 垂直定位误差小于 5.5 m; BDSBAS 水平和垂直完好性均在 99.9% 以上。

综上可以得出, BDSBAS 对 GPS 各空间信号有不同程度的增强作用, 可以有效提升卫星导航系统在飞机航路和进近阶段的定位精度和完好性。BDSBAS 格网电离层在有效点覆盖区域上符合预期, 电离层延迟播发时间间隔符合 ICAO 规定; 电离层延迟误差在 0°－5°N 范围内表现不佳, 在 5°－55°N 范围内表现良好, 由于电离层在低纬度地区比较活跃而不易被精确监测, 结合本文结论, 在建设 BDSBAS 的过程中应加大 0°到 5°N 地区监测站的投入。

参考文献

[1] 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 (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、星基增强、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)

[2] CHEN J P, ZHANG Y Z, YU C, *et al*. Models and performance of SBAS and PPP of BDS[J]. *Satellite Navigation*, 2022, **3**(1): 4

[3] SHAO Bo, GENG Yongchao, DING Qun, *et al*. Summarize of international satellite based augmentation system[J]. *Modern Navigation*, 2017, **8**(3): 157-161 (邵搏, 耿永超, 丁群, 等. 国际星基增强系统综述[J]. 现代导航, 2017, **8**(3): 157-161)

[4] ISBN 978-92-9258-504-4. International standards and recommended practices annex 10 vol. I. radio navigation aids[S]. Canada: ICAO, 2018

[5] NIE Z X, ZHOU P Y, LIU F, *et al*. Evaluation of orbit, clock and ionospheric corrections from five currently available SBAS L1 services: methodology and analysis[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(4): 411

[6] ROVIRA-GARCIA A, JUAN J M, SANZ J, *et al*. Accuracy of ionospheric models used in GNSS and SBAS: methodology and analysis[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, **90**(3): 229-240

[7] BAHRAMI M, FFOULKES-JONES G, ZHANG Q. Analysis of SBAS orbit and clock corrections for GPS and their applicability to today's mass market multi-GNSS personal navigation[C]//29 th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION

GNSS+ 2016). Portland: ION, 2016

[8] XIONG Shuai, ZHANG Jian, SHAO Bo, *et al.* Single-frequency augmented positioning method and accuracy evaluation for users of BeiDou satellite-based augmentation system[C]//Proceedings of the 12th Annual China Satellite Navigation Conference—S03 Navigation Signal and Signal Processing. Nanchang: China Satellite Navigation Conference, 2021: 46-64 (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与精度评估[C]//第十二届中国卫星导航年会论文集——S03 导航信号与信号处理. 南昌: 中国卫星导航学术年会组委会, 2021: 46-64)

[9] ZHANG Jian, SHAO Bo, XIONG Shuai, *et al.* Regional single frequency service availability evaluation of BDSBAS[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2021, **8**(3): 137-145 (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)

[10] JIN Biao, CHEN Shanshan, LI Zhulian, *et al.* SBAS GEO satellite user range error and position augmentation research[J/OL]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022: 1-11. [2022-03-22]. https://www.doc88.com/p-41873061468929.html (金彪, 陈姗姗, 李祝莲, 等. SBAS GEO卫星URE精度及定位增强研究[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022: 1-11. [2022-03-22]. https://www.doc88.com/p-41873061468929.html)

[11] FAA. Global positioning system Wide Area Augmentation System (WAAS) performance standard[S]. Washington: FAA, 2008

[12] NSTB/WAAS T&E Team. Wide Area Augmentation System Performance Analysis Report[R]. Atlantic City International Airport: FAA William J. Hughes Technical Center, 2021

[13] KIM M, KIM J. A long-term analysis of the GPS broadcast orbit and clock error variations[J]. *Procedia Engineering*, 2015, **99**: 654-658

[14] U. S. Department of Defense. Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard (4.0 th ed)[R]. Washington: U. S. Department of Defense, 2008: A17-A19

[15] CHEN J P, HU X G, TANG C P, *et al.* SIS accuracy and service performance of the BDS-3 basic system[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2020, **63**(6): 269511

[16] LIU Lu, GUO Jinyun, ZHOU Maosheng, *et al.* Accuracy analysis of GNSS broadcast ephemeris orbit and clock offset[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, **47**(7): 1122-1132 (刘路, 郭金运, 周茂盛, 等. GNSS广播星历轨道和钟差精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, **47**(7): 1122-1132)

[17] YAN Yue. Analysis of the coordinate conversion between WGS84 and ITRF frame[J]. *Geospatial Information*, 2021, **19**(1): 74-77 (严悦. WGS84与ITRF框架间的坐标转换分析[J]. 地理空间信息, 2021, **19**(1): 74-77)

[18] ZHANG Xiaohong, LI Pan, LI Xingxing, *et al.* Influence of antenna phase center correction model on precise point positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, **36**(12): 1470-1473 (张小红, 李盼, 李星星, 等. 天线相位中心改正模型对PPP参数估计的影响[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, **36**(12): 1470-1473)

[19] CHANG Zhiqiao, CHEN Jinping, LIU Li, *et al.* Broadcast characteristics and performance evaluation of WAAS ionospheric grid[J]. *Progress in Astronomy*, 2021, **39**(2): 265-275 (常志巧, 陈金平, 刘利, 等. WAAS电离层格网播发特性及其性能评估[J]. 天文学进展, 2021, **39**(2): 265-275)

[20] YIN P, SHI S R, REN D D. SBAS ionospheric grid delay estimation based on ionospheric tomography: a case study on September 7-9, 2017[J]. *GPS Solutions*, 2022, **26**(3): 86

[21] BILITZA D, MCKINNELL L A, REINISCH B, *et al.* The international reference ionosphere today and in the future[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, **85**(12): 909-920

[22] LIU A, WANG N B, LI Z S, *et al.* Validation of CAS's final global ionospheric maps during different geomagnetic activities from 2015 to 2017[J]. *Results in Physics*, 2018, **10**: 481-486

[23] China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document: satellite-based augmentation system service signal BDSBAS-B1 C (version 1.0)[EB/OL]. 2020. http://www.beidou.gov.cn/yw/xwzx/202008/t20200803_20930.html (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-B1 C(1.0版)[EB/OL]. 2020. http://www.beidou.gov.cn/yw/xwzx/202008/t20200803_20930.html)

[24] HUANG Guanwen. Research on Algorithms of Precise Clock Offset and Quality Evaluation of GNSS Satellite Clock[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012 (黄观文. GNSS星载原子钟质量评价及精密钟差算法研究[D]. 西安: 长安大学, 2012)