

DOI: 10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20220517.001

BDSBAS 时间基准互操作方法研究与性能测试

刘成¹, 陈颖¹, 熊帅², 邵搏², 张键², 王威¹

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094; 2. 中国电子科技集团公司第二十研究所, 陕西 西安 710068)

摘要: 卫星导航星基增强系统(Satellite-Based Augmentation System, SBAS)由不同国家建设, 所增强卫星星座和参考时间系统不尽相同, 因此, 星基增强系统时间基准之间的兼容互操作一直是国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)星基增强系统标准研究中的重要技术问题。介绍了星基增强系统网络时(SBAS Network Time, SNT)的概念和研究现状, 结合国际民航组织星基增强系统标准与建议措施(Standards and Recommended Practices, SARPs), 对星基增强系统网络时间兼容互操作问题进行了分析和研究, 并给出了目前最新的联合解决方案。在此基础上, 对北斗星基增强系统地面状态进行了升级, 并开展了服务性能初步测试。结果表明, 北斗星基增强系统单频(Single Frequency, SF)星基增强系统网络时间和双频多星座(Dual-Frequency Multi-Constellation, DFMC)星基增强系统网络时间与参考全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)时间基准之间的最大偏差分别为 37 ns 和 0.17 μ s, 满足国际民航组织标准要求; 服务性能基本符合 APV-I 等级要求, 证明了北斗星基增强系统时间基准互操作的可行性和可靠性。

关键词: 北斗; 全球导航卫星系统; 星基增强系统; 双频多星座; 星基增强网络时

中图分类号: V19 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7673(2022)06-0576-12

目前, 世界上已完成建设和正在建设的星基增强系统主要包括美国广域增强系统(Wide Area Augmentation System, WAAS)^[1-3]、欧盟欧洲地球同步导航重叠系统(European Geostationary Navigation Overlay System, EGNOS)^[4-5]、日本多功能星基增强系统(MTSAT Satellite-based Augmentation System, MSAS)^[6-7]、印度全球定位系统(Global Positioning System, GPS)辅助型地球同步轨道增强系统(GPS-Aided GEO Augmented Navigation System, GAGAN)^[8-9]、俄罗斯差分改正与监测系统(System of Differential Correction and Monitoring, SDCM)^[10-11]、韩国星基增强系统(Korea Augmentation Satellite System, KASS)^[12]、非洲及印度洋星基增强系统(SBAS for Africa and Indian Ocean, A-SBAS)^[13-14]、澳大利亚/新西兰南部定位增强网(Southern Positioning Augmentation Network, SouthPAN)^[15]以及我国北斗星基增强系统(Beidou Satellite-Based Augmentation System, BDSBAS)等^[16-19], 各国星基增强系统分布如图1。

由于各星基增强系统由不同国家进行建设, 所增强的全球导航卫星系统星座也不尽相同, 因此, 如何顺利实现各星基增强系统之间的兼容与互操作成为重大挑战。为此, 国际民航组织成立了星基增强互操作工作组(Interoperability Working Group, IWG), 专门负责联合各星基增强系统服务供应商, 共同开展星基增强系统国际标准的研究和制定工作。2012年, 星基增强互操作工作组已顺利完成单频星基增强系统标准与建议措施的制定工作, 并提交国际民航组织审核颁布。2015年起, 星基增强互操作工作组启动了双频多星座星基增强系统标准与建议措施草案的联合研究和制定工作, 我国北斗星基增强系统也开始正式参与^[20]。相比单频星基增强系统, 双频多星座星基增强系统利用双频

基金项目: 国家自然科学基金(42074044); 中国科协青年人才托举工程(2019QNRC001)和陕西省创新能力支撑计划(2021TD-03)资助。

收稿日期: 2022-01-24; 修订日期: 2022-03-20

作者简介: 刘成, 男, 博士, 主要研究卫星导航与定位、多源融合导航、集成电路设计与开发. Email: liucheng@beidou.gov.cn.

伪距测量值组合消除电离层误差, 进一步提升定位精度和完好性; 由于不再需要播发格网电离层改正数, 因此, 双频多星座星基增强系统可以实现对 4 个全球导航卫星系统核心星座(北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)、全球定位系统、格洛纳斯系统(GLONASS)、伽利略系统(GALILEO))的增强; 同时, 双频多星座星基增强系统还将实现更快的完好性告警时间(从 10 s 提升至 6 s)^[21]。

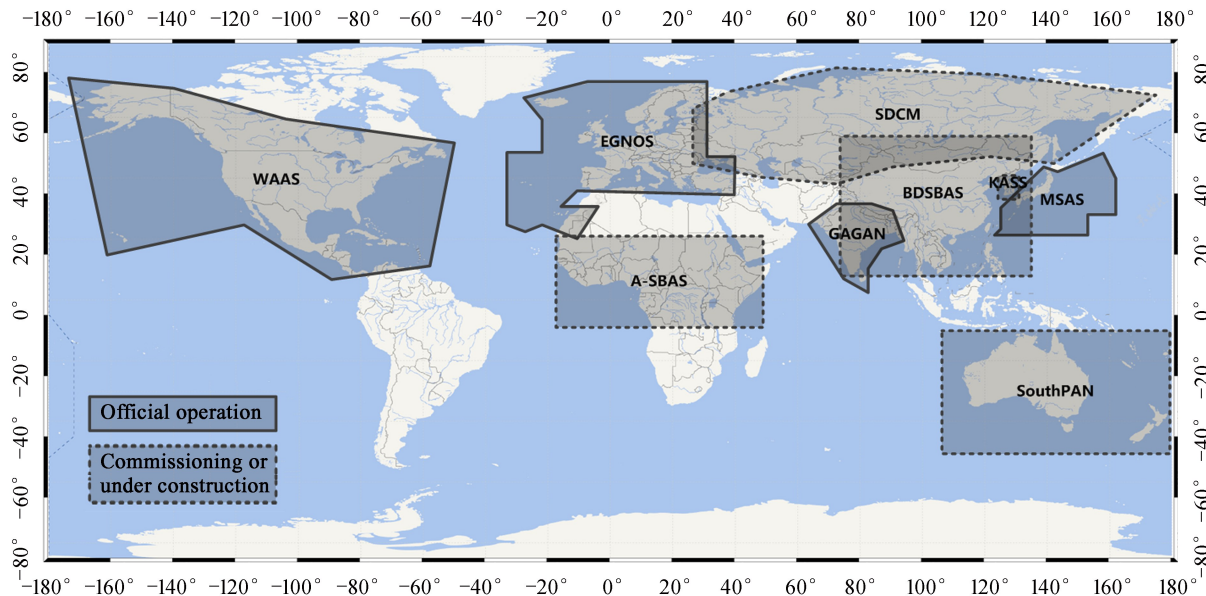


图 1 各国星基增强系统分布示意图

Fig. 1 Distribution of the SBASs in the world

在星基增强系统标准与建议措施研究中, 不同星基增强系统之间的时间基准互操作是主要技术问题之一。一方面, 为了实现对全球导航卫星系统的独立观测和完好性监测, 星基增强系统需要建立和维持一套独立的时间, 称为星基增强系统网络时, 它们之间本身就存在差异; 另一方面, 各星基增强系统所选择增强的全球导航卫星系统星座也不尽相同, 其改正数的时间基准问题也应该予以研究和明确。在单频标准与建议措施制定过程中, 由于当时仅存在全球定位系统、格洛纳斯系统两个全球导航卫星系统星座, 单频星基增强系统的增强电文仅能够对全球定位系统或格洛纳斯系统进行增强(因为电离层格网信息的播发占用了大量字节资源), 因此, 单频星基增强系统的时间基准互操作问题相对较为容易解决。然而, 在双频多星座标准与建议措施制定过程中, 世界卫星导航格局已发生显著变化, 随着北斗三号全球定位系统(BDS-3)的建成和伽利略系统的加速建设, 全球导航卫星系统核心星座已扩展为 4 个, 同时, 星基增强系统的数量也进一步增加。这些发展和变化为星基增强系统时间基准的互操作带来新的挑战。2020 年 11 月, 双频多星座星基增强系统标准与建议措施草案已通过国际民航组织 NSP/6 会议审议, 并向国际民航组织航委会(Air Navigation Commission, ANC)提交审核, 双频多星座星基增强系统标准与建议措施草案明确了包括星基增强系统时间基准互操作在内的各项技术内容^[22]。

本文从星基增强系统国际标准出发, 介绍了星基增强系统网络时间的基本概念和互操作现状, 重点结合国际民航组织星基增强系统标准与建议措施草案的制定进展, 对星基增强系统网络时间的兼容互操作问题进行了分析和研究, 并给出了目前的最新解决方案。在此基础上, 根据星基增强系统互操作时间基准的国际标准最新要求, 对北斗星基增强系统工程和软件状态进行了升级, 并给出了升级后的实测性能结果。相关内容能够为当前正在研制的北斗星基增强系统接收机, 特别是支持最新双频多星座服务模式的北斗星基增强系统接收机提供有益参考。

1 星基增强系统相关时间基准

利用星基增强系统进行增强定位时涉及到两套时间基准系统——全球导航卫星系统时间和星基增强系统时间。本节分别对全球导航卫星系统时间和星基增强系统时间进行介绍和分析。

1.1 全球导航卫星系统时间

1.1.1 全球定位系统时(GPS Time, GPST)

全球定位系统时通过安装在地面的原子钟与卫星原子钟共同维持。全球定位系统时的起始历元为协调时的 1980 年 1 月 6 日(星期日)零时刻,自该时刻起,全球定位系统时周而复始计数。全球定位系统时落后国际原子钟 19 s,美国海军天文台(The United States Naval Observatory, USNO)定期将其维持的协调时与全球定位系统时比较,并控制全球定位系统时,使之与国际原子时(Temps Atomique International, TAI)保持同步^[23-25]。

$$TAI = GPST + 19 \text{ s}, \quad (1)$$

全球定位系统时与协调时之间整数秒的差异随着协调时的跳秒不断变化,当前全球定位系统时与协调时之间的整数秒差增至 18 s^[25],即

$$GPST \approx UTC + 18 \text{ s}. \quad (2)$$

除了整秒差异外,全球定位系统时与协调时之间存在小于 1 μs 的秒内偏差,通常该偏差控制在几百纳秒之内,甚至小于 20 ns(1σ)^[26]。全球定位系统时可用全球定位系统周(WN)和全球定位系统周内秒(SOW)表示,周内秒最小值为 0,最大值不超过 604 800 s,在每星期六午夜零时从 0 开始逐渐增大,经过一周(即 604 800 s)后又返回 0,同时星期数(WN)增加 1。

1.1.2 北斗系统时(BeiDou Time, BDT)

北斗系统时与全球定位系统时一样采用原子时,以国际单位制(SI)秒为基本单位连续累计,起始历元为 2006 年 1 月 1 日协调世界时 00 时 00 分 00 秒。北斗系统时通过协调世界时与国际协调世界时建立联系,北斗系统时与国际协调世界时的偏差保持在 50 ns 以内(模 1 s),且无需闰秒^[27]。但由于北斗系统时与协调世界时保持在一定的公差范围内,而协调世界时存在闰秒问题,因此,北斗系统时与全球定位系统时均存在与协调世界时之间的跳秒改正(通过广播电文播发)。并且由于在 2006 年 1 月 1 日 00 时 00 分 00 秒北斗系统时起算之前,全球定位系统时已经与协调世界时之间存在 14 s 的跳秒改正,因此,北斗系统时与全球定位系统时除了相差的 1 356 周外,还始终保持一个 14 s 的系统差^[28]。即两者之间存在如下关系:

$$\begin{cases} BD \text{ 周} = GPS \text{ 周} - 1356 \\ BD \text{ 周内秒} = GPS \text{ 周内秒} - 14 \text{ s} \end{cases} \quad (3)$$

图 2 给出了目前北斗系统时与全球定位系统时的实测结果,证明北斗系统时与全球定位系统时之间保持稳定的 14 s 时差(周内秒)。

1.1.3 伽利略系统时(Galileo System Time, GST)

伽利略系统时是一个连续时间尺度,溯源到国际原子时,与国际原子时相差整数秒,不实施闰秒,保持偏差小于 50 ns。伽利略系统时的起始历元定义在 1999 年 8 月 22 日协调时(协调世界时)00 时 00 分 00 秒的基础上超前 13 s,与全球定位系统时保持一致^[29]。到目前为止超前协调世界时 18 s,即

$$GST = UTC + 18 \text{ s}. \quad (4)$$

1.1.4 格洛纳斯系统时(GLONASS Time, GLONASST)

格洛纳斯系统时以莫斯科时间为标准,以俄罗斯维持的协调世界时作为时间度量的标准。与上述几类全球导航卫星系统时间系统不同,格洛纳斯系统时与协调世界时具有相同的闰秒,因此不存在整

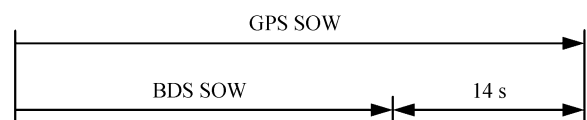


图 2 北斗系统时与全球定位系统时的周内秒时差
Fig. 2 The seconds of week (SOW) difference of BDT and GPST

秒差异。但它们之间存在 3 h 的整数偏移, 且相差一个微小偏差(1 ms 以内), 其关系为^[30-31]

$$GLONASST \approx UTC(SU) + 3 \text{ h} . \quad (5)$$

1.2 星基增强系统时间

根据国际民航组织标准要求, 各星基增强系统需要维持和使用一套自身的时间基准, 称为星基增强系统网络时。星基增强系统网络时定义为在满足星基增强系统总体性能要求的前提下, 星基增强系统利用自身地面监测站所维持的全球导航卫星系统时间。本质上, 这是星基增强系统出于独立观测和监测全球导航卫星系统完好性的需要。当使用星基增强系统改正数时, 用户定位是在星基增强系统网络时下进行, 而非全球导航卫星系统时(GNSS Time, GNSST)。然而, 由于单频星基增强系统与双频多星座星基增强系统的标准与建议措施制定时间相差数年, 期间世界卫星导航格局发生了重大变化, 因此, 这两类星基增强系统服务的时间基准要求也不相同。

1.2.1 单频星基增强系统时间基准

国际民航组织标准与建议措施中关于单频星基增强系统的标准内容早在 2012 年已制定完成, 且目前国际民航组织暂时没有重新启动修订更新的计划。由于当时只有全球定位系统和格洛纳斯系统两个全球导航卫星系统, 因此, 单频星基增强系统可选增强对象暂时只能是全球定位系统或格洛纳斯系统(二选一), 可选星基增强系统网络时基准为全球定位系统时。

但根据国际民航组织标准与建议措施附件 10 第 I 卷的要求, 单频星基增强系统的星基增强系统网络时只能以全球定位系统时为基准, 且两者之间的差异需保持在 50 ns 以内^[30], 即

$$|SNT_{\text{SF}} - GPST| \leq 50 \text{ ns} . \quad (6)$$

1.2.2 双频多星座星基增强系统时间基准

2015 年, 国际民航组织开始组织各星基增强系统服务供应商, 启动和开展双频多星座星基增强系统标准的制定工作。由于中国和欧洲均开始建设自己的导航卫星系统(BDS-3 和伽利略系统), 全球导航卫星系统核心星座从 2 个增加为 4 个, 因此, 在完成相关技术内容的论证和确认后, 双频多星座星基增强系统的可选增强对象也扩展为 4 个(全球定位系统、格洛纳斯系统、北斗卫星导航系统和伽利略系统), 相应地, 在双频多星座星基增强系统标准与建议措施文件中, 双频多星座星基增强系统的星基增强系统网络时也调整为可从四大核心全球导航卫星系统的系统时间中进行选择(可选星基增强系统网络时基准为全球定位系统时、格洛纳斯系统时、北斗卫星导航系统时和伽利略系统时)。两者之间的差异需保持在 1 μs 以内^[22], 即

$$|SNT_{\text{DFMC}} - GNSST| \leq 1 \mu\text{s} . \quad (7)$$

双频多星座星基增强系统网络时基准信息通过双频多星座星基增强系统电文类型(Message Type, MT)37 中的时间参考标识(Time Reference ID)字段参数进行播发(全球定位系统标识号为 0; 格洛纳斯系统标识号为 1; 伽利略系统标识号为 2; 北斗卫星导航系统标识号为 3)。

2 星基增强系统时间互操作方法与策略

2.1 单频星基增强系统网络时互操作方法与策略

在单频服务模式下, 由于只有俄罗斯差分改正与监测系统选择增强本国的格洛纳斯系统, 而其他全球导航卫星系统均选择增强全球定位系统, 因此, 对于俄罗斯差分改正与监测系统以外的星基增强系统而言, 国际民航组织制定的时间同步要求是适用的。星基增强系统播发全球定位系统时下的卫星改正数, 用户同时接收广播星历和星基增强系统改正数进行解算, 获得自身在全球定位系统时下的定位结果, 无需额外操作。

对于俄罗斯差分改正与监测系统而言情况更为复杂。因为俄罗斯差分改正与监测系统虽然播发格洛纳斯系统卫星改正数, 但它的时间基准却是相对于全球定位系统时的。这意味着用户需要额外做一次时间转换, 将格洛纳斯系统卫星改正数从全球定位系统时换算至格洛纳斯系统时, 才能与格洛纳斯

系统卫星的广播星历配合,共同完成对格洛纳斯系统的增强定位。这可以通过两种途径实现:

(1)接收格洛纳斯系统广播星历,计算得到格洛纳斯系统时相对于协调世界时的时差,同时接收全球定位系统广播星历,计算得到全球定位系统时相对于协调世界时的时差,进而计算得到格洛纳斯系统时与全球定位系统时之间的时差;

(2)在格洛纳斯系统广播星历中播发格洛纳斯系统时与全球定位系统时之间的时差参数。

2.2 双频多星座星基增强系统网络时互操作方法与策略

在双频多星座模式下,星基增强系统可以选择增强全球导航卫星系统星座数量增加为4个,星基增强系统网络时基准也可以由各星基增强系统供应商自行选择。在2017年制定形成的双频多星座星基增强系统标准与建议措施草案中,各星基增强系统供应商已明确了各自的选择对象,见表1。

表1中,“DFMC SBAS增强对象”是指该星基增强系统播发改正数的全球导航卫星系统星座。至于航空机载接收机在该星基增强系统服务区域内究竟使用哪个全球导航卫星系统星座及其增强改正数进行导航,由航空机载接收机设备厂商和各国民用航空主管部门确定。

由于双频多星座星基增强系统对多个全球导航卫星系统星座进行增强,涉及到更多的时间基准系统,因此星基增强系统网络时的互操作实现比单频星基增强系统更为复杂。根据双频多星座星基增强系统原理,当用户使用电文类型32中的被增强全球导航卫星系统卫星改正数进行定位解算时,全球导航卫星系统钟差的改正值 $\delta\Delta t_{SV}$ 为

$$\delta\Delta t_{SV} = \frac{\delta B + \delta\dot{B}(t - t_D)}{c}, \quad (8)$$

其中, δB 为卫星时钟偏差改正数; $\delta\dot{B}$ 为卫星时钟偏差变化率改正数; c 为光速; t 为该卫星在所在全球导航卫星系统星座时间系统下的测量时刻(由全球导航卫星系统广播电文得到); t_D 为该改正数在星基增强系统网络时的参考时刻(由星基增强系统增强电文得到)。

全球导航卫星系统卫星轨道的改正值 $[\delta x(t) \ \delta y(t) \ \delta z(t)]^T$ 为

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

其中, $[\delta x \ \delta y \ \delta z]^T$ 为卫星轨道偏差改正数; $[\delta\dot{x} \ \delta\dot{y} \ \delta\dot{z}]^T$ 为卫星轨道偏差变化率改正数。

当双频多星座星基增强系统网络时以某一全球导航卫星系统的时间系统(例如北斗系统时)为基准时,时间参考标识为3(见表2),表明双频多星座星基增强系统网络时以北斗系统时为基准,(1)式和(2)式中的 t_D 为北斗系统时下的时间。此时,若用户仅使用北斗卫星导航系统进行增强定位,不存在问题;但如果用户同时使用全球定位系统或其他全球导航卫星系统进行增强定位,则需要将(1)式和(2)式中 t 从所在全球导航卫星系统星座时间系统转换至北斗系统时下,否则会将不同全球导航卫星系统时差引入定位解算中。具体地,当用户使用全球定位系统卫星进行增强定位时,由于全球定位系统时与北斗系统时之间相差固定的14s,因此对于全球定位系统卫星的钟差改正值 $\delta\Delta t_{SV}^{GPS}$ 为

$$\delta\Delta t_{SV}^{GPS} = \frac{\delta B + \delta\dot{B}(t - 14 - t_D)}{c}. \quad (10)$$

表1 星基增强系统供应商所选择的双频多星座增强对象和星基增强系统网络时基准

Table 1 DFMC augmented constellations and SNT references of each SBAS provider

SBAS	DFMC SBAS Augmentation constellations	SNT Reference
WAAS	GPS、Galileo	GPST
EGNOS	Galileo、GPS	GST
MSAS	GPS	GPST
GAGAN	GPS、Galileo	GPST
KASS	GPS、Galileo	GPST
SDCM	GLONASS、GPS	GLONASST
BDSBAS	BDS、GPS	BDT

对于全球定位系统卫星的轨道改正值 $[\delta x^{\text{GPS}}(t) \quad \delta y^{\text{GPS}}(t) \quad \delta z^{\text{GPS}}(t)]^T$ 为

$$\begin{bmatrix} \delta x^{\text{GPS}}(t) \\ \delta y^{\text{GPS}}(t) \\ \delta z^{\text{GPS}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta \dot{x} \\ \delta \dot{y} \\ \delta \dot{z} \end{bmatrix} (t - 14 - t_D). \quad (11)$$

由于全球定位系统时、北斗系统时与全球导航卫星系统之间的整秒差异是固定的,因此很容易通过上述方式完成转换处理。但对于格洛纳斯系统而言,由于格洛纳斯系统时与其他全球导航卫星系统时之间整秒差异是不固定的,存在一个随时间变化的闰秒(这是由于格洛纳斯系统时随协调世界时闰秒),无法通过在接收机中预设的方式解决。相比其他全球导航卫星系统,用户必须接收格洛纳斯系统广播电文的闰秒信息,才能完成格洛纳斯系统与其他全球导航卫星系统的双频多星座模式兼容定位。

从星基增强系统互操作层面,这意味着所有双频多星座星基增强系统接收机必须增强格洛纳斯系统,否则就无法使用俄罗斯差分改正与监测系统播发的改正数信息,这并不符合双频多星座星基增强系统服务的设计和开发目的。因此,在 2020 年 11 月召开的国际民航组织 NSP/6 会议上,DS2 工作组给出了双频多星座星基增强系统网络时与被增强星基参考时间之间的转换关系^[22],以实现双频多星座星基增强系统的全球导航卫星系统时间兼容问题,见表 2。

表 2 双频多星座星基增强系统网络时与被增强星座参考时间之间的转换关系

Table 2 Conversion relationship between the DFMC SBAS SNT and the reference time of the augmented constellation

MT37 Time reference ID	0 (GPS)	1 (GLONASS)	2 (GALILEO)	3 (BDS)	
Augmentation constellations	GPS	$t(\text{SNT}=0)$ $= t(\text{GPST})$	$t(\text{SNT}=1)$ $= t(\text{GPST}) - \Delta t_{1S}$ $+ 10\,800\text{ s}$	$t(\text{SNT}=2)$ $= t(\text{GPST})$	$t(\text{SNT}=3)$ $= t(\text{GPST}) - 14\text{ s}$
	GLONASS	$t(\text{SNT}=0)$ $= t(\text{GLONASST})$ $+ \Delta t_{1S} - 10\,800\text{ s}$	$t(\text{SNT}=1)$ $= t(\text{GLONASST})$	$t(\text{SNT}=2)$ $= t(\text{GLONASST})$ $+ \Delta t_{1S} - 10\,800\text{ s}$	$t(\text{SNT}=3)$ $= t(\text{GLONASST})$ $+ \Delta t_{1S} - 10\,800\text{ s}$
	Galileo	$t(\text{SNT}=0) = t(\text{GST})$	$t(\text{SNT}=1) = t(\text{GST})$ $- \Delta t_{1S} + 10\,800\text{ s}$	$t(\text{SNT}=2) = t(\text{GST})$	$t(\text{SNT}=3)$ $= t(\text{GST}) - 14\text{ s}$
	BDS	$t(\text{SNT}=0)$ $= t(\text{BDT}) + 14\text{ s}$	$t(\text{SNT}=1) = t(\text{BDT})$ $- \Delta t_{1S} + 10\,800\text{ s}$	$t(\text{SNT}=2)$ $= t(\text{BDT}) + 14\text{ s}$	$t(\text{SNT}=3) = t(\text{BDT})$

注: Δt_{1S} 为 BDS, GPS, GALILEO 与 GLONASS 参考时间的闰秒差,利用 GNSS 导航电文信息进行解算。

3 测试与分析

前期,北斗星基增强系统已根据单频星基增强系统国际标准中的时间基准要求开展建设,相关服务性能满足国际民航组织标准要求。针对双频多星座星基增强系统国际标准中的这一最新技术要求和动态,北斗星基增强系统对地面段监测处理能力与流程进行了升级,以确保双频多星座模式下的全球导航卫星系统改正数是相对于各自全球导航卫星系统时的。

3.1 北斗星基增强系统时间基准测试

2021 年 5 月 8 日至 6 月 21 日,我们在北斗星基增强系统数据处理中心(西安)和北斗系统主控站(北京)架设共视接收机,进行了连续 45 天的观测。通过卫星共视时间传递方法,对北斗星基增强系统单频星基增强系统网络时、双频多星座星基增强系统网络时与相应全球导航卫星系统时间基准之间的偏差进行了计算和评估。

3.1.1 单频时间基准测试

对于单频星基增强系统网络时而言,目前,单频星基增强系统标准与建议措施国际标准中要求选择全球定位系统时或者格洛纳斯系统时作为基准。因此,北斗星基增强系统单频星基增强系统网络时采用在北斗系统时基础上增加 14 s 整秒的方式,以实现与全球定位系统时同步的目的,从而满足国际民航组织当前的标准要求。通过卫星共视时间传递方法计算得到了北斗单频星基增强系统网络时与全球定位系统时之间的时间偏差,结果如图 3。

由图 3 可知,北斗单频星基增强系统网络时与全球定位系统时之间的最大偏差为 37 ns,满足单频星基增强系统标准与建议措施中 50 ns 的指标要求。

3.1.2 双频多星座时间基准测试

对于双频多星座星基增强系统网络时而言,双频多星座星基增强系统标准与建议措施标准允许其从四大全球导航卫星系统时间中自行选择。因此,北斗双频多星座星基增强系统网络时选择以北斗系统时为基准、与北斗系统时之间进行同步。通过卫星共视时间传递方法计算得到了北斗双频多星座星基增强系统网络时与北斗系统时之间的时间偏差,结果如图 4。

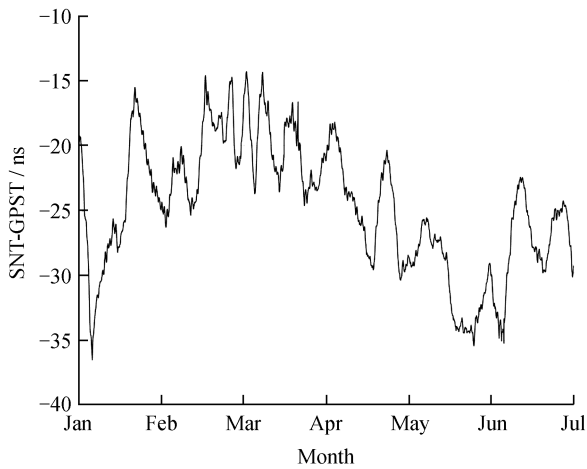


图 3 北斗单频星基增强系统网络时与全球定位系统时之间的偏差

Fig. 3 Difference between BDSBAS SF SNT and GPST

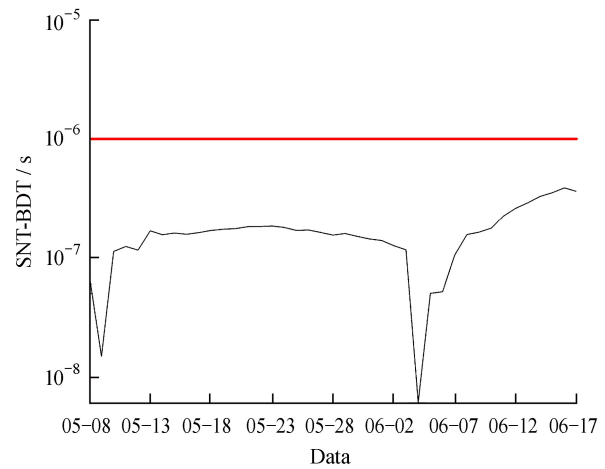


图 4 北斗双频多星座星基增强系统网络时与北斗系统时之间的偏差

Fig. 4 Difference between BDSBAS DFMC SNT and GPST

由图 4 可知,北斗双频多星座星基增强系统网络时与北斗系统时之间的最大偏差为 $0.17 \mu\text{s}$,满足双频多星座星基增强系统标准与建议措施中 $1 \mu\text{s}$ 的指标要求。

3.2 北斗星基增强系统服务性能测试

北斗星基增强系统服务性能测试选用北斗星基增强系统北京监测站 2021 年 6 月 15 日 1 秒采样数据,增强电文采用北斗星基增强系统 PRN130 卫星播发的增强信息。

3.2.1 单频服务性能测试

北京站的定位误差直方图和斯坦福图分布如图 5 和图 6。由图 5 和图 6 可知,水平精度(95%)为 1.187 m,垂直精度(95%)为 2.356 m; APV-I 可用性为 99.446%,连续性为 99.079%;水平和垂直最小安全因子分别为 4.107 和 3.098;计算时段内未发生危险性误导信息(Hazardously Misleading Information, HMI)事件。北京站的北斗星基增强系统单频服务的定位精度和可用性满足国际民航组织 APV-I 服务等级要求;并且最小水平/垂直安全因子均大于 1,保护级将定位误差完全包络,HMI 事件发生次数为 0,表明完好性参数可以满足为用户提供可靠的完好性保障。

3.2.2 双频多星座服务性能测试

北京站的定位误差直方图和斯坦福图分布如图 7 和图 8。由图 7 和图 8 可知,水平精度(95%)为 1.830 m,垂直精度(95%)为 2.860 m; APV-I 可用性为 100.00%,连续性为 100.00%;水平和垂直最

小安全因子分别为 1.872 和 2.581; 计算时段内未发生 HMI 事件。北斗星基增强系统双频多星座服务定位精度较单频稍差, 原因在于虽然北斗卫星导航系统 B1C/B2a 双频组合消除了电离层影响, 但会放大伪距测量噪声, 导致最终该组合模型噪声较大, 定位误差稍大于单频结果。但另一方面, 由于双频测量不受电离层格网分布、是否可用影响, 可用于增强定位的卫星数量增多, 弧段边长使双频服务的覆盖范围明显增大, 因此可用性、连续性等有所提升。评估时段内的北斗星基增强系统双频多星座服务性能满足 APV-I 等级要求。

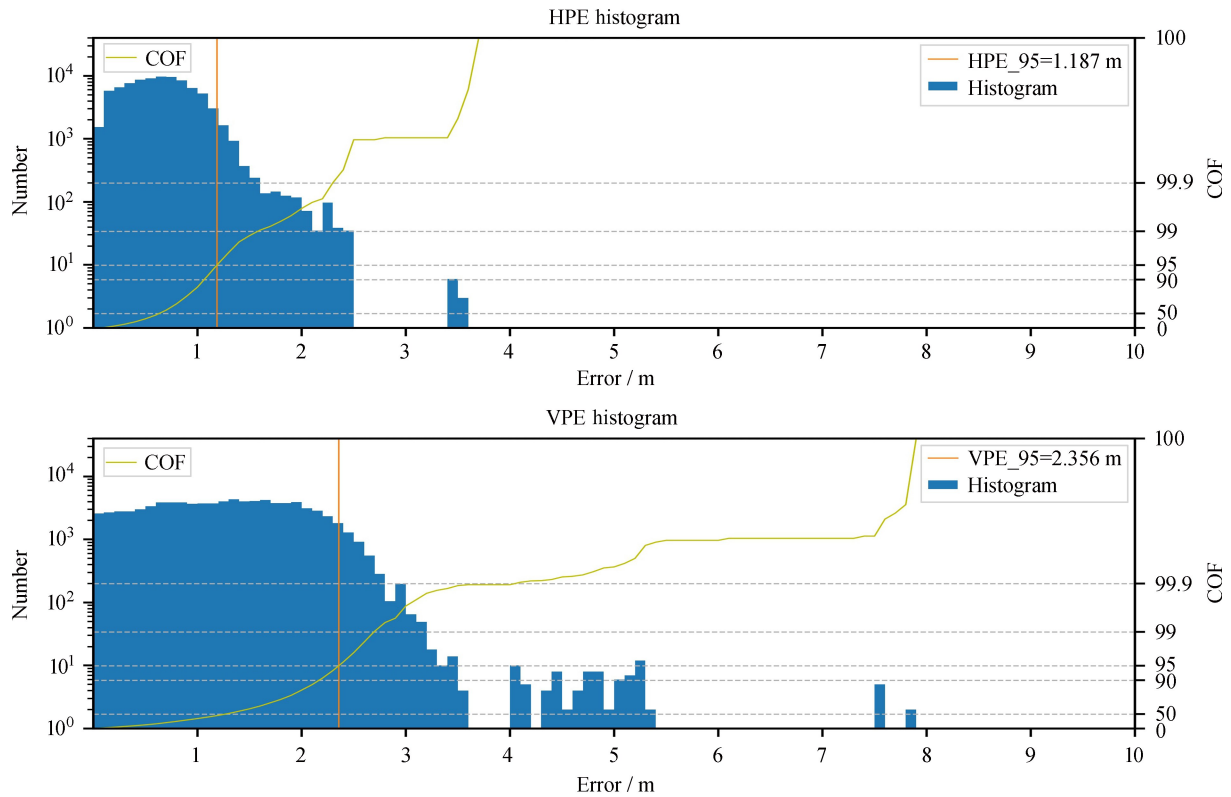


图5 2021年6月15日北斗星基增强系统单频服务北京站定位误差统计直方图
Fig. 5 Positioning error histogram of BDSBAS SF service at Beijing station (June 15, 2021)

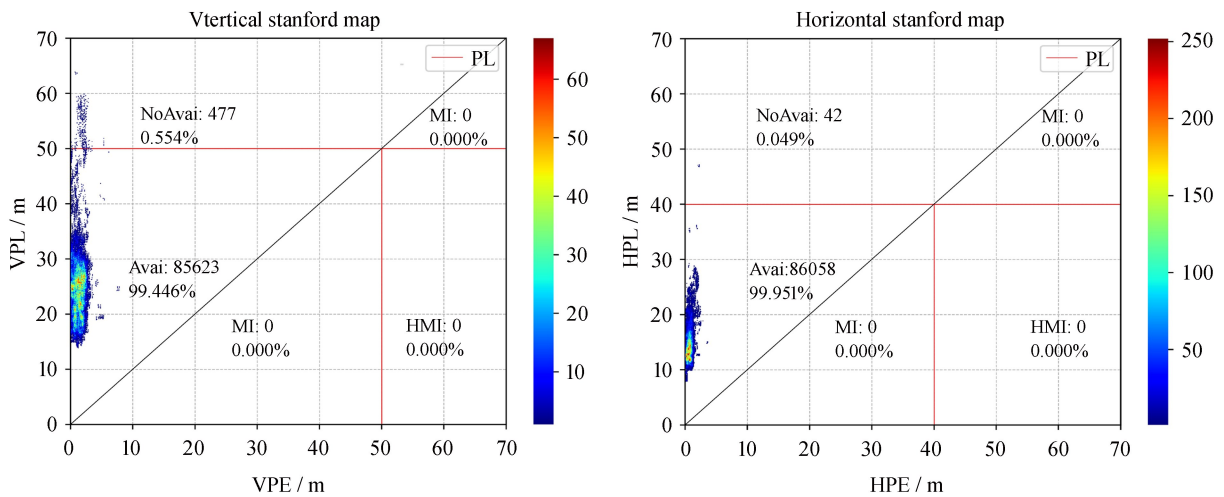


图6 2021年6月15日北斗星基增强系统单频服务北京站水平/垂直斯坦福图
Fig. 6 Horizontal/vertical Stanford chart of BDSBAS SF service at Beijing station (June 15, 2021)

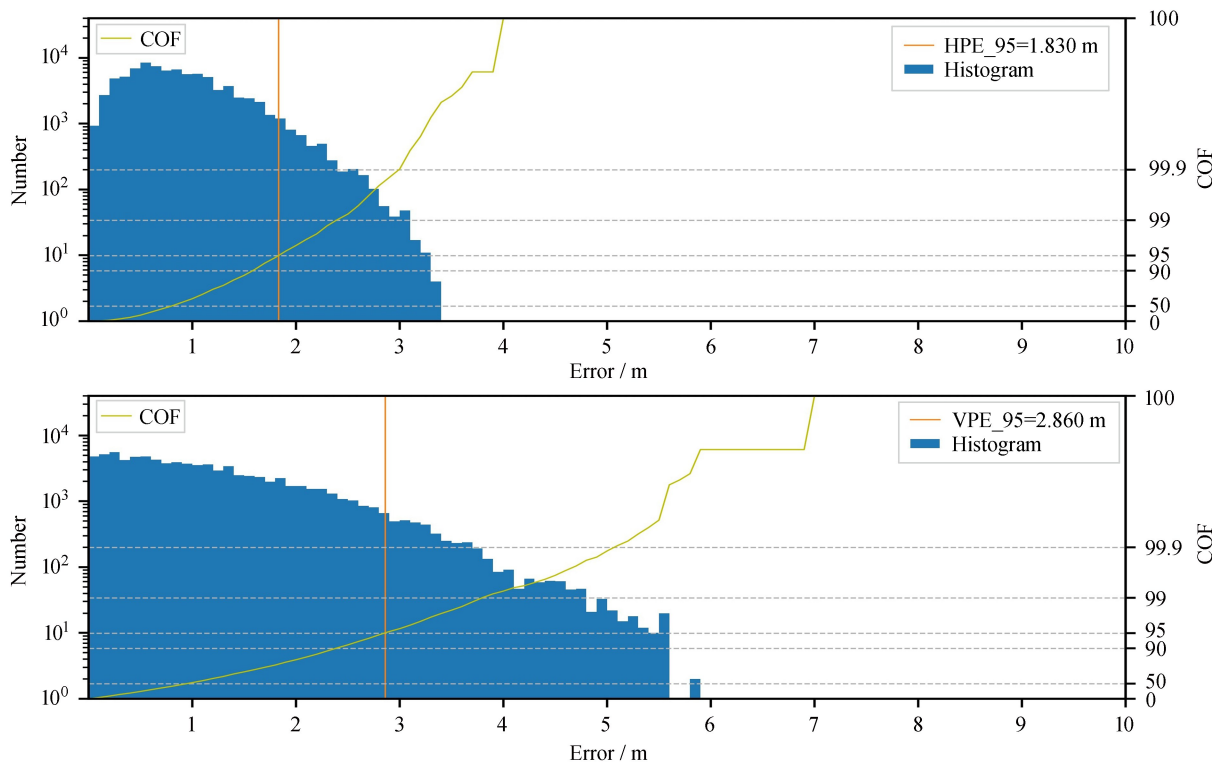


图 7 2021 年 6 月 15 日北斗星基增强系统双频多星座服务北京站定位误差统计直方图

Fig. 7 Positioning error histogram of BDSBAS DFMC service at Beijing station (June 15, 2021)

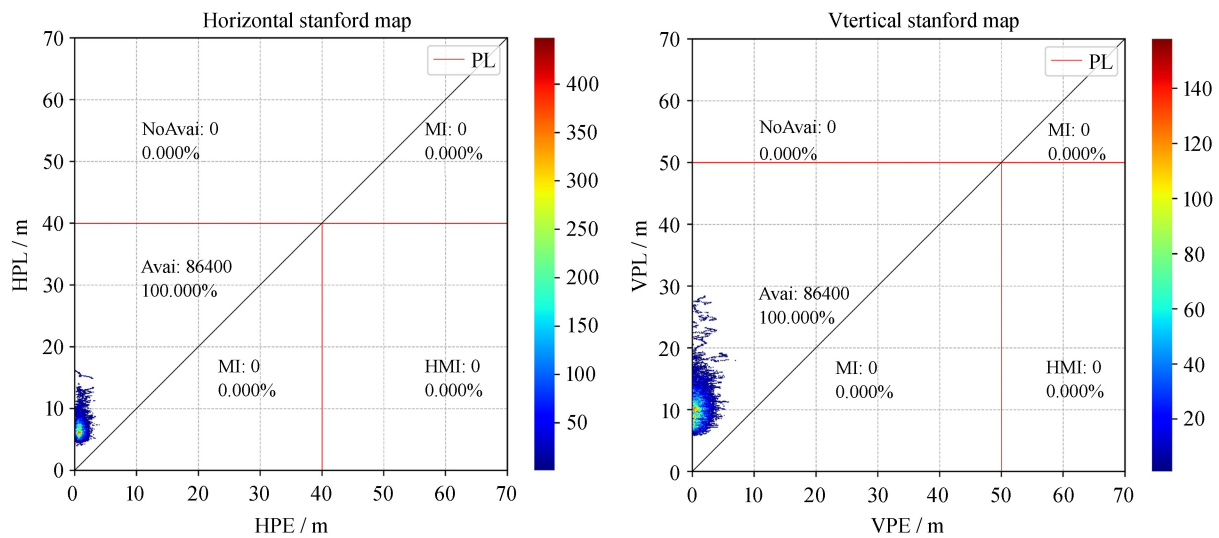


图 8 2021 年 6 月 15 日北斗星基增强系统双频多星座服务北京站水平/垂直斯坦福图

Fig. 8 Horizontal/vertical Stanford chart of BDSBAS DFMC service at Beijing station (June 15, 2021)

4 结 论

本文介绍了星基增强系统网络时的基本概念和互操作现状，结合国际民航组织星基增强系统标准与建议措施草案的制定进展，对星基增强系统网络时的兼容互操作问题进行了分析和研究。对于单频星基增强系统网络时而言，由于目前单频星基增强系统标准与建议措施国际标准中只能选择全球定位系统时或者格洛纳斯系统时作为基准，因此，北斗单频星基增强系统网络时选择暂时以全球定位系统时为

基准、与全球定位系统时之间进行时间同步。后续,待单频星基增强系统标准与建议措施修订工作重新启动,推进北斗进入单频星基增强系统标准与建议措施后,将升级为以北斗系统时为基准。对于双频多星座星基增强系统,由于需要对多个全球导航卫星系统星座进行增强,涉及到更多的时间基准系统,因此,星基增强系统网络时的互操作实现比单频星基增强系统更为复杂。为此,国际民航组织星基增强系统标准与建议措施标准联合工作组研究和制定了双频多星座星基增强系统网络时与被增强星基增强系统参考时间之间的转换关系,以实现双频多星座星基增强系统的全球导航卫星系统时间兼容。

针对星基增强系统互操作时间基准的上述国际标准最新要求,北斗星基增强系统进行了软硬件状态升级与服务性能初步测试。结果表明,对于单频模式而言,北斗星基增强系统网络时与全球定位系统时之间的偏差最大为 37 ns,满足国际民航组织标准中 50 ns 的指标要求;对于双频多星座模式而言,北斗星基增强系统网络时与北斗系统时之间的时间偏差最大为 0.17 μ s,满足国际民航组织标准中 1 μ s 的指标要求。在时间同步基础上,本文进一步开展了北斗星基增强系统服务性能测试,结果表明,测试期间北斗星基增强系统单频服务的精度、可用性满足国际民航组织 APV-I 指标要求,但连续性未能达标;北斗星基增强系统双频多星座服务的精度、可用性、连续性均满足国际民航组织 APV-I 指标要求。测试结果证明了北斗星基增强系统时间基准互操作方法的可行性和可靠性。

后续,北斗星基增强系统将开展国际民航组织国际标准的联合研究与制定工作,并积极推进北斗卫星导航系统进入单频星基增强系统标准与建议措施标准,成为单频星基增强系统服务增强选择对象。同时,持续开展系统建设与服务性能优化,以早日提供符合国际标准的高性能、高安全航空导航增强服务。

参考文献:

- [1] JASON B. Wide Area Augmentation System (WAAS) update [R]. Changsha: International Civil Aviation Organization, 2016.
- [2] JASON B. Wide Area Augmentation System (WAAS) program overview [R]. Brisbane: International Civil Aviation Organization, 2019.
- [3] 邵搏, 耿永超, 丁群, 等. 国际星基增强系统综述 [J]. 现代导航, 2017, 6(3): 157-161. SHAO B, GENG Y C, DING Q, et al. Summarize of international satellite based augmentation system [J]. Modern Navigation, 2017, 6(3): 157-161.
- [4] European Satellite Services Provider (ESSP). EGNOS performance and LPV implementation status [R]. Changsha: International Civil Aviation Organization, 2016.
- [5] NATHALIE R. EGNOS programme status [R]. Changsha: International Civil Aviation Organization, 2016.
- [6] MASASHI G. MSAS status [R]. Changsha: International Civil Aviation Organization, 2016.
- [7] HIDEITSUGU W. MSAS status and future plan [R]. Brisbane: International Civil Aviation Organization, 2019.
- [8] Airports Authority of India (AAI). GPS Aided GEO Augmented Navigation (GAGAN) [R]. Changsha: International Civil Aviation Organization, 2016.
- [9] Airports Authority of India (AAI). GPS Aided GEO Augmented Navigation (GAGAN) [R]. Senegal: International Civil Aviation Organization, 2016.
- [10] China Satellite Navigation Office (CSNO). System of differential correction and monitoring [EB/OL]. (2014-02-11) [2022-01-24]. http://www.beidou.gov.cn/zy/kpyd/201710/t20171023_4777.html.
- [11] European Space Agency. System of differential correction and monitoring [EB/OL]. (2021-08-01) [2022-01-24]. <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SDCM>.

- [12] EUNSUNG L. Korea SBAS program [R]. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2016.
- [13] Agency for Aerial Navigation Safety in Africa and Madagascar (ASECNA). SBAS for Africa and Indian Ocean initiative [R]. Ghana: International Civil Aviation Organization, 2019.
- [14] Agency for Aerial Navigation Safety in Africa and Madagascar (ASECNA). Update on “SBAS for Africa and Indian Ocean” (A-SBAS) development [R]. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2020.
- [15] JEFFREY B, SIMON R. Southern positioning augmentation network program update [R]. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2020.
- [16] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统应用服务体系 (1.0 版) [S/OL]. (2019-12-01) [2022-01-24]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz>.
China Satellite Navigation Office (CSNO). The application service architecture of BeiDou Navigation Satellite System (version 1.0) [S/OL]. (2019-12-01) [2022-01-24]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz>.
- [17] Civil Aviation Administration of China (CAAC) [R]. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2017.
- [18] LIU C, GAO W G, SHAO B, et al. Development of BeiDou satellite-based augmentation system [J]. Navigation, 2021, 68(2): 405-417.
- [19] 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): 42-48.
CHEN G C, LIU C, LU J. Service level and system performance analysis of BDSBAS [J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(1): 42-48.
- [20] 邵搏, 丁群, 耿永超, 等. 双频多星座星基增强系统电文综述 [C] // 第29届中国飞行器测控学术会议论文集. 北京: 清华大学出版社, 2018.
SHAO B, DING Q, GENG Y C, et al. The Summarize of dual-frequency multi-constellation satellite-based augmentation system messages [C] // Proceeding of the 29th Conference of Spacecraft TT&C Technology in China. Beijing: Tsinghua University Press, 2018.
- [21] Satellite Based Augmentation System Interoperation Working Group (SBAS IWG). Satellite-based augmentation system dual-frequency multi-constellation definition document [R]. Senegal: International Civil Aviation Organization, 2016.
- [22] DFMC SBAS SARPS sub-working group rapporteur. Proposed amendments to Annex 10, Volume I: Satellite-based augmentation system (SBAS) provisions [R]. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2020.
- [23] United States Naval Observatory (USNO). United States Naval Observatory [EB/OL]. (2020-05-24) [2022-01-24]. <https://www.usno.navy.mil/USNO>.
- [24] 刘成, 李芳. 卫星轨道误差对定位精度影响的摄动分析方法 [J]. 天文研究与技术, 2018, 15(1): 40-45.
LIU C, LI F. Study on perturbation analysis method of the influence of satellite orbit error on positioning accuracy [J]. Astronomical Research & Technology, 2018, 15(1): 40-45.
- [25] Leap Second. GPS, UTC, and TAI Clocks [EB/OL]. (2021-06-20) [2022-01-24]. <http://www.leapsecond.com/java/gpsclock.htm#~:text=UTC%2C%20Coordinated%20Universal%20Time%2C%20popularly%20known%20as%20GMT,clocks%20in%20the%20GPS%20ground%20control%20stations%20and>.
- [26] GPS Joint Program Office. NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Interfaces [S]. Segundo: GPS Joint Program Office, 2021.

- [27] 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空间信号接口控制文件公开服务信号 B1C (1.0 版) [S]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2017.
China Satellite Navigation Office (CSNO). BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B1C (Version 1.0) [S]. Beijing: China Satellite Navigation Office, 2017.
- [28] 高星伟, 过静珺, 程鹏飞, 等. 基于时空系统统一的北斗与 GPS 融合定位 [J]. 测绘学报, 2012, 41(5): 743-748, 755.
GAO X W, GUO J J, CHENG P F, et al. Fusion positioning of Compass/GPS based on spatio-temporal system unification [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(5): 743-748, 755.
- [29] ERIC C, NATALIA C. Update to Galileo Open Service Draft Sarps [R]. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2020.
- [30] 刘庆元, 包海, 王虎, 等. GPS、GLONASS、GALILEO 三大系统间时间系统以及坐标系统的转换 [J]. 测绘科学, 2008, 33(5): 13-15.
LIU Q Y, BAO H, WANG H, et al. The transformation and coordinates transformation among GPS, GLONASS and GALILEO [J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33(5): 13-15.
- [31] International Civil Aviation Organization (ICAO). International Standards and Recommended Practices Annex10 Aeronautical Telecommunications Volume I Radio Navigation Aids [S]. Senegal: International Civil Aviation Organization, 2018.

Research and Performance Assessment of BDSBAS Time System Interoperability

Liu Cheng¹, Chen Ying¹, Xiong Shuai², Shao Bo², Zhang Jian², Wang Wei¹

(1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China, Email: liucheng@beidou.gov.cn;

2. The 20th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Xi'an 710068, China)

Abstract: Since each SBAS is constructed by different countries, the augmented GNSS constellation and the reference time are not the same, the compatibility and interoperability between SBAS time systems has been one of the important issues in the SBAS standard research of the International Civil Aviation Organization (ICAO). The contribution introduces the concept and research status of the SBAS network time (SNT), combined with the formulation of ICAO SBAS Standards and Recommended Practices (SAPRs), analyzes and studies SNT compatibility and interoperability issues, and presents the latest joint solution. On this basis, the ground sub-system of the BeiDou Satellite-Based Augmentation System (BDSBAS) was upgraded, and preliminary service performance assessment was carried out. The results show that the maximum deviations between the BDSBAS single-frequency (SF) SNT and dual-frequency multi-constellation (DFMC) SNT and the reference GNSS time reference are 37 ns and 0.17 μ s, respectively, which meet the ICAO standards. The service performance basically conforms to the APV-I level requirements, which proves the feasibility and reliability of the interoperability of BDSBAS SNT.

Key words: BeiDou; Global Navigation Satellite System (GNSS); Satellite-Based Augmentation System (SBAS); Dual-Frequency Multi-Constellation (DFMC); SBAS Network Time (SNT)