

PAN Lijing, WANG Ling, JIN Biao, WANG Leilei, LIU Ningning, ZHAO Liqian, WANG Shaoxian, JING Hui. Study on Service Performance of Single Frequency SBAS in Algerian Satellite-based Augmentation System (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(4): 1079–1086. CSTR:32142.14.cjss.2024-0078. DOI:10.11728/cjss2025.04.2024-0078

阿尔及利亚星基增强系统单频 SBAS 服务性能研究*

潘丽静^{1,2} 王玲² 金彪^{2,3} 王雷雷¹
刘宁宁² 赵立谦² 王绍贤² 荆慧²

1(航天恒星科技有限公司天津分公司 天津 300462)

2(航天恒星科技有限公司 北京 100094)

3(北京卫星信息工程研究所 北京 100086)

摘要 阿尔及利亚星基增强系统 (ALG-SBAS) 是基于阿尔及利亚通信卫星一号 (Alcomsat-1) 建设的面向阿尔及利亚地区的星基增强系统 (SBAS), 已处于正式运行阶段. 为进一步了解掌握该系统的服务性能, 对该系统进行分析, 进而对该系统地球静止轨道 (GEO) 卫星播发电文稳定性、电离层延迟改正精度、定位精度及完好性进行评估. 结果表明 ALG-SBAS GEO 卫星具有较强稳定性, 电离层延迟改正百分比优于 87%, ALG-SBAS 定位精度比 GPS 定位有明显提升, 平均提升达到 39% 以上, SBAS PPP 各站 3D 定位精度平均值优于 0.45 m. 定位精度对标 EGONS, 结果显示 ALG-SBAS 略差于 EGONS. 同时对测站定位结果的完好性进行了分析, 在评估时段内 ALG-SBAS 未发生完好性风险事件, ALG-SBAS 在 I 类垂直引导进近 (APV-I) 阶段的所有测站平均可用性为 99.9%. 该星基增强系统服务性能满足单频服务指标, 可提供单频 SBAS 服务.

关键词 星基增强, 服务性能, 连续性, 定位精度, 完好性

中图分类号 P228

Study on Service Performance of Single Frequency SBAS in Algerian Satellite-based Augmentation System

PAN Lijing^{1,2} WANG Ling² JIN Biao^{2,3} WANG Leilei¹
LIU Ningning² ZHAO Liqian² WANG Shaoxian² JING Hui²

1(Tianjin Branch, Space Star Technology Co., Ltd., Tianjin 300462)

2(Space Star Technology Co., Ltd., Beijing 100094)

* 国家自然科学基金青年基金项目 (42304045) 和中国科协青年人才托举工程项目 (2022QNRC001) 共同资助

2024-06-17 收到原稿, 2024-12-03 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

3(Beijing Institute of Satellite Information Engineering, Beijing 100086)

Abstract The Algerian Satellite-based Augmentation System (ALG-SBAS) is a Satellite-based Augmentation System (SBAS) based on the Algerian communications satellite 1 (Alcomsat-1), which is already in its official operational phase. In order to deeply understand the system service type and performance, this paper first introduces the system, and then evaluates the stability of the broadcast message of the Geosynchronous Orbit (GEO) satellite, ionospheric delay correction accuracy, positioning accuracy and integrity. The results show that ALG-SBAS GEO satellite has strong stability. The ionospheric delay correction percentage is better than 87%. The positioning accuracy of The positioning accuracy of ALG-SBAS is significantly improved than that of GPS positioning, and the average positioning accuracy is increased by more than 39%. The average SBAS PPP 3D positioning accuracy of all stations is better than 0.45m. The positioning accuracy is compared with EGONS, and the results show that ALG-SBAS is slightly worse than EGONS. At the same time, the integrity of the station positioning results was analyzed, and no integrity risk events occurred in ALG-SBAS during the evaluation period. ALG-SBAS had an average availability of 99.9% at all stations in the Approach with Vertical Guidance-I (APV-I) phase. The service performance of the satellite-based augmentation system meets the single frequency service index and can provide single frequency SBAS service.

Key words Satellite-based enhancement, Service performance, Continuity, Positioning accuracy, Integrity

0 引言

星基增强系统 (SBAS) 旨在提高基本卫星导航系统在精度、可用性、完好性方面的水平, 满足民航等生命安全行业的使用需求. 该系统通过计算卫星的各种定位修正信息, 并把这些定位修正信息通过上行注入站发送给地球静止轨道 (GEO) 卫星, 最后将修正信息播发给广大用户, 从而达到提高定位精度的目的. SBAS 已经在美国广域增强系统 (WAAS)^[1]、欧洲静地星导航重叠服务 (EGNOS)^[2,3] 和日本多功能卫星增强系统 (MSAS)^[4] 等系统中投入使用和运行. 此外, 目前正在部署的 SBAS 包括北斗星基增强系统 (BDSBAS)^[5]、韩国增强卫星系统 (KASS)、俄罗斯的差分改正和监测系统 (SDCM) 和非洲阿尔及利亚星基增强系统 (ALG-SBAS) 等.

关于 SBAS 已开展了大量研究, 主要集中在改正数解算^[6,7]、用户差分距离误差 (UDRE) 和双频距离误差 (DFRE) 参数生成^[8-10]、电离层完好性建模^[11,12] 及定位性能等方面. 关于 SBAS 研究评估, Zhao 等^[13] 对 WAAS 和 EGNOS 两大系统进行了单频 SBAS 服务性能分析, 结果显示 WASS 从可用性、连续性、定位精度等方面优于 EGNOS 系统; Chen 等^[14] 对当前

已通过民航认证并正式提供服务的 SBAS 系统播发的电文进行了分析, 包括电文类型、更新周期、电文内容等, 其中 WAAS 播发的卫星数和电离层格网点 (IGP) 数量最多, 服务区域最大; Jin 等^[15] 对 SBAS 地球同步轨道 (GEO) 卫星的测距性能及其对定位结果的影响进行了研究, 结果表明在 SBAS 定位中引入 GEO 卫星测距值可提升系统的可用性; Cai 等^[16] 对 BDSBAS 的服务性能进行了评估, 结果表明其水平定位精度优于 1.5 m, 高程优于 3.0 m (置信度 95%); Jin 等^[17] 利用国际 GNSS 服务组织 (International GNSS Service Organization, IGS) 测站数据对 WAAS 和 EGNOS 的服务性能进行评估, 并验证了测地型接收机用于 SBAS 评估的可行性; Hebelbarth 等^[18] 对 SBAS 轨道和钟差改正数用于精密单点定位 (PPP) 的性能进行了评估, 结果表明 WAAS 改正数定位精度最高, 水平和垂直定位精度优于 30 cm.

当前对于 SBAS 的研究多针对 WASS, EGONS, BDSBAS 等系统, 对于阿尔及利亚星基增强系统 (ALG-SBAS) 性能的研究较少. 本文利用阿尔及利亚地面网的实测数据对系统单频 SBAS 服务性能进行研究, 对于进一步掌握该系统的服务性能及后续的星基增强系统研究具有重要参考.

1 系统服务与结构

ALG-SBAS 是基于阿尔及利亚通信卫星一号 (Alcomsat-1) 建设的星基增强系统, 其服务区域面向阿尔及利亚地区, 该系统使用 GPS 委员会分配的 148 号 PRN 码, 目前提供单频 SBAS 服务, 双频多星座星基增强服务正在建设中. ALG-SBAS 系统主要由地面监测站网、数据处理中心、地面上行站、GEO 通信卫星 Alcomsat-1 以及用户终端五部分组成^[19]. 图 1 给出了该系统的架构. ALG-SBAS 系统数据处理中心通过采集阿尔及利亚地面监测站网数据和 IGS 参考站数据解算得到卫星星历、电离层改正数及完好性参数, 生成 GPS 导航定位增强信息, 并将增强数据信息发给地面上行站; 地面上行站将增强数据流通过 C 波段完成上注, 通过 GEO 卫星播发增强信息; 用户终端接收 GPS 信号和 ALG-SBAS 信号, 从而达到提高定位精度和完好性的目的. ALG-SBAS 播发的电文遵循 RTCA-DO-229 D 标准协议^[20], 除使用协议中定义的增强电文类型外, 该系统也同时提供了自定义的信息类型 (Message Type, MT) MT29 和 MT30 用于精密单点定位 (PPP). 该系统已在阿尔及利亚渔业和交通领域开展了示范应用, 并计划应用于测绘、交通、海洋等诸多领域.

2 数学模型与数据来源

2.1 数学模型

2.1.1 星历和钟差改正

高精度的实时轨道确定是实时精密定位服务的核心技术之一. 利用导航卫星进行导航定位服务, 首先必须获得精密的卫星轨道信息, 卫星轨道误差直接影响用户定位精度. 通过获取阿尔及利亚区域跟踪网观测数据, 并辅助 IGS 观测数据, 通过数据预处理获得干净可靠的观测数据, 采用最小二乘估计方法和动力学积分实现轨道待估参数的估计和轨道预报.

与卫星轨道一样, 卫星钟差会对用户的定位精度造成影响. 卫星精密钟差确定模块将精密轨道确定模块生成的预报轨道、测站位置和 ERP 参数引入到实时精密卫星钟差处理器并进行固定, 同时将预处理后干净的实时观测数据作为滤波器的实时数据输入, 滤波器获得历元间钟差变化量, 同时引入某一时刻的钟差参考值, 给出每一时刻的卫星钟差. 通过估计的卫星钟差进行短时间外推, 提供发播系统满足实时用户要求的卫星钟差.

用户端利用接收到的增强信息计算卫星星历改正量, 计算公式如下:

$$\begin{bmatrix} \delta X^j \\ \delta Y^j \\ \delta Z^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X^j \\ \Delta Y^j \\ \Delta Z^j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \dot{X}^j \\ \Delta \dot{Y}^j \\ \Delta \dot{Z}^j \end{bmatrix} (T^j - T_0). \quad (1)$$

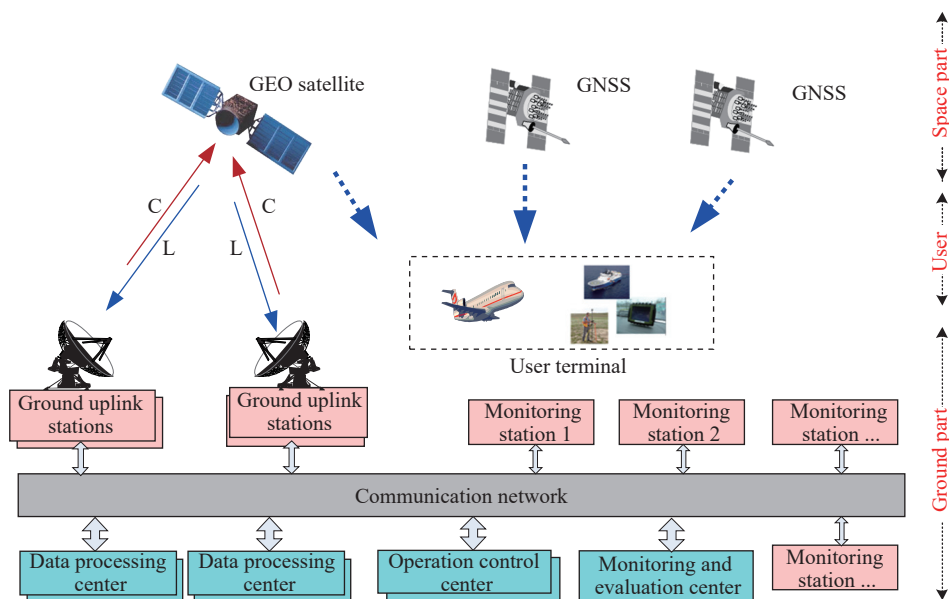


图 1 ALG-SBAS 的系统架构

Fig. 1 System architecture diagram of ALG-SBAS

其中, T_0 为星历改正数的参考时刻, T^j 为卫星信号发射时刻; $(\Delta X^j, \Delta Y^j, \Delta Z^j)$ 和 $(\Delta \dot{X}^j, \Delta \dot{Y}^j, \Delta \dot{Z}^j)$ 分别为播发的卫星轨道改正数和变化率, $(\delta X^j, \delta Y^j, \delta Z^j)$ 为 T^j 时刻卫星轨道改正数, 将其与由广播星历计算的卫星位置向量相加, 可以得到改正后的卫星位置如下:

$$\begin{bmatrix} X^j \\ Y^j \\ Z^j \end{bmatrix}_{\text{corr}} = \begin{bmatrix} X^j \\ Y^j \\ Z^j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta X^j \\ \delta Y^j \\ \delta Z^j \end{bmatrix}. \quad (2)$$

经星钟改正信息改正后的卫星钟差 dt^j 计算公式为

$$dt^j(t) = dt_0^j(t) + \delta a_{t0} + \delta a_{t1}(t - t_0). \quad (3)$$

其中, δa_{t0} 为卫星钟偏差改正, δa_{t1} 为卫星钟速改正, dt_0^j 为通过广播星历获取的卫星钟差。

2.1.2 电离层延迟改正

高精度电离层模型能有效描述 GNSS 信号传播路径上的电离层延迟, 能极大程度改善标准单点定位精度, 提高导航服务性能. 首先将接收到的数据进行实时预处理, 然后电离层参数估计模块利用经过预处理观测数据得到精确的斜路径电离层延迟, 再采用 MSLM 投影函数和低阶球谐函数估计整个区域的电离层延迟, 最后将估计出的电离层延迟参数转化为服务区内电离层格网点 (IGP) 垂直延迟改正值, 最后通过增强电文进行播发. 用户利用收到的增强电文在计算电离层延迟改正时, 首先确定用户视线电离层穿刺点 (IPP) 的位置, 然后根据 IPP 位置从服务区域内找到合适的格网点, 最后通过一定算法内插出视线上的电离层延迟误差。

电离层改正精度可通过计算电离层延迟改正百分比获取, 电离层延迟改正百分比计算公式为

$$p = \left(1 - \frac{S_C - S_L}{S_C}\right). \quad (4)$$

其中, S_C 为 IPP 点实际的电离层斜路径延迟, S_L 为 IPP 点处模型拟合的电离层斜路径延迟。

2.2 数据来源

选取地面观测网中 24 个测站的实测数据, 接收机类型为 UR380, 站分布如图 2 所示. 评估时段选取 2023 年 1 月 1 日至 12 月 31 日共 365 天的观测数据, 数据采样间隔 1 s。

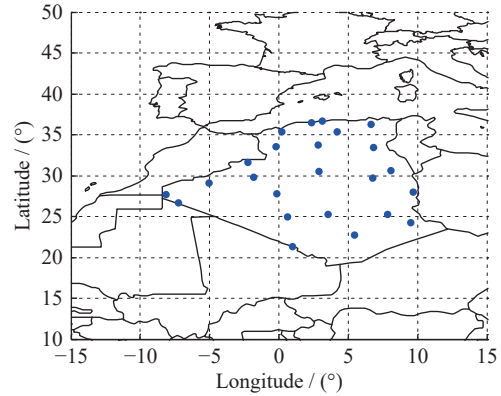


图 2 地面站网站分布

Fig. 2 Ground station website distribution map

3 评估结果

3.1 播发连续性

ALG-SBAS 增强电文通过 GEO 卫星播发, 播发间隔为 1 s. 用户通过获取 SBAS 播发的差分改正信息, 可以计算得到卫星轨道误差和卫星钟差, 从而实现实时定位. 若 SBAS 信息丢失过多, 则会影响用户定位. 为分析 GEO 播发电文的稳定性, 本文统计了年积日 2023 年第 001 天至第 100 共 100 天的 ALG-SBAS、EGNOS 和 WAAS 卫星播发 SBAS 电文息的数量. 统计结果见表 1. 用于统计分析的电文均从法国空间研究中心 (CNES) 下载*. 结果显示统计时段内 ALG-SBAS、EGNOS 和 WAAS 丢失电文条数分别为 11, 1304, 7. EGNOS 相比 ALG-SBAS 和 WAAS 消息丢失频繁, ALG-SBAS GEO 卫星稳定性较强。

3.2 电离层改正精度

对评估时段内各站电离层建模解算结果进行电离层延迟改正百分比评估, 对 24 个测站电离层延迟改正百分比进行了统计, 统计结果显示所有站电离层延迟改正百分比平均值优于 87%, 图 3 中给出了各站电离层延迟改正百分比的结果。

3.3 单点定位性能

选取评估时段内阿尔及利亚本地 4 个测站共 365 天的测试数据, 分别进行 GPS 单点定位模式 (GPS SPP) 和 SBAS 单点定位模式 (SBAS SPP) 定位精度评估, 统计分析不同定位模式下的水平和垂直外符合精度. GPS SPP 和 SBAS SPP 解算策略列于

* [ftp://serenad-public.cnes.fr](http://serenad-public.cnes.fr)

表 1 ALG-SBAS、EGNOS 和 WAAS 播发消息缺失数目统计

Table 1 Statistics of missing messages broadcast by ALG-SBAS, EGNOS and WAAS

Day of Year (DOY)	ALG-SBAS (PRN148)	EGNOS (PRN136)	WAAS (PRN135)
1—30	0	80	0
31—60	0	1199	0
61—100	11	25	7

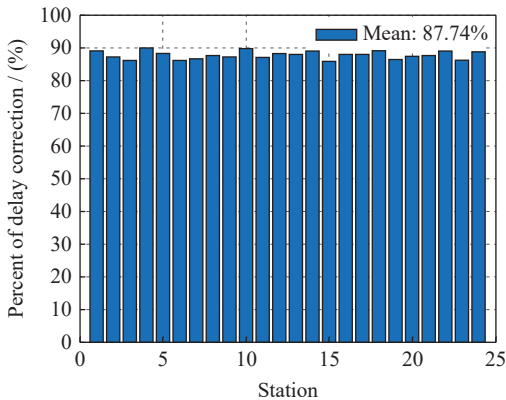


图 3 各地面站电离层延迟改正百分比统计直方图
Fig. 3 Statistical histogram of ionospheric delay correction percentage of each ground station

表 2. 图 4 给了 4 个测站 GPS SPP 和 SBAS SPP 精度统计结果. 精度统计方法为对每个站按天统计定位精度, 再将该站 365 天的结果求平均得到该站评估时段的定位精度统计值. 统计时间内所有站单频 SBAS 定位水平误差和垂直误差平均值分别为 0.88 m 和 1.29 m, 相比 GPS SPP, SBAS SPP 定位精度有明显提升.

为分析各覆盖区域的定位精度情况, 利用阿尔及利亚地面站网 24 个测站数据, 统计评估时段内 SBAS SPP 相对于 GPS SPP 定位精度的提升. 图 5 给出了各站提升情况, 与 GPS SPP 相比, SBAS SPP 精度平均提高了 39% 以上. 南部地区的 bbm1, tama 和 jane 站由于位于边界附近, 南部又没有其他可用的测站, 因此电离层和星历改正的精度较低, 进而导致其精度提升较其他站点低.

阿尔及利亚北部区域测站同时位于 EGNOS 覆盖范围内, 同时利用 EGNOS SBAS 增强信息进行定位, 选取 6 个测站, 测站分布如图 6 所示. 图 7 和

表 2 定位解算策略

Table 2 Positioning solution strategy

Type	Cut-off height angle	Ionospheric model	Tropospheric model	Satellite ephemeris
GPS SPP	10°	Klobuchar	Saastamoinen	Broadcast
SBAS SPP	10°	SBAS	Saastamoinen	SBAS+ Broadcast

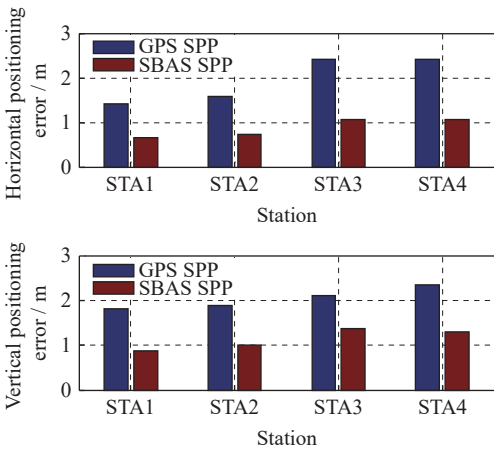


图 4 GPS SPP 和 SBAS SPP 定位结果
Fig. 4 GPS SPP and SBAS SPP positioning accuracy results

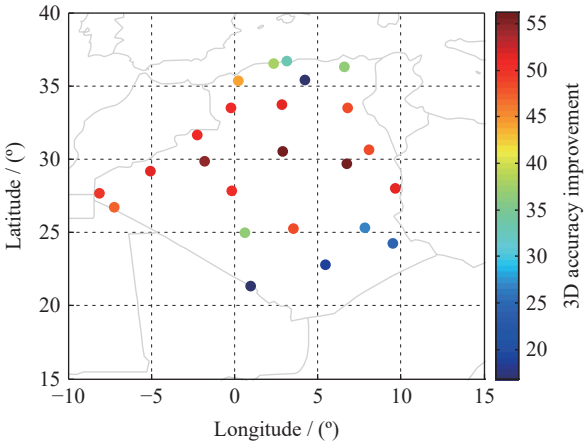


图 5 ALG-SBAS 定位精度相对 GPS 提升情况
Fig. 5 Positioning accuracy of correction ALG-SBAS is improved compared with GPS

图 8 分别给出了 ALG-SBAS, GPS 和 EGNOS 68% 和 95% 的水平和垂直误差. 统计结果表明, ALG-SBAS 单点定位 68% 的水平和垂直精度为 0.82 m 和 1.30 m, 95% 的水平和垂直精度为 1.65 m 和 2.62 m.

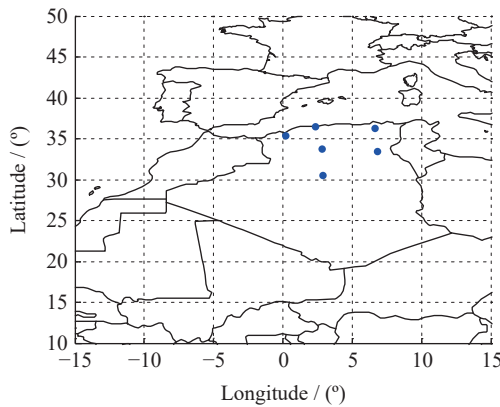


图6 评估选取的北部6个测站分布

Fig. 6 Distribution of the six stations in the north used for assessment

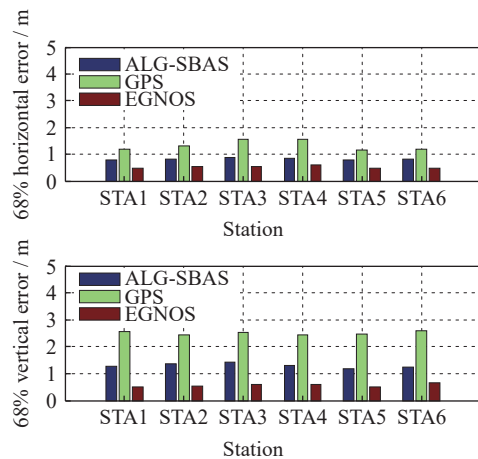


图7 ALG-SBAS, GPS 和 EGNOS 68% 定位精度统计

Fig. 7 ALG-SBAS, GPS and EGNOS 68% positioning accuracy statistics

ALG-SBAS 和 EGNOS 相比 GPS SPP 定位精度均有提高, EGNOS 相比 ALG-SBAS 提升较高. 两个系统精度提升差异主要有以下两方面原因: 一是 EGNOS 相比 ALG-SBAS 在系统架构方面存在差异, 采用了多星座融合、多频观测等; 二是在观测数据质量方面, EGNOS 比 ALG-SBAS 拥有更密集的参考站网络、更稳定的观测环境等, 这些方面的差异都有助于提高定位精度.

3.4 SBAS PPP 定位性能

ALG-SBAS 提供了自定义的信息类型 (Message Type, MT) MT29 和 MT30, 可用于精密单点定位 (PPP). 为评估 ALG-SBAS PPP 精度情况, 对评估时段内所有站进行 ALG-SBAS PPP 定位精度分

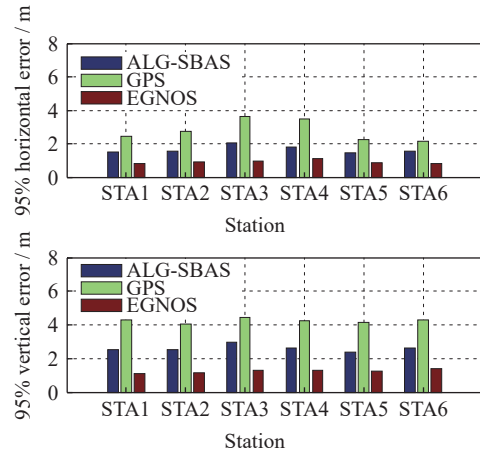


图8 ALG-SBAS, GPS 和 EGNOS 95% 定位精度统计

Fig. 8 ALG-SBAS, GPS and EGNOS 95% positioning accuracy statistics

析, 评估结果显示 ALG-SBAS PPP 统计时间内所有站的 3D 精度提升优于 0.45 m, 图 9 给出了各站的 3D 精度.

3.5 完好性

对地面站网中 24 个监测站 2023 年 365 天的定位结果完好性进行分析. 图 10 和图 11 分别为水平和垂直定位结果的斯坦福图. 图中对角线上方区域表示定位保护级大于定位误差, 无完好性风险事件, 当定位结果处于白色区域时, 定位保护级小于告警门限, 认为定位结果可用; 对角线下方区域则表示定位误差超过保护级, 此时系统产生误导信息 (MI), 其中当定位结果处于红色区域时, 表示定位误差、告警门限和定位保护级三者从大到小的顺序依次为定位误差、告警门限、保护级, 此时产生危险误导信息 (HMI), 影响民航飞行安全. 可以看出, 在评估时段内 ALG-SBAS 未发生完好性风险事件. 由于部分评估测站位于服务区边缘, 使得定位保护级超过了告警门限, 因此定位结果不可用. 对定位结果在 APV-I 阶段的可用性进行分析, 其中 APV-I 阶段对应水平和垂直告警门限分别为 40 m 和 50 m, ALG-SBAS 在 APV-I 阶段的所有测站平均可用性为 99.9%.

4 结论

评估分析了 ALG-SBAS 增强电文的连续性、电离层延迟改正精度、系统定位性能及完好性. 统计时段内 EGNOS 相比 ALG-SBAS 和 WAAS 增强电文

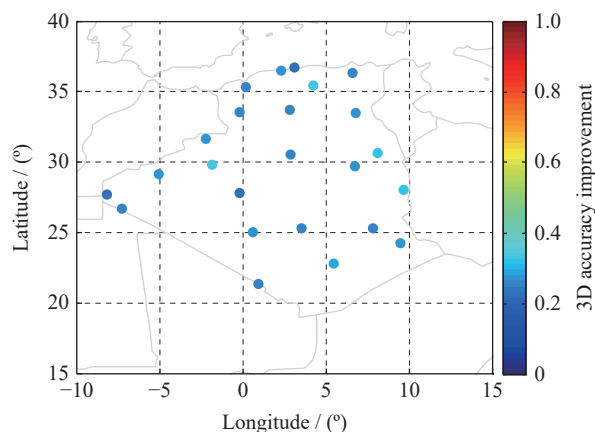


图9 各站 ALG-SBAS PPP 3D 定位精度

Fig. 9 ALG-SBAS PPP 3D positioning accuracy

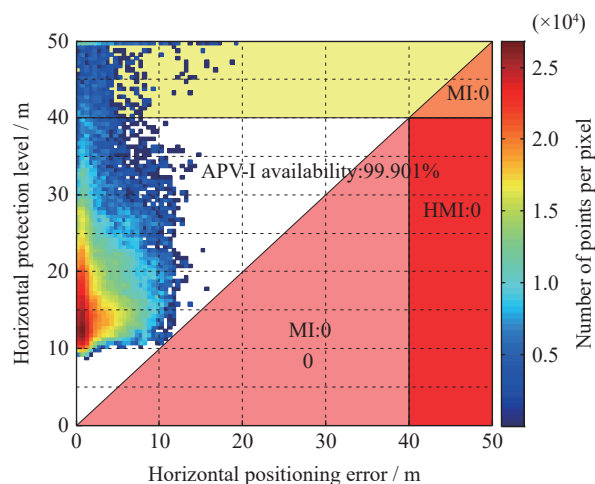


图10 ALG-SBAS 水平定位结果斯坦福图

Fig. 10 Stanford diagram of ALG-SBAS horizontal positioning results

消息丢失频繁, ALG-SBAS GEO 卫星稳定性较强. ALG-SBAS 电离层延迟改正百分比平均值优于 87%, 统计时间内所有站单频 SBAS 定位水平和垂直误差平均值分别为 0.88 m 和 1.29 m, ALG-SBAS 定位精度相对于 GPS 提升 39% 以上, 但是相比 EGNOS, ALG-SBAS 单点定位精度较低, 两个系统精度差异主要由于 EGNOS 在系统架构、监测站数据、站的分布及站的数据质量等方面均优于 ALG-SBAS. 利用 ALG-SBAS 自定义的 MT29 和 MT30 增强信息进行 SBAS PPP 定位精度分析, 评估结果显示 SBAS PPP 统计时间内所有站 3D 定位精度优于 0.45 m. 同时开展了对测站定位结果的完好性的分析, 分析结果

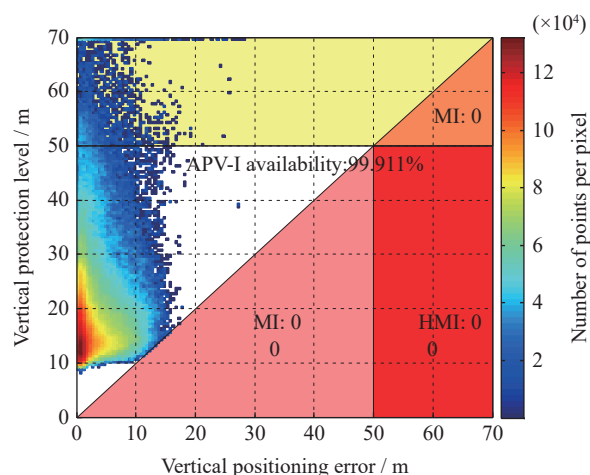


图11 ALG-SBAS 垂直定位结果斯坦福图

Fig. 11 Stanford diagram of ALG-SBAS vertical positioning results

显示评估时段内 ALG-SBAS 未发生完好性风险事件, ALG-SBAS 在 APV-I 阶段的所有测站平均可用性为 99.9%. ALG-SBAS 服务性能满足单频服务指标, 该系统建设推动了 GNSS 在阿尔及利亚地区的应用. 由于 ALG-SBAS 目前尚未经过民航认证, 后续需要更大样本的观测数据对系统性能进行评价.

参考文献

- [1] WALTER T, SHALLBERG K, ALTSHULER E, *et al.* WAAS at 15[J]. *Navigation*, 2018, **65**(4): 581-600
- [2] TABTI L, KAHLOUCHE S, BENADDA B, *et al.* Improvement of single-frequency GPS positioning performance based on EGNOS corrections in Algeria[J]. *Journal of Navigation*, 2020, **73**(4): 846-860
- [3] BLANCH J, WALTER T, ENGE P, *et al.* Evaluation of a covariance-based clock and ephemeris error bounding algorithm for SBAS[C]//Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Tampa, Florida: Institute of Navigation, 2014: 3270-3276
- [4] LEI Yan, GAO Yanming, WANG Jinlei, *et al.* Precision of MSAS single-point positioning in Northern China Seas[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2016, **32**(12): 65-70 (雷艳, 高延铭, 王金磊, 等. 北海区 MSAS 单点定位精度分析[J]. 海洋地质前沿, 2016, **32**(12): 65-70)
- [5] CHEN S S, JIN B, LI D J, *et al.* Study on the prediction method of single and dual frequency service area for BDS-BAS[C]//Proceedings of China Satellite Navigation Conference. Singapore: Springer, 2019: 228-237
- [6] WU T, PECK S. An analysis of satellite integrity monitoring improvement for WAAS[C]//Proceedings of the 15th

- International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2002). Portland, OR: Institute of Navigation, 2002: 756-765
- [7] BLANCH J, WALTER T, ENGE P. A clock and ephemeris algorithm for dual frequency SBAS[C]//Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011). Portland, OR: Institute of Navigation, 2011: 2513-2519
- [8] 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 (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)
- [9] JIN B, CHEN S S, LI D J, *et al.* Performance analysis of SBAS ephemeris corrections and integrity algorithms in China region[J]. *Satellite Navigation*, 2021, **2**(1): 15
- [10] SHAO B, DING Q, WU X B. Estimation method of SBAS dual-frequency range error integrity parameter[J]. *Satellite Navigation*, 2020, **1**(1): 9
- [11] JIN B, CHEN S S, LI D J, *et al.* Ionospheric correlation analysis and spatial threat model for SBAS in China region[J]. *Advances in Space Research*, 2020, **66**(12): 2873-2887
- [12] SPARKS L, BLANCH J, PANDYA N. Estimating ionospheric delay using kriging: 1. Methodology[J]. *Radio Science*, 2011, **46**(6): RS0D21
- [13] ZHAO Zhen, CHEN Gang, HU Zhigang. Service performance analysis on L1 frequency of satellite-based augmentation system[J]. *Earthquake Research in China*, 2020, **36**(4): 912-923 (赵镇, 陈刚, 胡志刚. 星基增强系统 L1 频段信息服务性能分析 [J]. 中国地震, 2020, **36**(4): 912-923)
- [14] CHEN Shanshan, JIN Biao, ZHAO Liqian, *et al.* Dynamic SBAS message scheduler algorithm[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, **47**(10): 1996-2005 (陈姗姗, 金彪, 赵立谦, 等. SBAS 电文时序动态编排算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2021, **47**(10): 1996-2005)
- [15] JIN Biao, CHEN Shanshan, LI Zhulian, *et al.* SBAS GEO satellite user range error and position augmentation research[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, **49**(7): 1166-1175 (金彪, 陈姗姗, 李祝莲, 等. SBAS GEO 卫星 URE 精度及定位增强研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2024, **49**(7): 1166-1175)
- [16] CAI Hongliang, MENG Yi'nan, 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)
- [17] JIN Biao, LI Rui, WANG Dun, *et al.* Service performance assessment method of single frequency SBAS[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2024, **50**(10): 3062-3073 (金彪, 李锐, 王盾, 等. 星基增强系统单频服务性能评估方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2024, **50**(10): 3062-3073)
- [18] HEBELBARTH A, WANNINGER L. SBAS orbit and satellite clock corrections for precise point positioning[J]. *GPS Solutions*, 2013, **17**(4): 465-473
- [19] Li Dongjun, Jin biao, Takka Elhadi, *et al.* Design and validation of Algerian satellite based augmentation system [C]//Proceedings of the 10th China Satellite Navigation Annual Conference, Beijing: China Satellites Navigation Office, 2019 (李东俊, 金彪, Takka Elhadi 等. 阿尔及利亚星基增强系统设计与验证 [C]//第十届中国卫星导航年会论文集. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2019)
- [20] RTCA. Minimum operational performance standards for global positioning system/wide area augmentation system airborne equipment[S]. Washington D C: RTCA, 2016

作者简介



潘丽静 女, 1988 年 9 月出生于河北省保定市, 现就职于航天恒星科技有限公司, 主要研究方向为卫星导航精密时间基准确定及精密定位方面等。
E-mail: lijingpan9130@163.com



金彪 (通信作者) 男, 1988 年 6 月出生于安徽省寿县, 现为航天恒星科技有限公司研究员, 博士, 主要研究方向为卫星导航精密时空基准建立维持及完好性增强等。
E-mail: jinb@spacestar.com.cn