引文格式:郭斐,李星宇,杨颜,等.Galileo高精度定位服务方法及性能评估[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(4):668-678.DOI:10.13203/j.whugis20240255

Citation: GUO Fei, LI Xingyu, YANG Yan, et al. Modeling and Performance Evaluation of Galileo High Accuracy Service[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(4):668-678.DOI:10.13203/j.whugis20240255

Galileo高精度定位服务方法及性能评估

郭 斐[1] 李星宇[1] 杨 颜[1] 张小红[1,2]

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

摘 要:伽利略(Galileo)高精度定位服务(high accuracy service,HAS)通过星基E6b信号或互联网向全球用户免费播发Galileo和GPS双系统的轨道、钟差和码偏差改正数,为全球实时精密单点定位(precise point positioning,PPP)提供了新的途径。描述了HAS信息的解码与改正数应用方法,并基于E6b播发的星基增强改正信息分析了HAS服务的可用性,评估了卫星轨道和钟差改正数的精度。选取全球均匀分布的13个测站,从不同区域对比分析了静态、伪动态场景下的HAS PPP定位性能,并在中国湖北省武汉地区开展了真实动态实验。结果表明:Galileo和GPS卫星的平均可用性高达98.9%和94.4%,轨道一维均方根误差分别为0.062 m和0.066 m,钟差的标准差分别为0.14 ns和0.23 ns,较广播星历精度提升显著;HAS PPP可以达到静态厘米级,伪动态水平厘米级、高程1~2 dm,真实动态1~4 dm的定位精度,且定位性能与测站区域分布密切相关。

关键词:Galileo HAS;轨道误差;钟差误差;PPP;定位性能

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-07-12

DOI:10.13203/j.whugis20240255 **文章编号**:1671-8860(2026)04-0668-11

Modeling and Performance Evaluation of Galileo High Accuracy Service

GUO Fei[1] *LI Xingyu*[1] *YANG Yan*[1] *ZHANG Xiaohong*[1,2]

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: **Objectives**: The Galileo high accuracy service (HAS) transmits precise orbit, clock and code bias products of the Galileo and GPS dual systems to users worldwide for free through satellite-based E6b signal or the Internet, offering a new approach for global real-time precise point positioning (PPP). Due to the fact that Galileo has been formally providing HAS for a relatively brief period, there is still little research about exploring service consistency on a global scale and PPP performance in real dynamic environments. **Methods**: The decoding method of HAS message, the usage of corrections and the PPP process were explored and described. The availability and accuracy of orbit and clock offset were comprehensively analyzed using satellite-broadcast HAS data. Thirteen multi-GNSS experiment (MGEX) stations in different regions were selected for comparison and analysis of HAS PPP performance in static and simulated kinematic modes. Additionally, a real dynamic test of HAS PPP was conducted in the Wuhan region for a more comprehensive evaluation of positioning performance. **Results**: The results show that the Galileo and GPS satellite corrections have high average availabilities of 98.9% and 94.4%, respectively. Compared with the final satellite products of Wuhan University (WHU), the one-dimensional root mean square error (1D RMSE) of the Galileo and GPS satellite orbit products are 0.062 m and 0.066 m, respectively. Additionally, the standard deviations (STD) of the clock errors are reported as 0.14 ns for Galileo and 0.23 ns for GPS, respectively. Those indicate a significant enhancement in accuracy compared to the broadcast ephemeris. Experimental results demonstrate that the HAS PPP solution achieves centimeter-level positioning accuracy

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB3903902)。

第一作者:郭斐,博士,教授,主要从事GNSS精密定位技术及其应用研究。fguo@sgg.whu.edu.cn

in static scenarios. In simulated kinematic mode, HAS PPP maintains horizontal positioning precision at the centimeter level while exhibiting vertical accuracy ranging from 1 to 2 dm. The positioning accuracy of real dynamic mode can achieve 1 to 4 dm level. GPS error is slightly higher, but can still meet sub-meter positioning requirements of HAS. The convergence time and elevation errors of the positioning initial phase are influenced significantly by the region distribution of stations. **Conclusions**: Overall, thanks to the high accuracy of the orbit and clock corrections, HAS can effectively meet the demand for real-time precise positioning. The HAS PPP accuracy and convergence performance will be further improved in the future with the development of HAS Phase 2.

Key words: Galileo HAS; orbit error; clock error; PPP; positioning performance

2023年1月24日起,伽利略(Galileo)系统将高精度定位服务(high accuracy service,HAS)作为一项免费服务向用户开放,旨在全球范围内提供精密单点定位(precise point positioning,PPP)服务。Galileo系统通过星基E6b信号或互联网实时广播Galileo和GPS的高精度卫星端轨道、钟差和码偏差改正信息,从而帮助用户实现高精度定位[1]。HAS分为全球服务和欧洲区域服务两种类型,分别基于传统PPP和PPP实时动态定位(PPP-real time kinematic,PPP-RTK)技术,预计能够提供优于水平方向20 cm、高程方向40 cm的精密定位服务[1-2]。在HAS正式提供初始服务前,文献[3]首次评估了HAS测试信号的服务覆盖范围,并以2021年5月的数据分析了改正数误差,结果表明Galileo和GPS的轨道改正误差分别为5.3 cm和6.6 cm,钟差误差分别为0.15 ns和0.26 ns。文献[4]利用2022年的HAS实测信号进行了PPP性能评估,表明在仿动态模式下Galileo和GPS双系统组合解的水平和垂直方向误差分别为13.1 cm和18.6 cm,满足HAS的预期精度。

伴随着HAS正式提供初始服务,许多学者开展了相关的轨道和钟差改正数精度评估[5-7]和PPP性能分析[8-10]。文献[11]利用互联网播发的HAS数据进行了服务可用性和改正数性能评估,结果表明Galileo和GPS的总体空间信号测距误差(signal-in-space ranging error,SISRE)可达6.0 cm和13.7 cm,能够为全球用户提供足够可用的改正信息。文献[12]选取欧洲区域内的多GNSS实验(multi-GNSS experiment, MGEX)跟踪站进行单系统和双系统的静态HAS PPP性能评估,结果表明在静态模式下能够实现厘米级的高精度定位。文献[13]利用位于郑州的接收机平台,在全球范围内选取MGEX跟踪站进行了仿动态的HAS PPP实验,结果显示Galileo系统PPP可在东(east, E)、北(north, N)、天(up, U)方向上分别达到平均8.08 cm、5.28 cm、12.43 cm的定位精度。

由于Galileo正式提供HAS的时间不长,目前相关研究仍相对较少,并且对全球范围内的服务一致性以及真实动态环境下的PPP性能的探究也较为匮乏。本文利用接收机采集的HAS信息,以武汉大学国际GNSS服务(International GNSS Service,IGS)的事后精密产品WUM作为参考值,分析了轨道和钟差改正数的可用性和误差。同时,选取全球均匀分布的13个MGEX测站进行静态和仿动态的HAS PPP定位和收敛性能评估,并利用在武汉地区采集的真实动态数据进行HAS PPP动态性能测试。

1　HAS方法

1.1　基本架构

HAS的基本架构如图1所示[14]。由高精度数据生成器模块(high accuracy data generator, HADG)处理接收来自传感器站(Galileo sensor station,GSS)的系统数据,实时生成HAS数据,传送给核心基础设施,并通过上行链路站(uplink station,ULS)上传到Galileo卫星。卫星可通过E6-B信号由星基实时向用户广播HAS数据。同时,用户也可以通过互联网获取HADG生成的HAS数据。

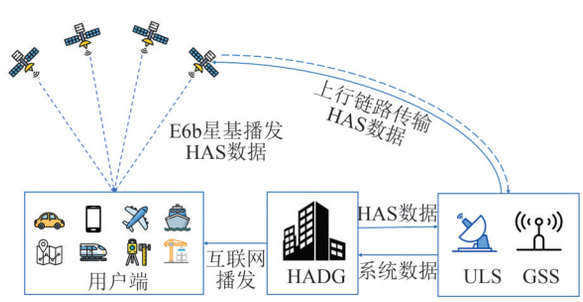


图1　HAS基本架构

Fig. 1　HAS Basic Architecture

1.2　信号和信息结构

HAS数据通过E6b信号的C/NAV页面进

行传输,利用未加密的测距码以确保用户的自由免费使用[15]。为方便传输,每个492 bit的C/NAV页面被拆分成若干部分,如图2所示,由14 bit的头部预留位、448 bit的HAS页面、24 bit的循环冗余检校码(cyclic redundancy check,CRC)和6 bit的尾部组成。为提高传输效率,HAS通过里德-所罗门(Reed-Solomon)编码[16],将每条HAS消息编码为255个HAS页面。每个HAS页面由24 bit的消息头和424 bit的高冗余垂直Reed-Solomon码(high-parity vertical Reed-Solomon,HPVRS)编码页面组成。HAS消息头中包含2 bit的HAS服务状态标识(HAS status,HASS)、2 bit的预留位、2 bit的消息类型标识(message type,MT)、5 bit的消息标识符(message identifier,MID)、5 bit的消息包含的页面总数(message size,MS)以及8 bit的消息页面标识符(message page identifier,PID)。424 bit的编码页面包含了32 bit的MT1消息头和392 bit的消息数据,卫星轨道、钟差和码偏差改正数即存储在消息数据中,其中MT1表示轨道、钟差和偏差的混合消息格式[1,17]。当用户接收到足够的HAS数据后,即可进行解码和改正处理。

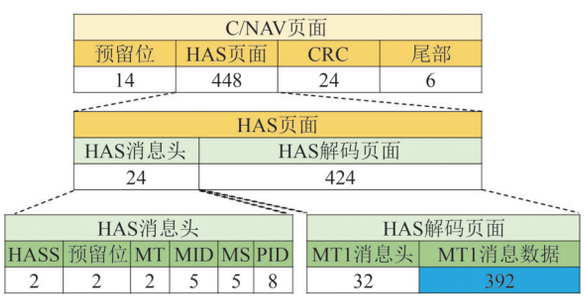


图2 HAS消息页面

Fig. 2 HAS Message Page

1.3 HAS数据解码方法

为满足实时定位的需求,出现了许多状态空间表示(state space representation,SSR)的信息格式[18-19],如RTCM3、CSSR和IGS SSR等。通常情况下,这些不同格式之间在信息内容方面的差异较小[20]。Galileo HAS数据的优势在于它可以被转换为其他任何SSR格式,除了不支持Galileo系统的SPARTN格式[21]。

HAS所使用的Reed-Solomon编码是一种基于Galois域的线性运算,其编码和解码操作可以表示为该域内的矩阵算法[22]。目前,HAS数据的解码工具有GHASP[23]、HASlib等。其中,HASlib支持将BINEX格式和SBF格式的HAS数据转换为RTCM3或IGS SSR格式[24],进一步基于RTKLIB平台可以进行RTCM3格式解码和HAS PPP解算[25]。完整的HAS数据解码流程如图3所示。其中,Reader为HASlib的数据读取与解析模块,负责处理输入数据与解析原始二进制文件;Collector模块负责HAS页面收集、排序重组以及Reed-Solomon解码;Converter模块负责将Galileo HAS专有格式转换为通用的标准化格式。

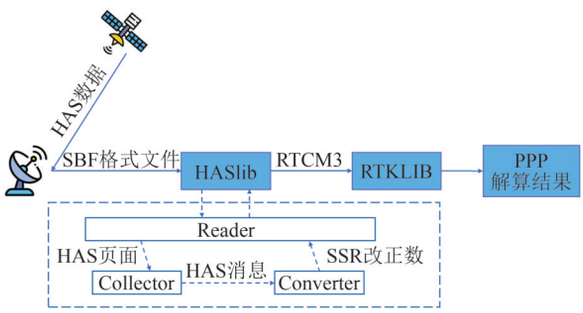


图3 HAS数据解码流程

Fig. 3 HAS Data Decoding Process

1.4 轨道改正数使用方法

HAS提供的轨道改正产品基于卫星轨道坐标系(satellite coordinate system,SCS),并以卫星天线相位中心(antenna phase center,APC)为原点[26-27]。因此,为将轨道改正数应用于广播星历(broadcast,BRDC),需要将基准由SCS转换到地心地固(Earth centered Earth fixed,ECEF)坐标系中,坐标旋转矩阵$\boldsymbol{R}_{\mathrm{SCS}}^{\mathrm{ECEF}}$的计算公式为:

$$\begin{cases}\boldsymbol{e}_{\mathrm{A}}=\dfrac{\dot{\boldsymbol{x}}^{s}}{\left|\dot{\boldsymbol{x}}^{s}\right|}\\ \boldsymbol{e}_{\mathrm{C}}=\dfrac{\boldsymbol{x}^{s}\times\dot{\boldsymbol{x}}^{s}}{\left|\boldsymbol{x}^{s}\times\dot{\boldsymbol{x}}^{s}\right|}\\ \boldsymbol{e}_{\mathrm{R}}=\boldsymbol{e}_{\mathrm{A}}\times\boldsymbol{e}_{\mathrm{C}}\\ \boldsymbol{R}_{\mathrm{SCS}}^{\mathrm{ECEF}}=\left[\boldsymbol{e}_{\mathrm{R}}\quad\boldsymbol{e}_{\mathrm{A}}\quad\boldsymbol{e}_{\mathrm{C}}\right]\end{cases}\tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{x}^{s}$和$\dot{\boldsymbol{x}}^{s}$分别为卫星s的APC在ECEF坐标系中的位置和速度矢量;$\boldsymbol{e}_{\mathrm{R}}$、$\boldsymbol{e}_{\mathrm{A}}$、$\boldsymbol{e}_{\mathrm{C}}$分别为轨道改正数在SCS中径向(radial,R)、切向(along-track,A)、法向(cross-track,C)的单位向量。

由旋转矩阵将轨道改正向量转换到ECEF坐标系后,匹配HAS改正信息的星历龄期(issue of data ephemeris,IODE)与广播星历的IODE,可将改正向量修正在广播星历计算的卫星位置$\boldsymbol{x}_{\mathrm{BRDC}}^{s}$上,得到更精确的卫星三维位置,计算公式为:

$$\begin{cases}\delta\boldsymbol{X}=\boldsymbol{R}_{\mathrm{NTW}}^{\mathrm{ECEF}}\delta\boldsymbol{R}\\ \boldsymbol{x}_{\mathrm{HAS}}^{s}=\boldsymbol{x}_{\mathrm{BRDC}}^{s}+\delta\boldsymbol{X}\end{cases}\tag{2}$$

式中,$\delta\boldsymbol{X}$和$\delta\boldsymbol{R}$分别为ECEF坐标系和SCS下的

轨道改正数;$\boldsymbol{x}^{s}_{\mathrm{HAS}}$为经HAS改正后的卫星位置,该值直接用于后续PPP解算。

为进行HAS轨道改正数的精度评估,将改正后的卫星位置与由IGS分析中心的事后精密星历计算的卫星位置进行比较,计算公式为:

$$\Delta\boldsymbol{x}^{i,s}=\boldsymbol{X}^{i,s}-\boldsymbol{x}^{i,s}_{\mathrm{HAS}} \tag{3}$$

式中,$X^{i,s}$和$x^{i,s}_{\mathrm{HAS}}$分别为经天线相位中心改正的事后精密星历计算的卫星位置和HAS改正得到的卫星位置。

1.5　钟差改正数使用方法

HAS钟差改正数作用于由Galileo I/NAV和GPS LNAV广播星历双频无电离层(ionospheric free,IF)组合模型计算得到的钟差上,计算公式为:

$$t^{s}_{\mathrm{HAS}}=t^{s}_{\mathrm{BRDC}}+\frac{\delta C^{s}}{c} \tag{4}$$

式中,t^{s}_{BRDC}为广播星历计算得到的卫星钟差;t^{s}_{HAS}为HAS改正后得到的精密钟差;δC^{s}为HAS钟差改正数(单位为m);c为光速。

考虑到HAS改正得到的精密钟差和事后精密钟差产品的时间基准不一致,存在系统性偏差,因此进行钟差改正数评估时需要使用钟差的二次差[26]。先将经HAS改正后的钟差与同历元事后精密钟差作差得到一次差,再取同一历元内同一系统的所有卫星一次差的中位数作为基准[28],将其与一次差结果再次作差,得到钟差二次差,计算公式为:

$$\Delta t^{i,s}=T^{i,s}-t^{i,s}_{\mathrm{HAS}}-M \tag{5}$$

式中,$T^{i,s}$和$t^{i,s}_{\mathrm{HAS}}$分别为事后精密钟差和经HAS改正后的钟差;M为同一历元卫星系统i的一次差中位数。此外,GPS、Galileo事后精密钟差的基准频率分别为C1W和C2W、C1C和C5Q,而HAS中GPS、Galileo钟差解算的基准频率分别为C1C和C2P、C1C和C7Q,因此在进行HAS钟差评估时,需要使用Galileo HAS码偏差产品或中国科学院发布的差分码偏差产品[29]。

2　改正数精度评估

2.1　改正信息可用性分析

HAS在全球范围内全天播发轨道和钟差改正数,分别以50 s和10 s的频率更新。为评估HAS服务性能,利用Septentrio PolaRx5接收机接收到的HAS信息,分析Galileo和GPS卫星的轨道和钟差改正数的可用性。图4为2024年年积日(day of year, DOY) 9—22连续14 d的HAS轨道和钟差改正数接收情况的时间序列图。

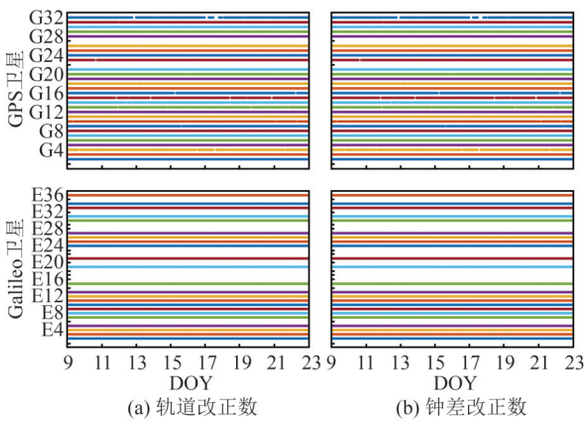


图4　HAS轨道和钟差改正数可用性

Fig. 4　Availability of HAS Orbit and Clock Corrections

Galileo系统目前有30颗在轨卫星,其中23颗卫星(E02～05、E07～13、E15、E19、E21、E24～27、E30、E31、E33、E34、E36)能够正常运行,7颗卫星(E01、E06、E14、E18、E20、E22、E29)处于异常状态。Galileo系统的卫星在轨可用情况与实验期间存在HAS数据的卫星一致,意味着HAS产品能够覆盖所有在轨可用的Galileo卫星。GPS系统的G02～32卫星在实验期间正常运行,其中G22和G27卫星在整个数据采集期间均无HAS数据。因此,HAS产品能够覆盖目前绝大多数GPS以及所有Galileo系统的在轨可用卫星。此外,对于同一卫星而言,轨道改正数缺失的情况基本与钟差改正数一致,没有改正数的历元基本不重合,可以保证任意时间内均有足够可用的卫星改正数。GPS卫星的数据中断发生次数更高,数据连续性差于Galileo卫星。为更直观地表示HAS数据的可用性,统计各卫星的改正数可用率,如图5所示。

由图5可知,GPS卫星的可用性整体差于Galileo卫星,但最差也可达到78.9%,其中79.3%卫星的可用率都达到了90%以上。相比之下,Galileo卫星的可用性更高且更稳定,所有卫星的可用率均高达97%以上。GPS卫星和Galileo卫星的轨道钟差改正数的平均可用率分别为94.4%和98.9%,具有良好的可用性。

2.2　轨道和钟差改正数精度

按照上文方法对轨道和钟差改正数精度进行评估,选取武汉大学IGS分析中心提供的WUM精密产品作为参考值,选取2024年1月9日至22日共计14 d的HAS信息,分别计算广播星历计算的卫星位置在HAS改正前后的轨道均

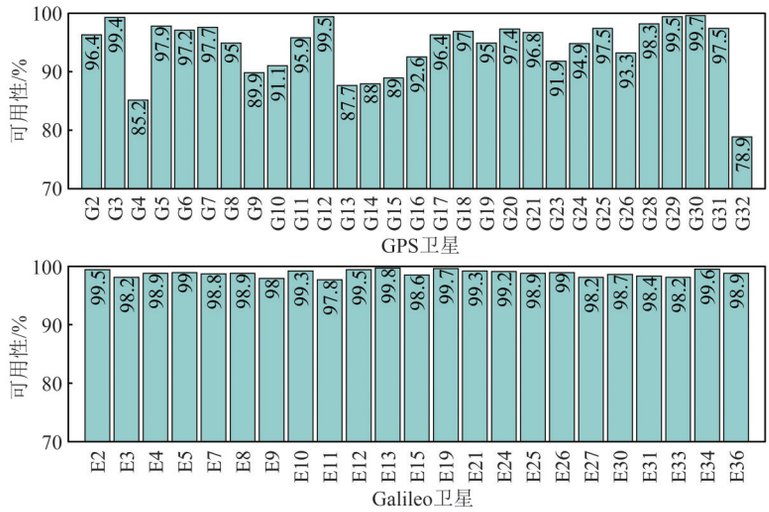


图5 各卫星改正数的可用率

Fig. 5 Availability Rates of Corrections for Each Satellite

方根误差(root mean square error,RMSE)和钟差标准差(standard deviation,STD)。

图6为GPS和Galileo各卫星在HAS改正前后的轨道R、A和C方向的RMSE。Galileo由于其卫星搭载高精度氢钟以及广播星历的频繁注入,用户的轨钟外推误差较小,因此其广播星历的轨钟精度显著优于GPS[30-31]。由图6可以发现,经HAS轨道改正后的卫星轨道误差相较于仅使用广播星历时有较大程度的提升,改正后的两系统卫星轨道精度相当。GPS的广播星历精度相对较差,改正效果更加显著,尤其是在A方向上。

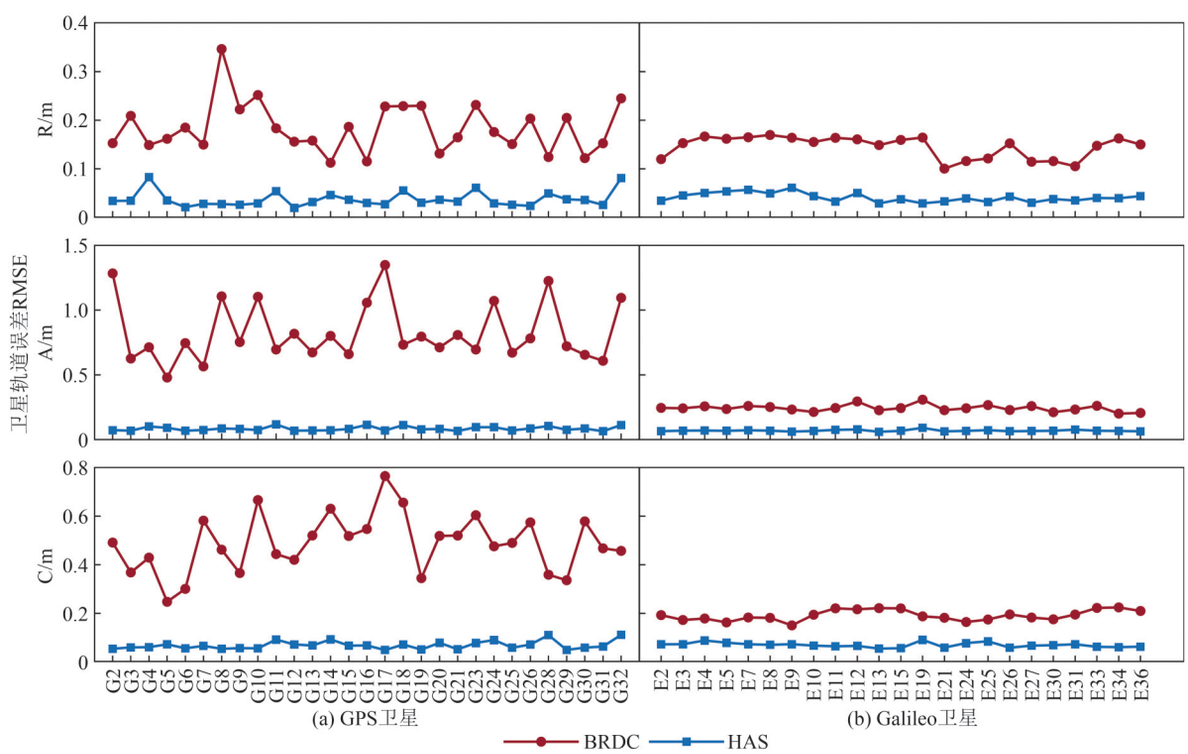


图6 卫星轨道误差的RMSE

Fig. 6 RMSE of Satellite Orbit Errors

图7为GPS和Galileo各卫星在HAS改正前后的卫星钟差误差的STD。可以看出,改正后的钟差精度相较于广播星历有较大提升,Galileo的改正后精度明显优于GPS,其各卫星的改正后钟差误差均可达到0.2 ns以内。GPS的改正效果略差,但各卫星的误差也均优于0.5 ns。

表1统计了HAS改正前后的整体轨道R、A、C方向的RMSE(R_R、R_A、R_C),轨道一维(one-di

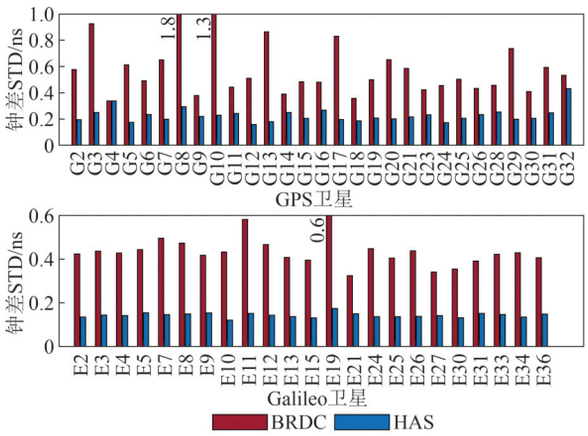


图 7　卫星钟差误差的 STD

Fig. 7　STD of Satellite Clock Errors

mensional，1D）RMSE（R_{1D}）以及钟差标准差（Clk）。1D RMSE是IGS评估GNSS星历轨道精度的标准度量[32]，其计算公式为：

$$R_{1D}=\sqrt{\frac{R_R^2+R_A^2+R_C^2}{3}} \tag{6}$$

从表1中可以看出，经HAS改正后，GPS和Galileo轨道R、A和C方向分量的平均RMSE均可达到厘米级，平均钟差STD均小于0.25 ns，相比于广播星历精度都有显著的提升。改正后的GPS和Galileo的轨道1D RMSE分别为0.066 m和0.062 m，与改正前相比分别提升约88.2%和68.9%；钟差STD分别为0.23 ns和0.14 ns，分别提升约59.9%和67.0%，改正效果显著。整体而言，Galileo的轨道和钟差改正效果略优于GPS，两者经HAS改正后均可达到较高的精度水平。

表 1　HAS改正前后的轨道和钟差误差

Table 1　Orbit and Clock Errors Before and After Being Corrected by HAS

系统	BRDC					HAS				
	R_R/m	R_A/m	R_C/m	R_{1D}/m	Clk/ns	R_R/m	R_A/m	R_C/m	R_{1D}/m	Clk/ns
GPS	0.183	0.818	0.488	0.561	0.61	0.036	0.085	0.067	0.066	0.23
Galileo	0.145	0.243	0.191	0.198	0.43	0.041	0.070	0.069	0.062	0.14

3　HAS PPP性能评估

3.1　数据来源及PPP处理策略

为评估HAS PPP性能，选取全球范围内均匀分布的13个MGEX测站，具体测站名称和分布见图8。HAS定义的服务范围将60°N—60°S、90°E—125°W的矩形区域排除在外，排除区域内HAS仍能正常提供服务，但无法保证满足定位精度的预期要求[1]。选取的测站中，jplm、kat1、urum和thtg测站位于HAS官方发布的服务范围边缘或以外。

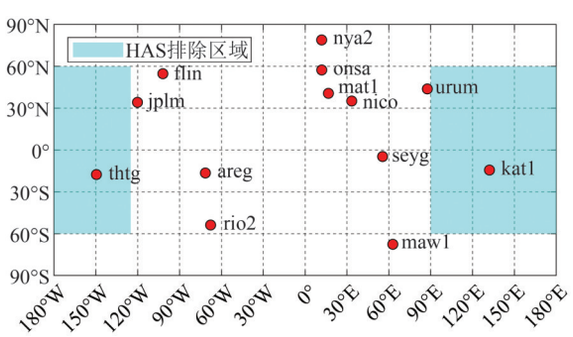


图 8　测站名称及位置分布

Fig. 8　Stations Name and Location

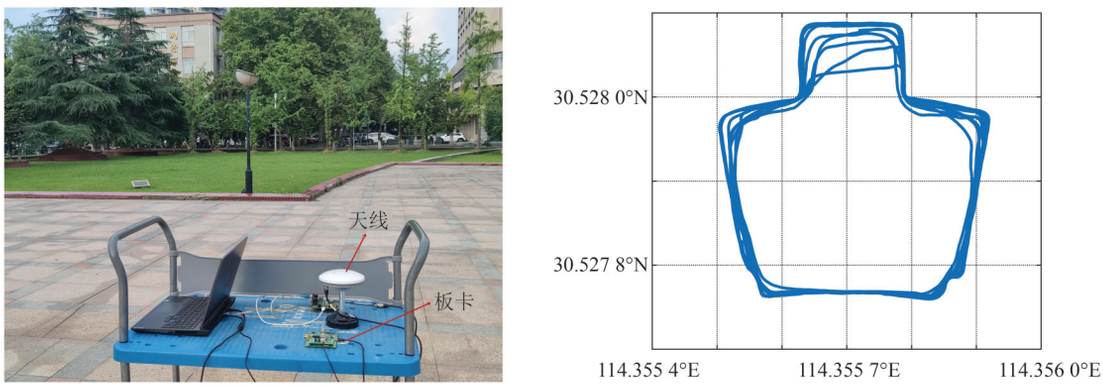
采用Septentrio PolaRx5接收机采集2024年1月9日至22日（DOY 9—22）星基播发的HAS信息，对13个MGEX测站进行静态和仿动态PPP解算；并于2024年6月6日（DOY 158）09:20至10:30（GPS时），利用Septentrio AsteRx-m3板卡在武汉地区采集的真实动态数据，以GPS+Galileo+BDS三系统组合RTK解作为参考值评估HAS动态PPP精度，数据采集场景和RTK解算轨迹如图9所示。

以连续20个历元满足HAS预期的水平方向0.2 m和高程方向0.4 m指标作为判定收敛时间的条件，基于HASlib和RTKLIB二次开发程序进行GPS和Galileo双系统的PPP解算，解算策略如表2所示。

3.2　静态和仿动态定位性能评估

为直观了解HAS改正前后的PPP性能，选取DOY 9的mat1测站，分别利用BRDC、WUM精密产品（PREC）和HAS进行静态和仿动态PPP解算，E、N、U方向上的误差时间序列如图10所示，定位解算RMSE见表3。结果表明，HAS PPP的定位精度基本与WUM精密产品PPP相当，能够达到厘米级；相比未经改正的广播星历PPP，HAS PPP的定位精度和收敛速度显著提升，尤其是在仿动态模式下。

图11展示了13个测站DOY 9单天尺度下的HAS PPP误差时间序列。由图11可知，HAS



(a) 数据采集场景 (b) RTK轨迹

图9 动态数据采集场景和RTK轨迹

Fig. 9 Dynamic Data Collection Scenario and RTK Trajectory

表2 PPP解算策略

Table 2 PPP Solution Strategies

内容	处理策略
模式	PPP静态/动态
观测量	GPS(L1+L2)/ Galileo(E1+E5b)
截止高度角/(°)	7
电离层延迟	无电离层组合
天顶对流层延迟	映射函数采用NMF模型[33]
卫星轨道和钟差	经HAS改正后的广播星历卫星轨道、钟差
卫星相位中心偏差和相位中心变化	IGS_14模型(ANTEX文件)
接收机位中心偏差和相位中心变化	IGS_14模型(ANTEX文件)
天线相位缠绕	模型改正
地球固体潮	模型改正(ERP文件)
参数估计方式	扩展卡尔曼滤波
接收机钟差	白噪声估计
接收机坐标	静态:常量估计;动态:白噪声估计

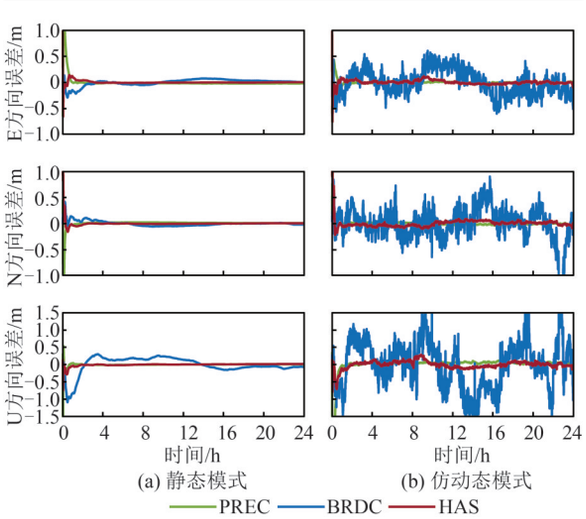


图10 3种模型的PPP误差时间序列

Fig. 10 Time Series of PPP Error for 3 Models

PPP在静态模式下收敛后误差基本能够保持在E和N方向0.1 m以内、U方向0.2 m以内;而在仿动态模式下定位精度略有降低,但仍能够满足E和N方向0.2 m以内、U方向0.4 m以内的定位误差,完全满足HAS的预期精度指标。

表3 3种模型的PPP RMSE/m

Table 3 PPP RMSE of 3 Models/m

模式	静态模式			仿动态模式		
	E	N	U	E	N	U
PREC	0.049	0.055	0.050	0.050	0.041	0.119
BRDC	0.064	0.052	0.238	0.232	0.317	0.682
HAS	0.041	0.059	0.041	0.051	0.080	0.111

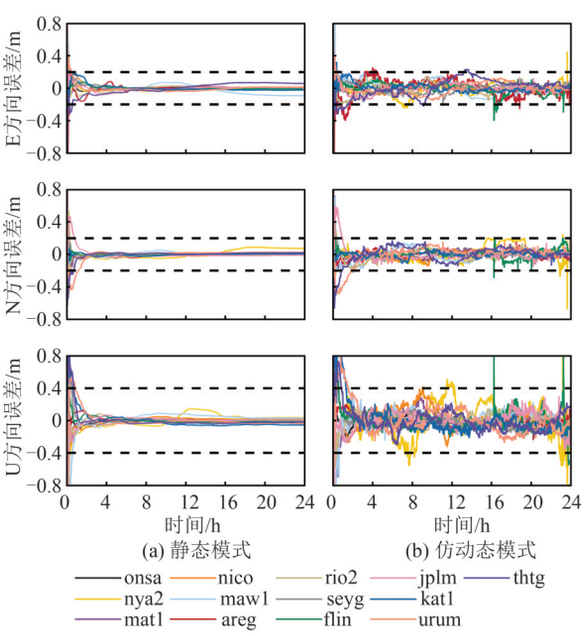


图11 HAS PPP 24 h误差时间序列

Fig. 11 Time Series of HAS PPP Error in 24 h

为评估初始定位精度,统计0时至2时(GPS时)2 h尺度的RMSE,如图12所示。根据测站位置以虚线划分3个区域,从左到右依次为:欧洲区域、欧洲以外的HAS定义服务区域,以及HAS边缘和排除区域。结果显示,位于HAS服务区域内

的maw1测站在U方向上的定位误差明显高于其他测站,这可能是由于该测站位于南极高纬度地区,高纬度地区的卫星分布情况较差、高度角较低,且对流层延迟和电离层闪烁现象频繁发生,导致测站的收敛速度较慢[34-35]。此外,HAS边缘和排除区域内测站的U方向误差明显高于其他地区,而这样的区域性特征在E和N方向并不显著。

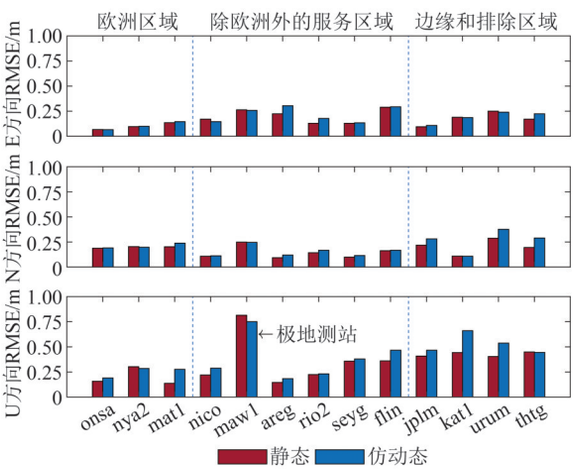


图12　2 h尺度HAS PPP解RMSE结果

Fig. 12　RMSE Results of HAS PPP in Initial 2 h

对13个测站DOY 9—22连续14 d的观测数据进行HAS PPP解算,静态和仿动态模式下在E、N、U方向上的平均RMSE如图13所示;平均收敛时间和可用卫星数如图14所示。由图13可以看出,HAS PPP在静态模式下的定位RMSE在E和N方向上均优于0.1 m,在U方向上优于0.2 m,定位精度较高且优于仿动态模式;仿动态模式下也能够达到E和N方向上优于0.15 m、U方向优于0.3 m的水平。其中,HAS服务范围内的nya2和maw1测站位于高纬度地区,定位性能相对较差,但也在很高的精度水平。即使是位于HAS服务边缘或以外的测站,整体也能够达到较高的定位精度。

由图14可知,可用卫星数基本与收敛速度成正比,欧洲区域的测站定位收敛时间明显小于其他区域,其中onsa测站和nya2测站在静态和仿动态模式下均能够满足HAS预期的300 s收敛指标,mat1受可见卫星数量的限制而收敛稍慢;在HAS边缘或排除区域,收敛速度明显更差,可用卫星数略低于其他区域,静态和仿动态模式的收敛时间分别为10～20 min和15～25 min。因此,收敛速度表现出两方面的特性:一方面,它体现了与HAS服务区域相关的地理分布特征;另一方面,它密切相关于可用卫星的数量。

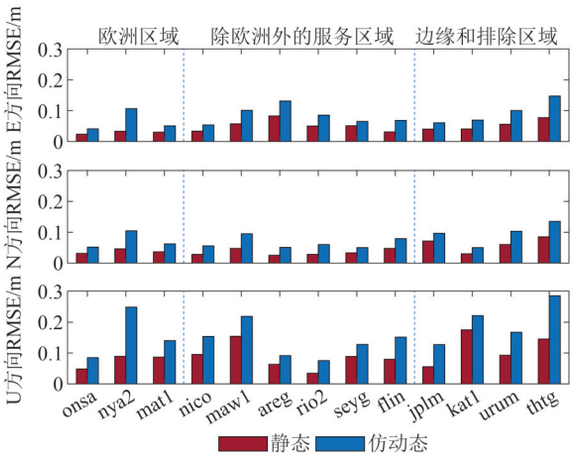


图13　HAS静态和仿动态PPP RMSE平均结果

Fig. 13　Average HAS PPP RMSE Results of Static and Simulated Kinematic Modes

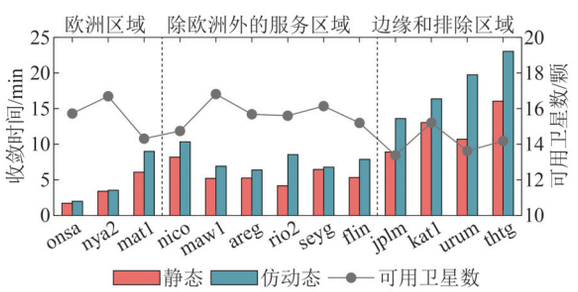


图14　HAS PPP收敛时间和可用卫星数

Fig. 14　HAS PPP Convergence Time and Number of Available Satellites

总体而言,HAS在全球范围内均具备实现较高定位精度的能力,但初始定位阶段的U方向误差和收敛速度在HAS排除区域劣势明显,受区域影响较大。

表4统计了13个测站14 d HAS PPP的总体定位误差和收敛时间。结果显示,在静态模式下,HAS PPP在E、N、U方向上的定位精度分别为0.044 m、0.041 m、0.089 m,仿动态模式下分别为0.078 m、0.072 m、0.154 m,表现远远优于HAS预期精度。HAS PPP在静态和仿动态模式下的平均收敛时间分别为6.548 min和9.264 min,尽管目前无法达到HAS预期的5 min指标,但已经相当接近。总体来看,HAS已经基本可以满足实时PPP的需求。

3.3　真实动态定位性能评估

动态场景下HAS PPP结果与RTK结果,以初始历元解算出的位置作为参考坐标,绘制运动过程中相对于初始点的定位偏差,如图15所示。图16展示了HAS PPP的可用卫星数量和空间位置精度因子(position dilution of precision, PDOP)

表4 HAS PPP总体定位结果

Table 4 HAS PPP Overall Positioning Results

定位模式	定位精度/m			收敛时间/min
	E	N	U	
静态模式	0.044	0.041	0.089	6.548
仿动态模式	0.078	0.072	0.154	9.264

的时间序列。在定位的初始阶段(约500 s内),GPS和Galileo双系统的可用卫星数量相对较少,仅为4～6颗,随后逐步增加到8～10颗,平均可用卫星数量为8.92颗。PDOP值在定位初期数值较大,但随着可用卫星数的逐步增多,多PDOP值呈波动递减趋势,卫星几何构型越来越好,其平均值为1.80。总体而言,虽然能够基本满足PPP对卫星数量和PDOP值的要求,但从改进服务质量的角度来看,仍有提升的空间。HAS PPP在定位初期由于未收敛,与RTK参考值存在较大偏差;HAS PPP需要大约1 500 s才能收敛,这可能与数据采集期间可用卫星数和PDOP情况以及区域位于HAS排除区域内有关,但定位收敛后与RTK参考解的偏差很小,精度较高。

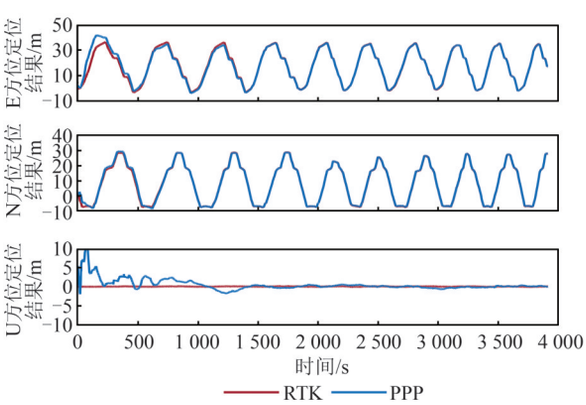


图15 动态环境下HAS PPP与RTK定位结果

Fig. 15 HAS PPP and RTK Positioning Results in Kinematic Environment

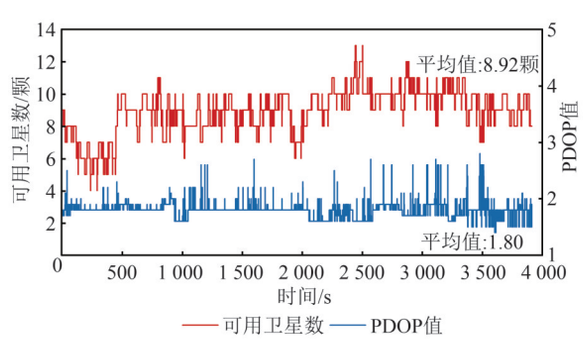


图16 动态环境下HAS PPP可用卫星数与PDOP时间序列

Fig. 16 HAS PPP Number of Available Satellites and PDOP Time Series in Kinematic Environment

对HAS PPP与RTK的E、N、U方向定位结果进行差分处理,得到HAS PPP的定位误差,结果见图17。可以看出,HAS PPP的收敛时间为1 492 s,收敛后E、N、U方向的RMSE分别为0.178 m、0.128 m和0.317 m,可以满足HAS要求的定位精度指标。

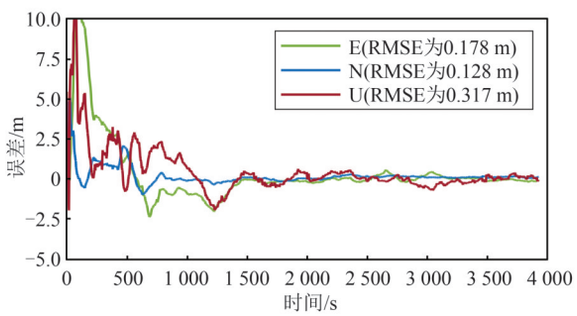


图17 动态环境下HAS PPP与RTK定位互差结果

Fig. 17 Differential Results of HAS PPP and RTK Positioning Results in Kinematic Environment

当前地区位于HAS的排除区域,初始定位阶段的误差较大且收敛速度并不快,但HAS PPP收敛后的精度已达到HAS预期,基本可以满足分米级精密定位的需求。未来,HAS的第二阶段计划将在全球范围内增设更多的GSS参考站点,以填补现阶段在亚太地区的覆盖空缺,届时当前区域的卫星覆盖深度将有所提升[3],HAS PPP精度和收敛速度也将得到进一步的改善。

4 结 语

本文利用2024年DOY 9—22采集的Galileo HAS数据,分析了HAS的服务可用性,并对比WUM事后精密产品,全面评估了HAS的卫星轨道和钟差改正数,选取全球范围内均匀分布的13个MGEX测站进行HAS静态和仿动态PPP性能评估。同时,于2024年DOY 158在武汉地区进行了HAS真实动态PPP实验。结果表明:

1)服务可用性方面,GPS卫星的可用卫星数更多,但Galileo卫星的数据连续性更优;Galileo所有卫星的可用率均高达97%以上,而GPS的可用率略差,但也可保证所有卫星均在78%以上,GPS和Galileo卫星的轨钟改正数平均可用率分别为94.4%和98.9%。

2)轨道和钟差改正数精度方面,Galileo卫星轨道在径向、切向、法向的RMSE分别为0.041 m、0.070 m、0.069 m,GPS卫星分别为0.036 m、0.085 m、0.067 m,均能达到较高的厘米级精度;Galileo卫星和GPS卫星的轨道1D

RMSE分别为0.062 m和0.066 m,钟差STD分别为0.14 ns和0.23 ns,Galileo的轨道和钟差产品精度略优于GPS,两者均可达到较高的精度水平。

3)静态和仿动态PPP方面,在静态模式下,HAS PPP的定位误差在E、N、U方向上分别为0.044 m、0.041 m、0.089 m,而在仿动态模式下分别为0.078 m、0.072 m、0.154 m,可达到静态厘米级、仿动态水平方向厘米级和高程方向1~2 dm的定位精度,显著优于HAS预期精度目标;静态和仿动态模式下的平均收敛时间分别为6.548 min和9.264 min,测站位置分布对初始定位阶段的U方向误差和收敛速度影响较大,目前无法在全球范围内满足HAS预期的5 min指标。

4)真实动态PPP方面,HAS PPP收敛后的E、N、U方向上的RMSE分别为0.178 m、0.128 m、0.317 m,能够实现1~4 dm定位精度,满足HAS的预期精度要求。

参 考 文 献

[1] GNSS Supervisory Authority. Galileo High Accuracy Service: Service Definition Document (HAS SDD) :Issue 1.0,January 2023[EB/OL].(2023-01-10)[2024-05-10]. https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-HAS-SDD_v1.0.pdf.

[2] 季锐,刘长建,王敏,等. Galileo高精度定位服务初始服务性能评估[J]. 大地测量与地球动力学,2024,44(1):21-26.
JI Rui, LIU Changjian, WANG Min, et al. Performance Evaluation of the Initial Service of Galileo High Accuracy Service[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2024, 44(1): 21-26.

[3] FERNANDEZ-HERNANDEZ I, CHAMORRO-MORENO A, CANCELA-DIAZ S, et al. Galileo High Accuracy Service: Initial Definition and Performance[J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(3): 65.

[4] NACIRI N, YI D, BISNATH S, et al. Assessment of Galileo High Accuracy Service (HAS) Test Signals and Preliminary Positioning Performance [J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(2): 73.

[5] HADAS T, KAZMIERSKI K, KUDŁACIK I, et al. Galileo High Accuracy Service in Real-Time PNT, Geoscience and Monitoring Applications[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2024, 21: 8000905.

[6] SENNI T, FERNANDEZ-HERNANDEZ I, CANCELA S. Evaluation of the Hungarian Algorithm for Optimal Transmission of the Galileo HAS Message from Multiple Satellites[C]//International Conference on Localization and GNSS, Tampere, Finland, 2022.

[7] TIMOTE C C, JUAN J M, SANZ J, et al. Ionospheric Corrections Tailored to Galileo HAS: Validation with Single-Epoch Navigation[J]. *GPS Solutions*, 2024, 28(2): 93.

[8] CHAMORRO A, ROCAMORA J, CANCELA S, et al. Achieving Sub-Decimeter Accuracy with the Galileo High Accuracy Service: Results from GMV's HAS Positioning Engine[J]. *Engineering Proceedings*, 2023, 54(1): 10.

[9] MARTINI I, SUSI M, CUCCHI L, et al. Galileo High Accuracy Service Performance and Anomaly Mitigation Capabilities[J]. *GPS Solutions*, 2023, 28(1): 25.

[10] PINTOR P, LOPEZ-MARTINEZ M, GONZALEZ E, et al. Testing Galileo High-Accuracy Service (HAS) in Marine Operations[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(12): 2375.

[11] MAO F Y, LOU Y D, GENG C J, et al. Evaluation of Timing and Time Transfer with PPP Using Galileo High Accuracy Service[J]. *Measurement*, 2024, 226: 114152.

[12] 丁尧,方荣新,陈国,等. Galileo高精度定位服务的空间信号误差及精密单点定位评估[J]. 全球定位系统,2024,49(3):1-9.
DING Yao, FANG Rongxin, CHEN Guo, et al. Spatial Signal Error and Precise Point Positioning Evaluation of Galileo High Accuracy Service[J]. *GNSS World of China*, 2024, 49(3): 1-9.

[13] ZHOU P Y, XIAO G R, DU L. Initial Performance Assessment of Galileo High Accuracy Service with Software-Defined Receiver[J]. *GPS Solutions*, 2023, 28(1): 2.

[14] HAUSCHILD A, MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, et al. Orbit Determination of Sentinel-6A Using the Galileo High Accuracy Service Test Signal[J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(4): 120.

[15] DE BLAS F J, VÁZQUEZ J, HERNÁNDEZ C, et al. The Galileo High Accuracy Service (HAS): A Pioneer Free-of-Charge Global Precise Positioning Service[C]//The 36th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Denver, Colorado, USA, 2023.

[16] FERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ I, SENNI T, BORIO D, et al. High-Parity Vertical Reed-Solomon Codes for Long GNSS High-Accuracy Messages [J]. *Navigation*, 2020, 67(2): 365-378.

[17] FERNANDEZ-HERNANDEZ I, HIROKAWA

R, RIJMEN V, et al. PPP/PPP-RTK Message Authentication[C]//The 34th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Online, 2021.

[18] WÜBBENA G, SCHMITZ M, BAGGE A. Real-Time GNSS Data Transmission Standard RTCM 3.0[C]//IGS workshop, Darmstadt, Germany, 2006.

[19] HIROKAWA R, FERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ I. Open Format Specifications for PPP/PPP-RTK Services: Overview and Interoperability Assessment [C]//The 33rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Online, 2020.

[20] 苏春阳, 舒宝, 郑蕾, 等. GPS/BDS实时SSR产品质量评估及其PPP性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(4): 714-726.
SU Chunyang, SHU Bao, ZHENG Lei, et al. Quality Evaluation and PPP Performance Analysis of GPS/BDS Real-Time SSR Products[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(4): 714-726.

[21] VANA S, AGGREY J, BISNATH S, et al. Analysis of GNSS Correction Data Standards for the Automotive Market[J]. *Navigation*, 2019, 66(3): 577-592.

[22] SARWATE D V, SHANBHAG N R. High-Speed Architectures for Reed-Solomon Decoders [J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems*, 2001, 9(5): 641-655.

[23] BORIO D, SUSI M, GIOIA C. GHASP: A Galileo HAS Parser[J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(4): 197.

[24] HORST O, KIRKKO-JAAKKOLA M, MALKAMÄKI T, et al. HASlib: An Open-Source Decoder for the Galileo High Accuracy Service[C]//The 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Denver, Colorado, USA, 2022.

[25] PROL F S, KIRKKO-JAAKKOLA M, HORST O, et al. Enabling the Galileo High Accuracy Service with Open-Source Software: Integration of HASlib and RTKLIB[J]. *GPS Solutions*, 2024, 28(2): 71.

[26] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, HAUSCHILD A. Broadcast Versus Precise Ephemerides: A Multi-GNSS Perspective[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(2): 321-333.

[27] 李宗义, 汪亮, 王宁波, 等. CAS实时轨道和钟差产品的性能评估及完好性支持信息估计[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(9): 1825-1837.
LI Zongyi, WANG Liang, WANG Ningbo, et al. Performance Assessment and Integrity Support Information Estimation of CAS Real-Time Orbits and Clocks Products[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(9): 1825-1837.

[28] 王天润, 袁德宝, 李允钊, 等. 不同IGS分析中心BDS-3实时精密轨道和钟差产品精度评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2024, 44(5): 461-467.
WANG Tianrun, YUAN Debao, LI Yunzhao, et al. Evaluation of Real-Time Precise Orbit and Clock Products for BDS-3 from Different IGS Analysis Centers[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2024, 44(5): 461-467.

[29] ZHANG R Z, TU R, LU X C, et al. Initial and Comprehensive Analysis of PPP Time Transfer Based on Galileo High Accuracy Service[J]. *GPS Solutions*, 2024, 28(2): 94.

[30] 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.
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.

[31] CARLIN L, HAUSCHILD A, MONTENBRUCK O. Precise Point Positioning with GPS and Galileo Broadcast Ephemerides[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(2): 77.

[32] 杨宇飞, 杨元喜, 徐君毅, 等. 低轨卫星对导航卫星星座轨道测定的增强作用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(1): 46-52.
YANG Yufei, YANG Yuanxi, XU Junyi, et al. Navigation Satellites Orbit Determination with the Enhancement of Low Earth Orbit Satellites[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1): 46-52.

[33] NIELL A E. Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, 101(B2): 3227-3246.

[34] 麻智鑫. 高纬度地区GNSS多系统定位性能对比分析[J]. 矿山测量, 2021, 49(4): 88-92.
MA Zhixin. Comparative Analysis of GNSS Multi-System Positioning Performance in High Latitude Areas[J]. *Mine Surveying*, 2021, 49(4): 88-92.

[35] 杨元喜, 徐君毅. 北斗在极区导航定位性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(1): 15-20.
YANG Yuanxi, XU Junyi. Navigation Performance of BeiDou in Polar Area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(1): 15-20.