

引用格式: 彭华东, 乔书波, 杨显赐. GPS/Galileo/BDS-3 广播星历精度分析[J]. 时间频率学报, 2024, 47(1): 62-71.

GPS/Galileo/BDS-3 广播星历精度分析

彭华东, 乔书波, 杨显赐

信息工程大学, 郑州 450001

摘要: 为了分析当前 GPS (Global Positioning System)、Galileo (Galileo Navigation Satellite System) 和 BDS-3 (Beidou Navigation Satellite System with Global Coverage) 广播星历的精度, 详细分析研究了各种偏差改正及消除方法, 并尽可能地消除了系统误差和粗差对评估结果的影响。选取 2021-11-01/12-31 共 61 天 MGEX (multi-GNSS experiment) 发布的多系统混合广播星历与武汉大学分析中心发布的事后精密星历数据进行实验, 对 GPS、Galileo 和 BDS-3 近期广播星历精度进行对比分析, 实验结果表明: 3 个系统广播星历整体精度由高到低依次是 Galileo、BDS-3 和 GPS, 其空间信号测距误差的 RMS (root mean square) 分别优于 0.17、0.25 和 0.37 m, 整体轨道精度的 RMS 分别优于 0.17、0.12 和 0.25 m, BDS-3 广播星历的轨道精度最高, 钟差误差的 RMS 分别优于 0.15、0.23 和 0.27 m, Galileo 广播星历的钟差精度最高。对于 GPS 卫星的广播星历, block IIIA 卫星钟差和轨道精度均优于其他 GPS 类型卫星。

关键词: 全球定位系统; 伽利略卫星导航系统; 北斗三号卫星导航系统; 广播星历; 轨道精度; 钟差精度

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2024-01-0062-10

Accuracy analysis of GPS/Galileo/BDS-3 broadcast ephemeris

PENG Hua-dong, QIAO Shu-bo, YANG Xian-ci

Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: To analyze the accuracy of current Global Positioning System (GPS), Galileo Navigation Satellite System (Galileo) and Beidou Navigation Satellite System with Global Coverage (BDS-3) broadcast ephemeris, various error correction and elimination methods are analyzed in detail, and the influences of systematic errors and gross errors on evaluation results are eliminated as much as possible. The multi-system hybrid broadcast ephemeris released by multi-GNSS experiment (MGEX) from 2021-11-01 to 2021-12-31 and the precision ephemeris released by the Analysis Center of Wuhan University were used for the experiment. The precision of the recent broadcast ephemeris of GPS, Galileo and BDS-3 was compared and analyzed. The experimental results show that the Galileo ephemeris exhibits the highest accuracy, while those from BDS-3 and GPS provide the second and the third best results. The root mean square (RMS) of space signal ranging error is

better than 0.17, 0.25 and 0.37 m for Galileo, BDS-3 and GPS, respectively. Their RMS of 3D orbit accuracy is better than 0.17, 0.12 and 0.25 m, respectively, with the BDS-3 performing the best. The RMS of clock errors is better than 0.15, 0.23 and 0.27 m, respectively, with the best coming from Galileo. For the broadcast ephemeris of GPS satellites, the clock and orbit accuracy of block III A satellite is better than those of other GPS blocks.

Key words: Global Positioning System (GPS); Galileo Navigation Satellite System (Galileo); Beidou Navigation Satellite System with Global Coverage (BDS-3); broadcast ephemeris; orbit accuracy; clock offset accuracy

当前全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 被广泛应用于导航与定位相关服务。实时的定位与导航服务在社会生产生活中应用更为广泛。广播星历由于可实时获取而被普遍应用于导航、定位领域, 随着各卫星导航系统广播星历精度的不断提升, 基于广播星历实现精密定位也将成为可能^[1]。而可靠的卫星星历则是 GNSS 提供导航定位服务的前提, 其轨道和钟差的精度将直接影响导航与定位的精度、可靠性和稳定性。因此, 对广播星历进行精度评估具有重要的现实需求。有学者先后对 GNSS 的广播星历进行了评估, 张熙对全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 广播星历长期质量进行了分析, 研究表明 GPS 广播星历精度在逐年提高, 2019 年 GPS 广播星历轨道精度优于 0.3 m, 空间信号误差的 RMS (root mean square) 优于 0.6 m^[2]。P. Steigenberger 和 O. Montenbruck^[3]评估了伽利略卫星导航系统 (Galileo Navigation Satellite System, Galileo) 广播星历精度及对定位精度的影响, 结果表明, 2015—2016 年 Galileo 广播星历的空间信号测距误差 (signal in space ranging error, SISRE) 精度优于 0.3 m。随着 BDS 的发展, 有学者^[4-8]对 BDS (Beidou Navigation Satellite System) 广播星历质量进行了分析, 研究表明, 北斗三号 (Beidou Navigation Satellite System with Global Coverage, BDS-3) 广播星历精度优于北斗二号 [Beidou Navigation Satellite (regional) System, BDS-2], BDS-3 的 IGSO (inclined geosynchronous orbit) 和 GEO (geosynchronous orbit) 卫星的空间信号测距误差可分别达到 0.4、0.3 m^[7]。刘路^[9]利用 2014—2018 共 5 年的数据对 GNSS 多个系统的广播星历长期精度进行了对比分析。以上对 GNSS 广播星历的质量分析多是集中于单系统, 或是实验数据的选取时间距今过久。而 GPS、

Galileo 与 BDS 卫星导航系统在不断发展, 随着 BDS-3 的全球组网完成, Galileo 星座的卫星数量已经达到了 24 颗, GPS 也加紧三代卫星的发射, 到目前为止, GPS 已经发射了 5 颗 block III A 卫星。随着各系统的不断发展与完善, 其卫星广播星历轨道与钟差的精度需要进行评估。本文将对 GPS、Galileo 与 BDS-3 的广播星历进行精度评估。

广播星历精度评估主要采用与精密星历、精密钟差对比的方法, 由于精密星历与精密钟差的精度比广播星历至少高 1 个量级^[10], 因此可将卫星的精密星历与精密钟差作为参考值, 实现广播星历精度评估。在使用精密星历与广播星历对比评估时, 由于两种星历产生方法、卫星的参考点、时间的基准与尺度均不同, 需要对两种星历进行相应的系统误差改正。本文在对各种系统误差整改的基础上, 评估 GPS、Galileo 和 BDS-3 的广播星历的轨道误差、钟差以及空间信号测距误差的精度。

1 数据处理与精度评估指标

1.1 数据

1) 数据来源

实验数据采用多模 GNSS 实验 (multi-GNSS experiment, MGEX) 发布的多系统混合广播星历与武汉大学 (WUM) 分析中心发布的 15 min 事后精密星历。选择 2021 年 11 月 1 日至 2021 年 12 月 31 日 (年积日第 305~365 天, 北京时间) 共 61 天的数据进行实验。WUM 发布的精密星历产品, 每隔 15 min 提供一组卫星质心在 IGB08 参考框架下的三维坐标和一组 GPST (GPS Time) 基准下的钟差。武汉大学分析中心发布的精密轨道与钟差的精度和其他 MEGX 分析中心相当^[11]。在评估广播星历轨

道和钟差精度过程中,武汉大学分析中心发布的精密星历可作为真值。

2) 粗差处理

首先对于非健康状态的卫星,剔除该卫星的广播星历数据,以避免不健康卫星星历对精度评估产生影响。由于精密星历、精密钟差和广播星历可能会存在质量问题,因此会产生较大的粗差,为了排除粗差对卫星星历和钟差精度评估的影响,选择 10 m 作为卫星各个轨道方向和钟差的限差^[12]。

1.2 系统性偏差的处理方法

1) 参考框架

不同卫星导航系统的参考框架不同,它们之间也存在微小的差别,GPS、Galileo、BDS 的广播星历分别使用 WGS-84、GTRF、BDCS 参考框架,与精密星历参考框架间互差最大为厘米级^[12],因此在评估广播星历精度时不再考虑参考框架不同带来的影响。

2) 天线相位中心改正

卫星广播星历给出的是卫星天线相位中心的位置,而 WUM 精密星历的参考点是卫星的质心,因此,在星历对比时需要将广播星历的天线相位中心改正到卫星质心。天线相位中心改正包括天线相位中心偏差(phase center offset, PCO)和相位中心变化(phase center variation, PCV),由于天线 PCV 的大小相比于广播星历误差很小,天线 PCO 的改正量级与广播星历轨道误差相当,因此本文忽略 PCV 的影响,仅考虑天线的 PCO 改正^[13]。BDS 官方在 2019 年 12 月 30 日发布了北斗卫星有关参数的公告(http://www.beidou.gov.cn/yw/gf/gg/201912/t20191209_19613.html),因此, BDS 卫星的 PCO 改正采用 BDS 官方发布的天线改正文件。其他系统采用 IGS(international GNSS service)发布的天线文件改正卫星的 PCO。

3) 卫星的 TGD 改正

当精密钟差与广播星历的钟差采用不同的频率解算时,钟差中所包含的卫星段硬件延迟不同,因此需要使用群延迟(time group delay, TGD)进行相应的改正。对于 GPS 和 Galileo,它们广播星历的钟差与精密钟差在解算时所用的频率相同,因此不

需要再对 GPS 和 Galileo 进行群延迟改正。BDS 的广播星历钟差参数基准为 B3I,而 WUM 分析中心发布的精密产品是基于 B1I 和 B3I 消电离层组合进行解算的^[14],因此,在广播星历钟差与精密钟差比较时,还应加入 TGD 改正,使其与精密星历消电离层组合基准一致。相应的 TGD 改正公式为^[5]

$$T_{\text{IF}} = T_3 - \frac{f_1^2 \cdot D_{13}}{f_1^2 - f_3^2} \quad (1)$$

式(1)中: T_{IF} 为 BDS 基于 B1I 和 B3I 双频消电离层组合求解的精密钟差, T_3 为 BDS 以 B3I 为基准的广播星历计算的钟差, f_1 、 f_3 分别为 B1I 和 B3I 的频率, D_{13} 为 B1I 和 B3I 之间的群延迟。

4) 时间系统统一

WUM 提供的精密星历与钟差产品时间基准都是 GPST,而广播星历的时间是参考各个导航系统的时间基准, GPS、Galileo、BDS 分别参考 GPST、GST (Galileo System Time)、BDT (BDS Navigation Satellite System Time),因此,通过广播星历计算卫星位置与钟差时,需要先统一到 GPST。其转换关系为^[9]

$$\begin{cases} T_{\text{GPST}} = T_{\text{GST}} + T_{\text{GGTO}} \\ T_{\text{GPST}} = T_{\text{BDST}} + 14 \text{ s} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, T_{GGTO} (GPS-Galileo time offset) 为 GPST 与 GST 之间的时间偏差。

不同卫星导航系统除时间基准不同之外,它们之间时间尺度的实现也存在一定差异^[9],因此在以精密星历为参考值求取广播星历钟差的误差时,还需要考虑时间尺度不同带来的系统性偏差。该偏差通常大于广播星历的钟差精度,且对同一系统的所有卫星产生相同的影响,其大小会随历元的变化而变化^[12]。因此,本文使用二次作差法^[12,15]得到该系统偏差,并对钟差误差加以改正,该系统偏差改正如式(3)所示。

$$\begin{cases} T^i = T_b^i - T_p^i - \Delta t \\ \Delta t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_b^i - T_p^i) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: T_b^i 为第 i 颗卫星的广播星历计算的钟差, T_p^i 为第 i 颗卫星的精密钟差, n 为同一卫星导

航系统同一历元下的可用卫星数量, Δt 为整个系统同一历元下广播星历计算的钟差与精密钟差的差值的均值, 即系统偏差。

由于 BDS-3 计算钟差误差时, 对广播星历钟差进行 TGD 改正, 因此, TGD 的精度对钟差评估会有一定的影响。此外, 3 个系统内每颗卫星仍然包含一个均值偏差^[16]。为了消除这些偏差对钟差评估的影响, 采用单颗星一日内广播星历与精密星历钟差之差的均值为基准, 不同历元的钟差与该均值作差, 以此来消除该星钟差的系统性偏差^[10]。

1.3 精度评估指标

广播星历的精度评估一般是对卫星的轨道误差和钟差误差进行评估, 同时还要评估卫星轨道与钟差的综合影响。评估卫星的轨道误差时, 需要评估卫星在径向 (radial)、切向 (along-track)、法向 (cross-track) 上的轨道误差及其统计特性。评估卫星钟差误差时, 通过广播星历计算的钟差与精密钟差作差得到卫星钟差的误差。利用空间信号测距误差 (signal in space ranging error, SISRE) 来衡量轨道误差与钟差对测距的综合影响, 计算公式如下:

$$E_{\text{SISRE}} = \sqrt{(\omega_R R - T)^2 + (A^2 + C^2)\omega_{A,C}^2} \quad (4)$$

式 (4) 中: R 、 A 、 C 为卫星在径向、切向和法向方向的轨道误差, T 为单位为 m 的卫星钟差, ω_R 和 $\omega_{A,C}$ 为权因子, 卫星高度不同其权因子不同, GPS、Galileo 和 BDS 各类卫星的权因子如表 1 所示。

表 1 GPS、Galileo 和 BDS 各类卫星的权因子

系统	ω_R	$\omega_{A,C}^2$
GPS	0.98	1/49
Galileo	0.98	1/61
BDS (MEO)	0.98	1/54
BDS (IGSO, GEO)	0.99	1/126

若不考虑钟差, 仅考虑轨道误差对测距的影响, 也可得到整体轨道误差对测距精度影响 (称整体轨道精度) 的公式:

$$O_{\text{SISRE}} = \sqrt{(\omega_R R)^2 + (A^2 + C^2)\omega_{A,C}^2} \quad (5)$$

对各方向轨道误差和钟差求取均值、均方根 (root mean square, RMS) 和均方根误差 (root mean squared error, RMSE), 对 O_{SISRE} 和 SISRE 求取均方根, 可得到其相应指标统计特性。

本实验期间各系统未发生卫星的更替, GPS、Galileo、BDS-3 的卫星及其钟的类型如表 2 所示。

表 2 各系统卫星及钟的类型

卫星系统	卫星类型	钟类型	PRN
GPS	Ⅱ R	Rb	G13、G16、G20、G21、G28、G02、G19、G22
	Ⅱ R-M	Rb	G05、G07、G12、G15、G17、G29、G31
	Ⅱ F	Rb	G01、G03、G06、G09、G10、G25~G27、G30、G32
		Cs	G08、G24
	Ⅲ A	Rb	G04、G11、G14、G18、G23
Galileo	IOV	Rb	E11
		H	E12、E19
	FOC	H	E01~E05、E07~E09、E13~E15、E18、E21、E24~E27、E30、E31、E33、E36
BDS-3	MEO	Rb	C19~C24、C32、C33、C36、C37、C45、C46
		H	C25~C30、C34、C35、C41~C44
	IGSO	H	C38~C40

2 实验分析

本文采用的 WUM 精密星历与钟差的时间间隔为 15 min, 为了减少精密星历与钟差因内插而带来的精度损失, 将不对精密星历与钟差进行内插, 直接采用精密星历与钟差的历元为基准。对广播星历每 15 min 计算一个卫星位置和钟差。

2.1 不同系统广播星历精度分析

首先, 为了分析各系统广播星历轨道和钟差的精度, 利用两个月的实验数据, 计算出每个历元广播星历的轨道误差与钟差误差, 并统计了广播星历各方向轨道误差、钟差误差、整体轨道精度和 SISRE 的均方根。其中, GPS 卫星中 PRN 编号为 G11、G28 两颗卫星处于非健康状态, block III A 卫星的轨道误差含有系统误差, 未计入统计范围; Galileo 卫星中 PRN 编号为 E14、E18 两颗卫星处于非健康状态, 未计入统计范围; BDS-3 未对 GEO 卫星的广播星历轨道与钟差进行分析。各系统广播星历轨道径向 (R)、切向 (A)、法向 (C) 误差的均方根、钟差 (CLK) 的均方根、轨道整体精度 (SISRE_o) 的均方根以及空间信号测距误差 (SISRE) 的均方根如图 1 所示。

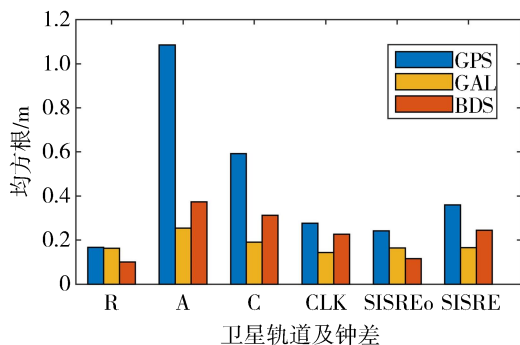


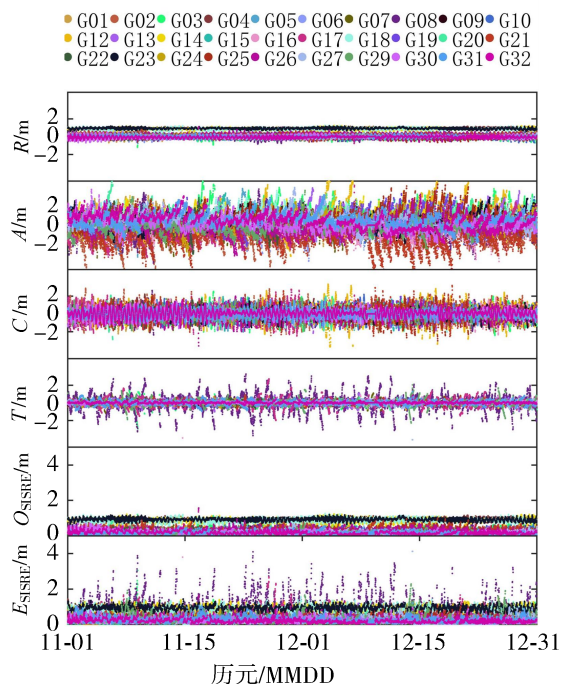
图1 各系统的轨道误差、钟差及 SISRE 的均方根

从图 1 可以看出, 就轨道误差而言, 3 个系统广播星历均表现出径向轨道精度优于切向、法向的轨道精度; 在径向方向上, BDS-3 的轨道精度优于 GPS 和 Galileo, 主要是由于采用了星间链路改进广播轨道性能^[17], GPS 和 Galileo 精度相当; 在切向和法向方向上, 各系统广播星历的轨道精度由高到低表现为 Galileo > BDS-3 > GPS; 在整体轨道精度方

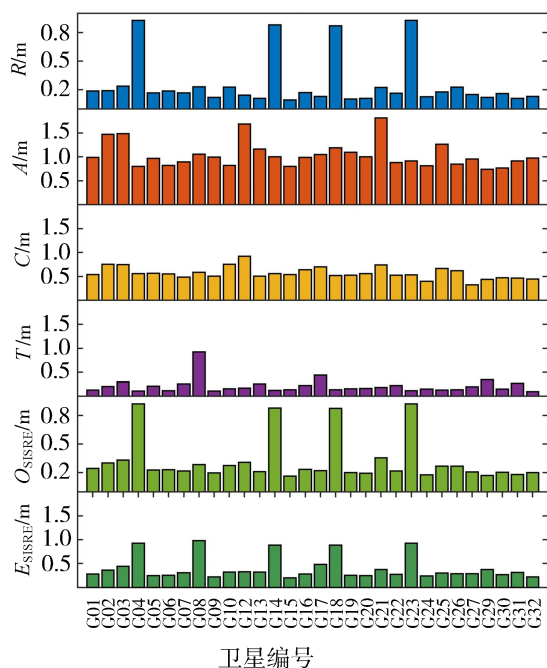
面, 轨道精度由高到低依次为 BDS-3、Galileo 和 GPS, 它们整体轨道精度的 RMS 分别优于 0.12、0.17 和 0.25 m。在钟差方面, Galileo 广播星历的钟差精度优于 GPS 与 BDS-3, Galileo 钟差误差的 RMS 优于 0.15 m, GPS 与 BDS-3 钟差误差的 RMS 分别优于 0.28 m、0.23 m。综合分析 3 个系统广播星历的轨道误差和钟差对测距的影响, GPS、Galileo 和 BDS-3 SISRE 的 RMS 分别优于 0.37、0.17 和 0.25 m。

2.2 各系统不同类型卫星广播星历精度分析

以上统计各项指标的 RMS 是对一个系统内所有可用卫星整体统计的结果, 表现出各系统的卫星轨道和钟差的总体精度。为了分析各系统内不同类型卫星的广播星历精度, 分别对不同类型卫星及每颗卫星的各项精度指标进行了统计。其中, GPS、Galileo 和 BDS-3 每颗卫星的轨道误差、钟差误差、SISRE_o 及 SISRE 随历元变化如图 2 至图 4 的 (a) 所示, 各系统内所有可用卫星的轨道误差、钟差误差、SISRE_o 及 SISRE 的 RMS 如图 2 至图 4 的 (b) 所示, 各系统不同类型卫星的精度指标如表 3 所示。结合图 2 至图 4 与表 3, 各系统内不同类型卫星的广播星历精度分析如下。

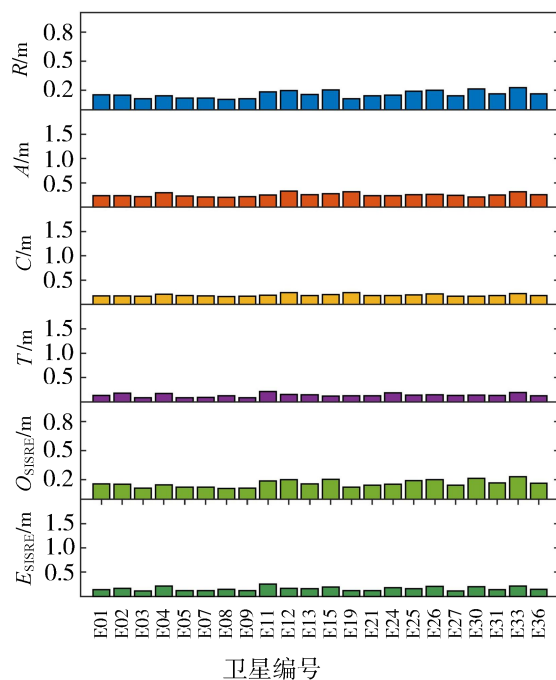


(a) 各卫星广播星历误差随历元变化



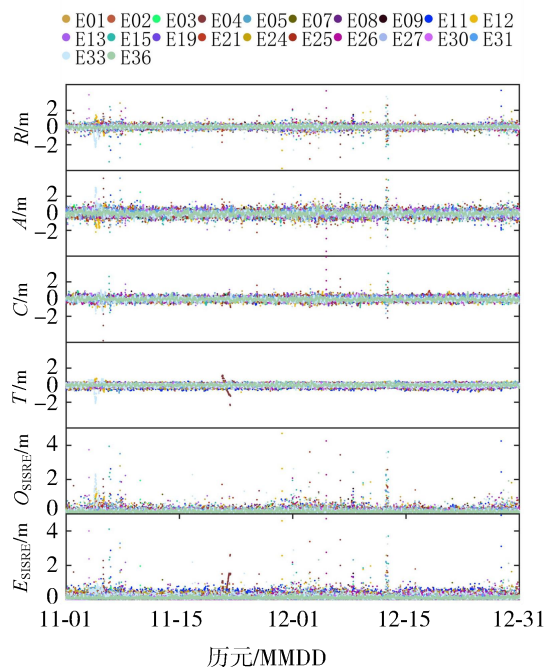
(b) 各 PRN 编号卫星广播星历误差的 RMS

图 2 GPS 广播星历与精密星历对比结果

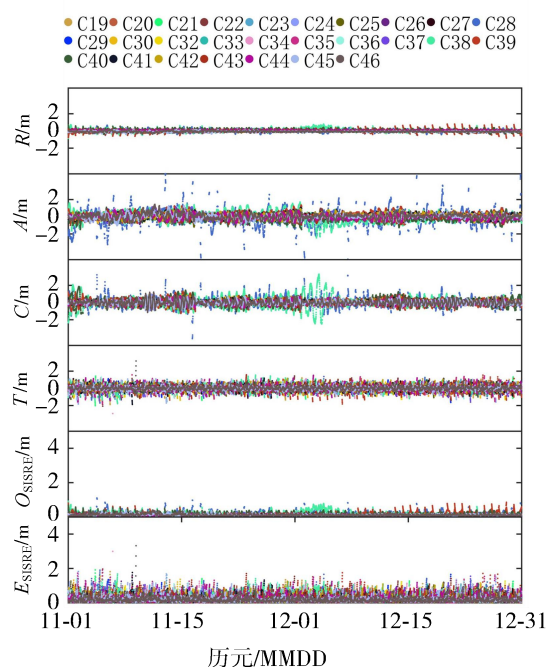


(b) 各 PRN 编号卫星广播星历误差的 RMS

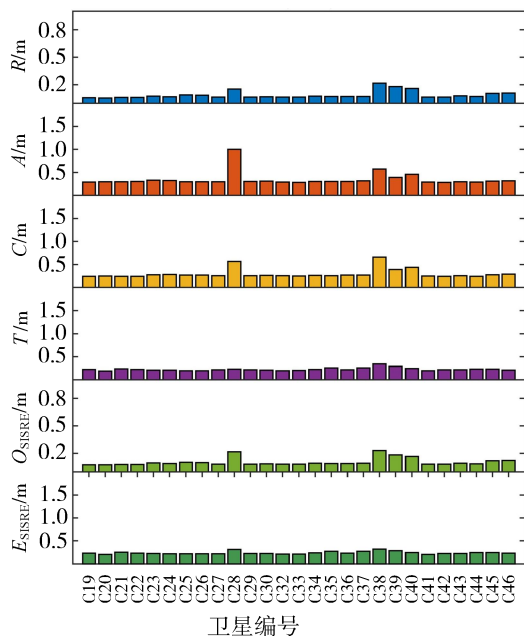
图 3 Galileo 广播星历与精密星历对比结果



(a) 各卫星广播星历误差随历元变化



(a) 各卫星广播星历误差随历元变化



(b) 各 PRN 编号卫星广播星历误差的 RMS

图 4 BDS-3 广播星历与精密星历对比结果

对于 GPS, 由图 2 (a) 可知, 轨道径向精度最高, 且数据较为稳定; 轨道切向误差波动较大, 精度较低; 钟差误差出现较多离散点, 该离散点主要与 G08 卫星钟差精度较低有关, 图 2 (b) 也同时印证了 G08 卫星钟差精度较低。轨道切向、轨道法向和钟差的误差均在 0 刻度上下波动, 说明没有明显的系统误差, 而径向误差存在一条在 1 刻度附近波动线, 由式 (4)、式 (5) 可知, 在 SISRE 和 SISRE₀ 值也会随之变化, 结合图 2 (b) 可知, 在 1 刻度附近波动的卫星为 G04、G14、G18、G23, 全为 GPS 新增的 block III A 卫星, 再结合表 3 可以发现, block III A 卫星的轨道和钟差的误差存在明显的系统误差, 此系统误差说明 IGS 提供 PCO 改正不适用于 block III A 卫星, 因此 GPS 系统的整体精度 (表 3 中 ALL 一行) 未统计 block III A 卫星。结合表 3 可知, 除去含有系统误差的 block III A 卫星外, GPS 各类型卫星的整体轨道误差的 RMS 大小相当, 均在 0.21~0.26 m 之间, 其中 block II R-M 整体轨道精度略好; 各类型卫星的钟差精度由高到低顺序为 block III A > block II F (Rb) > block II R > block II R-M > block II F (Cs), 其中 block III A 卫星钟差误差的 RMS 优于 0.12 m, 而 block II F (Cs) 卫星由于使用 Cs 钟, 使得钟差误差的 RMS 大于同型号 Rb 钟卫星, 其钟差误差的 RMS 约为 0.67 m, 其中两颗 block II F

(Cs) 卫星, 由图 5 可以看出 G24 卫星的钟差精度较好, 优于 G08 卫星; 对于各类型卫星的 SISRE, block II F (Cs) 由于钟差精度低, 导致其 SISRE 明显大于其他类型卫星, 约为 0.72 m, 其余类型卫星的 SISRE 在 0.29~0.40 m 之间, 其信号测距精度表现为 block II F (Rb) 优于 block II R 和 block II R-M。对于 block III A 卫星, 使用标准差 (STD) 衡量其轨道误差和钟差误差的精度, 由表 3 可以发现, 相比于其他型号卫星, block III A 卫星无论轨道误差还是钟差误差的精度都有所提高。

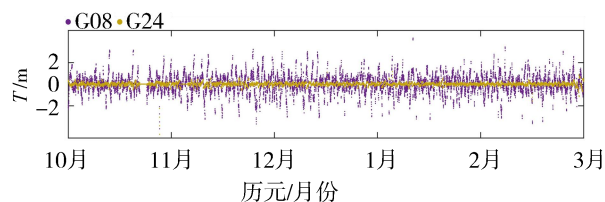


图 5 2021 年 10 至 2022 年 2 月 G08 和 G24 卫星钟差误差随历元变化

对于 Galileo, 由图 3 (a) 可以看出, 卫星各方向轨道误差和钟差误差均在 0 刻度附近波动, 没有明显的系统误差, 个别卫星在个别历元有粗差, 出现较多的离散点, 但不具有系统性。相比于 GPS, 其 3 个方向上的轨道误差及钟差误差较小, 精度更高。由图 2 (b) 可以看出 Galileo 各卫星广播星历的轨道误差和钟差误差没有显著差异、精度相当。结合表 3, Galileo 各类型卫星的整体轨道误差的 RMS 均优于 0.19 m, IOV 卫星的轨道精度略优于 FOC 卫星; 各类型卫星钟差误差的 RMS 均优于 0.22 m, 其中, 使用 H 钟的 IOV 卫星与 FOC 卫星钟差精度相当, 其钟差误差的 RMS 均优于 0.15 m, 使用 Rb 钟的 IOV 卫星钟差精度较低; 各类型卫星 SISRE 的 RMS 均优于 0.26 m。总体来说, 由于使用 Rb 钟的 IOV 卫星仅剩一颗 (E11), 因此对于 Galileo 整个系统, 钟差误差的 RMS 优于 0.15 m, 整体轨道误差的 RMS 优于 0.17 m, SISRE 的 RMS 优于 0.17 m。

对于 BDS-3, 由图 4 (a) 可知, BDS-3 卫星的轨道误差和钟差误差没有明显的系统误差, 轨道误差在径向上数据较为稳定, 径向轨道精度优于切向和法向; 在切向和法向上波动加大, 且有离散点, 该波动主要与 IGSO 卫星轨道误差有关, 离散点主要与 C28 卫星轨道误差有关, 由图 4 (b) 也可以明显看出这些卫星的轨道误差精度较差。

表 3 各系统不同类型卫星精度指标统计值

卫星系统	卫星类型	钟类型	R/m			A/m			C/m			T/m			SISRE ₀	SISRE
			均值	RMS	STD	均值	RMS	STD	均值	RMS	STD	均值	RMS	STD	RMS/m	RMS/m
GPS	Ⅱ R	Rb	0.050	0.159	0.147	-0.195	1.260	1.200	0.030	0.618	0.622	-0.000	0.200	0.200	0.254	0.308
	Ⅱ R-M	Rb	0.018	0.136	0.135	0.210	1.049	1.028	-0.026	0.608	0.608	-0.000	0.278	0.278	0.219	0.334
		Rb	-0.012	0.186	0.185	0.325	1.006	0.952	-0.013	0.577	0.577	0.001	0.157	0.157	0.246	0.294
	Ⅱ F	Cs	0.001	0.188	0.188	0.139	0.944	0.934	-0.054	0.499	0.497	0.000	0.664	0.664	0.239	0.717
		all	-0.010	0.186	0.186	0.293	0.996	0.952	-0.020	0.565	0.564	0.001	0.308	0.308	0.245	0.398
	Ⅲ A	Rb	0.894	0.901	0.107	0.576	0.985	0.799	-0.037	0.540	0.539	0.000	0.118	0.118	0.897	0.906
Galileo	ALL		0.013	0.167	0.166	0.144	1.084	1.075	-0.024	0.591	0.591	0.000	0.276	0.276	0.240	0.360
		Rb	0.033	0.186	0.183	-0.044	0.251	0.247	-0.038	0.185	0.182	0.000	0.211	0.211	0.187	0.253
	IOV	H	0.043	0.162	0.156	-0.040	0.324	0.322	0.019	0.238	0.238	0.000	0.140	0.140	0.167	0.148
		all	0.040	0.171	0.166	-0.041	0.302	0.299	-0.000	0.222	0.222	0.000	0.167	0.167	0.174	0.190
	FOC	H	0.067	0.161	0.146	-0.014	0.245	0.245	-0.002	0.184	0.184	0.000	0.139	0.139	0.162	0.161
	ALL		0.063	0.162	0.149	-0.017	0.253	0.253	-0.001	0.190	0.190	0.000	0.143	0.143	0.164	0.165
BDS-3		Rb	-0.037	0.077	0.067	0.037	0.303	0.301	0.006	0.262	0.262	0.000	0.215	0.215	0.093	0.234
	MEO	H	0.003	0.084	0.084	-0.044	0.404	0.402	-0.021	0.294	0.293	0.001	0.215	0.215	0.107	0.240
		all	-0.017	0.081	0.079	-0.003	0.357	0.357	-0.007	0.279	0.278	0.000	0.215	0.215	0.100	0.237
	IGSO	H	0.023	0.189	0.187	-0.061	0.477	0.473	0.030	0.507	0.506	-0.004	0.299	0.299	0.197	0.290
	ALL		-0.012	0.099	0.098	-0.010	0.372	0.372	-0.003	0.312	0.312	-0.000	0.226	0.226	0.115	0.244

图 6 绘制了 2021 年 10 月 1 日至 2022 年 2 月 28 日 C28 卫星轨道误差随历元变化, 由图 6 可知 C28 卫星轨道误差在 2021 年 11 月至 12 月两个月内波动较大, 在 2022 年 1 月开始趋于稳定。由图 4 (b) 可知, 3 颗 IGSO 卫星 (C37、C38、C39) 的轨道误差较大。结合表 3 可知, BDS-3 各类型卫星整体轨道误差的 RMS 均优于 0.2 m, MEO 轨道精度优于 IGSO; 各类型卫星钟差误差的 RMS 均优于 0.30 m, 其中, 使用 Rb 钟的 MEO 卫星钟差与使用 H 钟的 MEO 卫星精度相当, 且都优于使用 H 钟的 IGSO 卫星; 各类型卫星 SISRE 的 RMS 均优于 0.30 m, 其中, MEO 卫星 SISRE 的 RMS 小于 IGSO, 表明 MEO 卫星的广播星历整体精度优于 IGSO 卫星。

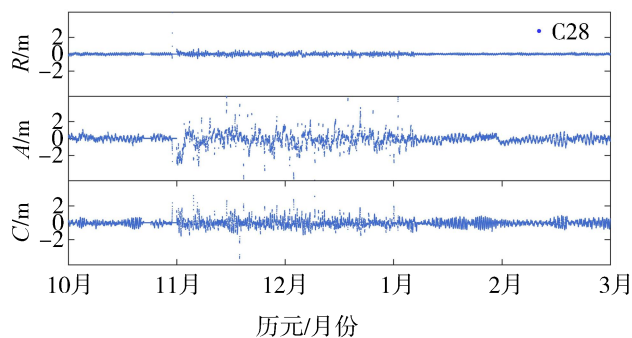


图 6 2021 年 10 月至 2022 年 2 月
C28 卫星轨道误差随历元变化

3 结论

本实验采用两个月的 GNSS 广播星历和精密星历, 对 GPS、Galileo 和 BDS-3 的广播星历精度进行了对比分析, 通过实验结果得到如下结论。

① 广播星历整体精度由高到低依次为 Galileo、BDS-3 和 GPS。其中, Galileo 的整体轨道精度和 SISRE 的 RMS 均优于 0.17 m, 钟差误差的 RMS 优于 0.15 m; BDS-3 的整体轨道精度在 3 个系统中最优, 其 RMS 优于 0.12 m, 钟差误差的 RMS 优于 0.23 m, SISRE 的 RMS 优于 0.25 m; GPS 整体轨道精度的 RMS 优于 0.25 m, 钟差误差的 RMS 优于 0.28 m, SISRE 的 RMS 优于 0.37 m。由于本文尽可能消除钟差中的系统误差, 并剔除了轨道误差中仍含有系统误差的卫星, 因此, 实验结果的精度更高, 更能真实反应出各系统广播星历轨道误差和钟差的精度。

② 对于单个系统内不同类型卫星的广播星历精度。首先, 实验发现 IGS 发布的天线文件不适用于 block III A 卫星的 PCO 改正, 因 block III A 卫星的 PCO 改正不准确, 在卫星轨道误差的径向方向仍然存在系统性误差。因此, 采用标准差对 GPS 各类型卫星轨道精度进行了分析, 结果表明新发射的 block III A 卫星广播星历精度优于其他类型卫星, 对于其他类型 GPS 卫星, 除了使用 Cs 钟的 block II F 广播星历精度较低外, 其他类型 GPS 二代卫星广播星历精度相当。对于 Galileo, 各类型卫星的广播星历精度表现为, 使用 H 钟的 IOV 卫星和 FOC 卫星精度相当, 且均优于使用 Rb 钟的 IOV 卫星。BDS-3 中 MEO 卫星的广播星历精度优于 IGSO 卫星。

参考文献:

- [1] CARLIN L, HAUSCHILD O, MONTENBRUCK O. Precise point positioning with GPS and Galileo broadcast ephemerides[J]. GPS Solutions, 2021, 2(25): 1-13.
- [2] 张熙, 刘长建, 章繁, 等. GPS 广播星历长期数据质量分析[J]. 测绘科学技术学报, 2020, 37(2): 144-148.
- [3] STEIGENBERGER P, MONTENBRUCK O. Galileo status: orbits, clocks, and positioning[J]. GPS Solutions, 2017, 21(2): 319-331.
- [4] 李送强, 赵兴旺, 胡豪杰, 等. BDS-3 广播星历轨道、钟差精度分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(3): 407-412.
- [5] 王海春, 贾小林, 李鼎, 等. 北斗三号卫星广播星历精度评估分析[J]. 导航定位学报, 2019, 7(4): 60-63.
- [6] 许焱, 刘智敏, 徐保朋, 等. 北斗卫星导航系统广播星历轨道精度分析[C] // 第十三届中国卫星导航年会, 北京: 第十三届中国卫星导航年会组委会, 2022.
- [7] 简濠骏, 王逸石, 张元泰, 等. 北斗卫星广播星历精度评估与单点定位优化模型[J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(3): 291-297.
- [8] 刘伟平, 郝金明, 吕志伟, 等. 北斗三号空间信号测距误差评估与对比分析[J]. 测绘学报, 2020, 49(9): 1213-1221.
- [9] 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, 49(9): 1122-1132.

- [10] 张熙, 刘长建, 章繁, 等. 四大 GNSS 广播星历精度评估与对比分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(2): 208-218.
- [11] GUO J, XU X L, ZHAO Q L, et al. Precise orbit determination for quad-constellation satellites at Wuhan University: strategy, result validation, and comparison[J]. Journal of Geodesy, 2016, 2(90): 143-159.
- [12] MONTENBRUCK O, STEGENBERGER P, HAUSCHILD A. Broadcast versus precise ephemerides: a Multi-GNSS perspective[J]. GPS Solutions, 2015, 2(19): 321-333.
- [13] 刘星, 石明旺, 游扬声, 等. GPS/GLONASS/BDS 广播星历轨道误差分析[J]. 测绘科学, 2017, 42(11): 1-7+13.
- [14] ResearchGate. Hourly ultra-rapid and final WUM multi-GNSS including Beidou-3 precise orbit and clock released[EB/OL]. (2019-12-20)[2022-12-20]. <https://www.researchgate.net/project/Multi-GNSS-analysis-at-Wuhan-University-attitude-solar-radiation-pressure-phase-center-and-more>.
- [15] 曾琪, 吴多, 刘万科. 基于长期数据的北斗广播星历精度评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(11): 958-962.
- [16] LI X Y, GE M R, ZHANG H P, et al. The GFZ real-time GNSS precise positioning service system and its adaption for COMPASS[J]. Advances in Space Research, 2013, 51(6): 1008-1018.
- [17] 冯来平, 毛悦, 宋小勇, 等. 低轨卫星与星间链路增强的北斗卫星联合定轨精度分析[J]. 测绘学报, 2016, 45(S2): 109-115.