



四大GNSS广播星历精度评估与对比分析

张熙, 刘长建, 章繁, 吴庆, 胡小华

引用本文:

张熙, 刘长建, 章繁, 吴庆, 胡小华. 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.

ZHANG Xi, LIU Changjian, ZHANG Fan, WU Qing, HU Xiaohua. Accuracy Evaluation and Comparative Analysis of Four Major GNSS Broadcast Ephemeris[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(2): 208–218.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[SBAS星历改正数及UDRE参数生成算法分析](#)

Analysis of SBAS Ephemeris Correction and UDRE Generation Algorithm

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(1): 111–117 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190033>

[一种顾及IGS-RTS数据接收中断的厘米级星载GPS实时定轨方法](#)

A Centimeter-Level Real-Time Orbit Determination Method Using Space-Borne GPS Measurements Considering IGS-RTS Data Receiving Interruption

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(11): 1620–1626 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200432>

[长距离GPS/BDS双系统网络RTK方法](#)

A Network Real-Time Kinematic Method for GPS and BDS Double Systems Between Long Range

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(2): 252–261 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190352>

[BDS/QZSS及其组合系统在中国和日本及周边地区的定位性能评估](#)

Positioning Performance Evaluation of BDS/QZSS and Its Combined Systems in China, Japan and Their Peripheral Areas

武汉大学学报·信息科学版. 2020, 45(4): 574–585, 611 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180228>

[使用抛物面定向天线分析北斗三号星上伪距和载波测距偏差](#)

Analysis of Pseudorange and Carrier Ranging Deviation of BDS-3 Using Parabolic Directional Antenna

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(9): 1298–1308 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200182>



四大GNSS广播星历精度评估与对比分析

张 熙^{1,2} 刘长建² 章 繁² 吴 庆² 胡小华²

1 61363部队,陕西 西安,710000

2 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450000

摘 要:分析了目前广播星历精度评估中存在的问题,详细论述了广播星历精度评估过程中对精密星历进行天线相位中心改正的取值方法,提出了利用单颗星单日钟差均值作二次差对广播星历钟差的系统性偏差进行改正的方法。选取2019-09-01—2019-11-01共计62天的多模GNSS实验(multi-GNSS experiment, MGEX)混合广播星历和精密星历,对全球定位系统(global positioning system, GPS)、格洛纳斯(global navigation satellite system, GLONASS)、伽利略卫星导航系统(Galileo navigation satellite system, Galileo)、北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)进行多方面精度评估。结果表明,精度评估所选用的天线相位中心改正值以及消除广播星历钟差系统性偏差的方法均准确有效;从星座整体的轨道误差、钟差、空间信号测距差的均方根来看,4个系统广播星历精度由高到低依次为Galileo、GPS、BDS、GLONASS,随着各导航系统的完善,各系统广播星历精度必将进一步提高。

关键词:广播星历;精密星历;星历对比;精度评估

中图分类号:P228

文献标志码:A

2007年,联合国正式将美国的全球定位系统(global positioning system, GPS)、俄罗斯的格洛纳斯(global navigation satellite system, GLONASS)、欧盟的伽利略卫星导航系统(Galileo navigation satellite system, Galileo)、中国的北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)确定为四大全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)^[1]。其中, GPS是最早建成并具有完全运作能力的卫星定位系统,自1994年全面建成以来,逐步进行卫星的更新换代。2019年8月22日,美国又成功发射第二颗Block III卫星^[2],该型号卫星相比目前在轨运行的GPS卫星具有更大的信号发射功率、更强的抗干扰能力和更长的使用寿命;GLONASS经过现代化升级后于2011年第二次实现全球覆盖,俄罗斯目前仍陆续采用新一代GLONASS-M型卫星和研制中的GLONASS-K1型卫星替换旧型号卫星;Galileo于2016年正式提供服务,目前在轨卫星共26颗,其中4颗为在轨验证(in-orbit validation, IOV)卫星和22颗具备全面运行能力(full operational capability, FOC)卫星^[3],该系统目前仍在建设当中;

BDS是中国分三步实施建设的卫星定位系统,二期工程BDS-2于2012年建成,主要为亚太地区提供服务,2017年开始,三期工程BDS-3进入高密度组网阶段,2018年底, BDS已面向全球提供服务,并在2020年完成所有卫星的发射组网工作。

广播星历由于更新速度快、可实时获取的特点而应用广泛,对其精度进行准确评估具有重要的参考意义。目前,广播星历的精度评估主要采用与精密星历比较的方法,精密星历精度比广播星历高1~2个数量级,因此可将精密星历的卫星位置与钟差作为真值。然而在两种星历的位置和钟差比较方面,由于生成广播星历的地面控制中心和提供精密星历的分析中心算法不完全公开,广播星历精度评估方法面临如何选取精密星历卫星坐标天线相位中心改正值并尽可能消除广播星历钟差的系统性偏差等问题。本文在充分论证所用评估方法合理性的基础上,从卫星的轨道误差、钟差和空间信号测距误差(signal-in-space range error, SISRE)等方面对比分析四大导航系统广播星历的近期精度。

收稿日期:2020-12-27

项目资助:国家自然科学基金(41374041)。

第一作者:张熙,硕士,主要研究方向为GNSS数据处理理论与方法。18237860502@163.com

通讯作者:刘长建,博士,教授。chxyjcj@163.com

1 数据概况

1.1 各系统星座概况

为了评估各系统近期广播星历的精度,考虑到 Galileo 自 2019-07-12 全星座暂停向用户发播信号^[4],直至 2019-07-18 恢复正常^[5],所选时段需要满足各系统均正常播发信号的要求,因此,评估时段选定为 2019-09-01—2019-11-01,即年积日(day of year, DOY)第 244~305 天,共计 62 d。卫星系统的星座状态包括卫星发射时间、开始服役的时间、已服役时长、轨道类型、搭载卫星钟的种类等, GPS、GLONASS、Galileo、BDS 的星座状态均可以在 GPS World 的 THE ALMANAC 栏目中查得^[3],但是该网址不包含 BDS 搭载的卫星钟情况, BDS 详细星座状态可以在中国卫星导航办的官网上查得^[6]。需要说明的是,本文均采用伪随机码(pseudo-random noise, PRN)编号识别卫星,因为所选评估时段内各系统卫星对应的飞行器编号不变,不涉及到卫星型号的更替问题, PRN 编号前的大写字母 G、R、E、C 分别代表 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS。

1.2 数据来源

本文采用多模 GNSS 实验(multi-GNSS experiment, MGEX)发布的多系统混合广播星历(ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/campaign/mgex/daily/rinex3/2019/brdm/)与武汉大学(WUM)、中国科学院上海天文台(SHA)分析中心发布的 15 min 事后精密星历(ftp://igs.ign.fr/pub/igs/products/mgex/)进行星历比较,选用 WUM 的精密星历产品是因为只有 WUM 有较完整的 BDS-3 数据,考虑到 2019 年 DOY 299 的 WUM 精密星历文件缺失,故使用 SHA 的精密星历替代,该天 SHA 精密星历对于 BDS 仅提供 BDS-2 的数据。

对于所选用的精密星历产品, WUM 使用 IGB08 参考框架, SHA 使用 IGS08 参考框架,两者均每隔 15 min(900 s)提供一组各 PRN 编号的卫星质心在各自参考框架下以 km 为单位的三维坐标和以 μs 为单位的钟差。WUM 精密星历轨道与钟差的精度与稳定性和 MGEX 各分析中心持平,对于 BDS 的轨道精度,在地球同步轨道(geostationary orbit, GEO)、倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit, IGSO)、地球中轨(medium earth orbit, MEO)的精度分别达到分米级、分米级、厘米级^[7],钟差精度约为 0.1 ns^[8];而

SHA 精密星历在轨道与钟差精度上与国际 GNSS 服务组织(international GNSS service, IGS)各分析中心相当^[9]。在评估广播星历精度时,二者提供的坐标与钟差均可作为真值使用。

1.3 精度评估指标

为评估广播星历精度,需要考虑轨道误差、钟差以及二者的综合影响。在星固坐标系中,利用广播星历与精密星历得到的卫星位置在径向、法向、切向上的坐标差可得到轨道精度;利用广播星历计算得到的钟差与精密星历钟差之差 δd_c 可以衡量钟差精度;利用 SISRE 来衡量包含轨道误差和钟差影响的总体测距精度,计算式为:

$$\text{SISRE} = \sqrt{(\omega_R \cdot R - \delta d_c)^2 + (A^2 + C^2) \cdot \omega_{A,C}^2} \quad (1)$$

式中, R 、 A 、 C 分别为径向、法向、切向的坐标差; ω_R 、 $\omega_{A,C}^2$ 是权系数,不同卫星系统和轨道类型的卫星取值不同,详见表 1。

表 1 不同系统和轨道类型卫星 SISRE 系数表^[10]

Tab.1 SISRE Coefficients of Different Systems and Orbit Satellites^[10]

卫星系统(轨道类型)	ω_R	$\omega_{A,C}^2$
GPS	0.98	1/49
GLONASS	0.98	1/45
Galileo	0.98	1/61
BDS(GEO)	0.99	1/126
BDS(MEO)	0.98	1/54

若仅衡量整体轨道精度,可以不考虑钟差项,得到仅含卫星轨道误差的测距差 SISRE_o , 计算式为:

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

对上述指标求取均值和均方根(root mean square, RMS),可得到各项指标的统计特性。

2 精度评估时需要注意的问题

2.1 广播星历坐标与钟差的计算

在所选评估时段内, GPS、GLONASS、Galileo、BDS 的广播星历分别使用 WGS-84^[11]、PZ-90^[12]、GTRF^[13]、BDCS^[14]参考框架,与精密星历参考框架间互差最大为厘米级^[15-18],因此在评估广播星历精度时忽略参考框架不同带来的影响。

通过精密星历头文件可知,所用精密星历均采用 GPST(GPS time),因此需要将各系统时转为 GPST:(1)对于 GLONASS, RENIX 3.03 给出

的是 UTC 时间系统下的周内秒,仅需加上 2019 年对应的闰秒数(18 s)即可转化为 GPST,需要注意的是,由于并非所有 MGEX 混合广播星历头文件中均含有 LEAP SECONDS 信息,所以不能采取读头文件的方式读取闰秒数;(2)对于 Galileo,由于 GST(Galileo system time)中 Galileo 周和 GPS 周相同,两个时间系统仅差几十 ns^[19],故视为一致;(3)对于 BDS,由于 BDS 周比 GPS 周晚 1 356 周(BDT(BeiDou time)开始于 2006-01-01 00:00:00,GPST 开始于 1999-08-22 00:00:00),因此 BDT 比 GPST 晚 14 s。利用导航星历计算卫星位置和钟差的具体算法参见各系统最新版本的接口控制文件(interface control document, ICD)^[11-13,20]。

2.2 天线相位中心改正

广播星历计算得到的卫星位置是卫星天线相位中心的位置,而精密星历提供的是卫星质心的位置,在进行轨道比较时,应把精密星历提供的卫星位置改化至天线相位中心。需要注意的是,此时对精密星历卫星位置加入的天线相位中心改正值不能采用 IGS 发布的 ANTEX 文件提供的改正值,虽然 IGS 发布的天线模型是经平差处理后与真实天线相位中心位置最接近的结果,但是该模型是与 IGS 发布的轨道及钟差产品配套使用的,和广播星历生成时使用的各 GNSS 卫星生产商提供的天线相位中心偏移量不能混淆^[21],广播星历在生成时是将生产商提供的偏移量作为改正值将卫星质心坐标转化为天线相位中心

坐标提供给用户使用,因此,在利用精密星历评估广播星历轨道精度时,应使用与广播星历生成相匹配的天线相位中心改正值。

目前,四大 GNSS 并没有官方公布各自广播星历生成时使用的具体天线相位中心改正值。因此,对于 GPS 和 GLONASS,采取 Montenbruck 等于 2015 年^[10]和 2017 年^[22]通过对比精密星历和广播星历的差值计算得到的天线相位中心偏差;对于 Galileo,采取欧洲卫星导航服务中心(Euro-pean GNSS service centre,ESC)发布的卫星天线相位中心与某一确定物理参考点在星固坐标系中三方向的差值^[23],同一型号的卫星取均值作为该型号卫星天线相位中心偏移量;对于 BDS,早期一些星历质量评估文献由于 BDS 官方未公布改正参数,加之文献[10]发现 BDS 二代卫星质心与相心较为接近,于是忽略此项改正^[10,24-25]。随着星座构建日益完善,部分文献采用的是 MGEX 推荐值^[26]或早期硬件制造商公布的一组改正值^[27],经验算,以上方法对于 BDS 广播星历轨道精度的评估仍存在系统性误差,注意到 BDS 官方于 2019-12-30 发布的北斗卫星参数文件中包含制造商公布的每一颗 BDS 卫星的天线相位中心相对于质心的改正值^[28],采取对各型号卫星三方向改正值求均值的方法,计算得到本文后续采用的天线相位中心改正值。综上,本文对各系统不同型号卫星星固坐标系下 x 、 y 、 z 3 个方向进行天线相位中心改正值的取值,结果见表 2。

表 2 不同型号卫星天线相位中心改正值/m
Tab.2 Phase Center Correction Values of Different Satellite Antennas/m

卫星系统	卫星型号	PRN 编号	x	y	z
GPS	Block IIA	G18	+0.279	0.000	+0.920
	Block IIR-A	G11, G13, G14, G16, G20, G21, G28	0.000	0.000	+1.610
	Block IIR-B	G02, G19, G22, G23	0.000	0.000	-0.040
	Block IIR-M	G05, G07, G12, G15, G17, G29, G31			
	Block IIF	G01, G03, G06, G08~G10, G24~G27, G30, G32	+0.394	0.000	+1.160
Galileo	IOV	E11, E12, E19	+0.170	+0.029	+0.548
	FOC	E01~E05, E07~E09, E21, E24~E27, E30, E31, E33, E36	+0.121	-0.010	+0.650
GLONASS	M	R20	+0.545	0.000	+2.450
		R01~R03, R05, R07, R08, R11~R19, R21~R24	+0.545	0.000	+2.050
	K1	R09	0.000	0.000	+1.650
BDS	2G	C01~C05	-0.615	-0.570	+1.100
	2I	C06~C10, C13, C16	-0.419	-0.573	+1.100
	2M	C11, C12, C14	-0.428	-0.179	+1.100
	3M	C19~C30, C32~C37	+0.613	+0.128	+0.953

2.3 钟差的系统性偏差

广播星历中,不同 GNSS 系统的钟差参数基准不同,通常定义为某个指定观测量,该观测量可以是单频观测量,如 BDS 的 B3,也可以是双频消电离层组合观测量^[29],如 GPS 的 L1/L2、GLONASS 的 G1/G2、Galileo 的 E1/E5a(对应 INAV)或 E1/E5b(对应 FNAV)^[19]。以双频消电离层组合观测量为例,假设 $P_i(i=1,2)$ 代表某 GNSS 系统两个频率上的码观测量,其非差观测方程可以简写为:

$$P_i \approx \rho - cdt^S - K_i^S + \epsilon_i \quad (3)$$

式中, ρ 代表接收机至卫星天线相位中心的距离; c 为光速; dt^S 为卫星钟差; K_i^S 是卫星的硬件延迟偏差; ϵ_i 包含接收机钟差和硬件延迟偏差、相对论效应、对流层延迟、电离层延迟和观测噪声。需要注意的是,对于 GLONASS,与 GPS、Galileo 和 BDS 不同,在广播星历中已经加入相对论改正,用户在使用广播星历进行位置解算时不必考虑该项^[12],但在星历比较时,为了与精密星历对应,需要将钟差的相对论改正项 $\Delta\rho_{\text{rel}}$ 从 GLONASS 广播星历计算的钟差中减去, $\Delta\rho_{\text{rel}}$ 计算式为:

$$\Delta\rho_{\text{rel}} = -2 \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}}{c} \quad (4)$$

式中, \mathbf{r} 、 \mathbf{v} 分别是利用广播星历计算出的卫星位置向量和速度向量。

设 f_i 为频率,令 $\tilde{\alpha}_1 = f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2)$, $\tilde{\alpha}_2 = f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2)$,由 P_i 进行消电离层组合得到的组合观测量 P_c 可以表示为:

$$\begin{cases} P_c = \tilde{\alpha}_2 P_1 - \tilde{\alpha}_1 P_2 = \rho - c\delta t^S + \epsilon_c \\ c\delta t^S = cdt^S + \tilde{\alpha}_2 K_1^S - \tilde{\alpha}_1 K_2^S \end{cases} \quad (5)$$

式中, ϵ_c 为各模型误差的消电离层组合量; δt^S 即为广播星历所给钟差参数计算得到的卫星钟差。观察式(3)和式(5),得到关系式:

$$cdt^S + K_i^S = c\delta t^S + \tilde{\alpha}_i (K_2^S - K_1^S) \quad (6)$$

由式(6)可知, $c\delta t^S$ 与 cdt^S 的差值在星历比较中是一个系统性偏差,对于某 PRN 编号的卫星来说硬件延迟偏差在一天之内可以看作一个常数。考虑到在评估广播星历精度时, SISRE 指的是用户接收机至卫星天线相位中心的测距误差,不应含有系统性偏差,因此,广播星历精度评估采用的应该是 dt^S 所表示的卫星钟差。

由于 GPS 和 Galileo 广播星历中给出的钟差基于双频消电离层组合观测量,无需考虑群延迟(time group delay, TGD)改正, GLONASS 则是在广播星历中直接给出包含 TGD 改正的基于 G1 的

钟差,在与精密星历比较时也无需考虑该项改正^[21]。BDS 广播星历钟差参数基准为 B3,由于 WUM 分析中心发布的精密星历最终产品自 2019 年 DOY 001 开始从使用 B1I 和 B2I 消电离层组合改为使用 B1I 和 B3I 消电离层组合^[30],在与精密星历钟差比较时,还应加入 TGD 改正,使其与精密星历消电离层组合基准一致。TGD 改正公式为:

$$\text{TGD} = \frac{f_{B1}^2}{f_{B1}^2 - f_{B3}^2} \cdot \text{TGD}_1 \quad (7)$$

式中, f_{B1}^2 、 f_{B3}^2 为 B1、B3 频点的频率值; TGD_1 为 BDS 广播星历中 B1 频点的群延迟改正数。

由于 DOY 299 采用 SHA 精密星历来评估当天广播星历的精度,虽然精密星历的互差在广播星历精度评估时可忽略不计,但目前尚无 SHA 在产生精密星历时使用的组合观测量有关的参考文献,因此,式(7)的适用性无法确定。根据 TGD 的数值由载波的频率和该频率上卫星的硬件延迟偏差决定的性质,可以把 TGD 对单颗星一日内的影响视为系统性偏差处理。

消除广播星历钟差系统性偏差的方法有很多:(1)选取一颗卫星为基准星,其余卫星与其作二次差^[31-33],但是该方法对基准星要求较高,基准星选取不当会将基准星误差引入其他卫星钟差;(2)求取一个 GNSS 系统内所有可用卫星钟差的均值,其余卫星与其作二次差^[10,24-25,34],但是该方法仅消除了星座整体时标偏差,每颗卫星的钟差仍然包含一个均值偏差^[35];(3)利用加权最小二乘进行迭代,以残差最小为目标函数,计算所有可用卫星的钟差一次差来求解公共偏差^[36],但是该方法计算量大,过程较为繁琐。为了最大限度地消除系统性偏差,本文采用一种对单颗星一日内广播星历与精密星历钟差之差求均值,在逐历元与精密星历比较时,不同历元的钟差再与该均值作差的方法,消除该星钟差的系统性偏差。经验证,采用该方法作二次差,在计算广播星历钟差时是否加入 TGD 改正对最终钟差精度没有影响,也证明了 TGD 和其他系统误差通过上述二次差方法均可得到有效消除。

3 实验分析

以精密星历的历元间隔 15 min(900 s)为比较间隔,每隔 15 min 选择健康卫星的数据计算一次广播星历各系统各 PRN 编号卫星的位置与钟差, GPS、GLONASS、Galileo、BDS 与精密星历的比较结果分别如图 1~图 4 所示。

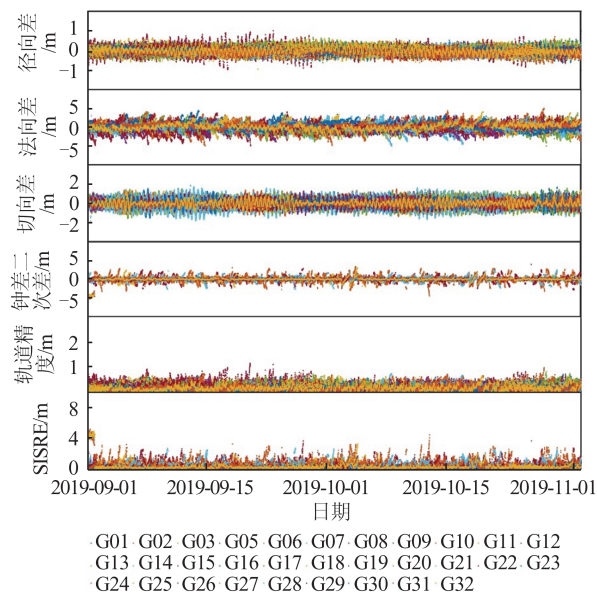


图1 GPS广播星历与精密星历对比结果

Fig. 1 Comparison of GPS Broadcast Ephemeris and Precise Ephemeris

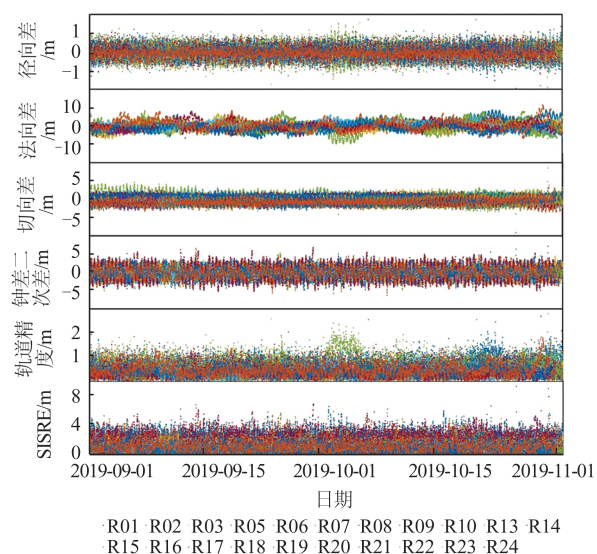


图2 GLONASS广播星历与精密星历对比结果

Fig. 2 Comparison of GLONASS Broadcast Ephemeris and Precise Ephemeris

需要指出的是,在画图过程中保留了所有数据,不剔除粗差,以便观察各误差变化规律,各图块纵轴范围内显示的数据均不包含误差值过大的个别数据点。各系统不同类型卫星的轨道精度、钟差精度、SISRE的RMS等统计结果详见表3。在统计精度时需要进行粗差的剔除,本文设置的剔除条件为:若某颗星在某历元 SISRE的RMS大于10 m,则判定为粗差,并剔除该星在该历元所有指标数据。对于BDS,所使用广播星历BDS在GEO、IGSO的卫星钟龄期(age of data clock, AODC)、星历龄期(age of data ephemeris,

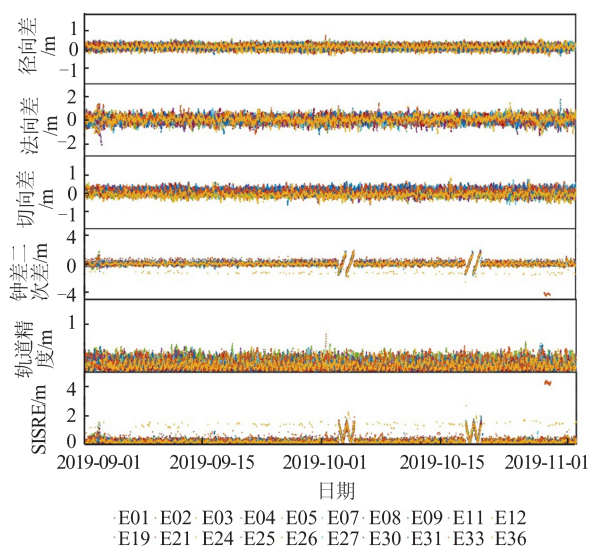


图3 Galileo广播星历与精密星历对比结果

Fig. 3 Comparison of Galileo Broadcast Ephemeris and Precise Ephemeris

AODE)数值均小于25, MEO的AODC、AODE 24 h以内的各占98.32%、98.51%。需要指出的是,BDS广播星历精度与数据龄期并非简单的线性相关的关系,其中还存在周期性变化^[37],这里提供的龄期状态仅为后续比较结果提供参考。

结合图1~图4与表3,具体分析各系统各指标精度如下:

1)对于GPS,由图1可以看出,径向、法向、切向和钟差的误差值均围绕0刻度上下波动,说明计算结果不含系统性偏差,3个方向中径向精度最高,且数据质量较为稳定,没有过多的散点。结合表3可知,整体轨道精度的RMS优于0.3 m, SISRE的RMS优于0.5 m。其中,Block IIA由于型号老旧,钟差的RMS大于同样将Rb钟作为工作钟的Block IIR/IIR-M和Block IIF型号的卫星,精度较差;对于Block IIF卫星,使用Cs钟的两颗卫星钟差的RMS大于使用Rb钟的其他同型号卫星,由于轨道精度相近,且根据式(1),其SISRE的RMS也大于其他同型号卫星。对于使用Rb钟的GPS卫星,从表3中可以看出,Block IIA至Block IIF,钟差与SISRE的精度均逐渐提高。

2)对于GLONASS,由图2可以看出,轨道误差中3个方向以及钟差的误差值在四大导航系统MEO轨道卫星中是最大的,但是通过图2中数据点分布可以看出,其数据不存在明显的分散以及系统性偏差,由文献[3]可知,GLONASS全星座均使用Cs钟,结合表3,该系统整体钟差的RMS为1.5 m左右,轨道精度的RMS优于0.8 m,

SISRE 的 RMS 在 2 m 以内。由于统计时段内有数据参与统计的 GLONASS-K1 卫星仅有一颗,且由于该统计仅反映近期精度情况,因此 K1 型号卫星在该统计时段内整体精度稍差。

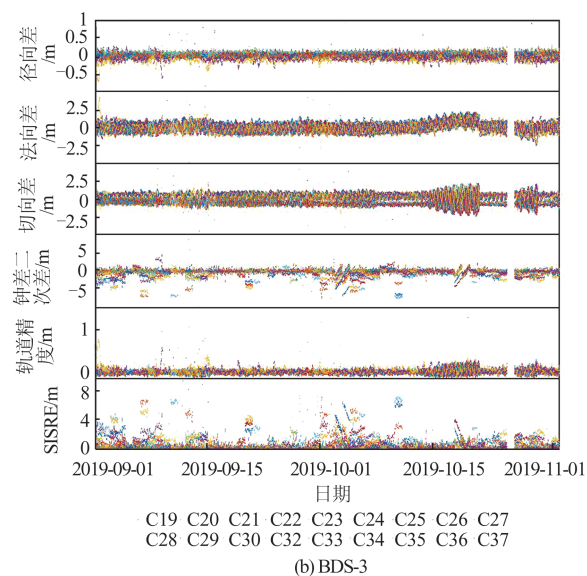
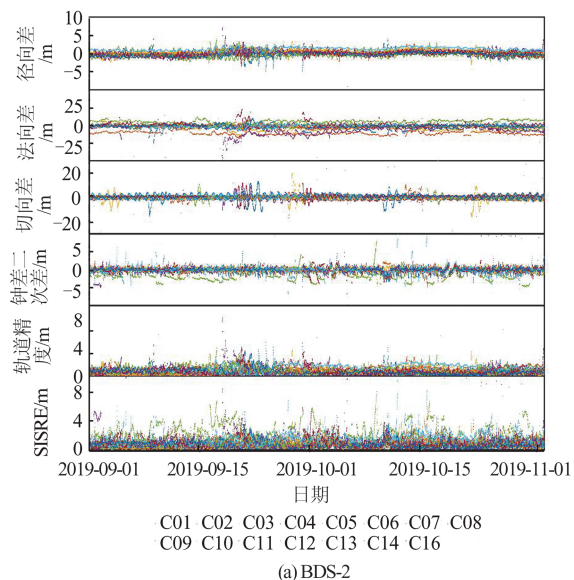


图4 BDS广播星历与精密星历对比结果

Fig. 4 Comparison of BDS Broadcast Ephemeris and Precise Ephemeris

3)对于Galileo,由图3可以看出,除数据没有明显的系统性偏差外,3个方向的误差较小且精度稳定,但钟差存在一条稀疏的离散点条带,且个别日期的数据存在整体的线性变化,由式(1)知,SISRE数值也随之变化,结合表3,该系统整体轨道精度的RMS优于0.2 m,钟差和SISRE的RMS均优于0.4 m。使用Rb钟的E11卫星广播星历预报钟差的RMS稍大于使用被动型氢钟的其他卫星,对于全部使用氢钟的FOC卫星,整体钟差精度的RMS要稍好于测试用的IOV卫星。

4)对于BDS,除各项精度指标不含系统性偏差外,由图4(a)可知,由于轨道高度原因,BDS-2的GEO卫星在法向和切向上精度明显较差,且数值变化周期长,有较多的数据分散点;由图4(b)可知,所有指标在DOY 299发生数据缺失,这是因为该日使用的SHA精密星历中没有BDS-3的数据,BDS-3轨道精度明显优于BDS-2,钟差精度较BDS-2也更加接近0,但相比于其他3个系统,BDS总体的钟差精度稳定性较差,图4中表现为钟差图块中离散的点数较多。结合表3,BDS-2钟差精度由高到低按轨道高度排列依次为MEO、IGSO、GEO,BDS-2的整体轨道精度优于0.7 m,SISRE的RMS优于1 m。相比BDS-2,BDS-3的轨道精度和钟差精度均有较大提高,SECM制造的BDS-3卫星使用氢钟,该批卫星整体广播星历预报钟差精度要优于CAST制造的使用Rb钟的BDS-3卫星,BDS-3整体轨道精度的RMS在0.2 m以内,SISRE的RMS在0.4 m以内。同时,由于BDS-3可用观测值数量低于BDS-2,因此WUM精密星历BDS-3的轨道精度和钟差精度较低^[30],对BDS-3广播星历精度评估有一定的影响。

4 结 语

相比于已有的评估工作,本文在评估内容与策略上的改进主要体现在以下几个方面:(1)评估时段较新,对于BDS,采用了最新发布的制造商对不同型号卫星天线相位中心相对于质心偏移量的标定值进行天线相位中心改正。(2)对于钟差的系统性偏差的处理,在广播星历质量评估类文章中,首次利用非差观测值方程,推导出广播星历所提供钟差的具体表达形式,为充分消除系统性偏差提供理论依据,并提出一种不依赖于精密星历所使用的电离层的频点的系统性偏差消除方法。(3)涵盖四大导航系统,目前,比较时段较近的涵盖四大导航系统广播星历质量评估的工作是2018年Montenbruck等^[21]开展的,随着2019年WUM改变精密星历电离层使用的频点以及BDS官方发布北斗卫星参数文件,原有的四大系统广播星历质量评估与比较的结果不再具有时效性。

从本文评估结果来看,四大导航系统广播星历整体精度从高到低依次为Galileo、GPS、BDS、GLONASS。其中,Galileo整体轨道精度优于0.2 m,钟差和SISRE的RMS均优于0.4 m;

表 3 各导航系统卫星精度指标统计值/m
Tab.3 Statistics of Accuracy Indexes for Various Navigation Satellite Systems/m

卫星系统	卫星类型	卫星 钟类 型	PRN	径向差		法向差		切向差		钟差二次差		SISRE ₀		
				均值	RMS	均值	RMS	均值	RMS	均值	RMS	RMS	RMS	
GPS	Block IIA	Rb	G18 G02, G11, G13, G14, G16, G19~G23, G28 G05, G07, G12, G15, G17, G29, G31	-0.017	0.180	-0.081	1.107	0.003	0.397	-0.039	0.639	0.251	0.673	
	Block IIR			-0.017	0.131	-0.066	0.966	-0.008	0.366	-0.014	0.331	0.202	0.413	
	Block IIR-M			-0.052	0.140	-0.133	0.934	-0.004	0.384	-0.038	0.328	0.208	0.409	
	Block IIF	Cs	G08, G24	0.000	0.234	0.051	1.044	0.004	0.340	0.011	0.828	0.285	0.886	
		Rb	G01, G03, G06, G09, G10, G25~G27, G30, G32 Block IIF all	0.004	0.170	-0.068	0.851	0.002	0.362	-0.035	0.260	0.219	0.384	
GLONASS	GPS整体精度			0.003	0.181	-0.048	0.883	0.003	0.359	-0.028	0.355	0.230	0.467	
	M K1	Cs	R01~R03, R05, R07, R08, R11~R24	-0.017	0.153	-0.075	0.925	-0.003	0.367	-0.025	0.340	0.215	0.434	
		K1	R09	-0.015	0.388	-0.225	1.720	0.062	1.060	0.003	1.434	0.499	1.545	
			GLONASS整体精度			-0.162	0.539	-0.956	3.487	0.005	0.762	-0.013	1.702	0.755
	Galileo	GLONASS整体精度			-0.022	0.395	-0.259	1.804	0.060	1.046	0.002	1.447	0.511	1.563
IOV		Rb	E11	0.021	0.122	0.046	0.269	-0.004	0.169	0.002	0.361	0.123	0.335	
		H	E12, E19	0.054	0.140	0.089	0.310	0.001	0.182	0.002	0.338	0.148	0.323	
			IOV all			0.043	0.134	0.075	0.296	-0.001	0.178	0.002	0.346	0.140
Galileo		FOC	H	E01~E05, E07~E09, E21, E24~E27, E30, E31, E33, E36	0.139	0.176	0.033	0.258	-0.012	0.162	0.002	0.315	0.178	0.348
	Galileo整体精度			0.125	0.169	0.039	0.263	-0.010	0.164	0.002	0.319	0.172	0.345	
	GEO	Rb	C01~C05	0.032	0.517	-2.965	5.422	-0.794	1.614	0.002	0.575	0.793	1.102	
	IGSO		C06~C10, C13, C16	0.176	0.535	-1.360	1.898	0.077	1.541	-0.002	0.526	0.591	0.813	
	BDS-2 MEO		C11, C12, C14	-0.014	0.503	-0.242	2.203	0.404	0.851	0.005	0.470	0.599	0.779	
BDS	BDS-2整体精度			0.137	0.522	-1.671	3.133	-0.148	1.427	0.001	0.531	0.660	0.903	
	MEO	Rb	C19~C24, C32, C33, C36, C37	0.045	0.109	-0.014	0.581	-0.184	0.804	0.010	0.287	0.199	0.338	
		H	C25~C30, C34, C35	-0.030	0.072	-0.016	0.647	-0.009	0.635	-0.004	0.311	0.135	0.301	
	BDS-3	BDS-3整体精度			0.012	0.093	-0.015	0.610	-0.106	0.729	0.004	0.298	0.172	0.321
	BDS整体精度			0.069	0.288	-0.768	1.757	-0.125	1.046	0.002	0.404	0.394	0.586	

GPS 整体轨道精度优于 0.3 m, 钟差的 RMS 优于 0.4 m, SISRE 的 RMS 优于 0.5 m; 对于 BDS, BDS-2 整体轨道精度优于 0.7 m, 钟差的 RMS 优于 0.6 m, SISRE 的 RMS 优于 1 m; BDS-3 的轨道精度优于 0.2 m, 钟差的 RMS 优于 0.4 m, SISRE 的 RMS 优于 0.4 m, 且 BDS-3 广播星历的整体轨道精度、钟差精度和 SISRE 的 RMS 和四大系统整体结果相比均最优; 由于采用了最新的天线相位中心改正值以及新的钟差系统性偏差处理方法, 相比于刘凡等^[34]的评估结果, BDS-2 与 BDS-3 SISRE 的 RMS 精度均提高 0.2 m 左右; BDS 总体轨道精度和钟差精度均在 0.4 m 左右, SISRE 优于 0.6 m; GLONASS 整体轨道精度在 0.5 m 左右, 钟差的 RMS 约为 1.5 m, SISRE 的 RMS 约为 1.6 m。此外, 广播星历钟差精度不完全取决于钟的稳定度, 更取决于预报时长的差异: 以 BDS 为例, 根据毛亚等^[38]的评估结果, 氢原子钟千秒稳定性、万秒稳定性和日稳定性分别高于铷原子钟 40.16%、47.10%、65.60%, 且氢原子钟的长期稳定性要明显优于铷原子钟, 但是运控系统监测的各卫星导航星历钟差精度差别并不明显。造成各系统广播星历精度评估结果差异的原因也是多方面的, 如预报时长、原子钟类型、信号调制方式、信号频率、地面控制中心的布址分散程度、空间星座的轨道设计、不同生产厂家生产卫星的工艺, 以及生成广播星历与精密星历采用的算法等。随着各系统卫星的更新换代, 各 GNSS 广播星历的精度还会有所提高, 尤其是 BDS, 随着 BDS-3 的 GEO 和 IGSO 卫星逐步替代原有的 BDS-2 相应轨道高度的卫星, BDS 整体广播星历精度还会有较大的提升。

致谢: 感谢 MGEX 提供的免费数据文件下载服务; 感谢德国宇航中心的 Oliver Montenbruck 主任在天线相位偏差改正值的选取方面提供的指导; 感谢武汉大学的郭斐、郭靖老师在 WUM 分析中心定轨策略上提供的重要信息。

参 考 文 献

- [1] Concox. The Major Four Satellite Navigation and Positioning Systems in the World[EB/OL]. (2018-06-15) [2019-12-23]. <http://www.concox.net/about/industry/218.html> (康凯斯. 全球四大卫星导航定位系统[EB/OL]. (2018-06-15) [2019-12-23]. <http://www.concox.net/about/industry/218.html>)
- [2] GPS. GOV. Current and Future Satellite Generations [EB/OL]. (2019-11-16) [2019-12-23]. <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>
- [3] GPS WORLD. The Almanac [EB/OL]. (2019-11-16) [2019-12-23]. <https://www.gpsworld.com/the-almanac/>
- [4] European GNSS Service Centre. Galileo Initial Service Recovery Actions Underway[EB/OL]. (2019-07-17) [2019-12-23]. <https://www.gsc-europa.eu/news/galileo-initial-service-recovery-actions-underway>
- [5] European GNSS Service Centre. Galileo Initial Services Have Now Been Restored[EB/OL]. (2019-07-18) [2019-12-23]. <https://www.gsc-europa.eu/news/galileo-initial-services-have-now-been-restored>
- [6] Test and Assessment Research Center of China Satellite Navigation Office[EB/OL]. (2019-12-23) [2019-12-23]. <http://www.csno-tarc.cn/index/index> (中国卫星导航系统管理办公室测试评估研究中心[EB/OL]. (2019-12-23) [2019-12-23]. <http://www.csno-tarc.cn/index/index>)
- [7] 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, 90(2): 143-159
- [8] Shi C, Zhao Q L, Li M, et al. Precise Orbit Determination of BeiDou Satellites with Precise Positioning [J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(7): 1079-1086
- [9] Chen J P, Wu B, Hu X G, et al. SHA: The GNSS Analysis Center at SHAO [C]// China Satellite Navigation Conference (CSNC), Guangzhou, China, 2012
- [10] Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. Broadcast Versus Precise Ephemerides: A Multi-GNSS Perspective [J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(2): 321-333
- [11] GPS. GOV. Interface Control Documents: IS-GPS-200[DB/OL]. (2019-05-06) [2019-12-20]. <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200K.pdf>
- [12] PKC. Interface Control Document — General Description of Code Division Multiple Access Signal System [DB/OL]. (2016-08) [2019-12-20]. <http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD-GLONASS-CDMA-General-Edition-1.0-2016.pdf>
- [13] European GNSS Service Centre. Programme Reference Documents: Galileo — Open Service — Signal in Space Interface Control Document (OS SIS ICD

- V1.3) [DB/OL]. (2016-12) [2019-12-20]. <https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SIS-ICD.pdf>
- [14] China Satellite Navigation Office (CSNO). Notice on the Release of the BeiDou Coordinate System (BDCS) Template [EB/OL]. (2019-12-09) [2019-01-31]. http://www.beidou.gov.cn/yw/gfgg/201912/t20191209_19612.html (北斗卫星导航系统. 关于发布北斗坐标系(BDCS)模板的公告 [EB/OL]. (2019-12-09) [2019-01-31]. http://www.beidou.gov.cn/yw/gfgg/201912/t20191209_19612.html)
- [15] Guo Fei, Zhang Xiaohong, Li Xingxing, et al. Precision Analysis on Orbit and Clock of GPS Satellites Broadcast Ephemeris [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(5): 589-592 (郭斐, 张小红, 李星星, 等. GPS系列卫星广播星历轨道和钟的精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(5): 589-592)
- [16] Liu Lu, Guo Jinyun, Xia Yaowei, et al. Orbit Error Analysis and Accuracy Assessment of GLONASS Broadcast Ephemeris [J]. *China Sciencepaper*, 2019, 14(2): 232-238 (刘路, 郭金运, 夏要伟, 等. GLONASS广播星历轨道误差分析与精度评估[J]. 中国科技论文, 2019, 14(2): 232-238)
- [17] Zou Rong, Liu Hui, Yang Shujiang. Inspiration of Establishing COMPASS Terrestrial Reference Frame from GTRF Realization [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(11): 1266-1270 (邹蓉, 刘晖, 杨蜀江. 伽利略地球参考框架对建立我国自主的地球参考框架的启示[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(11): 1266-1270)
- [18] Wei Ziqing. China Geodetic Coordinate System 2000 and Its Comparison with WGS84 [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2008, 28(5): 1-5 (魏子卿. 2000中国大地坐标系及其与WGS84的比较[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(5): 1-5)
- [19] IGS. RINEX 3.03 Update 1 Documentation [DB/OL]. (2019-10-29) [2019-12-17]. https://kb.igs.org/hc/en-us/article_attachments/115007372627/RINEX-3_03-update1.pdf
- [20] China Satellite Navigation Office (CSNO). BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document-Open Service Signal B1I (Version 3.0) [DB/OL]. (2019-02-27) [2019-12-20]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201902/P020190227592987952674.pdf> (北斗卫星导航系统. 北斗系统空间信号接口控制文件B1I(3.0版)[DB/OL]. (2019-02-27) [2019-12-20]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201902/P020190227592987952674.pdf>)
- [21] Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. Multi-GNSS Signal-in-Space Range Error Assessment — Methodology and Results [J]. *Advances in Space Research*, 2018, 61(12): 3020-3038
- [22] Montenbruck O, Steigenberger P, Prange L, et al. The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) — Achievements, Prospects and Challenges [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(7): 1671-1697
- [23] European GNSS Service Centre. Galileo Satellite Metadata [EB/OL]. (2019-12-10) [2019-12-18]. <https://www.gsc-europa.eu/support-to-developers/galileo-satellite-metadata>
- [24] Zeng Qi, Wu Duo, Liu Wanke. Accuracy Assessment of BDS Broadcast Ephemeris Based on Long-Term Data [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2016, 36(11): 958-962 (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)
- [25] Liu Wanke, Ren Jie, Zeng Qi, et al. Accuracy Assessment of BDS Signal-in-Space Range Errors in 2013—2015 [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2016, 38(3): 1-6 (刘万科, 任杰, 曾琪, 等. 2013—2015年BDS空间信号测距误差的精度评估[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(3): 1-6)
- [26] Rizos C, Montenbruck O, Weber R, et al. The IGS MGEX Experiment as a Milestone for a Comprehensive Multi-GNSS Service [C]// ION Pacific PNT Conference, Honolulu, Hawaii, 2013
- [27] Lou Y D, Liu Y, Shi C, et al. Precise Orbit Determination of BeiDou Constellation Based on BETS and MGEX Network [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4692
- [28] China Satellite Navigation Office CSNO). BDS Satellite Info [DB/OL]. (2019-12-30) [2020-01-31]. <http://www.beidou.gov.cn/yw/gfgg/201912/W020191230559858089737.rar> (北斗卫星导航系统. 北斗卫星参数文件[DB/OL]. (2019-12-30) [2020-01-31]. <http://www.beidou.gov.cn/yw/gfgg/201912/W020191230559858089737.rar>)
- [29] Wang Ningbo, Yuan Yunbin, Zhang Baocheng, et al. Accuracy Evaluation of GPS Broadcast Inter-Signal Correction (ISC) Parameters and Their Impacts on GPS Standard Positioning [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(8): 919-928 (王宁波, 袁运斌, 张宝成, 等. GPS民用广播星历中

- ISC 参数精度分析及其对导航定位的影响[J]. 测绘学报, 2016, 45(8): 919-928)
- [30] ResearchGate. Hourly Ultra-Rapid and Final WUM Multi-GNSS Including BeiDou-3 Precise Orbit and Clock Released [EB/OL]. (2019-03-02) [2019-12-20]. <https://www.researchgate.net/project/Multi-GNSS-analysis-at-Wuhan-University-attitude-solar-radiation-pressure-phase-center-and-more>
- [31] Lou Yidong, Shi Chuang, Zhou Xiaoping, et al. Realization and Analysis of GPS Precise Clock Products[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(1): 88-91 (楼益栋, 施闯, 周小青, 等. GPS 精密卫星钟差估计与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(1): 88-91)
- [32] Gong Xiaochun, Wang Yupu, Wang Ning, et al. Real-Time Prediction of GPS Satellite Clock Bias Correction[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(6): 867-873 (宫晓春, 王宇谱, 王宁, 等. GPS 卫星钟差改正数实时预报算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(6): 867-873)
- [33] Wang Shengli, Wang Qing, Gao Wang, et al. Quality Analysis of IGS Real-Time Products and Its Application in Real-Time Precise Point Positioning[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2013, 43(S2): 365-369 (王胜利, 王庆, 高旺, 等. IGS 实时产品质量分析及其在实时精密单点定位中的应用[J]. 东南大学学报自然科学版, 2013, 43(S2): 365-369)
- [34] Liu Fan, Li Lei, Liu Guolin, et al. Accuracy Assessment of BDS-2 and BDS-3 Satellite Signal-in-Space [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, 45(1): 54-61 (刘凡, 李雷, 刘国林, 等. BDS-2 与 BDS-3 卫星空间信号精度评估[J]. 测绘科学, 2020, 45(1): 54-61)
- [35] Li X X, 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
- [36] Wu Y, Liu X L, Liu W K, et al. Long-Term Behavior and Statistical Characterization of BeiDou Signal-in-Space Errors[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(4): 1907-1922
- [37] Che Tongyu, Zhou Wei, Cai Wei, et al. The Precision Evaluation of BDS MEO Broadcast Ephemeris Based on AOD[C]// The 9th China Satellite Navigation Conference, Harbin, China, 2018 (车通宇, 周巍, 蔡巍, 等. 基于龄期条件的北斗 MEO 卫星广播轨道精度评估[C]// 第九届中国卫星导航学术年会, 哈尔滨, 2018)
- [38] Mao Ya, Wang Qianxin, Hu Chao, et al. Analysis of the Characterization for BDS-3 Satellite Clock Error[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1): 53-61 (毛亚, 王潜心, 胡超, 等. BDS-3 卫星钟差特性分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(1): 53-61)

Accuracy Evaluation and Comparative Analysis of Four Major GNSS Broadcast Ephemeris

ZHANG Xi^{1,2} LIU Changjian² ZHANG Fan² WU Qing² HU Xiaohua²

¹ 61363 Troops, Xi'an 710000, China

² College of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450000, China

Abstract: Objectives: The major global navigation satellite system (GNSS) includes global positioning system (GPS), global navigation satellite system (GLONASS), Galileo navigation satellite system (Galileo), and BeiDou navigation satellite system (BDS). The accuracy of broadcast ephemeris of the four major GNSS should be evaluated, and the evaluation results do not include systematic deviations. **Methods:** We download the mixed broadcast ephemeris and precise ephemeris of the multi-GNSS experiment (MGEX) for a total of 62 days from 1st September to 1st November in 2019, and select healthy satellite data from broadcast ephemeris every 15 minutes. After this preparation, we calculate the satellite position and clock difference of each GNSS system, then compare root mean square (RMS) of orbital position deviation, RMS of clock difference, and RMS of signal-in-space range error (SISRE) of all kinds of satellites with pre-

cise ephemeris. To correct the position of antenna phase center, the correction value should be selected corresponding to the generation of broadcast ephemeris. To eliminate the systematic deviation of clock difference, we make a quadratic difference on the average value of daily clock difference of single satellite. **Results:** The radial, along-track, cross-track position deviation and clock difference of the four major GNSS broadcast ephemeris fluctuate around 0 scale, indicating that the calculation results do not include systematic deviation, the methods of correcting the position of antenna phase center and eliminating systematic deviation of clock difference are correct and effective. **Conclusions:** The order of accuracies of the four major GNSS broadcast ephemeris from high to low is Galileo, GPS, BDS, GLONASS. With the development of each navigation system, the accuracy of broadcast ephemeris can be further improved.

Key words: broadcast ephemeris; precise ephemeris; ephemeris comparison; accuracy evaluation

First author: ZHANG Xi, master, specializes in the theory and method of GNSS data processing. E-mail: 18237860502@163.com

Corresponding author: LIU Changjian, PhD, professor. E-mail: chxylcj@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41374041).

引文格式: ZHANG Xi, LIU Changjian, ZHANG Fan, et al. Accuracy Evaluation and Comparative Analysis of Four Major GNSS Broadcast Ephemeris[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(2): 208-218. DOI: 10.13203/j.whugis20190473 (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. DOI: 10.13203/j.whugis20190473)