GNSS导航电文空间信号测距误差分析

杨建华^{1,2*}, 唐成盼^{1,3}, 宋叶志¹, 胡小工¹, 周善石¹, 常志巧⁴

1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 国防科技大学电子科学与工程学院, 长沙 410073;

4. 北京卫星导航中心, 北京 100094

*联系人, E-mail: yangjianhua@shao.ac.cn

收稿日期: 2020-06-23; 接受日期: 2020-08-21; 网络出版日期: 2020-12-15

国家自然科学基金(编号: 4180430, 441874039, 41574029)资助项目

摘要 空间信号测距误差(Signal-In-Space Range Error, SISRE)描述卫星广播星历误差和钟差参数误差在用户平均星站方向的投影, 是影响用户定位授时精度的关键因素. 本文以事后精密轨道和钟差参数为基准, 分别评估Galileo, GPS和BDS-3卫星的广播星历轨道用户测距误差(User Range Error, URE)、钟差参数误差、SISRE的大小和特征. 结果表明, Galileo, GPS, BDS-3的SISRE分别为0.14, 0.49, 0.35 m. 三者的广播星历轨道URE分别为0.14, 0.27, 0.09 m. 三者的钟差参数误差分别为0.14, 0.41, 0.35 m. Galileo广播星历径向轨道误差和钟差参数误差之间具有很强的相关性. 两者相互抵消, 可有效降低Galileo卫星的SISRE. 不同类型GPS卫星的钟差参数误差和SISRE有明显区别. 随着GPS卫星的更新换代, 其钟差参数误差和SISRE会逐步降低. BDS-3卫星具备与GPS和Galileo卫星显著不同的特征: (1) BDS-3卫星广播星历轨道径向误差和钟差参数误差的相关性较小, 自治性较差; (2) BDS-3卫星广播星历轨道URE较小, 而钟差参数误差较大. 其中, BDS-3卫星的广播星历轨道URE小于Galileo和GPS, 但是其钟差参数误差对SISRE的贡献显著大于Galileo和GPS. 通过对比上述卫星的SISRE大小及特征, 指出提高钟差参数精度是提高BDS-3卫星空间信号精度的关键.

关键词 空间信号测距误差(SISRE), GPS, Galileo, BDS-3

PACS: 95.10.Eg, 06.30.Ft, 91.10.Fc, 96.25.Vt

1 引言

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的定位精度由用户等效距离误差(User Equal Range Error, UERE)和定位几何精度因子(Dilu-

tion of Precision, DOP)共同决定. UERE是卫星导航电文误差、大气延迟模型误差和接收机测量误差在用户视线投影的叠加效应. DOP反映了卫星空间几何分布对定位精度的影响. UERE可进一步划分为空间信号测距误差(Signal-In-Space Range Error, SISRE)、大

引用格式: 杨建华, 唐成盼, 宋叶志, 等. GNSS导航电文空间信号测距误差分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 019508

Yang J H, Tang C P, Song Y Z, et al. Analysis of signal-in-space ranging error of GNSS navigation message (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 019508, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0227

气延迟模型误差和用户设备误差(User Equipment Error, UEE). UEE是指用户接收机伪距测量的多路径误差与随机噪声, 大气延迟模型误差反映了信号穿越电离层和对流层产生延迟的建模误差, SISRE指卫星播发的导航电文误差, 包括卫星广播星历误差和钟差参数误差, 是UERE的重要组成部分, 是卫星导航系统的重要精度属性. 分析评估卫星导航系统SISRE大小及特征, 对于研究卫星导航系统空间信号精度和系统服务精度提升方法有重要借鉴意义.

GPS系统作为全球第一个能独立、全面运行的卫星导航系统, 每两小时播发一次导航电文, GPS卫星都为BLOCK卫星. 其在L1频点上的CA码和L2频点上的P码被GPS用户广泛使用. 截至2019年11月, 在轨的GPS卫星包括BLOCK-IIA, BLOCK-IIR-A, BLOCK-IIR-B, BLOCK-IIR-M和2019年1月底发射的BLOCK-IIIA卫星. GPS卫星的星载原子钟包括铷钟和铯钟, 其中BLOCK-IIF卫星装载的铷钟要优于IIR和IIA卫星^[1]. 2012–2013年, Gruber^[2]和Cooley^[3]的研究显示GPS的SISRE为0.7 m. 2013–2014年, Montenbruck等人^[4]对GPS的SISRE评估为1.0 m. 其中, 装有铷钟的IIF卫星SISRE为0.4 m. Montenbruck等人^[5]2018年的研究显示GPS卫星2016–2017年的SISRE为0.6 m.

Galileo是欧洲独立自主设计的全球导航系统, 由欧洲航天局(ESA)开发研制. 截至2019年1月, Galileo包括4颗IOV卫星, 22颗FOC卫星. Galileo的星载原子钟为最新一代的被动氢原子钟(Passive Hydrogen Masers, PHM), 其短稳特性较好, 性能优于BLOCK-IIF的铷钟^[1]. Galileo用户广泛地免费使用导航信息(Freely Accessible Navigation, F/NAV)和完整导航信息(Integrity Navigation, I/NAV). F/NAV的信号频点为E1, E5a, I/NAV的信号频点为E1, E5b. Rodriguez^[6]在2013年5月到6月期间对Galileo卫星的SISRE评估为1–2 m. Montenbruck等人^[4]对Galileo 4颗IOV卫星在2013–2014年的SISRE评估为1.6 m. 韩德强等人^[7]认为Galileo 2016年的广播星历的钟差参数误差为1.0 ns, 整体SISRE优于1 m. Montenbruck等人^[5]在2018年的研究成果显示, 2017年Galileo的SISRE基本维持在0.2 m的水平, 领先其他GNSS.

第三代北斗导航系统(BDS-3)是中国北斗卫星导航系统发展战略的第三步. BDS-3于2018年底开始提供基本导航服务. 建成后的BDS-3将包括3颗GEO卫

星, 3颗IGSO卫星和24颗MEO卫星, 导航电文播发间隔为每小时一次. 其星载原子钟包括铷钟和被动氢钟. 其中, 播发的民用频点包括B1I, B1C, B2a, B2b和B3I. 不同于GPS和Galileo, BDS-3采用了L波段星地双向时间同步技术(TWSTFT)来获得境内的卫星钟差信息^[8–13]. 在此基础上, 采用了Ka波段星间链路技术^[13–15](ISL)来获得境外卫星钟差信息. 在精密定轨中, 加入ISL的测距数据^[12,14,15]后可显著降低BDS-3广播星历轨道的URE. 随着BDS-3的星座逐渐完善、运行控制端和信息处理解算和播发的策略不断优化, 其SISRE有望进一步降低.

GNSS的SISRE不断降低, 一方面是因为在轨卫星的更新换代, 另一方面是因为不断优化的定轨、钟差测定以及播发策略. 由于SISRE的主要贡献来自径向轨道误差和钟差参数误差(见第2节), 因此本文将从这两个主要贡献项出发, 分析比较Galileo, GPS, BDS-3的SISRE. 并以此为依据, 指出BDS-3卫星空间信号精度提升的关键. 这对于降低BDS-3卫星空间信号测距误差, 提高BDS-3定位精度具有重要的借鉴意义.

2 空间信号测距误差

SISRE计算公式常常被用于衡量广播星历和钟差参数的精度. 若仅考虑轨道的影响, 则广播星历轨道误差URE可用下式表达^[4]:

$$\text{URE}_{\text{orb}} = \sqrt{[\omega_R \cdot \text{rms}(R)]^2 + \omega_{T,N}^2 \cdot [\text{rms}^2(T) + \text{rms}^2(N)]}. \quad (1)$$

若考虑包括钟差参数误差在内的综合影响, 则完整的SISRE可通过式(2)计算^[4].

$$\text{SISRE} = \sqrt{[\text{rms}(\omega_R \cdot R - c\Delta t)]^2 + \omega_{T,N}^2 \cdot [\text{rms}^2(T) + \text{rms}^2(N)]}, \quad (2)$$

其中, T 为迹向误差, N 为法向误差, R 为径向误差, 其指向为卫星指向地心, $c\Delta t$ 为钟差参数误差, 后文用CLK表示 $c\Delta t$. ω_R 和 $\omega_{T,N}$ 为SISRE贡献因子, 贡献因子由各项误差在平均伪距方向的投影计算得出. 导航卫星的轨道高度一般高于20000 km, 因此径向轨道误差矢量与伪距矢量的夹角一般小于20°, 迹向或法向轨道误差矢量与伪距矢量的夹角一般大于70°, 这使得 ω_R 接近1且明显大于 $\omega_{T,N}$. Galileo和GPS的贡献因子可参考

Monterbruck等人^[4]的文章. BDS-3的SISRE贡献因子由表1给出.

不同卫星计算SISRE时各项误差有明显差异, 故需对(2)式展开进一步分析. SISRE的计算由两项构成: 第一项由径向轨道误差与钟差参数误差相加后的综合误差决定; 第二项由切平面上的轨道误差决定. 切平面轨道误差大小与轨道径向误差大小在同一量级时, 较小的 ω_{TN} 使得SISRE主要由第一项决定. 有论文指出定轨解算的钟差会吸收轨道残余误差^[16], 这使得轨道误差和钟差参数误差存在一定的相关性. 该相关性导致 $RMS(R+CLK) < RMS(R) + RMS(CLK)$. 甚至可能导致 $RMS(R+CLK) < RMS(R)$ 或 $RMS(R+CLK) < RMS(CLK)$. 该性质可显著降低卫星的SISRE. 因此从上述角度出发研究各项误差之间的关系以及对SISRE的贡献, 可有效反映各系统SISRE特征.

3 数据选择

对于GPS, 研究的卫星为BLOCK第二代卫星, 选择的导航信息为L/NAV. 对于Galileo, 选择的导航信息为F/NAV和I/NAV, 研究的卫星为FOC卫星. 选取的时间为2019年1月13日–1月20日连续的7 d. GPS和Galileo采用的导航电文来自MGEX全球监测站收集的多系统导航电文¹⁾. BDS-3的导航电文来自2019年10月6日–2019年10月13日期间的回收电文. 选择的频点为B3I.

德国波茨坦地理中心(GFZ)的精密轨道和精密钟差文件被选择为GPS和Galileo轨道和钟差的比较基准²⁾, 其轨道和钟差精度在2–3 cm的水平^[16]. BDS-3的境内精密轨道和境内精密钟差通过复现Zhou等人^[9–15]的工作得出, 轨道的激光检核精度^[12]和钟差测量残

差^[1]分别为10 cm和0.5 ns.

4 方法

事实上, 广播星历和钟差参数不能用于直接比较. 广播星历与精密轨道参考点不同, 需进行相位中心(PCO)修正. 钟差参数和精密钟差的基准不同, 需进行时间群延迟(Time Group Delay, TGD)、差分码偏差(Different Code Bias, DCB)、天线相位中心修正(Phase Center Offset, PCO)和系统时间差修正. 本节主要介绍如何对广播星历和钟差参数进行修正.

4.1 广播星历改正

考虑到广播星历的参考点为卫星的相位中心, 而事后精密轨道的参考点是卫星质心, 因此在对比广播星历和精密轨道前需按式(3)进行PCO修正.

$$\overline{X_C^{ITRS}} = \mathbf{A}(\mathbf{A}^T \overline{X_p^{ITRS}} + \text{PCO}), \quad (3)$$

其中, $\overline{X_C^{ITRS}}$ 为地固系下的卫星质心位置, $\mathbf{A}$ 为IGS参考系^[4]到地固参考系的旋转矩阵^[4], PCO 为IGS参考系下相位中心相对于质心的矢量. 在这里需要指出的是, 尽管IGS提供了导航卫星的天线相位中心修正方法和修正量, 但是并没有证据表明, IGS推荐的修正值被各导航系统的运控中心所采纳^[4]. 因此我们采用了下述渠道和方法来进行PCO修正.

对于GPS卫星的PCO修正, 最重要的修正是指向地心方向上的修正, 这是因为该方向的差异对SISRE的影响远大于其他正交方向. 因此文章采用Monterbruck推荐的方法对GPS卫星进行天线相位中心修正^[4], 即扣除各卫星广播星历与精密产品在径向上的平均差异. 该方法的提出有两个假设: (1) 各时刻广播星历质心与IGS质心在径向上的误差均值为0, (2) 卫星天线严格指向地心. 切向和法向^[17]的PCO修正采用了IGS提供的数据(igs14_2045).

对于Galileo FOC卫星, 采用官方的姿态信息进行修正可以更好地反映广播星历精度, 因此欧洲GNSS服务中心提供的官方PCO数据和姿态协议³⁾被应用于本次试验的Galileo广播星历和精密轨道的比较中. 在

表 1 BDS-3不同轨道类型的SISRE贡献因子

Table 1 BDS3 SISRE contribution factors of different orbital types

轨道类型	ω_R	ω_{TN}
BDS-3MEO	0.981	0.136
BDS-3GEO/IGSO	0.992	0.088
Galileo ^[4]	0.980	0.121
GPS ^[4]	0.980	0.143

1) <ftp://igs.gnsswhu.cn/pub/gnss/mgex/daily/rinex3/>

2) <ftp://igs.gnsswhu.cn/pub/gnss/products/mgex/>

3) <https://www.gsc-europa.eu/support-to-developers/galileo-iov-satellite-metadata>

按Galileo官方文件的数值对卫星进行PCO修正时, 考虑到选择的钟差参数为双频组合播发的钟差参数, 因此PCO也应为双频组合, 具体计算如下:

$$\overline{\text{PCO}}(f_1, f_2) = \frac{f_1^2 \times \text{PCO}(f_1) - f_2^2 \times \text{PCO}(f_2)}{f_1^2 - f_2^2}, \quad (4)$$

其中, $\overline{\text{PCO}}(f_1, f_2)$ 表示双频组合的PCO修正矢量, $\text{PCO}(f_1)$ 和 $\text{PCO}(f_2)$ 表示不同频点的PCO矢量, f_1, f_2 为播发频率. 在F/NAV中, 采用的频率是E1, E5a, I/NAV中, 采用的频率是E1, E5b. 实验表明, FOC卫星采用式(4)修正比其中任意单频PCO修正效果要好.

BDS-3卫星播发参考于B3频点相位中心的广播星历, 计算卫星广播星历误差采用卫星出厂标定的B3频点天线相位中心偏差, 姿态控制模式为名义姿态.

4.2 钟差参数改正

不同GNSS系统的接口控制文件指出用户在通过钟差参数计算卫星钟差时需考虑相对论修正, 然而在使用精密钟差进行定位时要进行相同的修正. 因此进行卫星钟差比较时, 基于广播星历的钟差无需进行相对论修正.

广播星历的钟差预报还需要考虑TGD修正或DCB修正. 对于BDS-3和GPS, 我们通过选择和广播电文钟差参考频点一致的精密钟差^[9-13, 17]来避免DCB或TGD修正. 对于Galileo, 有文章说明Galileo可以忽略E1-E5a和E1-E5b之间的TGD^[18], 因此通过选择F/NAV和I/NAV中的双频信号可避免TGD修正或者DCB修正.

对于GPS和Galileo, 如图1所示, 考虑到文章中采用的PCO修正方法和IGS的PCO修正方法并不一致, 这使得广播星历钟差参考点和IGS的钟差参考点存在差异, 该差异对SISRE的影响主要来自径向方向. 因此需按式(5)所示^[4, 5]对该差异进行修正.

$$\text{dclk}_{\text{PCO}} = \overline{\text{PCO}(z)}_{\text{IGS}} - \overline{\text{PCO}_{\text{bcast}}(z)}. \quad (5)$$

最后, 对于GPS和Galileo, 导航电文的时间基准与精密产品的时间基准存在差异, 该差异可通过式(6)进行修正^[4, 5]:

$$\text{dclk}_{\text{REF}} = -\frac{\sum_{i=1}^n (\text{clk}_{\text{bcast}}(i, t) + \text{dclk}_{\text{pco}}(i))}{n}, \quad (6)$$

dclk_{REF} 为不同时间系统的差异修正, 其中 $\text{clk}_{\text{bcast}}$ 为导

图1 不同PCO修正示意图以及对钟差影响示意图

Figure 1 Different PCO correction and influence on clock difference.

航电文计算的钟差, n 为GPS或者Galileo卫星数目, i 为卫星索引下标.

综上所述, 对于GPS和Galileo, 通过选取合适的频点, 各个时刻钟差参数误差可用式(7)表示:

$$\text{CLK}(t) = \text{clk}_{\text{bcast}}(t) + \text{dclk}_{\text{PCO}} + \text{dclk}_{\text{REF}} - \text{clk}_0(t). \quad (7)$$

对于BDS-3, 通过选择合适的频点, 各个时刻的钟差参数误差如式(8)所示:

$$\text{CLK}(t) = \text{clk}_{\text{bcast}}(t) - \text{clk}_0(t), \quad (8)$$

其中, $\text{clk}_0(t)$ 为精密钟差, $\text{CLK}(t)$ 为钟差参数误差.

5 试验结果与分析

5.1 Galileo统计情况与特征分析

5.1.1 统计结果与轨道误差特征

Galileo卫星I/NAV和F/NAV的统计情况在表2和3给出. I/NAV协议中Galileo FOC卫星径向误差的RMS平均值为0.10 m, 切线误差RMS的平均值为0.19 m, 法向误差RMS的平均值为0.17 m, 钟差参数误差RMS的平均值为0.21 m, 其轨道URE的平均值为0.10 m, SISRE的平均值为0.19 m. F/NAV协议中FOC卫星径向轨道误差的RMS平均值为0.11 m, 切线轨道误差的RMS平均值为0.19 m, 法向轨道误差的RMS平均值为0.17 m, 钟差参数误差的RMS平均值为0.14 m, 其广播星历轨道误差URE的平均值为0.12 m, SISRE的平均值为0.14 m.

图2给出了F/NAV各星的钟差参数误差图. 所有卫星的钟差参数误差存在明显的轨道周期, 说明10 min/次的播发频率可以很好地表达钟差参数中的轨道误差

表 2 7 d I/NAV比较结果(RMS) (单位: m)

Table 2 7 d I/NAV comparison results (RMS) (unit: m)

SATID	R	T	N	CLK	CLK+ R	SISRE
E01	0.11	0.17	0.18	0.15	0.11	0.12
E02	0.12	0.20	0.16	0.37	0.36	0.36
E03	0.07	0.20	0.19	0.12	0.13	0.13
E04	0.06	0.20	0.15	0.26	0.27	0.27
E05	0.07	0.19	0.17	0.13	0.12	0.13
E07	0.06	0.17	0.17	0.13	0.11	0.12
E08	0.07	0.19	0.17	0.40	0.41	0.40
E09	0.06	0.20	0.15	0.21	0.20	0.20
E21	0.11	0.16	0.18	0.31	0.29	0.28
E24	0.12	0.22	0.18	1.60	1.59	1.54
E25	0.13	0.18	0.16	0.17	0.11	0.11
E26	0.10	0.23	0.19	0.13	0.10	0.11
E27	0.11	0.19	0.19	0.18	0.15	0.15
E30	0.13	0.17	0.14	0.18	0.13	0.13
E31	0.11	0.17	0.19	0.15	0.09	0.10

表3 7 d F/NAV比较结果(RMS) (单位: m)

Table 3 7 d F/NAV comparison results (RMS) (unit: m)

SATID	R	T	N	CLK	CLK+ R	SISRE
E01	0.13	0.17	0.18	0.14	0.06	0.06
E02	0.14	0.19	0.16	0.18	0.17	0.15
E03	0.09	0.20	0.19	0.11	0.15	0.16
E04	0.08	0.20	0.15	0.09	0.13	0.13
E05	0.09	0.19	0.17	0.15	0.19	0.19
E07	0.09	0.17	0.17	0.09	0.08	0.08
E08	0.09	0.19	0.17	0.12	0.16	0.17
E09	0.09	0.20	0.15	0.12	0.15	0.15
E21	0.12	0.16	0.18	0.24	0.25	0.25
E24	0.13	0.22	0.18	0.12	0.08	0.09
E25	0.14	0.18	0.16	0.16	0.13	0.13
E26	0.12	0.23	0.19	0.18	0.23	0.23
E27	0.12	0.19	0.19	0.14	0.11	0.11
E30	0.14	0.17	0.14	0.16	0.08	0.08
E31	0.13	0.17	0.17	0.14	0.12	0.13

信息, 这充分发挥了Galileo氢原子钟短期稳定度高和
高频播发导航电文的优势。

图3为典型的FOC卫星广播星历轨道误差和钟差
参数误差图。从图中可以看出FOC卫星各方向的轨道误
差基本一致。通过第2节对SISRE的特征分析表明, Gali-

图 2 F/NAV钟差参数误差

Figure 2 F/NAV clock parameter error.

图 3 F/NAV E30广播星历误差

Figure 3 F/NAV E30 broadcast ephemeris errors.

leo卫星广播星历切向和法向误差对SISRE贡献较小。因
此Galileo的SISRE由径向轨道误差和钟差参数误差决
定。该结论与表2和3中最后两列的统计结果相符。

5.1.2 轨道径向误差和钟差参数误差的耦合性

在第2节中可以发现, 大部分Galileo卫星的广播星
历径向轨道误差与钟差参数误差之和小于两者中任意
一项。本节将对这一特性进行分析。

从图3的紫线和蓝线可以看出Galileo卫星轨道径
向误差和钟差参数误差的关系: 波动大小与周期基本
一致, 相位差180°。计算表明, 所有FOC卫星轨道径向

误差和钟差参数误差的相关性系数范围在 $-0.85 \sim -1$. 该性质在文章的后续部分将其称为广播星历径向轨道误差和钟差参数误差的耦合性.

图4给出了F/NAV中FOC卫星的线性负相关拟合系数图. 大部分卫星的线性负相关系数接近 -1 , 该拟合系数可反映FOC卫星径向轨道误差和钟差参数误差的耦合关系.

从第2节我们推出, 当径向轨道误差和钟差参数误差相关性很强时, 两者会相互抵消, 从而降低卫星的SISRE. 图5给出了E31的径向轨道误差和钟差参数误差以及两者相加后相互抵消的效果图. 径向轨道误差和钟差参数误差相互抵消, 使得综合误差分别为径向轨道误差的43%, 钟差参数误差的40%, 有效降低了该卫星的SISRE.

5.2 GPS统计情况与特征分析

5.2.1 不同GPS卫星的统计结果

由于在轨GPS卫星型号的多样性, 在评估时需按卫星型号分类评估. 图6–8分别为GPS卫星的SISRE、

钟差参数误差和轨道误差URE统计图. 其中, 咖啡色为GPS BLOCK IIA卫星, 蓝色为BLOCK IIF卫星, 浅黄色表示为搭载铯钟的BLOCK IIF卫星, 红色为BLOCK IIR卫星, 紫色为IIR-B卫星, 绿色为BLOCK IIR-M卫星. 从GPS官方统计结果可知, G28处于异常状态, 暂不参与统计分析⁴⁾.

不同GPS卫星SISRE的差异主要体现在卫星钟差参数误差上. 其中, IIF卫星的钟差参数误差小于IIR卫星, 且两者明显大于IIA卫星. 铷钟的钟差参数误差明显小于铯钟. 不同卫星的轨道误差URE差异较小, 轨道URE均在 $0.24 \sim 0.33$ m之间. 表4按卫星类型平均了上图中的统计结果.

事实上, GPS第三代卫星已经开始替换较旧的IIA和IIR卫星. 预计GPS整体的SISRE会随着GPS卫星的更新换代而降低.

5.2.2 不同GPS卫星SISRE特征分析

从表4可以看出, 对于较新的IIF和IIR卫星, 轨道径向误差和钟差参数误差大小基本一致, 这与Galileo类

图 4 F/NAV线性负相关系数拟合图

Figure 4 F/NAV linear negative correlation coefficient fitting.

4) <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/>

图 5 F/NAV E31 $R+CLK$ 误差图. (a) 轨道径向误差和钟差参数误差; (b) 轨道径向误差和钟差参数误差两者相互抵消后的误差图

Figure 5 F/NAV E31 broadcast ephemeris $R+CLK$ error. (a) Orbit radial error and clock difference error; (b) the error after orbit radial error plus clock difference error.

似. 图9分别给出了典型的IIF和IIR卫星的广播星历径向轨道误差和钟差参数误差以及两者相加后的效果图.

对于IIF卫星, 径向轨道误差与钟差参数误差大小相当, 且没有找到两者的耦合性, 这一特点与其他IIF卫星一致. 但是对于IIR卫星, 如图10所示. 两者展现出了较弱的耦合性(相比于Galileo), 但是这种耦合性被较大的钟差参数误差所掩盖, 故该关系只能抑制两者

误差之和被线性放大, 无法有效降低IIR卫星的SISRE.

通过公式(2)可知 $R+CLK$ 和SISRE之间的差反映的是广播星历轨道迹向和法向误差的贡献. 通过对比图11的灰柱和黄柱可以发现, GPS的切平面轨道误差会使GPS的SISRE进一步变大, 其中对IIF卫星的影响最为显著. 因此对于IIF卫星, 各项误差在计算SISRE时都不可忽视. 对于IIR系列的GPS卫星, 尽管径向轨道误差和钟差参数误差存在一定程度的耦合性, 但由于钟差误差较大, 导致其SISRE主要由较大的钟差参数误差决定. 对于IIA卫星和装有铯钟的GPS卫星, 较大的钟差参数误差完全掩盖了广播星历轨道误差, 成为计算其SISRE的决定性成分.

5.3 BDS-3统计情况与特征分析

5.3.1 统计结果轨道误差特征

表5为BDS-3卫星境内统计情况, 其中C38–C39为IGSO, C19–C37为MEO, C59为GEO. BDS-3卫星SISRE的平均值为0.39 m, 钟差参数误差RMS的平均值为0.35 m, 轨道误差URE的平均值为0.14 m. 这里存在59号星机动后快速恢复^[19]的异常情况. 排除该情况后, BDS-3卫星的SISRE为0.34 m. 钟差参数误差为0.35 m. 广播星历轨道误差URE为0.09 m, 优于GPS卫星和Galileo卫星. 在性能均衡方面, BDS-3卫星与Galileo的FOC卫星统计结果类似, 不同BDS-3卫星的SISRE大小基本一致.

图 6 不同GPS卫星SISRE统计结果

Figure 6 Statistics results of SISRE for different GPS satellites.

图 7 不同GPS卫星钟差参数误差统计结果

Figure 7 Statistics results of different clock parameter error for GPS broadcast ephemeris.

图 8 不同GPS卫星广播星历轨道误差URE统计结果

Figure 8 Statistics results of orbit URE for GPS broadcast ephemeris.

然而在轨道误差特征方面, BDS-3卫星与Galileo卫星有明显区别: BDS-3卫星径向轨道误差为0.06 m, 切平面轨道误差为0.41 m, 其径向轨道误差远低于切平面方向轨道误差, 这与各方向上轨道误差基本相同的Galileo FOC卫星有明显区别. 但是由于切平面方向的轨道误差在计算SISRE时被较小的 $\omega_{T,N}^2$ 所吸收, 使得BDS-3卫星的轨道误差URE低于Galileo卫星.

5.3.2 钟差参数误差与SISRE

通过对比表6中的SISRE和钟差参数误差可以发现, BDS-3卫星整体的钟差参数误差大于Galileo的FOC和GPS的BLOCK-IIF卫星. 其SISRE大小与钟差参数误差基本相等, 本节将针对这一特点进行分析.

不同于Galileo和GPS, BDS-3钟差测定依靠TWSTFT和ISL技术独立于定轨实现^[12-15], 该方法与定

表 4 不同类型GPS卫星统计结果(单位: m)

Table 4 Statistics result of different GPS satellite types (unit: m)

卫星类型	R	CLK	$R+CLK$	轨道URE	SISRE
IIA	0.20	0.88	0.87	0.29	0.88
IIF-Rb	0.16	0.22	0.27	0.27	0.35
IIF-Cs	0.23	1.25	1.27	0.33	1.27
IIR-A	0.11	0.42	0.43	0.24	0.48
IIR-B	0.13	0.31	0.32	0.27	0.40
IIR-M	0.12	0.41	0.41	0.27	0.47

图 9 G01(BLOCK-IIF) $R+CLK$ 误差. (a) 轨道径向误差和钟差参数误差图; (b) 轨道径向误差和钟差参数误差两者相互抵消后的效果图Figure 9 Error of $R+CLK$ for G01(BLOCK-IIF). (a) Orbit radial error and clock difference error; (b) the error after orbit radial error plus clock difference error.

轨相互独立, 经计算所有BDS-3卫星轨道径向误差和钟差参数误差的相关性系数小于0.1. 学术界对该方法进行研究较少, 相关理论与算法尚不完善. 国外GPS系统和Galileo系统对星地星间联合的卫星轨道和钟差测定多为仿真研究, 缺乏应用实践. 国内学者提出了采用法方程叠加或者观测量叠加的方式独立开展卫星轨道和钟差测定, 并进行了试验验证. 但是该算法未顾及卫星轨道和钟差的自洽处理, 未克服L波段星地双向时间同步设备时延不稳定波动和其他系统误差, 也未考虑Ka波段不同建链条件下的误差特征和差异性. 因此目前的BDS-3钟差测定误差较大, 严重影响了钟差参数精度.

图12和13给出了北斗三号MEO和IGSO星的轨道

图 10 GPS(BLOCK-IIRB) G22 $R+CLK$. (a) 轨道径向误差和钟差参数误差图; (b) 轨道径向误差和钟差参数误差两者相互抵消后的效果图Figure 10 $R+CLK$ for G22(BLOCK-IIRB). (a) Orbit radial error and clock difference error; (b) the error after orbit radial error plus clock difference error.

径向误差、轨道切平面误差、钟差参数误差以及钟差参数误差和SISRE关系的示意图. 从图中可发现卫星入境后短期内有明显的“毛刺”现象, 这可能与卫星入境期间不同钟差测定方法之间的切换处理有关^[8-14]. “毛刺”现象在其他MEO和IGSO卫星中也普遍存在. “毛刺”期间较大的钟差参数误差严重拉高了BDS-3卫星的入境期间SISRE.

通过第2节的推导可知, 当轨道误差较小, 而钟差参数误差较大时, 各时刻的 $SISRE \approx |c\Delta t|$. 图12(b)和13(b)给出了各时刻SISRE和钟差参数误差绝对值之间的关系, 两者相关系数在0.97附近, 其SISRE大小基本等于 $|c\Delta t|$. 因此如何提高BDS-3钟差参数精度是提高BDS-3卫星空间信号精度的关键.

6 结论

表6总结了上文的统计结果(排除异常的E24, C59). 除了异常的E24卫星, 统计结果与GPS, Galileo官方评估的结果相比基本一致^{4), 5)}. 在广播星历轨道误差URE方面, BDS-3卫星(0.08 m)略微低于Galileo卫星(0.10 m), 两者都低于GPS卫星(0.22 m). 在钟差参数误差方面, Galileo (0.13 m)优于BDS3 (0.35 m)优于GPS

5) <https://www.gsc-europa.eu/electronic-library/galileo-service-performance-reports>

图 11 不同GPS卫星的SISRE贡献项
Figure 11 SISRE contribution of different GPS satellites.

表 5 BDS-3卫星统计结果(单位: m)
Table 5 Statistics result of BDS-3 satellite (unit: m)

PRN	轨道径向误差	轨道切平面误差	轨道误差URE	CLK	SISRE
19	0.04	0.43	0.07	0.26	0.27
20	0.05	0.39	0.07	0.48	0.48
21	0.05	0.44	0.07	0.31	0.31
22	0.04	0.44	0.07	0.29	0.29
23	0.09	0.45	0.1	0.41	0.37
24	0.08	0.41	0.1	0.25	0.23
25	0.05	1.23	0.18	0.44	0.45
26	0.05	1.19	0.17	0.39	0.40
27	0.06	0.23	0.06	0.34	0.32
28	0.07	0.23	0.07	0.35	0.34
29	0.05	0.3	0.06	0.39	0.38
30	0.05	0.36	0.07	0.44	0.43
32	0.05	0.44	0.08	0.37	0.35
33	0.04	0.45	0.07	0.29	0.29
34	0.05	0.24	0.06	0.36	0.34
35	0.06	0.28	0.07	0.38	0.37
36	0.07	0.4	0.08	0.48	0.44
37	0.07	0.41	0.08	0.24	0.23
38	0.06	0.5	0.09	0.38	0.37
39	0.14	0.63	0.16	0.25	0.24
59	0.40	9.00	1.29	0.29	1.30

(0.49 m). 但是考虑到GPS现代化不断推进, 新的IIF卫星和IIIA卫星将取代旧的IIR和IIA卫星, GPS钟差参数误差可能会在未来小于0.27 m, 从而使GPS卫星的SISRE与BDS-3卫星相当甚至低于BDS-3卫星.

表 6 不同GNSS的SISRE统计结果(RMS) (单位: m)

Table 6 Statistics result of different GNSS (RMS) (unit: m)

GNSS系统	URE _{orb}	CLK	SISRE
GPS	IIA	0.29	0.88
	IIR-A	0.24	0.42
	IIR-B	0.27	0.31
	IIR-M	0.27	0.41
	IIF-CS	0.33	1.25
	IIF-Rb	0.27	0.22
Galileo	I/NAV	0.10	0.21
	F/NAV	0.12	0.14
BDS-3	0.09	0.35	0.35

图 12 BDS-3 C38卫星SISRE各项构成. (a) 轨道误差和钟差参数误差图; (b) SISRE和钟差参数的关系示意图

Figure 12 The composition of SISRE for BDS-3 C38. (a) Orbit error and clock difference error; (b) relation between the SISRE and clock difference error.

Galileo卫星通过10 min/次的播发策略,一方面充分发挥了PHM短期稳定度高的特点,另外一方面将广播星历径向轨道误差和钟差参数误差很好地耦合在一起,降低了SISRE两个主要贡献项(轨道径向误差、钟差参数误差)对SISRE的影响。

图 13 BDS-3 C28卫星SISRE各项构成. (a) 轨道误差和钟差参数误差图; (b) SISRE和钟差参数的关系示意图

Figure 13 The composition of SISRE for BDS-3 C28. (a) Orbit error and clock difference error; (b) relation between the SISRE and clock difference error.

对于GPS而言,不同型号卫星的SISRE特征明显不同.不同卫星的轨道误差URE基本相同,但是不同卫星的钟差参数误差和SISRE有较大差异,即将被淘汰的IIA卫星和装有铯钟的IIF卫星拉高了GPS整体的SISRE,较老GPS卫星的SISRE大小基本取决于卫星钟差参数误差. IIR卫星钟差参数误差和径向轨道误差存在较弱的耦合性,但是这种关系被较大的钟差参数误差掩盖.对于新型的IIF卫星,尽管两者精度相当,但是由于缺少径向轨道和钟差参数误差的耦合性,因此SISRE并没有得到降低。

BDS-3卫星展现出了与GPS和Galileo完全不同的SISRE特征.在轨道误差URE方面,尽管BDS-3卫星轨道迹向和法向误差大于Galileo,但是较小的径向轨道误差使其广播星历轨道误差URE低于Galileo,且远低于GPS. BDS-3卫星的钟差参数误差较大,其对SISRE的贡献远大于GPS和Galileo.因此如何降低BDS-3卫星的钟差参数误差是降低BDS-3卫星SISRE的关键。

参考文献

- 1 Montenbruck O, Steigenberger P, Prange L, et al. The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS)—Achievements, prospects and challenges. *Adv Space Res*, 2017, 59: 1671–1697
- 2 Gruber B. GPS program updates. In: *Proceedings of ION GNSS+2012*. Nashville, 2012. 521–537
- 3 Cooley B. GPS program updates. In: *Proceedings of ION GNSS+2013*. Nashville, 2013. 537–554
- 4 Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. Broadcast versus precise ephemerides: A multi-GNSS perspective. *GPS Solut*, 2015, 19: 321–333

- 5 Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. Multi-GNSS signal-in-space range error assessment—Methodology and results. *Adv Space Res*, 2018, 61: 3020–3038
- 6 Rodriguez R L. Galileo IOV status and results. In: Proceedings of ION GNSS+2013. Nashville, 2013. 3065–3093
- 7 Han D Q, Dang Y M, Pang H, et al. Evaluation Galileo broadcast ephemeris and its influence on positioning accuracy. *J Geodesy Geodyn*, 2018, 38: 69–73 [韩德强, 党亚民, 庞辉, 等. Galileo广播星历评估及其对定位精度的影响. *大地测量与地球动力学*, 2018, 38: 69–73]
- 8 Liu L, Zhu L F, Han C H, et al. The model of radio two-way time comparison between satellite and station and experimental analysis. *Chin Astron Astrophys*, 2009, 33: 431–439
- 9 Zhou S S, Hu X G, Liu L, et al. Applications of two-way satellite time and frequency transfer in the BeiDou navigation satellite system. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2016, 59: 109511
- 10 Tang C, Hu X, Zhou S, et al. Improvement of orbit determination accuracy for Beidou navigation satellite system with two-way satellite time frequency transfer. *Adv Space Res*, 2016, 58: 1390–1400
- 11 Zhou S S, Cao Y L, Zhou J H, et al. Positioning accuracy assessment for the 4GEO/5IGSO/2MEO constellation of COMPASS. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2012, 55: 2290–2299
- 12 Tang C, Hu X, Zhou S, et al. Initial results of centralized autonomous orbit determination of the new-generation BDS satellites with inter-satellite link measurements. *J Geod*, 2018, 92: 1155–1169
- 13 Pan J, Hu X, Zhou S, et al. Time synchronization of new-generation BDS satellites using inter-satellite link measurements. *Adv Space Res*, 2018, 61: 145–153
- 14 Chen J P, Hu X G, Tang C P, et al. SIS accuracy and service performance of the BDS-3 basic system. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 269511
- 15 Yang Y, Yang Y, Hu X, et al. Inter-satellite link enhanced orbit determination for BeiDou-3. *J Navigation*, 2020, 73: 115–130
- 16 Johnston G, Riddell A, Hausler G. The International GNSS Service. In: Teunissen P G, Montenbruck O, eds. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Berlin: Springer, 2017
- 17 Rebischung P, Schmid R. IGS14/igs14.atx: A new framework for the IGS products. In: Proceedings of the AGU Fall Meeting. San Francisco, 2016
- 18 Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P. Differential code bias estimation using multi-GNSS observations and global ionosphere maps. *Navigation*, 2014, 61: 191–201
- 19 Guo R, Zhou J H, Hu X G, et al. Precise orbit determination and rapid orbit recovery supported by time synchronization. *Adv Space Res*, 2015, 55: 2889–2898

Analysis of signal-in-space ranging error of GNSS navigation message

YANG JianHua^{1,2*}, TANG ChengPan^{1,3}, SONG YeZhi¹, HU XiaoGong¹,
ZHOU ShanShi¹ & CHANG ZhiQiao⁴

¹ Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

⁴ Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China

The signal-in-space ranging error (SISRE) is a major factor that affects the accuracy of positioning and timing. It describes the projection of the satellite-broadcast ephemeris error and clock difference error in the average direction from satellites to stations. In this study, the size and characteristics of the broadcast ephemeris user range error (URE), clock difference error, and SISRE are evaluated with respect to GPS, Galileo, and BDS-3. The results indicate that the SISREs of Galileo, GPS, and BDS-3 are 0.14, 0.49, and 0.35 m, respectively, the broadcast ephemeris UREs of Galileo, GPS, and BDS-3 are 0.14, 0.27, and 0.09 m, respectively, and the clock difference errors of Galileo, GPS, and BDS-3 are 0.14, 0.41, and 0.35 m, respectively. In case of Galileo, the radial orbit error and the clock difference error exhibit strong correlation. Both these errors cancel each other, and the SISRE associated with Galileo can be effectively reduced. Further, obvious differences can be observed with respect to the clock difference error and SISRE in case of different types of GPS satellites. The clock difference error and SISRE of GPS will gradually decrease with the upgradation of satellites. The SISRE of BDS-3 exhibits different characteristics when compared with those exhibited by the SISREs of GPS and Galileo. First, the radial error of BDS-3 is less correlated with the clock difference error, which exhibits poor self-consistency. Second, the BDS-3 satellite-broadcast ephemeris URE is small, whereas the clock difference error is large. Furthermore, the broadcast ephemeris URE associated with BDS-3 is lower than those associated with Galileo and GPS. However, the contribution of the clock difference error associated with BDS-3 to SISRE is considerably greater than those of the clock difference errors associated with GPS and Galileo to SISRE. In this study, the sizes and characteristics of the SISRE of BDS-3, Galileo, and GPS are compared, indicating that signal-in-space accuracy of BDS-3 can be improved by reducing the clock difference error.

signal-in-space ranging error (SISRE), GPS, Galileo, BDS-3

PACS: 95.10.Eg, 06.30.Ft, 91.10.Fc, 96.25.Vt

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0227](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0227)