



卫星导航空间信号用户测距误差评估方法

王尔申^{1,2,3}, 张晴¹, 雷虹⁴, 庞涛¹

- (1. 沈阳航空航天大学电子信息工程学院, 辽宁 沈阳 110136;
2. 交通运输行业水上智能交通行业重点实验室, 辽宁 大连 116026;
3. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191;
4. 电磁环境效应航空科技重点实验室, 辽宁 沈阳 110035)

摘要:空间信号(SIS)精度是卫星导航系统的基本性能之一,而卫星的用户测距误差(URE)是 SIS 精度的重要指标。基于轨道误差及钟差误差研究了 GPS(全球定位系统)和 BDS(北斗卫星导航系统)的 SIS URE 评估方法,并利用实测数据评估了 GPS 和 BDS 的 SIS 性能。验证结果表明:GPS 的 SIS URE 均优于 2.2 m, BDS SIS URE 除 GEO-01 和 GEO-04 卫星外均优于 2.5 m,符合 GPS 标准定位服务性能规范(2008 年)及北斗卫星导航系统公开服务性能规范(1.0 版)对 SIS URE 的指标要求。

关键词:空间信号;精度;用户测距误差;GPS;北斗卫星导航系统

中图分类号:TN391.9

文献标识码:A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016266

Evaluation method of satellite navigation signal-in-space user range error

WANG Ershen^{1,2,3}, ZHANG Qing¹, LEI Hong⁴, PANG Tao¹

1. School of Electronic and Information Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China
2. Key Laboratory of Intelligent Waterway Transport of Ministry of Transport, Dalian 116026, China
3. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China
4. Electromagnetic Environment Effect Top Laboratory of Aviation Industry, Shenyang 110035, China

Abstract: Signal-in-space(SIS) accuracy is one of the basic performance of satellite navigation system, and the user range error (URE) of satellite is often used as the important indicator of SIS accuracy. Based on the orbit error and clock error, the SIS URE evaluation methods of GPS and BDS were discussed. And the SIS performance of GPS and BDS were evaluated by using the measured data. The results show that all the SIS URE of GPS satellites are better than 2.2 m. In addition, except GEO-01 and GEO-04, the SIS URE of other BeiDou satellites are better than 2.5 m. And it conforms the indicators of GPS standard positioning service performance standard (GPS SPS PS, 2008) and BDS open service performance standard (BDS OS PS, 1.0).

Key words: signal-in-space, accuracy, user range error, GPS, BeiDou navigation satellite system

收稿日期:2016-08-08;修回日期:2016-10-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61571309, No.61101161);交通运输行业水上智能交通行业重点实验室开放课题;中央高校基本科研业务费资助项目(No.3132016317)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61571309, No.61101161), Open Program of Key Laboratory of Intelligent Waterway Transport of Ministry of Transport, The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.3132016317)

1 引言

作为全球四大卫星导航系统之一,BDS(BeiDou navigation satellite system,北斗卫星导航系统)已经进入全球化建设阶段,将面临 GPS、GLONASS、Galileo 等诸多导航系统的竞争。卫星导航系统的性能成为竞争的关键因素^[1-3]。SIS (signal-in-space,空间信号)精度是评价卫星导航系统服务性能的关键指标,主要通过卫星的 URE(user range error,用户测距误差)表示。

URE 综合反映控制段及空间段对精度的影响,同时也基本反映卫星导航系统的系统设计性能^[4,5]。SIS URE 指利用预报星历得到的卫星位置和钟差的预测值与实际值之差,反映了预报星历及钟差的精度,并最终影响导航用户的实时定位精度^[6,7]。卫星位置与钟差的实际值是指卫星在任意时刻的真实位置和钟差,虽然实际值无法真正获得,但可以通过精度更高的测量手段获得更精确的卫星位置和钟差作为“实际值”。诸多文献利用激光观测解算得到的精密星历和钟差来评估广播星历的 URE^[8,9]。该方法是一种独立于系统之外的评估方法,虽然结果可靠,却存在不能广泛布站及观测数据有限的缺陷。此外目前一些文献在 GPS SIS 误差评估分析方面成果丰富^[10,11],也有部分文献对 BDS 的广播星历精度等进行了必要分析^[5,7,12],但多数文献只对单一系统的广播星历 SIS URE 进行评估分析,缺少不同卫星导航系统之间评估结果的对比。

针对 GPS 和 BDS 的系统特点,以 GPS 标准定位服务性能标准(2008 年)(global positioning system standard positioning service performance standard, GPS SPS PS)和北斗卫星导航系统公开服务性能规范(1.0 版)(BeiDou navigation satellite system open service performance standard, BDS OS PS)为依据^[13,14],基于轨道误差及钟差误差研究了各自系统的分段式 SIS URE 评估模型。通过对广播星历和广播钟差与精度更高的事后精密星历和精密钟差进行比较,评估了 GPS 和 BDS 导航系统的 URE 精度。

2 SIS URE 计算模型

SIS URE 包含卫星轨道误差和钟差误差,可以用瞬时 URE 和置信度为 95%的 URE 表示^[7,11]。瞬时 URE 指在不包含用户接收机钟差和测量误差的情况下,期望伪距和该接收机测得的伪距之差。置信度为 95%的 URE

是对一定时间间隔内瞬时 URE 的统计值,一般采用 95%分位数对应的值。假设瞬时 URE 服从均值为零的正态分布,则置信度为 95%的 URE 与瞬时 URE 的标准差的关系为:

95%URE=URE(1s)×1.96 (1)

其中,URE(1s)为指定时间段和服务区域内瞬时 URE 的标准差。

由于不同卫星导航系统的星座组成各不相同,目前卫星导航服务领域内尚未形成统一的服务性能标准体系。GPS SPS PS(2008 年)及 BDS OS PS(1.0 版)分别对 SIS URE 指标参数进行了阐述,见表 1。

表 1 SIS URE 指标

系统	所属国家	URE 指标	资料来源
GPS	美国	≤7.8 m(单频 C/A 码, 95%置信度)	GPS SPS PS(2008 年)
BDS	中国	≤2.5 m(GEO/IGSO/MEO, 95%置信度)	BDS OS PS(1.0 版)

2.1 GPS SIS URE

星历误差可以用径向、切向和法向轨道误差向量表示^[13],则 GPS SIS URE 的分段式计算方法为:

SIS URE_{GPS}=((c×T)²+(0.980×R)²+(0.141×A)²+ (0.141×C)²-1.960×c×T×R)^{1/2} (2)

其中,c 为光速;T 为钟差误差;R 为径向轨道误差;A 为切向轨道误差;C 为法向轨道误差。

由式(2)可知计算 GPS SIS URE 的关键在于获取卫星的轨道误差和钟差误差。IGS(international GPS service,国际 GPS 服务)网站提供 GPS 广播星历和间隔为 15 min 的 GPS 精密星历。利用 GPS 接口控制文件中的相关模型对广播星历进行解算,可以得到卫星在 ECEF (earth centered earth fixed,地心地固坐标系)下不同时刻的卫星位置和钟差。由于卫星的真实位置无法真正获取,本文通过 IGS 事后精密星历来读取卫星轨道和钟差数据作为卫星的真实位置和钟差。为了得到与广播星历同一时刻的卫星位置与钟差数据,往往还需要对精密星历进行内插^[15]。将精密星历解算的卫星位置和钟差分别与相同时刻广播星历解算的卫星位置与钟差作差,即可得到卫星的钟差误差 T 及 ECEF 坐标系下的轨道误差。

ECEF 坐标系下的轨道误差经坐标转换即可得到径、切、法向误差,为:

ECl=R(θ)·ECEF (3)



$$\begin{bmatrix} R \\ A \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{r} \\ \vec{v} \\ \vec{c} \end{bmatrix} \cdot ECI \quad (4)$$

其中, ECI 表示卫星在惯性坐标系 (earth centered inertial, ECI) 下的轨道误差; $ECEF$ 为卫星在地心地固坐标系下的轨道误差; $R(\theta)$ 为旋转矩阵, 可通过式(5)~式(8)计算; $\vec{r}$ 为卫星和地心连线方向的径向单位向量; $\vec{v}$ 为卫星速度方向与径向所构成的平面上的切向单位向量; $\vec{c}$ 为垂直于轨道面的法向单位向量。

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\theta(T_u) = 2\pi(0.779\ 057\ 273\ 264\ 0 + 1.002\ 737\ 811\ 911\ 354\ 48T_u) \quad (6)$$

$$T_u = (\text{Julian UT1 data} - 2\ 451\ 545.0) \quad (7)$$

$$UT1 = UTC + (UT1 - UTC) \quad (8)$$

其中, θ 为天球历书原点和地球历书原点间的地球自转角; T_u 是与 J2000.0 的时间差; Julian date 表示儒略日, 是用连续数值标识时间的方法; UTC 为协调世界时, $UT1 - UTC$ 可从国际地球自转服务公报获取。通过计算的轨道误差, 结合钟差误差 T 可解算卫星的瞬时 URE 值, 继而由式(1)得到卫星的 95%URE。

2.2 BDS SIS URE

BDS 的空间段由 5 颗 GEO (geostationary earth orbit, 地球静止轨道) 卫星、27 颗 MEO (medium earth orbit, 中圆地球轨道) 卫星和 3 颗 IGSO (inclined geosynchronous satellite orbit, 倾斜地球同步轨道) 卫星组成^[14]。由于星座空间结构的差异, BDS SIS URE 的计算方法与 GPS 不同, 用式(9)、式(10)表示。

$$SIS\ URE_{BDS(MEO)} = \sqrt{(0.98R - c \times T)^2 + \frac{1}{54}(A^2 + C^2)} \quad (9)$$

$$SIS\ URE_{BDS(GEO,IGSO)} = \sqrt{(0.99R - c \times T)^2 + \frac{1}{127}(A^2 + C^2)} \quad (10)$$

其中, c 为光速; T 为钟差误差; R 为径向轨道误差; A 为切向轨道误差; C 为法向轨道误差。

BDS 广播星历的参考时间系统为北斗时, 精密星历的时间参考系统为 GPS 时, 在进行轨道和钟差比较分析前对时间系统进行统一。此外, BDS 采用了中国 2000 大地坐标系 (China geodetic coordinate system 2000, CGCS 2000), 而精密星历则是基于国际地球参考框架 (international terrestrial reference frame, ITRF)。CGCS2000 与 WGS 84 在

相同历元相同框架下, 在坐标系的实现精度范围内两者的坐标是一致的; 不同框架在同一历元下的点位坐标差异一般在 3~5 cm^[16]。因此本文对坐标参考框架的不一致性忽略不计。

3 实验验证与结果分析

3.1 GPS SIS URE 验证

为验证 GPS SIS URE 评估模型的正确性及有效性, 本文基于 2015 年 IGS 发布的 GPS 广播星历和精密星历求出每个采样点的径、切、法向误差及钟差误差。经统计分析, 得到其年均值和方差如图 1 所示。

图 1 中圆点为均值, 线段为方差。由图 1 可知, 在所有误差中, 径向精度最高, 不超过 1.5 m, 切向误差最大。事实上, 在 3 个方向的误差分量中, 径向误差对伪距测量影响最大, 切向和法向误差对用户定位的影响较小, 因此较高的径向精度对 SIS URE 有重要影响。

通过各误差的瞬时值, 利用式(2)计算得到 GPS 卫星的瞬时 SIS URE, 如图 2 所示。

考虑到 GPS 卫星较多, 每种型号仅选取了 2 颗卫星。由图 2 可知, GPS SIS URE 随时间呈不同程度的波动, 其稳定性与卫星类别有一定相关性。其中, BLOCK II A 系列的 PRN4 和 PRN32 波动最大, 其次是 BLOCK II R 系列的 PRN14。从一定程度上说明了随着卫星类型的不断升级, 卫星的性能也越来越稳定。

GPS SPS PS(2008)关于 GPS SIS URE 的指标关注的是正常操作不同数据龄期下的全球平均 URE (95%置信度), 因此最终计算得到置信度为 95%的 SIS URE, 如图 3 所示。

由图 3 可知, 2015 年 GPS 每颗卫星的 SIS URE 精度 (95%) 均小于 2.2 m, 符合 GPS SPS PS(2008 年)中 SIS URE 的指标。SIS URE 除了与卫星类型有关外, 还与卫星退役和换星等因素有关。PRN4、PRN8、PRN10 和 PRN26 在 2015 年进行了换星, 由于退役卫星没有立刻被替换卫星代替, 这些轨道在一段时间内无在轨卫星。此外, 与正常运行状态相比, 卫星在即将退役和刚发射不久期间性能更不稳定。因此可以认为除了卫星类型这一因素外, 图 3 中 PRN4、PRN8、PRN10 和 PRN26 的 URE 较大主要是换星导致。

3.2 BDS SIS URE 验证

通过对采集到的 2015 年广播星历和精密星历进行处理得到 BDS 的径、切、法向误差及钟差误差的年均值和方差 (圆点为均值, 线段为方差), 如图 4 所示。

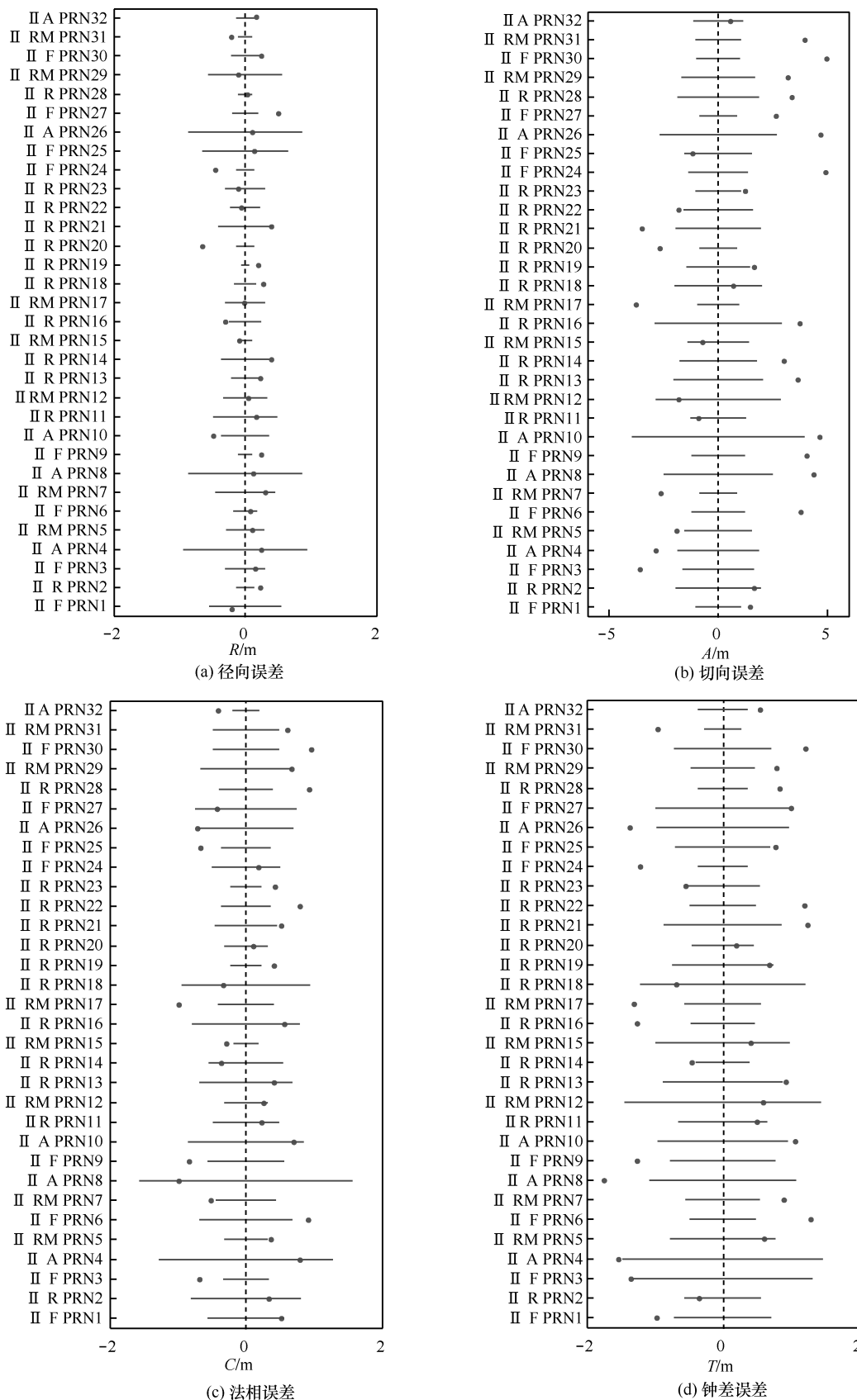


图1 GPS SIS 轨道及钟差误差(年统计值)

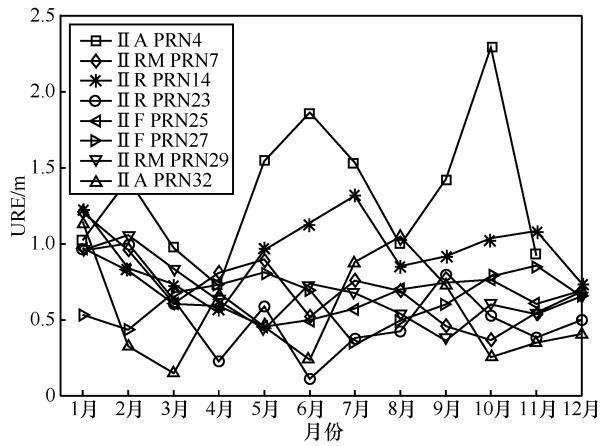


图2 GPS SIS URE 评估结果(月统计值)

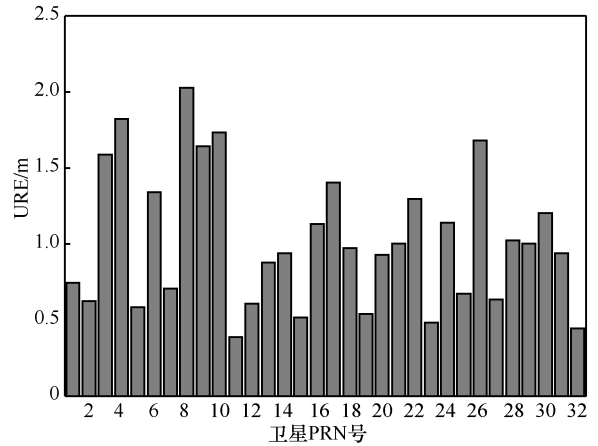
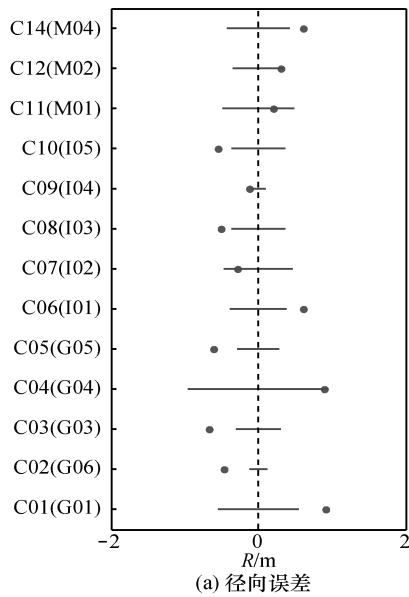
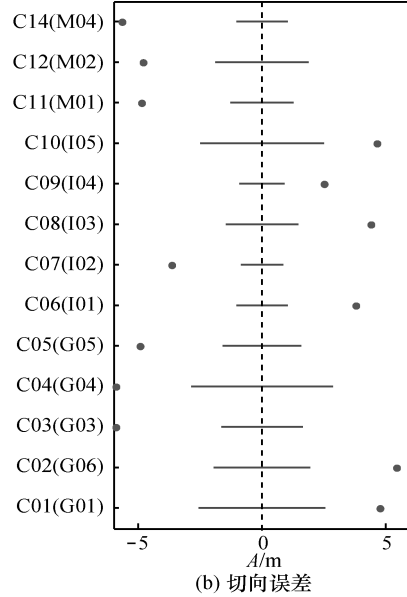


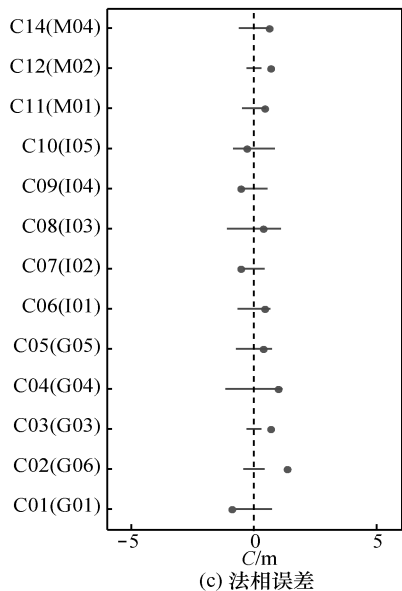
图3 GPS SIS URE(置信度 95%)



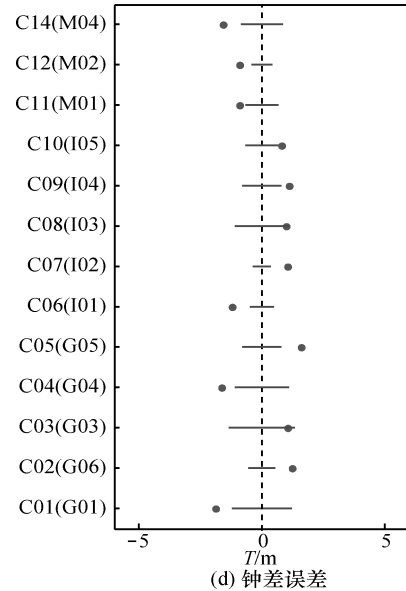
(a) 径向误差



(b) 切向误差



(c) 法相误差



(d) 钟差误差

图4 BDS SIS 轨道及钟差误差(年统计值)

由图 4 可知, BDS 卫星的切向误差最大, 大部分在 4 m 以上, 径向误差最小。从 3 类卫星的横向比较来看, 由于卫星星座结构较差、卫星本身相对于地面的几何变化较小等原因, GEO 的轨道误差和钟差误差略大于 IGSO 和 MEO。

通过式(9)、式(10)对各误差的瞬时值进行计算, 得到 BDS3 类卫星的瞬时 SIS URE 结果, 如图 5 所示。

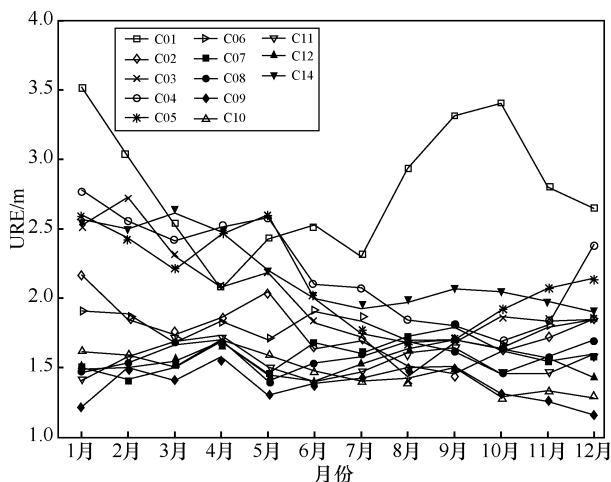


图 5 BDS SIS URE 评估结果(月统计值)

由图 5 可知, 卫星 C01(GEO)、C03(GEO)、C04(GEO)、C05(GEO)和 C14(MEO)的 SIS URE 随时间的波动较为明显, 与其他卫星相比稳定性较差。

BDS OS PS(1.0)关注的同样是全球平均下的 BDS SIS URE(95%置信度), 置信度为 95%的 BDS SIS URE 结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 除去 C01(GEO-1)和 C04(GEO-4)以外, 其余卫星的 SIS URE 均小于 2.5 m, 符合 BDS SIS URE 指

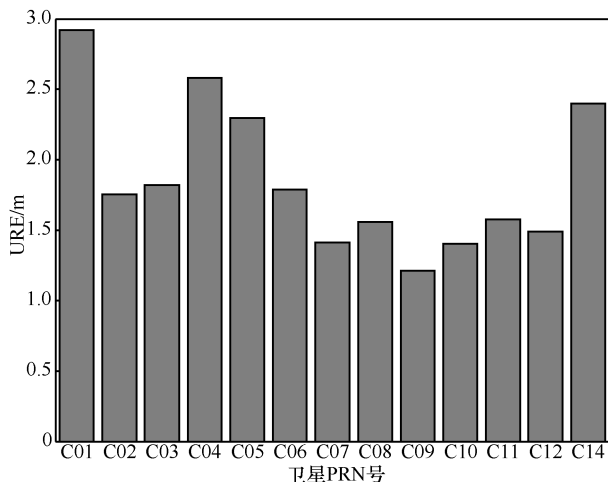


图 6 BDS SIS URE(置信度 95%)

标。由于 GEO-1 和 GEO-4 位于亚太地区上空最东边, 而 BDS 系统尚未在此处设立监测站, 这两颗卫星不符合指标要求的主要原因是几何观测条件不够好导致广播星历和精密星历定轨不够高。此外由于 C13 号卫星 2014 年出现故障之后一直没有修复, 本文并未统计 C13 号卫星的 SIS URE。

通过对比还可以发现, 从整体上来说 GEO(C01~C05)卫星的 URE 最大, IGSO(C06~C10)卫星的 URE 最小。GEO 较弱的几何观测结构导致解算的轨道误差和钟差误差较大, 从而影响 GEO 卫星的 URE; 而由于几何观测结构较好, 广播星历更新频率较高等原因, IGSO 卫星的 URE 较小; 对于 MEO 卫星来说, 虽然在亚太地区其观测结构与 IGSO 相当甚至更好, 但由于目前的注入站都位于中国境内, MEO 卫星出境后主要靠外推实现导航星历的更新, 且精度随外推时间的增加而下降。因此 MEO 卫星的精度稍差于 IGSO。

4 结束语

本文基于研究的分段式 GPS 和 BDS SIS URE 评估模型, 利用 2015 年 IGS 提供的实测数据评估了 GPS 和 BDS 的 SIS URE 性能。结果表明: GPS SIS URE 均优于 2.2 m, BDS SIS URE 除 GEO-01 和 GEO-04 卫星外均优于 2.5 m, 符合 GPS SPS PS(2008)及 BDS OS PS(1.0)对 SIS URE 的指标要求, 验证了本文研究的评估方法的有效性。本文还对 BDS3 类卫星的 URE 进行了对比, 从验证结果看出 GEO 卫星的 URE 最大, IGSO 卫星的 URE 最小, MEO 卫星的 URE 稍大于 IGSO。

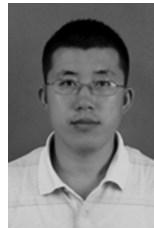
参考文献:

- [1] 李作虎. 卫星导航系统性能监测及评估方法研究 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2012.
LI Z H. Research on monitoring and assessment of satellite navigation system performance [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2012.
- [2] YU L, ZHAO G P, ALICE A, et al. How reliable is satellite navigation for aviation? Checking availability properties with probabilistic verification [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015(144): 95-116.
- [3] 郝才勇, 刘恒. 采用空间稀疏性的单星无源定位方法 [J]. 电信科学, 2016, 32(4): 65-69.
HAO C Y, LIU H. Method of single satellite passive geolocation using spatial sparsity [J]. Telecommunications Science, 2016, 32(4): 65-69.



- [4] WALTER T, BLANCH J, ENGE P. Evaluation of signal in space error bounds to support aviation integrity [J]. *Bmc Infectious Diseases*, 2010, 57(2): 11-21.
- [5] 张清华, 隋立芬, 贾小林, 等. 北斗卫星导航系统空间信号误差统计分析[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2014, 39(3): 271-274.
ZHANG Q H, SUI L F, JIA X L, et al. SIS error statistical analysis of BeiDou satellite navigation system [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39 (3): 271-274.
- [6] SUN S, WANG Z P. Signal-in-space accuracy research of GPS/BDS in china region [C]//2016 China Satellite Navigation Conference (CSNC) on Lecture Notes in Electrical Engineering, May 18-20, 2016, Changsha, China. Berlin: Springer, 2016: 235-245.
- [7] 胡志刚. 北斗卫星导航系统性能评估理论与试验验证[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
HU Z G. BeiDou navigation satellite system performance assessment theory and experimental verification[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [8] 秦显平, 杨元喜, 焦文海, 等. 利用 SLR 和伪距资料确定导航卫星钟差[J]. *测绘学报*, 2004, 33(3): 205-209.
QIN X P, YANG Y X, JIAO W H, et al. Determination of navigation satellite clock bias using SLR and pseudorange data [J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2004, 33(3): 205-209.
- [9] 路晓峰, 贾小林, 杨志强. 利用 SLR 和 GPS 双频相位平滑伪距资料测定导航卫星钟差[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2008, 33(3): 237-240.
LU X F, JIA X L, YANG Z Q. Determination of navigation satellite clock bias using SLR and GPS dual frequency phase-smoothed pseudo-range sata[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(3): 237-240.
- [10] COHENOUR C, GRASS F R. GPS orbit and clock error distributions[J]. *Navigation*, 2011, 58(1): 17-28.
- [11] HENG L, GAO X X, WALTER T, et al. Statistical characterization of GPS signal-in-space errors [C]//Institute of Navigation-International Technical Meeting 2011 (ION ITM 2011), January 24-26, 2011, San Diego, CA, USA. [S.l.:s.n.], 2011: 312-319.
- [12] 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.
LIU W K, REN J, ZENG Q, 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.
- [13] Global positioning system standard positioning service performance standard: DoD. 2030-6000:2008[S/OL]. (2008-09-28) [2016-07-20]. <http://www.gps.gov/technical/ps/2008-SPS-performance-standard.pdf>.
- [14] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统公开服务性能规范 (1.0 版): BDS-OS-PS-1.0:2013[S/OL]. (2013-12-28) [2016-07-20]. <http://www.beidou.gov.cn/2016/06/16/20160616104e9f657fae430097dbab52dd6b94bf>.
CSNO. BeiDou navigation satellite system open service performance standard (version1.0.): BDS-OS-PS-1.0:2013[S/OL]. (2013-12-28) [2016-07-20]. <http://www.beidou.gov.cn/attach/2013/12/26/20131226298ff2928cc34e45b4714a6ac0e14a1c.pdf>.
- [15] 肖琴琴. 广播星历参数及拟合算法性能研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2013.
XIAO Q Q. The performance study of broadcast ephemeris parameters and fitting method [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [16] 彭小强, 高井祥, 王坚. WGS84 和 CGCS2000 坐标转换研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2015, 35(2): 219-221.
PENG X Q, GAO J X, WANG J. Research of the coordinate conversion between WGS84 and CGCS2000[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2015, 35(2): 219-221.

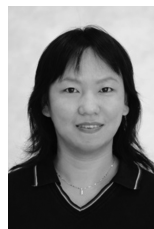
[作者简介]



王尔申(1980-),男,沈阳航空航天大学副教授,主要研究方向为卫星导航、无线通信。



张晴(1991-),女,现就职于沈阳航空航天大学,主要研究方向为卫星导航定位技术。



雷虹(1965-),女,沈阳航空航天大学研究员,主要研究方向为电磁兼容。

庞涛(1976-),女,博士,沈阳航空航天大学讲师,主要研究方向为人工智能。