

引用格式:王尔申,王世明,雷虹,等. GNSS 空间信号精度评估方法[J]. 电光与控制,2018,25(6):78-82. WANG E S, WANG S M, LEI H, et al. On methods for evaluation of GNSS signal-in-space accuracy[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(6):78-82.

GNSS 空间信号精度评估方法

王尔申^{1a,1b}, 王世明^{1a}, 雷虹², 庞涛^{1a}, 曲萍萍^{1a}, 张晴^{1a}

(1. 沈阳航空航天大学, a. 电子信息工程学院; b. 辽宁省通用航空重点实验室, 沈阳 110136;

2. 沈阳飞机设计研究所电磁环境效应航空科技重点实验室, 沈阳 110035)

摘要: 空间信号(SIS)精度是卫星导航系统的性能之一。针对目前精度评估模型存在的问题,提出了分段式 SIS 用户测距误差(URE)评估模型,并研究了 SIS 用户测速误差(URRE)、用户测加速度误差(URAE)评估模型,利用广播星历和精密星历评估了 GPS 和 BDS 的 SIS 精度性能。结果表明,除 BDS C02 卫星的 URE 以及 GPS PRN10 卫星的 URAE 略大以外,其余 GPS 和 BDS 卫星的 SIS URE,URRE 和 URAE 均符合各自系统的指标,验证了所提精度评估方法的有效性。

关键词: GNSS; 北斗卫星导航系统; 空间信号; 精度; 性能评估

中图分类号: TN391.9 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.06.017

On Methods for Evaluation of GNSS Signal-in-Space Accuracy

WANG Er-shen^{1a,1b}, WANG Shi-ming^{1a}, LEI Hong², PANG Tao^{1a}, QU Ping-ping^{1a}, ZHANG Qing^{1a}

(1. Shenyang Aerospace University, a. School of Electronic and Information Engineering; b. Liaoning General Aviation Key Laboratory, Shenyang 110136, China; 2. Electromagnetic Environment Effect Top Laboratory of Aviation Industry,

Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract: Signal-in-Space (SIS) accuracy is one of the basic performances of satellite navigation system. Considering the disadvantages of existing accuracy calculation models, we proposed a segmented SIS User Range Error (URE) evaluation model, carried out a study on the models for evaluation of SIS User Range Rate Error (URRE) and the User Range Acceleration Error (URAE), and used the broadcast ephemeris and precise ephemeris to evaluate the SIS accuracy of GPS and BDS. The results show that; the URE of BDS C02 and the URAE of GPS PRN10 are relatively larger, while the SIS URE, URRE and URAE of the other GPS and BDS satellites all conform to their own indicators. It verified the effectiveness of the proposed accuracy evaluation method.

Key words: GNSS; BeiDou Navigation Satellite System (BDS); signal in space; accuracy; performance evaluation

0 引言

空间信号(SIS)精度主要包括用户测距误差(URE)、用户测速误差(URRE)、用户测加速度误差(URAE)和世界协调时偏移误差(UTC OE)4个参数^[1-4]。URE是在不包含测量误差和接收机钟差的情况下,接收机和卫星之间的真实距离与接收机实际测量的伪距之差^[5-7]。诸多文献采用格网法计算卫星在特定瞬间的

URE,由于该方法的计算量较大,所以其又被称为“暴力法”。此外,可以利用精度更高的激光角反射器来观测导航卫星得到精密星历,评估广播星历的 URE,使用该方法得到的伪距具有更高的精度和可靠性,但存在不能广泛布站以及观测数据有限等问题^[8-9]。

本文以 GPS 和 BDS 为例,针对格网法和激光观测测量法存在的问题,提出了一种基于轨道误差及钟差误差的分段式 SIS URE 评估模型,分别对 GPS 和 BDS 的 URE 进行了计算。在此基础上,本文采用交叠式 Allan 方差法评估了 GPS 和 BDS 的 URRE 和 URAE。

1 SIS URE 精度

SIS URE 是指卫星位置和钟差的实际值与利用预报导航星历得到的预测值之差。由于卫星在某一个时刻的真实位置和钟差是无法准确得到的,通常将事后精

收稿日期:2017-06-26

修回日期:2018-03-27

基金项目:国家自然科学基金(61571309,61101161);辽宁省“百千万人才工程”项目;辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LR2016069);辽宁省教育厅项目(L201716);中央高校基本科研业务费专项资金(3132016317)

作者简介:王尔申(1980—),男,辽宁辽阳人,博士,副教授,研究方向为卫星导航、接收机信号处理算法及航空电子技术。

密星历中取得的卫星位置和钟差数据作为实际值^[10]。

通常用瞬时 URE 和置信度为 95% 的 URE 表示 SIS URE^[11-12]。假设瞬时 $U_{RE} \sim N(0, \sigma^2)$, 则在 95% 置信度下的 URE 与瞬时 URE 的标准差的关系为

$$95\% U_{RE} = U_{RE}(1s) \times 1.96 \quad (1)$$

式中, $U_{RE}(1s)$ 为指定时间段和服务区域内瞬时 URE 的标准差。

1.1 SIS URE 评估模型

将 URE 分成广播星历误差和预报钟差误差两部分, 统计卫星轨道的 R, A, C 和 T , 由此得到 SIS URE 的分段式算式为

$$S_{U_{GPS}} = \sqrt{(0.98R - c \times T)^2 + 0.141^2(A^2 + C^2)} \quad (2)$$

$$S_{U_{BDS(MDI)}} = \sqrt{(0.98R - c \times T)^2 + \frac{1}{54}(A^2 + C^2)} \quad (3)$$

$$S_{U_{BDS(GEO, IGSO)}} = \sqrt{(0.99R - c \times T)^2 + \frac{1}{127}(A^2 + C^2)} \quad (4)$$

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

从上述算式可以看出, 获取卫星的轨道以及钟差误差是计算 SIS URE 的关键, 具体步骤如下。

1) 广播星历解析: 通过广播星历得到卫星的轨道和钟差参数, 将 GPS 和 BDS 广播星历参数分别代入对应接口控制说明文档中计算卫星轨道和钟差的算式里, 得到 GPS 和 BDS 的广播星历和钟差, 其中, GPS 的坐标是在地心地固 (ECEF) 坐标系下的, BDS 是在 CGCS2000 坐标系下的。

2) 卫星的真实位置获取: BDS 和 GPS 在轨卫星的真实位置和钟差数据可以通过事后精密星历得到。由于官方只提供间隔 15 min 和 5 min 的精密星历, 无法满足间隔 30 s 的采样率, 因此需要对精密星历进行内插来得到与广播星历对应时间的卫星位置和钟差数据。考虑到插值节点增多会引起龙格现象, 并考虑计算量和精度等因素, 本文选取 10 阶拉格朗日滑动式分段内插, 并取得插节点的前 5 组和后 5 组精密星历数据作为差值区间, 表达式为

$$y(t) = \sum_{j=0}^n \left[\prod_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^n \left(\frac{t - t_i}{t_j - t_i} \right) \right] y_j \quad (5)$$

式中: t 为待插值时间节点; $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ 为 $n+1$ 个插值时间节点; $y_0, y_1, y_2, \dots, y_n$ 是与 $n+1$ 个插值时间点对应的精密星历轨道误差和钟差分量。

3) SIS 轨道误差及钟差误差计算: 将解算精密星历数据得到的卫星位置、钟差与对应时刻解算的广播星历得到的数据做差, 即可得到 GPS 和 BDS 在相应轨道坐标系下的钟差误差 T 以及轨道误差。在此基础上可得到轨道的径向、切向和法向误差为

$$E_{CI_{GPS}} = \mathbf{R}(\theta) \cdot E_{CEF} \quad (6)$$

$$E_{CI_{BDS}} = \mathbf{R}(\theta) \cdot C_{GCS2000} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{A} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{v} \\ \mathbf{c} \end{bmatrix} \cdot E_{CI} \quad (8)$$

式中: E_{CI} 表示在惯性坐标系下卫星的轨道误差; E_{CEF} 为在地心地固坐标系下卫星的轨道误差; $\mathbf{R}(\theta)$ 为旋转矩阵; \mathbf{r} 为卫星到地心连线方向单位向量; \mathbf{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; \mathbf{c} 为垂直于轨道面的法向单位向量。

4) SIS URE 计算: 根据式(2)~式(4), 利用步骤3)中得到的误差数据来计算 GPS 和 BDS 在指定时间段的 URE 值。

1.2 SIS URE 数据处理与结果分析

1) 广播星历解析。

国际 GPS 服务中心 (IGS) 提供数据播发 GPS 和 BDS 的间隔为 30 s 的 RENIX 格式广播星历。将 2015 年 BDS 和 GPS 广播星历中得到的星历参数分别代入 GPS 和 BDS 接口控制文件的相关模型中, 可计算得到 GPS 以及 BDS 在相应坐标系下的轨道位置和钟差。

2) 卫星的真实位置获取。

GPS 的精密星历可以通过美国国家地理空间情报局 (NGA) (时间间隔为 5 min) 和 IGS (时间间隔为 15 min) 获取。由于目前 NGA 尚未提供 BDS 的精密星历, BDS 的精密星历通过 IGS 获取 (时间间隔为 15 min), IGS 提供的精密星历定位精度可达到 5 cm 左右。本文对 GPS 和 BDS 分别采用 2015 年 NGA 和 IGS 提供的精密星历, 并利用式(5)分别处理卫星的轨道位置和钟差, 获得与广播星历对应时刻的卫星真实位置和钟差。

3) SIS 轨道误差及钟差误差计算。

可以直接通过上述方法来计算 GPS 在 2015 年的 SIS 的径向、切向、法向轨道误差和钟差误差。在计算轨道误差和钟差误差时需要解决以下几个问题。

① 时间系统不一致。BDS 的广播星历时间基准为 BDS 时 (BDT), 而精密星历则采用 GPS 时 (GPST), 因此在计算 BDS SIS URE 前必须对时间系统进行统一。BDT 与 GPST 的转换关系为

$$G_{PST} - B_{DT} = 14(s) \quad (9)$$

② 轨道参考框架不一致。BDS 采用北斗坐标系 (BeiDou Coordinate System, BDCS), 与中国大地坐标系 CGCS2000 定义一致, 而 IGS 提供的是基于国际地球参考框架 (ITRF) 的精密星 (与 WGS-84 基本一致)。研究表明, 在相同历元、相同框架下的两个坐标系坐标基

本一致;两坐标系坐标在相同历元、不同框架下有约为 3~5 cm 的坐标差异,相比于米级的 URE,可以忽略不计^[13]。

③ 剔除计算过程中的明显粗差。在对广播星历和精密星历进行处理时,需要剔除如广播星历中明显的粗差,例如广播星历中卫星轨道数据标识为“不健康”、精密星历中出现的不正常的坐标和钟差等。此外,在计算卫星位置过程中会有一些标识为“健康”的卫星,但对其计算得到的结果可能会包含粗差,这些也需要剔除。

4) SIS URE 计算。根据 SIS 轨道误差及钟差误差计算中得到的径向、切向、法向误差及钟差误差的瞬时值,结合式(2)~式(4)计算得到 GPS 和 BDS 每周的瞬时 SIS URE 均值,分别如图 1 和 2 所示。

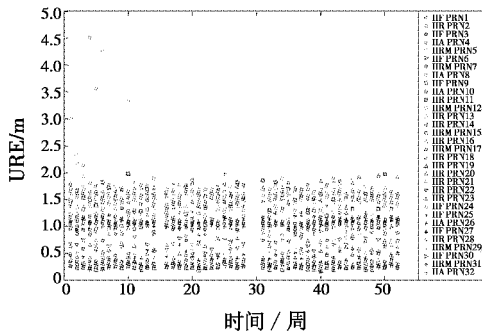


图 1 GPS 瞬时 SIS URE 评估结果(周统计值)

Fig. 1 Evaluation results of GPS instant SIS URE(week statistic)

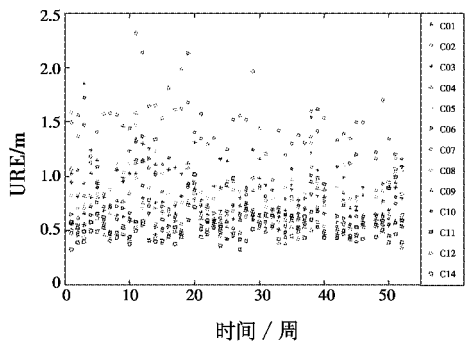


图 2 BDS 瞬时 SIS URE 评估结果(周统计值)

Fig. 2 Evaluation results of BDS instant SIS URE(week statistic)

由图 1 可知,2015 年 GPS 在轨卫星的 SIS URE 的最大值低于 5 m,低于 GPS SPS PS(2008)所规定的 URE 的最大值 7.8 m,且除 PRN8 在某几周的 URE 明显高于其他卫星外,其余时间上卫星的瞬时 URE 基本上随时间平稳分布,且基本不超过 2 m。从图 1 中还可以看出,随着 GPS 卫星的不断升级,其所提供的定位精度也越来越高,可以看到,发射较早卫星的 URE 值普遍小于发射较晚卫星的 URE 值。由图 2 可知,所有 BDS 在轨卫星的瞬时 URE 值均小于 2.5 m,且基本分

布平稳。另外,从图 2 中还可以看出,BDS 3 类卫星中 MEO 卫星的稳定性相较于其他卫星最好。

相比于瞬时 SIS URE,卫星在置信度 95% 下的 URE 更受 GPS 和 BDS 关注。对瞬时 URE 进行统计和计算,得到两个系统在置信度为 95% 时的 SIS URE 分别如图 3 和 4 所示。

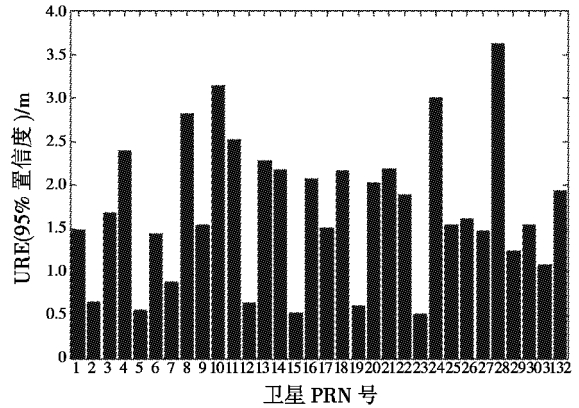


图 3 GPS SIS URE(95% 置信度)

Fig. 3 GPS SIS URE(95% confidence)

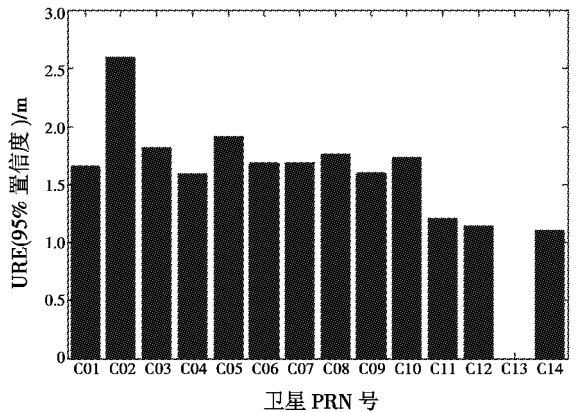


图 4 BDS SIS URE(95% 置信度)

Fig. 4 BDS SIS URE(95% confidence)

由图 3 可知,2015 年 GPS 每颗卫星在 95% 置信度下的 SIS URE 精度均不超过 4 m,并且除 PRN8, PRN10, PRN24 和 PRN28 外,其余卫星的 SIS URE 不超过 2.5 m,符合 GPS SPS PS(2008)中的指标,也验证了分段式 SIS URE 评估方法用于 GPS 系统的有效性。由图 4 可以看出,除 C13 卫星的 URE 无法统计外,2015 年 BDS 每颗卫星在 95% 置信度下的 SIS URE 精度都小于 3 m,另外,除 C02 卫星外,其余卫星均小于 2 m,符合 BDS-OS-PS-1.0 中的指标。从图 4 中还可以发现,因为 MEO 卫星的 URE 低于 GEO 和 IGSO,说明其 SIS URE 精度高于其他两类卫星。

2 SIS URRE 和 URAE 精度

卫星导航系统的 URRE 和 URAE 分别定义为瞬时

URE 的一阶和二阶时间导数^[4]。

2.1 SIS URRE 和 URAE 评估模型

大量研究表明,卫星时钟的不稳定会引起较大的 URRE 和 URAE 误差,时钟的不稳定性将直接反映在 URRE 和 URAE 中,其误差可达到轨道误差的 10 倍以上。常用的计算卫星 SIS URRE 和 SIS URAE 有差分法和载波法,由于这两种传统方法均存在一定局限性,高稳定度振荡器的频率稳定度的时域表征目前均采用 Allan 方差,本文采用交叠式 Allan 方差法来评估卫星的 URRE 和 URAE。

Allan 方差法的原理:假设系统的采样周期为 τ ,对其进行连续采样,其中, $X(i), i = 1, 2, 3, \dots, N$ 为采样后的 N 个数据点。对其按每 M 个点进行分组,则每段时间内各点的均值序列 $Y(k)$ 为

$$Y(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=k}^{k+M-1} X(i) \quad k = 1, 2, \dots, N - M + 1 \quad (10)$$

从而差值序列 $D(k)$ 为

$$D(k) = Y(k+M) - Y(k) \quad k = 1, 2, \dots, N - 2M + 1 \quad (11)$$

交叠式 Allan 方差表达式为

$$\tau = \frac{1}{2} \langle D(k)^2 \rangle \quad k = 1, 2, \dots, N - M + 1 \quad (12)$$

式中, $\langle \rangle$ 表示求取均值。

将计算 SIS URE 时得到的卫星钟差误差作为初始样本 $X(i)$ 代入式(10)~(12),得到 $D(k)$ 和 τ ,求得的 τ 即为 SIS URRE。同理,将 $D(k)$ 作为初始样本代入式(10)~(12),计算相应的 τ ,即为 SIS URAE。

2.2 SIS URRE 和 URAE 评估与结果分析

本文以 SIS URE 计算过程得到的实测钟差误差作为初始样本,在剔除不健康的 SIS 后,利用 2.1 节所述评估模型,分别对 2015 年 GPS 和 BDS 的 SIS URRE 进行评估分析,得到 GPS 和 BDS 的 SIS URRE(95% 置信度),分别如图 5 和 6 所示。

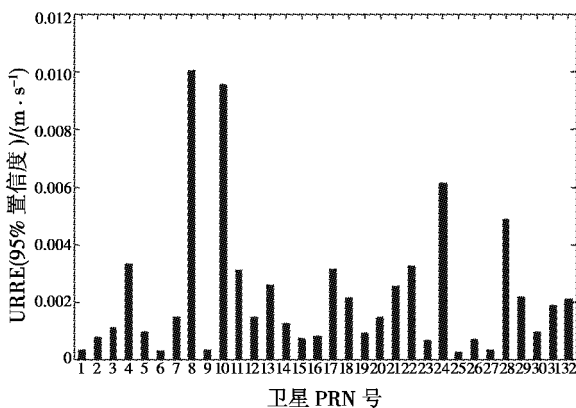


图5 GPS SIS URRE(95% 置信度)
Fig.5 GPS SIS URRE(95% confidence)

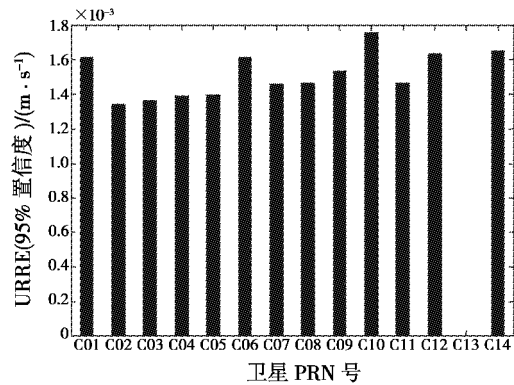


图6 BDS SIS URRE(95% 置信度)
Fig.6 BDS SIS URRE(95% confidence)

由图 5 可知,在 95% 置信度下除 PRN8, PRN10 和 PRN24 卫星的 SIS URRE 大于 0.006 m/s, PRN28 的略大于 0.004 m/s 外,其余卫星的均小于 0.004 m/s,满足 GPS SPS PS(2008)中 0.006 m/s 的指标。由图 6 可知,BDS 可见卫星中在 95% 置信度下除 C13 卫星外,其余卫星的均小于 0.0018 m/s,满足 BDS-OS-PS-1.0 中 0.006 m/s 的指标。

与 URRE 类似,以钟差的差值序列为初始样本,代入到 2.1 节所述评估模型中,得到 2015 年 GPS 和 BDS 卫星的 SIS URAE 精度(95% 置信度),如图 7 和 8 所示。

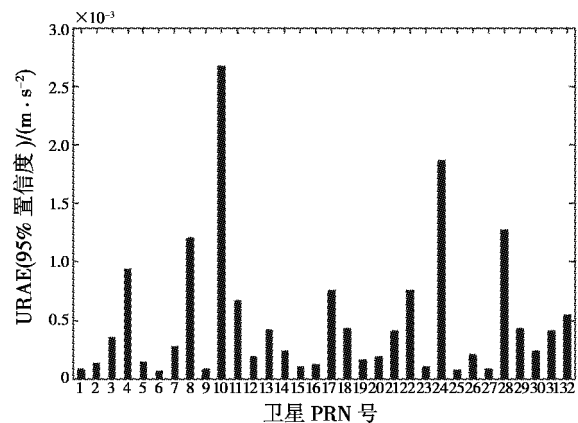


图7 GPS SIS URAE(95% 置信度)
Fig.7 GPS SIS URAE(95% confidence)

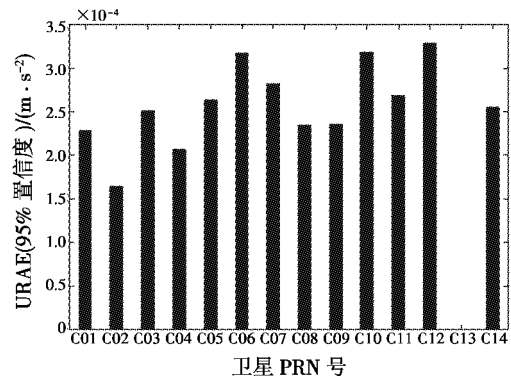


图8 BDS SIS URAE(95% 置信度)
Fig.8 BDS SIS URAE(95% confidence)

由图 7 可知, GPS 可见卫星中在 95% 置信度下, 除 PRN10 的 URAE 较其他卫星明显偏大外, 其余卫星均满足 GPS SPS PS(2008)0.002 m/s² 的指标。由图 8 可知, BDS 可见卫星在 95% 置信度下, 除 C13 卫星外, 其余所有卫星均满足 BDS-OS-PS-1.0 中 0.002 m/s² 的指标。

3 结论

本文基于研究的分段式 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; 并基于 Allan 方差法, 评估了 GPS 和 BDS 的 URRE 和 URAE 性能。结果表明: 除 BDS C02 卫星的 URE 以及 GPS PRN10 卫星的 URAE 略大以外, 其余 GPS 和 BDS 卫星的 SIS URE, URRE 和 URAE 均符合各自系统的指标要求, 验证了所研究的精度评估方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 王尔申, 张晴, 雷虹, 等. GPS 空间信号可用性评估算法 [J]. 电光与控制, 2017, 24(2):39-42, 46.
- [3] U. S. Department of Defense. Global positioning system standard positioning service performance standard [R]. 4th ed. Washington: DS, 2008.
- [4] 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). [M]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2013.
- [5] WALTER T, BLANCH J, ENGE P. Evaluation of signal in space error bounds to support aviation integrity [J]. Navigation, Journal of the Institute of Navigation, 2010, 11(26):11-21.
- [6] 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.
- [7] SUN S, WANG Z P. Signal-in-space accuracy research of GPS/BDS in China region [C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC) Proceedings, Lecture Notes in Electrical Engineering, 2016:235-245.
- [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.
- [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.
- [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 (ION ITM), 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.
- [13] 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.

(上接第 55 页)

- Driven Optimization (WDO): a novel nature-inspired optimization algorithm and its application to electromagnetics [C]//IEEE International Symposium on Antennas and Propagation Society, 2010:1-4.
- [8] SUN J, WANG X, HUANG M, et al. A cloud resource allocation scheme based on microeconomics and wind driven optimization [C]//ChinaGrid Conference, IEEE Computer Society, 2013:34-39.
 - [9] BAYRAKTAR Z, KOMURCU M, BOSSARD J A, et al. The wind driven optimization technique and its application in electromagnetics [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013, 61(5):2745-2757.
 - [10] 陈客松, 韩春林, 何子述. 一种有阵元间距约束的稀布阵天线综合方法 [J]. 电波科学学报, 2007, 22(1):27-32.
 - [11] 孙绍国. 基于粒子群算法的非均匀稀布阵列综合 [J]. 火控雷达技术, 2014, 43(1):14-17.
 - [12] 万再莲. 数字多波束形成与波束跟踪算法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2008.