

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2019.03.013

北斗空间信号误差统计特征及描述方法研究

冯 帅,李 亮,程 春,刘媛媛

(哈尔滨工程大学自动化学院,哈尔滨 150001)

摘要:通过对比北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System,BDS)广播星历与事后精密星历,提取了轨道和卫星时钟误差。基于北斗轨道误差及北斗卫星时钟误差统计特征分析,构建区别于全球定位系统(Global Positioning System,GPS)的BDS空间信号用户测距误差(Signal-In-Space User Range Error,SISRE)描述方法,对BDS广播星历中用户测距精度(User Range Accuracy,URA)进行了验证。6个月的北斗数据测试结果表明,北斗GEO、IGSO和MEO卫星的URA分别为3.0m、1.9m和1.6m。

关键词:SISE;轨道误差;卫星时钟误差;URA;北斗卫星导航系统

中图分类号:TP701

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:2095-8110(2019)03-0095-08



Study on Error Statistical Characterization and Description Method of BDS Signal-in-Space

FENG Shuai, LI Liang, CHENG Chun, LIU Yuan-yuan

(School of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Satellite orbit error and satellite clock errors were extracted by comparing the BeiDou navigation satellite system (BDS) broadcast ephemeris with the post-event precise ephemeris. Based on the statistical characterization of BDS orbit and clock error, a signal-in-space user range error (SISRE) description method different from GPS for BDS space signals is constructed to verify the user range accuracy (URA) in BDS broadcast ephemeris. The 6-month BeiDou data test results show that the URA of BeiDou GEO, IGSO and MEO satellites are 3.0m, 1.9m and 1.6m respectively.

Key words: SISE; Orbit error; Satellite clock error; URA; BDS

0 引言

卫星导航定位技术是以卫星技术和通信技术为基础,利用导航卫星发送导航定位信息为目标用户提供测距和授时服务。继美国的全球定位系统(Global Positioning System,GPS)和俄罗斯的全球

卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GLONASS)之后,中国的北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System,BDS)成为世界上第三个面向全球提供服务的卫星导航系统。BDS在卫星导航市场面临着GPS和GLONASS的竞争与挑战,系统的性能即成为决胜市场的关键。对于实时导

收稿日期:2018-11-20;修订日期:2019-02-26

基金项目:国家自然科学基金重点项目(61633008);国家自然科学基金面上项目(61773132,61803115);工信部《第七代超深水钻井平台(船)》创新专项;黑龙江省杰青项目(JC2018019);中央高校基金基本科研业务费项目(HEUCFP201768)

作者简介:冯帅(1994-),男,硕士研究生,主要从事GNSS数据分析方面的研究。E-mail: i_zephyr@hrbeu.edu.cn

航的用户而言,广播星历是其能够正常导航定位的前提,而广播星历中卫星轨道和时钟的精度是影响导航定位精度的重要因素^[1]。

空间信号误差(Signal-In-Space Errors, SISEs)反映的是与卫星有关的误差,主要由卫星轨道和卫星时钟误差组成,其大小将会影响导航用户的定位精度及可靠性。用户测距误差(User Range Error, URE)是广播星历轨道和卫星时钟误差的综合体现,指在接收机到卫星视线方向上的投影,反映了空间信号的精度,并最终影响实时导航用户定位精度。用户测距精度(User Range Accuracy, URA)用来描述 URE 的精度。Zhang 等通过一个月广播星历的 SISE 统计分析,与武汉大学精密星历相比,得到中地球轨道卫星(Medium Earth Orbit, MEO)、倾斜地球同步轨道卫星(Inclined GeoSynchronous Orbit, IGSO)和地球同步轨道卫星(Geostationary Earth Orbit, GEO)的轨道 URE 值分别为 0.5m、0.6~0.8m 和 0.9~1.8m^[2]。毛亚等统计了广播星历轨道误差 1d 的均方根(Root-Mean-Square, RMS)和卫星时钟误差的标准差(Standard Deviation, STD),结果表明多数卫星时钟误差精度优于 10ns,轨道精度优于 5m。若 URE 的分布服从零均值正态分布,那么 URA 就可表示为 URE 的 1-sigma 界限^[3]。Walter 和 Blanch 已经证明, GPS SIS URE 的 URA 值为 2.4m, GPS SIS URE 的精度可由其 URA 准确描述^[4]。对于 BDS, Liu 等通过分析 2013 年 3 月到 2016 年 9 月的数据发现,北斗广播星历播发的 2.0m 的 URA 过于乐观地描述了北斗 URE 的精度,能够满足 URE 1-sigma 界限的 URA 应为 2.4m^[5]。

本文利用 2018 年 1 月到 6 月的导航数据进行 BDS 空间信号误差的统计特征研究,分析了影响空间信号误差的因素,建立了北斗 URE 的描述方法,并验证了广播星历播发的 URA 是否适用于 BDS。

1 SISE 计算

对空间信号误差的研究主要是针对卫星轨道误差和卫星时钟误差的研究。在利用内插对比法进行星历对比前,首先要统一时空基准,然后计算时钟和轨道误差。

1.1 轨道误差

进行轨道对比时,首先要统一空间基准。主要包括两部分:

1)统一坐标参考框架。通过比较广播星历和

精密星历来计算 SISE,必须确保广播星历和精密星历参考坐标系的一致性。北斗广播星历轨道参考 2000 国家大地坐标系(China Geodetic Coordinate System 2000, CGCS2000),精密轨道参考 IGS14 坐标系(The International GNSS Service 14, IGS14),但这 2 个框架相差在几厘米之内,对于米级的轨道误差影响极小^[6],所以在对比过程中忽略坐标系统的差别。

2)校正天线相位中心。精密星历以卫星质心为坐标零点,而广播星历以天线相位中心为零点。所以,在比较广播星历和精密星历之前,通常进行天线相位中心偏移校正。修正参数来源于 igs14_1949_plus.atx 文件。

由于广播星历和精密星历都基于地心地固坐标系(Earth-Centered, Earth-Fixed, ECEF),而本文研究的是卫星导航系统的空间部分。由于在卫星轨道坐标系(Radial-Along-Cross, RAC)下可以更明确地展现出卫星的运动特性,因此在进行统计之前,本文将 ECEF 坐标系下的各向误差转换到 RAC 坐标系下进行计算^[7]。

设 P_1, P_2, \dots, P_n 为某颗卫星在某个等差时间段内的已知位置,可通过 8 阶拉格朗日多项式内插法计算出该卫星在这个时间段内的任意时刻的速度^[8]。由位置向量和速度向量可求出单位方向向量。

$$\begin{bmatrix} R \\ A \\ C \end{bmatrix} = [e_{\text{radial}} \quad e_{\text{along}} \quad e_{\text{cross}}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, e_i 是单位方向向量($i = \text{radial}, \text{along}, \text{cross}$), $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 分别为 ECEF 坐标系下的轨道径向、切向和法向误差, R, A, C 分别为 RAC 坐标系下的轨道径向、切向和法向误差。

1.2 卫星时钟误差

北斗广播时钟 T_b 以单频 B3I 信号为参考。然而,本文选用的德国地球科学研究中心(GeoForschungsZentrum, GFZ)发布的北斗精密时钟产品 T_p 是通过使用双频(B1I 和 B2I)无电离层组合计算得到的,因此,应移除 14s 的 BDT-GPST 偏移量。在比较 T_b 和 T_p 之前,还应考虑时间群延迟($tg d$)^[9]:

$$tg d_{\text{brdc}}^i = \frac{f_{\text{B1}}^2}{f_{\text{B2}}^2 - f_{\text{B1}}^2} tg d_1^i - \frac{f_{\text{B2}}^2}{f_{\text{B2}}^2 - f_{\text{B1}}^2} tg d_2^i \quad (2)$$

其中, $tg d_{\text{brdc}}^i$ 是卫星 PRN^i 的广播时钟的时间

群延迟校正, $tg d_1^i$ 和 $tg d_2^i$ 分别是信号 B1I 和 B2I 的时间群延迟差分, f_{B1} 和 f_{B2} 分别是 B1I 和 B2I 的频率。广播星历时钟通过群延迟进行校正

$$T_{b, tgd}^i = T_b^i - tg d_{brdc}^i \quad (3)$$

广播和精密时钟之间的时间偏移量 ΔT_b^i 由式(4)计算

$$\Delta T_b^i = T_p^i - T_{b, tgd}^i \quad (4)$$

由于在 T_b 和 T_p 的计算过程中采用了不同的参考原点, 因此为了获得正确的广播卫星时钟误差, 还应该去除公共时间尺度偏差。在历元 k 的卫星 i 的时间偏移量可以表达为

$$\Delta T_b^i(k) = \mu(k) + \delta T^i(k) + \Delta^i(k), \quad (i=1, \dots, 14) \quad (5)$$

其中, $\mu(k)$ 是在历元 k 处的公共时间尺度偏差; $\delta T^i(k)$ 是卫星 i 的广播时钟误差; $\Delta^i(k)$ 是噪声。通过加权最小二乘方法可以估计公共时间尺度偏差

$$\hat{\mu}(k) = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \Delta T_b^i(k)}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (6)$$

在估计共同时间尺度偏差之后, 卫星时钟误差通过以下计算得到

$$\delta T^i(k) = \Delta T_b^i(k) - \hat{\mu}(k) \quad (7)$$

2 北斗 URE 描述方法

BDS 卫星轨道和时钟的解算方式不同于 GPS, 所以在计算北斗 URE 时不能完全套用 GPS URE 的描述方法, 必须针对 BDS 的特点对传统 URE 的描述方法加以修改, 使其能够恰当准确地描述 BDS 的 URE。

2.1 瞬时用户测距误差

瞬时用户测距误差 (Instantaneous SISURE, IURE) 就是指某一时刻的瞬时 URE。北斗 IURE 计算公式为

$$IURE^j = (\hat{\mathbf{X}}^j - \mathbf{X}^j) \cdot \frac{\mathbf{X}^j - \mathbf{X}_r}{\|\mathbf{X}^j - \mathbf{X}_r\|} - c \delta T^j \quad (8)$$

其中, $IURE^j$ 表示卫星 j 的 IURE, $\hat{\mathbf{X}}^j$ 和 \mathbf{X}^j 分别表示利用广播星历和精密星历计算的卫星位置, c 代表光速, \mathbf{X}_r 表示用户接收机位置, \cdot 为矩阵相乘运算符, $\|\mathbf{x}\| = \sqrt{\mathbf{x} \cdot \mathbf{x}^T}$ 。

2.2 全球平均用户测距误差

地球上不同地点的 GNSS 用户会遇到不同的 UREs。为衡量空间信号整体上的精度, 综合轨道

误差和卫星时钟误差, 提出了全球平均用户测距误差 (Global-Average URE, avgURE)。对于 GPS, avgURE 由式(9)计算

$$\text{avgURE} = \sqrt{[0.98(R - \delta T)]^2 + \frac{1}{49}(A^2 + C^2)} \quad (9)$$

式中, A 表示轨道的切向误差, C 表示轨道的法向误差。 $(R - \delta T)$ 代表着卫星时钟误差和径向轨道误差之间具有负相关性, 这是由 GPS 的轨道和卫星时钟误差解算算法决定的。然而, 北斗采用双向卫星时间、频率传递 (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer, TWSTFT) 方法来确定卫星时钟。TWSTFT 测量卫星和地面站之间的下行和上行伪距观测值, 以计算相对于地面主时钟的卫星时钟误差。该方法将卫星时钟与轨道分开估算。因此, 北斗径向轨道误差与卫星时钟误差之间的相关性并不显著。同时由于 BDS 卫星轨道高度与 GPS 轨道高度不同, 因此 BDS 的 URE 的计算可区别如下。

对于 GEO/IGSO 卫星

$$\text{avgURE}_{G/I} = \sqrt{(0.99R)^2 + \delta T^2 + \frac{1}{127}(A^2 + C^2)} \quad (10)$$

对于 MEO 卫星

$$\text{avgURE}_M = \sqrt{(0.98R)^2 + \delta T^2 + \frac{1}{54}(A^2 + C^2)} \quad (11)$$

avgURE 涉及轨道误差和卫星时钟误差, 是轨道误差和卫星时钟误差的综合体现。

2.3 轨道部分的用户测距误差

根据式(10)和式(11), 在不考虑卫星时钟误差的情况下, 轨道部分的用户测距误差 (Orbit-only URE, OrbitURE) 公式为

$$\text{OrbitURE}_{G/I} = \sqrt{(0.99R)^2 + \frac{1}{127}(A^2 + C^2)} \quad (12)$$

$$\text{OrbitURE}_M = \sqrt{(0.99R)^2 + \frac{1}{54}(A^2 + C^2)} \quad (13)$$

OrbitURE 是将轨道误差和卫星时钟误差进行误差剥离, 仅考虑轨道误差在计算 avgURE 时的作用, 为下面分析轨道误差和卫星时钟误差何者在计算 avgURE 时占主导地位奠定了基础。

2.4 最差用户测距误差

就 SIS 完好性而言, 最差用户测距误差 (Worst-case URE, worstURE) 对评估 SIS 性能至关重要。对于 BDS, 卫星时钟误差与径向误差之间没有显著相关性。因此, 卫星时钟误差和径向误差被独立传

播到最差 SIS URE^[10]。因此,北斗 worstURE 的公式可以用式(14)来描述

worstURE =

$$\sqrt{\left\{ \max_{|\theta| \leq \gamma} (R \cos \theta + \sqrt{A^2 + C^2} \sin \theta) \right\}^2 + \delta T^2} \quad (14)$$

本节根据北斗独有的卫星时钟误差测定方法会导致卫星轨道径向误差和卫星时钟误差之间相关性较弱这一推论,对 GPS 的 URE 描述方法进行了修改,使之符合 BDS 空间信号误差的特点。相比于直接套用 GPS 的 URE 计算公式,修改后的描述方法可以更准确地描述 BDS 的 URE,更加简洁的公式也有利于之后对其统计特征的分析。

3 实验结果及分析

实验首先基于内插对比法分析了北斗卫星轨道和卫星时钟误差的变化规律及精度。为了探究轨道误差和卫星时钟误差对于 SISRE 的影响,验证 SISRE 描述方法修改的正确性,以及确定适合描述 SISRE 的 URA,实验还对北斗空间信号误差的统计特征进行了分析。

3.1 广播星历和精密星历数据源以及数据预处理

本文采用的广播星历和精密星历来源于多 GNSS 实验网 (Multi-GNSS Experiment, MGEX) (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/>, 广播星历数据为 brdm0010.18p 到 brdm1820.18p,精密星历 sp3 数据为 gbm19821.sp3 到 gbm20080.sp3,精密星历 clk 数据为 gbm19821.clk 到 gbm20080.clk,数据时间跨度为 6 个月)。基于内插对比法,以 GFZ 提供的精密轨道和时钟作为真值,分析从 2018 年 1 月 1 日到 2018 年 6 月 30 日的广播星历轨道和卫星时钟误差。为保证样本独立性,采样率选为 15min。同时在比较广播星历和精密星历之前,应排除 2 个数据集中的无效星历。无效星历可用以下条件筛选^[11]:

- 1) 导航信息不健康,即健康状态字为 1。
- 2) $|t_k - T_{oc}| > 1h$ 或 $|t_k - T_{oc}| > 1h$ 。其中 t_k 是历元 k 的时间, T_{oc} 是星历参数的参考时间, T_{oc} 是时钟参数的参考时间。
- 3) 精密星历/时钟坏值或缺失被设置为“0.000000”/“999999.999999”。

3.2 钟轨误差分析

图 1 展示了 C01、C06 和 C11 号卫星广播星历的轨道误差。

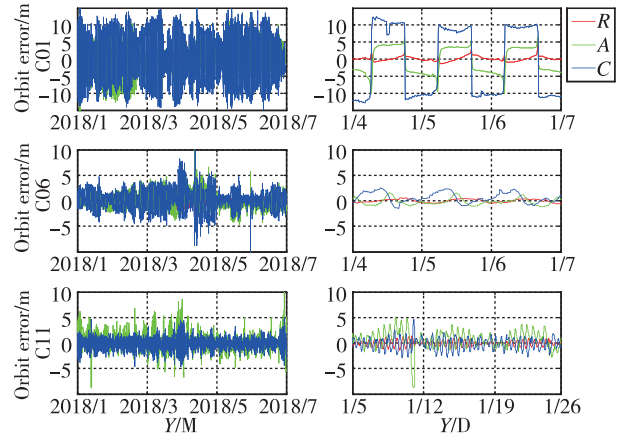


图 1 北斗卫星轨道误差图

Fig. 1 BDS orbit error

C01 号卫星为 GEO, GEO 为地球同步轨道卫星,其轨道周期等于地球的自转周期,为 23h56min4s。为了得到轨道变化的一些细节,图 1 给出了 C01 号卫星 1 月 1 日到 11 日的轨道误差图。从放大图中可以看出,轨道径向、切向和法向的误差变化都具有周期性,而且三者的变化具有一致性,周期大约为 24h,这也与 GEO 的轨道周期相符。

C06 号卫星为 IGSO, IGSO 是倾斜地球同步轨道卫星,与 GEO 一样,其轨道周期等于地球的自转周期,约为 24h。与 C01 号 GEO 相比, C06 号卫星的轨道误差明显要小,尤其是切向和法向误差。从放大图中可以看出,三向误差具有相同的变化周期,轨道径向和切向误差变化具有一致性,而法向误差变化落后径向和切向半个周期。

C11 号卫星为 MEO, MEO 是中地球轨道卫星,运转周期约为 12h。与其他两类卫星相比, MEO 的轨道误差最小。从放大图中可以看出,3 个方向上的轨道误差都具有一定的周期,大约为 12h。图中还展示出了另一个大约 7d 的周期。在这个周期内,轨道三向误差的变化具有一致性。

图 2 展示了北斗三类卫星的时钟误差。从图 2 中可以看出, GEO 的时钟误差在 5m 以内,大多为负值; IGSO 的时钟误差在 3m 以内,大多为正值; MEO 的时钟误差在 2m 以内,大多为负值。整体来看, MEO 的时钟误差最小, IGSO 次之, GEO 的时钟误差最大。

图 3 展示了三向误差的均值和标准差。从图 3 中可以看出,在径向上, GEO、IGSO 和 MEO 可近似为零均值,三类卫星的标准差都较小,在 1m 以内;在切向上,三类卫星均值围绕零值上下波动,幅

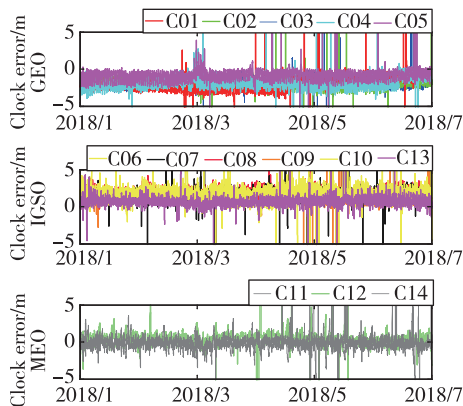


图 2 北斗卫星时钟误差图
Fig. 2 BDS clock error

度较小,但是 GEO 标准差较大,达到了 4m;在法向上,三类卫星均值都接近 0,但标准差差距比较明显。GEO 标准差最大能达到 7m,IGSO 标准差最大为 1m,MEO 标准差则在 1m 以内;对于卫星时钟误差,大多数卫星时钟误差不具有零均值,但标准差都小于 1m。较小的标准差说明其波动较小,稳定性好。从图 4 中也可以看出,整体上,MEO 的轨道精度最高,IGSO 次之,GEO 轨道误差最大。

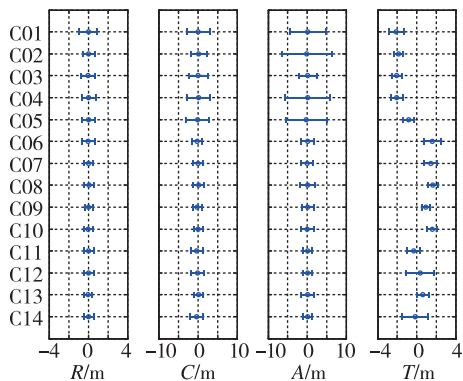


图 3 轨道三向误差的均值和标准差
Fig. 3 Mean and STD for RAC

3.3 URE 的统计特征

统计特征的分析对于评估系统的整体性能起到了十分重要的作用。对于统计特征的研究主要包括以下 4 个方面^[12]：

- 1) 计算 SISRE 的均值、标准差和均方根值,分析轨道误差 R、A、C 和卫星时钟误差 δT 在计算 SIS URE 时的权重;
- 2) 计算每个卫星的轨道误差 R、A、C 和卫星时钟误差 δT 之间的相关系数,以此证明之前对于 BDS SISRE 描述方法修改的正确性;

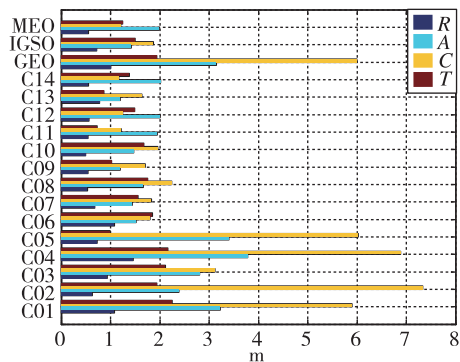


图 4 轨道三向误差和卫星时钟误差均方根
Fig. 4 RMS for RAC and clock error

3) 通过对峰值和偏度值的分析验证 IURE 的分布是否满足正态分布;

4) 为了研究 URA 能否正确描述 SISRE,将 avgURE 和 worstURE 的经验累积分布函数与当前给出的 URA 进行比较,并结合 URE 的 RMS 值,确定当前适合描述 BDS 的 URA 值。

图 5 展示了轨道误差和卫星时钟误差之间的相关性。从图 5 中可以看出,A-R 之间基本为负相关,C-R 之间相关性较大,A-T 和 C-T 之间相关性很弱。A-R、A-C、C-R、R-T 中 C10 相关性较大。除了 C10,R-T 之间也是弱相关,从而验证了式(10)、式(11)对于 avgURE 的修改。

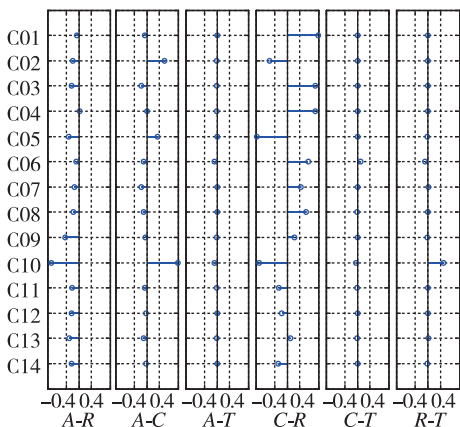


图 5 轨道和卫星时钟误差相关性图
Fig. 5 Orbit and satellite clock error correlation graph

假定 URE 服从零均值正态分布,则 URA 是对 URE 的 1σ 估计,68% 的 URE 应处于以 URA 为上边界的区域中^[13]。从图 6 中可以看出,对于 GEO、IGSO 和 MEO,若 URE 的分布服从零均值正态分布,则 1σ 上界分别为 4.1m、2.4m 和 1.3m。

但是如果 URE 的分布服从非零均值正态分

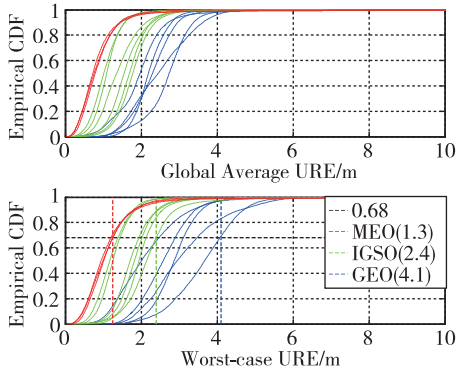


图6 全球平均 URE 和最差 URE 的经验 CDF 图
Fig. 6 Empirical CDF of global average URE and worst-case URE

布,那么利用 1σ 的 URE 界限确定 URA 是不合理的。为了验证 BDS 的 URE 是否服从零均值正态分布,以 GAMG 测站为例,对其 IURE 统计特性进行分析。为了尽可能准确描述 IURE 的分布,在分析 IURE 分布之前剔除异常值。本文以 4.42 倍 URAUB 为门限值剔除异常值,其中 URAUB 表示广播星历播发 URA 的上边界。图 7 展示的是 GAME 测站 GEO 卫星的 IURE 频率分布直方图。图中蓝色区域是卫星 IURE 的直方图,红线是 IURE 的正态概率分布拟合曲线。从图 7 中可以看出,C01、C04 和 C05 号卫星存在较为明显的侧偏。

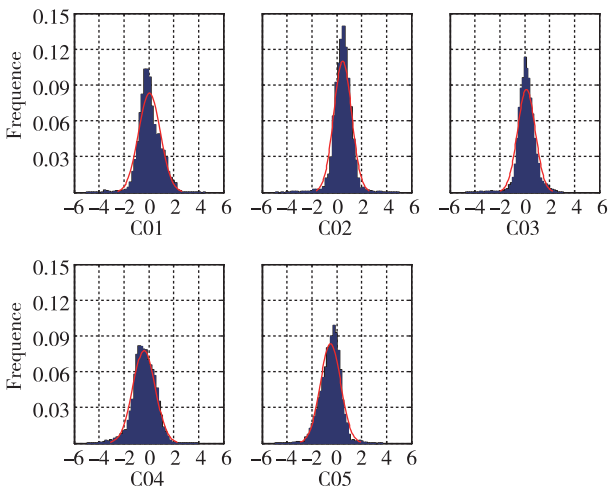


图7 GEO 卫星 IURE 频率分布直方图

Fig. 7 GEO satellite IURE frequency distribution histogram

从图 8 的 IGSO 卫星 IURE 频率分布直方图中可以看出,C07 和 C09 号卫星存在侧偏,所有 IGSO 卫星 IURE 均值都不为 0。

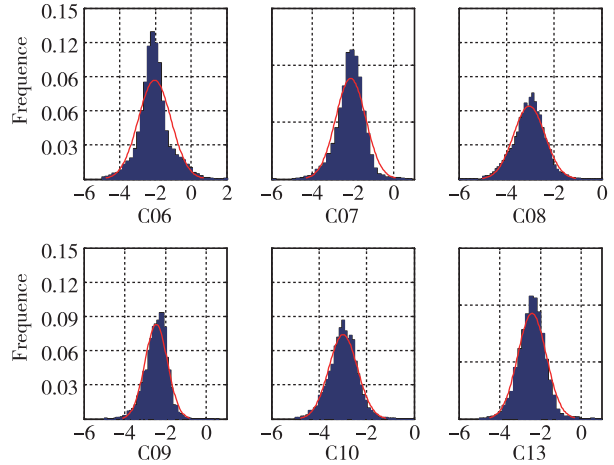


图8 IGSO 卫星 IURE 频率分布直方图

Fig. 8 IGSO satellite IURE frequency distribution histogram

图 9 中,C11 和 C14 号卫星存在侧偏。另外,图 8、图 9 中拟合的正态分布曲线均值明显都不为 0。

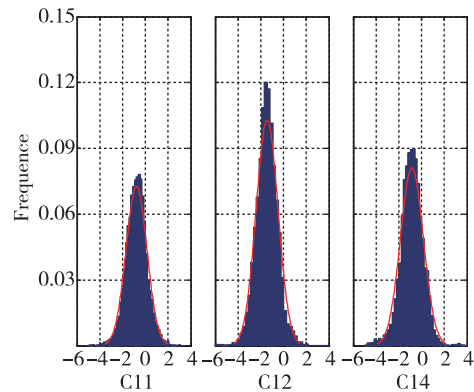


图9 MEO 卫星 IURE 频率分布直方图

Fig. 9 MEO satellite IURE frequency distribution histogram

为了进一步研究 IURE 的分布特性,图 10 展示了 IURE 的峰度与偏度。峰度是研究数据分布陡峭或平滑的统计量,正态分布的峰度视为 0。偏度是描述数据分布对称性的统计量,正态分布的偏度为 0。从图 7 可以看出,IURE 的峰度均大于 0,曲线较为陡峭;大部分卫星 IURE 的偏度值达到了 0.5,个别卫星超过 1,说明 IURE 的分布存在一定的侧偏,曲线对称性较差,不满足正态性。所以,将 URE 的分布假定为零均值正态分布并不是十分合理。因此,本文选择利用 URE 的均方根来确定 URA。

图 11 展示了每颗卫星和每类卫星 URE 的 RMS 值。从图 11 中可以看出,GEO、IGSO 和 MEO 的 OrbitURE 分别为 1.3m、0.8m、0.6m。对于所有卫星,OrbitURE 为 1.0m。

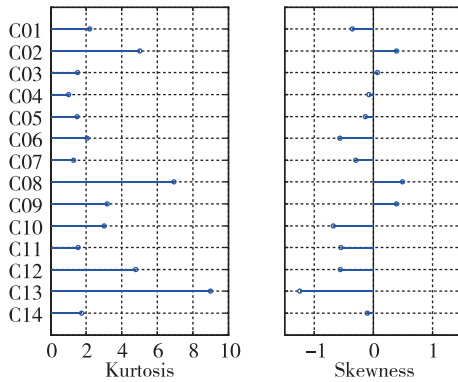


图 10 IURE 分布的峰度与偏度
Fig. 10 Kurtosis and skewness of IURE

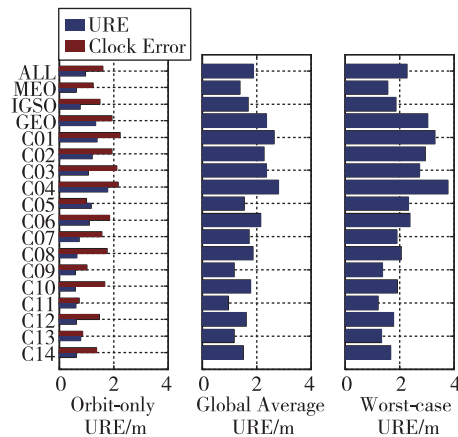


图 11 全球平均、仅轨道、最差 URE 和卫星时钟误差的 RMS 图
Fig. 11 RMS for global average, orbit-only, worst-case URE and clock error

为了探究钟差对 avgURE 的影响作用,图 11 将 δT 和 OrbitURE 的 RMS 值进行比较。结果表明,与 OrbitURE 相比, δT 的 RMS 值与 avgURE 的 RMS 值更为相近,最大差值仅为 0.6m,而 OrbitURE 与 avgURE 的 RMS 值之差最大可超过 1m。由此可以推断出在 avgURE 的计算过程中,轨道误差所占权重较低,尤其是切向和法向误差。虽然径向误差所占权重较大,但其量级小,在 avgURE 中的作用并不明显。所以这三者对于 avgURE 的计算结果影响较少,URE 的大小由卫星时钟误差 δT 主导。

worstURE 代表最差情况下的 URE,也就是某一时段内 URE 的最大值。从完好性方面考虑,应用 worstURE 的 RMS 确定 URA^[14]

$$URA_i = \text{rms}(\text{worstURE}_i) \quad (15)$$

其中, $i = \text{GEO,IGSO,MEO}$ 。对于 GEO、

IGSO 和 MEO,根据式(15),从图 11 中可以看出其对应的 URA 分别为 3.0m、1.9m 和 1.6m。

4 总结

本文针对 BDS 空间信号误差特点,对其用户测距误差描述方法进行了修改,并对用户测距精度进行了验证,实验结果表明:

- 1) 北斗轨道径向误差和钟差之间为微相关,对其用户测距误差描述方法的修改是正确的。
- 2) MEO 的空间信号精度最高,IGSO 次之,GEO 最差。
- 3) 空间信号误差各分量不服从正态分布,所以不能用用户测距精度的 1-sigma 上界来确定 URA 的值。对于 GEO、IGSO 和 MEO,利用 worstURE 的 RMS 值确定的 URA 分别为 3.0m、1.9m 和 1.6m。

参考文献

[1] 李金龙,唐斌,郭海荣,等. 新一代北斗试验卫星伪距质量初步评估[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(4): 66-73.
Li Jinlong, Tang Bin, Guo Hairong, et al. Preliminary evaluation on the pseudorange quality of new-generation BDS experimental satellites[J]. Navigation Position and Timing, 2017, 4(4):66-73(in Chinese).

[2] 张清华,王源,孙阳阳,等. BDS 区域卫星导航系统空间信号精度评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35 (5):764-767.
Zhang Qinghua, Wang Yuan, Sun Yangyang, et al. Initial signal-in-space assessment of BeiDou satellite navigation system[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2015, 35 (5): 764-767(in Chinese).

[3] Ochieng W Y, Sauer K, Walsh D, et al. GPS integrity and potential impact on aviation safety[J]. The Journal of Navigation, 2003, 56(1): 51-65.

[4] Walter T, Hansen A, Blanch J, et al. Robust detection of ionospheric irregularities[C]// Proceedings of the ION GPS. Salt Lake City, UT, 2000: 19-22.

[5] Wu Y, Liu X, Liu W, et al. Long-term behavior and statistical characterization of BeiDou signal-in-space errors [J]. GPS Solutions, 2017, 21(4):1907-1922.

[6] Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective[J]. GPS Solutions, 2015, 19(2): 321-333.

[7] 马下平,鲁尚强,李秦政,等. 北斗卫星导航系统的空间信号精度评估[J]. 测绘科学, 2019, 44(247): 90-97.

- Ma Xiaping, Lu Shangqiang, Li Qinzheng, et al. Evaluation of signal in space accuracy for BeiDou navigation satellite system[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(247): 90-97(in Chinese).
- [8] 何玉晶, 杨力. 基于拉格朗日插值方法的 GPS IGS 精密星历插值分析[J]. *测绘工程*, 2011, 20(5): 60-63.
- He Yujing, Yang Li. Analysis of interpolation results on GPS IGS precise ephemeris based on Lagrange interpolation[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2011, 20(5): 60-63(in Chinese).
- [9] 罗璠, 李建文, 黄海, 等. BDS 广播星历的轨道误差分析[J]. *测绘通报*, 2015(2): 70-72+91.
- Luo Fan, Li Jianwen, Huang Hai, et al. Error analysis of orbit determined by BDS broadcast ephemeris[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2015(2): 70-72+91 (in Chinese).
- [10] Heng L, Gao G X, Walter T, et al. Statistical characterization of GPS signal-in-space errors[C]//Proceedings of the 2011 International Technical Meeting of the Institute of Navigation (ION ITM 2011), San Diego, CA. 2011: 312-319.
- [11] Steve Hilla. National Ocean Service, Silver Spring. The Extended Standard Product 3 Orbit Format(SP3-c) [S]. National Geodetic Survey, MD. USA 20910-6233.
- [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 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(in Chinese).
- [13] Chen L, Jiao W, Huang X, et al. Study on signal-in-space errors calculation method and statistical characterization of BeiDou navigation satellite system[C]// 2013 Proceedings of China Satellite Navigation Conference (CSNC). Springer, Berlin, Heidelberg, 2013: 423-434.
- [14] 李亮. 陆基增强系统定位与完好性监测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- Li Liang. Ground based augmentation system: Positioning and integrity monitoring[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012(in Chinese).