

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.10.022

空间信号误差对北斗单向授时的影响*

李丹丹^{1,2,3} 许龙霞^{1,2} 李博^{1,2,3} 李孝辉^{1,2}

(1. 中国科学院国家授时中心 西安 710600; 2. 中国科学院精密导航定位与
定时技术重点实验室 西安 710600; 3. 中国科学院大学 北京 10049)

摘要:北斗卫星广播星历是影响授时服务的主要误差源,分析它的精度是非常必要的。分析了空间信号误差的主要组成星历误差和星钟误差的计算方法,并阐述了计算过程中应注意的问题:参考时间尺度不一致、坐标系不一致和卫星位置参考点不一致。以IGS分析中心GFZ提供的事后精密星历为参考,利用北斗卫星广播星历分析了空间信号误差对北斗单向授时的影响。结果表明,空间信号误差对北斗单向授时的影响随机波动在7 ns以内,由于不同北斗卫星对应的星钟误差中存在大小不等的系统误差,导致星钟误差对单向授时结果的影响大于星历误差。

关键词:北斗卫星导航系统;空间信号误差;星历误差;星钟误差;单向授时

中图分类号: TH762 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.40

Impact of signal-in-space error on Beidou one-way timing

Li Dandan^{1,2,3} Xu Longxia^{1,2} Li Bo^{1,2,3} Li Xiaohui^{1,2}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Precision Navigation and Timing Technology, National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Beidou satellite broadcast ephemeris is the main error source of timing service, and it is necessary to analyze its precision. The calculation method of signal-in-space is analyzed mainly considering satellite ephemeris and satellite clock error. The care must be taken is that when using the BeiDou satellite broadcast ephemeris and precise ephemeris/clocks the reference time scale is atypsim, the coordinate system is atypsim, and the reference point of satellite position is atypsim. The impact of signal-in-space error on one-way timing is analyzed with IGS final precise ephemeris for reference. According to the results, the random fluctuation of the impact of signal-in-space error on one-way timing is within 7 ns. And the impact of satellite clock error is relatively larger than that of satellite ephemeris error because there are different system errors corresponding to each BeiDou satellite's clock error.

Keywords: Beidou navigation satellite system; signal-in-space error; ephemeris error; satellite clock error; one-way timing

0 引 言

2012年12月27日,北斗卫星导航系统(Beidou navigation satellite system, BDS)开始正式提供区域导航服务,有13颗卫星可供用户使用。2013~2016年,北斗卫星导航系统又陆续发射了7颗卫星(截止2016年6月12

日),用于试验星的组网,试验北斗全球系统的新信号体制。

卫星导航系统提供卫星轨道和星钟的精确程度决定了其提供的定位、导航和授时服务的能力。目前国内外已有很多学者对GPS和BDS的卫星轨道误差和星钟误差进行了相关计算分析^[1-4],魏亚静等人^[5]分析了BDS星钟预报误差对授时性能的影响,但未分析卫星星历误

差对北斗授时的影响。本文针对北斗空间信号的星历误差^[6]和星钟误差这两项主要误差^[7],研究了空间信号误差的计算方法,并利用北斗卫星的广播星历和IGS分析中心GFZ提供的北斗事后精密星历,针对BDS在时间尺度,坐标系和卫星位置参考点等3方面分析了北斗空间信号误差大小以及对北斗单向授时结果的影响。

1 空间信号误差对北斗单向授时的影响分析

星历误差和星钟误差是空间信号误差的主要部分,本文重点考虑星历误差和星钟误差,理论分析这两项误差对北斗单向授时的影响。

1.1 星历误差

在北斗区域系统中,地面主控站综合各监测站的原始观测数据,通过对卫星进行动力学建模,测定卫星的位置,通过对卫星的各项动力学参数进行拟合,得到卫星的轨道参数,然后编排进导航电文,向用户广播。在即将建成的全球系统中加入星间链路的测量数据参与卫星位置的确定,以弥补北斗系统不能全球建站带来的影响。

由北斗卫星广播的星历参数可以计算得到卫星在CGCS2000坐标系中的位置,将计算得到的卫星位置与相应时刻的精密轨道作差,可以得到不同卫星在不同时刻的卫星位置误差。星历误差对用户的影响为卫星位置误差在卫星至用户视线方向上的投影,其中卫星真实位置由精密星历给出,卫星广播位置根据导航电文广播的轨道参数计算得到^[8]。图1所示为卫星位置误差与星历误差计算示意图,这是几何意义,但是在实际计算时求的是 $\Delta\rho$,是近似值,如式(1)所示。

$$\Delta\rho = \rho' - \rho \tag{1}$$

目前提供北斗卫星精密星历产品的机构有iGMAS、WHU、GFZ和CODE,其中CODE分析中心仅提供北斗IGSO和MEO卫星的精密星历产品,本文采用GFZ公布的北斗卫星精密星历产品。WHU、GFZ和CODE三家分析中心精密星历产品的精度基本相当,GEO卫星的轨道精度在分米量级,IGSO和MEO卫星的轨道精度在cm量级^[9]。iGMAS发布的北斗最终精密星历产品中,GEO卫星的轨道精度为4 m,MEO/IGSO的轨道精度为0.15 m,发布的钟差产品的精度为0.5 ns。

对于BDS,由广播的星历参数计算得到的是卫星在CGCS2000坐标系中的坐标,而精密星历采用ITRF坐标系,但二者相差在cm级,可以忽略不同坐标系间的相互转换引入的误差^[10]。另外,北斗精密轨道产品给出的卫星位置是参考到卫星质心的,由北斗广播星历参数计算出的卫星位置也是参考到卫星质心,可以直接计算星历误差^[11-14]。另外,广播星历的时间系统采用北斗时,而精

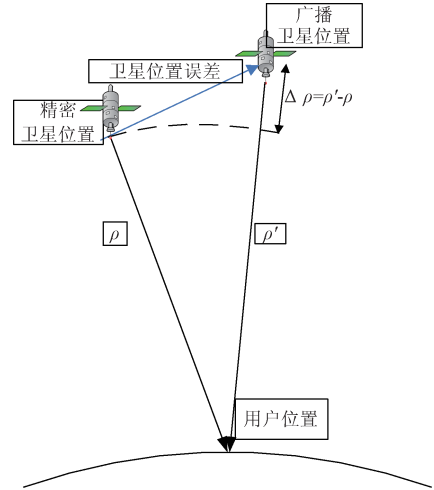


图1 卫星位置误差与星历误差示意图

Fig. 1 Satellite position error and ephemeris error

密星历的时标采用GPS时,因此需要把广播星历中的北斗时转换为GPS时,北斗时和GPS时都是一个连续的时间尺度,均作闰秒调整,GPS时超前北斗时14 s。

1.2 星钟误差

北斗1~12,14号卫星的星载原子钟都是铷钟。根据卫星广播的钟差参数可以计算得到卫星时间相对于系统时间的偏差。计算北斗星钟误差也需要考虑北斗广播钟差参数和精密钟差的时标不一致问题。由北斗广播星历中的钟差参数,可以计算得到卫星星钟相对于BDT的钟差,而GFZ公布的精密星历中的钟差是相对于GPST的钟差,因此,需要统一时间参考,扣除BDT与GPST间的系统时差。本文采用的方法是首先计算每颗卫星的广播钟差与精密钟差的单差,然后计算同一时刻所有卫星的差值的统计平均值作为该时刻的系统时差,将单差值与系统时差作差,得到该时刻的星钟误差^[15]。

1.3 空间信号误差对北斗单向授时的影响分析

下面以单颗北斗卫星为例,理论上分析空间信号误差对单向授时的影响。

对观测伪距 ρ_i 进行各项修正,获得接收机时间与BDT的偏差 δt_u ,如式(2)所示。

$$c \cdot \delta t_u = \rho_i - \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} + c \cdot \delta t^i - I_i - T_i \tag{2}$$

式中: (x_i, y_i, z_i) 是卫星*i*的位置, (x_u, y_u, z_u) 是接收机位置, δt^i 为卫星钟与BDT的偏差, c 为光速, I_i 为电离层延迟, T_i 为对流层延迟。

由式(2)可知,卫星位置误差会反映在星地几何距离和Sagnac效应改正中,星钟误差影响 δt^i 的改正精度,进而影响接收机端解算的时差 δt_u 。

综合星历误差和星钟误差以及 sagnac 效应改正,北斗空间信号误差对单向授时结果的影响如式(3)所示。

$$c \cdot \delta t_{u,corr} = c \cdot \delta t_u + c \cdot \delta t^{i,igs} - c \cdot \delta t^{i,brd} + \sqrt{(x_{i,brd} - x_u)^2 + (y_{i,brd} - y_u)^2 + (z_{i,brd} - z_u)^2} - \sqrt{(x_{i,igs} - x_u)^2 + (y_{i,igs} - y_u)^2 + (z_{i,igs} - z_u)^2} \quad (3)$$

2 分析结果

本文采用的北斗广播星历来源于 IGS 全球数据中心 CDDIS(crustal dynamics data information system) 网站,精密星历数据采用 GFZ 分析中心公布的精密产品,根据这些数据分析北斗区域系统中的每颗卫星的星历误差对临撞用户的影响。

在评估时间段内,只有北斗 1~14 号卫星的广播星历和精密星历数据,所以本文只分析了北斗 1~14 号卫星的空间信号误差对单向授时的影响。

2.1 卫星星历误差

本文利用 2015 年 5 月 17 日~6 月 3 日的北斗广播星历和精密星历计算卫星的星历误差,图 2~4 所示分别为北斗 GEO-1、IGSO-1 和 MEO-1 卫星的位置误差对临撞用户产生的影响。表 1 所示为北斗卫星星历误差的均方根统计值。

从表 1 中可以看出,北斗区域系统卫星的位置误差对临撞用户授时结果的影响小于 3 ns。GEO 和 IGSO 星历误差的随机波动相对于 MEO 卫星大,GEO 卫星表现的更为明显。虽然北斗 GEO 卫星的定轨精度相对于 MEO 和 IGSO 卫星低,但是对用户产生影响的主要是卫星位置误差的径向分量,GEO 卫星的径向误差相对切向和法向较小。另外,GEO 卫星的轨道高度是 MEO 卫星的 1.66 倍,相同条件下,轨道高度越高切向误差对单向

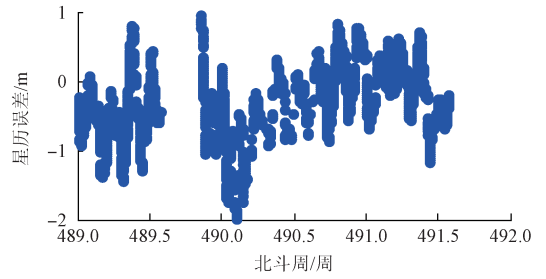


图 2 北斗 GEO-1 卫星的星历误差
Fig. 2 Ephemeris error of BeiDou GEO-1 satellite

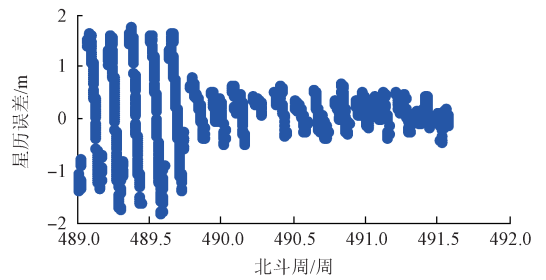


图 3 北斗 IGSO-1 卫星的星历误差
Fig. 3 Ephemeris error of BeiDou IGSO-1 satellite

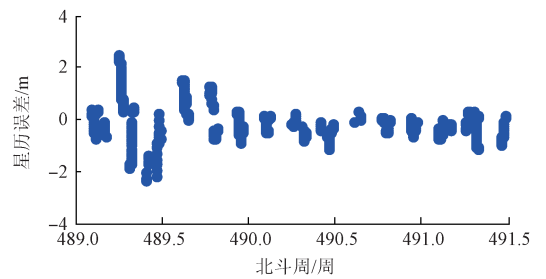


图 4 北斗 MEO-1 卫星的星历误差
Fig. 4 Ephemeris error of BeiDou MEO-1 satellite

表 1 北斗卫星星历误差的 RMS

Table 1 RMS of BeiDou satellite ephemeris error

(m)

卫星号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14
RMS	0.61	0.72	0.82	0.88	0.68	0.69	0.61	0.51	0.64	0.65	0.72	0.54	0.55

授时结果的影响越小。因此,北斗 3 种不同类型卫星的星历误差对用户授时结果的影响差异不明显。

2.2 星钟误差

本文利用 2015 年 5 月 17 日~6 月 3 日的北斗广播星历和精密星历计算卫星的钟差误差,图 5~7 所示分别为北斗 GEO-1、IGSO-1 和 MEO-1 卫星的星钟误差。表 2 所示为北斗星钟误差的统计结果。

从表 2 中可以看出,每颗卫星对应的星钟误差均存在不同程度的系统误差,其中 1 号 GEO 卫星的系统差最

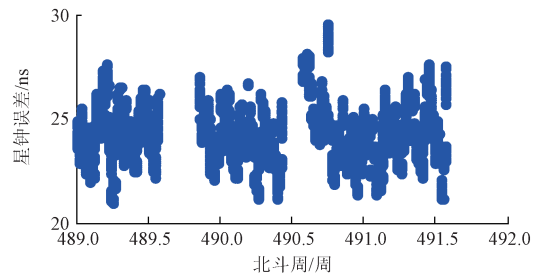


图 5 北斗 GEO-1 卫星的星钟误差
Fig. 5 Clock error of BeiDou GEO-1 satellite

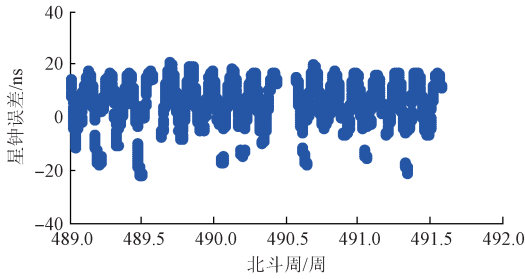


图6 北斗 IGSO-1 卫星的星钟误差

Fig. 6 Clock error of BeiDou IGSO-1 satellite

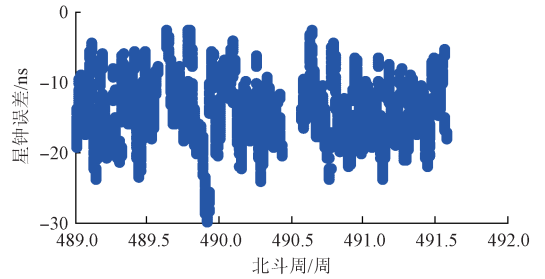


图7 北斗 MEO-1 卫星的星钟误差

Fig. 7 Clock error of BeiDou MEO-1 satellite

大,达到了 24.2 ns。广播钟差与精密钟差间的系统差是各项误差的综合反应,可能是卫星的定轨残差,也可能是由地面发射设备引起的系统时延等。北斗 GEO 卫星的钟差误差随机波动最小,在 3 ns 以内;北斗 IGSO 卫星的

钟差误差随机波动比较大,尤其是 6 号卫星,为 9.8 ns,其他 IGSO 卫星的钟差误差随机波动在 8 ns 以内;MEO 卫星的钟差误差随机波动在 5 ns 以内。

表 2 北斗星钟误差的统计参数

Table 2 Statistical parameters of Beidou satellite clock error

(ns)

卫星号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14
RMS	24.2	5.3	3.4	2.0	8.0	11.1	17.4	15.2	8.0	8.5	15.0	14.0	7.0
均值	24.2	-5.0	-3.1	1.3	-7.7	5.1	16.3	13.7	-3.1	-5.7	-14.2	-13.1	-5.3
std	1.3	1.8	1.4	1.5	2.3	9.8	6.1	6.5	7.3	6.2	4.8	4.9	4.5

2.3 空间信号误差对单向授时的影响

图 8~10 所示分别为北斗 GEO-01、IGSO-01 和 MEO-01 卫星对应的空间信号误差对单向授时结果的影响。

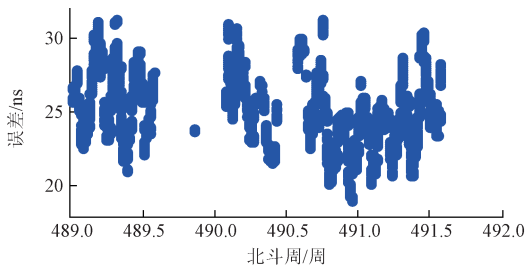


图8 北斗 GEO-01 卫星空间信号误差对单向授时的影响

Fig. 8 Impact of signal-in-space error on one-way timing for BeiDou GEO-1 satellite

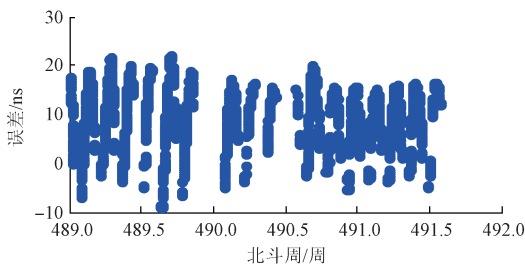


图9 北斗 IGSO-01 卫星空间信号误差对单向授时的影响

Fig. 9 Impact of signal-in-space error on one-way timing for BeiDou IGSO-1 satellite

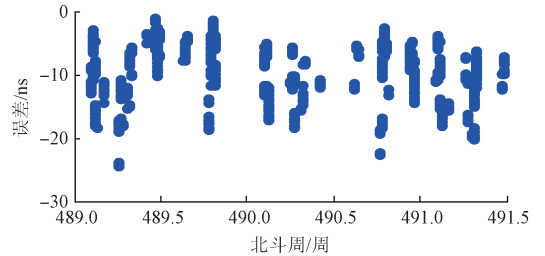


图10 北斗 MEO-01 卫星空间信号误差对单向授时的影响

Fig. 10 Impact of signal-in-space error on one-way timing for BeiDou MEO-1 satellite

表 3 所示为北斗卫星的空间信号误差对单向授时的影响统计值。

从表 3 中可以看出,北斗空间信号误差对单向授时结果的影响存在系统误差,且每颗北斗卫星的系统误差各不相同,特别是 1 号卫星的系统误差比较大;北斗 GEO 卫星的计算结果随机波动比 IGSO 卫星和 MEO 卫星的都小,在 4 ns 以内,北斗 IGSO 卫星的随机波动在 7 ns 以内,MEO 卫星的随机波动在 5 ns 以内。

综上所述,北斗卫星的星历误差和星钟误差有正有负,空间信号误差对单向授时结果的影响结果与星钟误差相比,值不一定都变大,这是因为北斗广播的星历与星钟参数间有一定的自洽性,星钟钟差中包含一定的定轨残差分量,综合使用广播星历发布的两类参数时,获得的授时结果误差不一定比星钟误差大。

表3 空间信号误差对单向授时的影响

Table 3 Statistical parameters of impact of signal-in-space error on one-way timing

(ns)

卫星号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14
RMS	25.1	4.1	4.8	2.8	8.8	12.4	20.8	16.8	6.3	6.2	10.2	9.1	4.3
std	2.5	2.4	3.1	2.8	3.4	6.6	6.9	4.6	6.2	5.6	4.6	3.9	3.6

3 结 论

随着 BDS 的不断发展和成熟,其用户越来越多,有授时需求的用户越来越关心北斗广播星历的精度。本文利用北斗卫星的广播星历和 GFZ 分析中心提供的北斗事后精密星历,分析了空间信号误差对北斗单向授时的影响。由分析结果可以看出,星钟误差对授时结果的影响随机波动大都在 8 ns 以内,星历误差对单向授时结果的影响小于 3 ns。不同卫星类型对应两项误差的大小也有所差异。总的来说,空间信号误差对北斗单向授时的影响随机波动在 7 ns 以内,其中 GEO 卫星的随机波动最小,约在 3 ns 以内,IGSO 卫星的随机波动在 7 ns 以内,MEO 卫星的随机波动在 5 ns 以内。由于不同北斗卫星对应的星钟误差中存在大小不等的系统误差,最大有二十几纳秒,导致了星钟误差对单向授时结果的影响大于星历误差。

参考文献

- [1] 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.
GUO F, ZHANG X H, LI X X, 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.
- [2] ZHAO G, ZHOU S S, ZHOU X H, et al. Precise orbit determination of Beidou satellites using satellite laser ranging[C]. Proceedings of China Satellite Navigation Conference (CSNC). Berlin: Springer, 2013: 221-229.
- [3] 朱永兴,李斌,于亮,等. 基于精密星历的北斗卫星广播星历精度分析[J]. 全球定位系统,2014,39(1):1-4.
ZHU Y X, LI B, YU L, et al. Analysis of Beidou satellite broadcast ephemeris accuracy based on precise ephemeris[J]. GNSS World of China, 2014, 39(1): 1-4.
- [4] ZHOU S S, HU X G, WU B, et al. Orbit determination and time synchronization for a GEO/IGSO satellite navigation constellation with regional tracking network[J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2011, 54(6): 1089-1097.
- [5] 魏亚静,袁海波,董绍武,等. BDS 星钟预报误差分析及对授时性能的影响[J]. 时间频率学报,2016,39(4):301-307.
WEI Y J, YUAN H B, DONG SH W, et al. Error analysis of BDS satellite clock difference prediction and its impact on performance [J]. Journal of Time and Frequency, 2016, 39(4): 301-307.
- [6] 孟祥广,孙越强,白伟华,等. 北斗卫星广播星历精度分析[J]. 大地测量与地球动力学,2016,36(10):870-874.
MENG X G, SUN Y Q, BAI W H, et al. Precision analysis of Beidou satellites' broadcast ephemeris [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2016, 36(10): 870-874.
- [7] GAO G X, TANG H, BLANCH J, et al. Methodology and case studies of signal-in-space error calculation top-down meets bottom-up [C]. Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2009: 2824-2831.
- [8] 许龙震. 基于共视原理的卫星授时方法[D]. 西安:中国科学院(国家授时中心),2012.
XU L X. A new common-view based timing method[D]. Xi'an: Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center), 2012.
- [9] 孔尧. 基于 GNSS 和 SLR 观测的北斗卫星精密轨道确定[D]. 西安:中国科学院研究生院(国家授时中心),2015.
KONG Y. Precise orbit determination of BDS satellites based on GNSS and SLR observations [D]. Xi'an: Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center), 2015.
- [10] 陈星宇,李建文,黄海. BDS 空间信号精度评估算法[J]. 卫星导航,2015,3(1):29-33.
CHEN X Y, LI J W, HUANG H. Assessment algorithms of BDS SISA[J]. Journal of Satellite Navigation, 2015, 3(1): 29-33.
- [11] 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.
LUO F, LI J W, HUANG H, et al. Error analysis of orbit determined by BDS broadcast ephemeris [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(2): 70-72.

- [12] 王彬. 北斗卫星导航系统广播星历误差分析[J]. 测绘地理信息, 2015, 40(6): 25-27.
WANG B. Broadcast ephemeris error analysis of Beidou navigation satellite system [J]. Journal of Geomatics, 2015, 40(6): 25-27.
- [13] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, HAUSCHILD A. Broadcast versus precise ephemerides: A multi-GNSS perspective [J]. Gps Solutions, 2015, 19(2): 321-333.
- [14] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P. The BD navigation message [C]. International Global Navigation Satellite Systems Society Symposium, 2013.
- [15] 范毅, 陆华, 贾小林, 等. GNSS 广播星历精度评估研究 [C]. 第七届中国卫星导航学术年会, 2016.
FAN Y, LU H, JIA X L, et al. Study on GNSS broadcast

ephemeris precision evaluation [C]. China Satellite Navigation Conference, 2016.

作者简介



李丹丹, 2011 年于河南农业大学获得学士学位, 2013 年于上海大学获得硕士学位, 目前为中国科学院国家授时中心在读博士, 主要研究方向为卫星导航系统时间溯源方法。

E-mail: leedanvip@163.com

Li Dandan received B. Sc. from Henan Agricultural University in 2011 and M. Sc. from Shanghai University in 2013, respectively. Now she is a Ph. D. candidate in National Time Service Center. Her research interest is in the method of generating the UTC parameters.