

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.03.012

闰秒过程中部分北斗授时时钟显示错误分析

唐 斌,李金龙,申俊飞,何海波

(北京卫星导航中心,北京 100094)

摘要:2012年12月北斗二号卫星导航系统开通服务以来,已经广泛为通信、电力、金融等诸多领域提供授时服务,但是在2015年6月30日和2016年12月31日两次闰秒调整期间,也出现了部分北斗授时时钟时间显示错误问题。从北斗时钟授时基本原理入手,详述了北斗系统的闰秒调整策略,闰秒调整前后各个阶段的BDT与UTC转换方法,以2016年12月31日的闰秒调整为例,分析了部分北斗时钟闰秒过程时间显示错误的原因,并给出了正确的算法,为用户正确应用北斗授时提供借鉴。

关键词:北斗授时;闰秒;时间同步参数;转换关系

中图分类号:P228

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2017)03-0072-05

Analysis of Some BeiDou Timing Clock Display Error in the Process of Leap Second

TANG Bin, LI Jin-long, SHEN Jun-fei, HE Hai-bo

(Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China)

Abstract: Since the BeiDou II satellite navigation system began offering services to customers in the Asia-Pacific region in December 2012, it has provided a wide range of timing services for communications, power, finance and other fields. However, problems of display error with BeiDou timing clock appeared twice during the leap second adjustments on June 30, 2015 and December 31, 2016. In order to find the cause of display error, and based on the basic principle of BeiDou clock timing, the leap second adjustment strategy of the BeiDou system is elaborated, the conversion method of BDT and UTC at each stage before and after the leap seconds adjustment is put forward. Taking the leap second adjustment on December 31, 2016 as an example, the cause of the error is analysed, and the algorithm for the BeiDou users to correctly apply BDT and UTC conversion relationship is presented.

Key words: BeiDou timing; Leap second; Time synchronization parameter; Conversion relationship

0 引言

卫星导航系统具备全覆盖、全天候、高精度等特点,在授时领域获得了广泛的应用。北斗卫星导航系统是我国重要的时空基础设施,已经成为我国国防、电力、通信、金融等诸多领域主要的时间同步

手段^[1]。北斗授时方法包括RDSS双向授时、RDSS单向授时和RNSS授时三种。其中,RDSS双向授时采用有源授时方法,授时精度高,但需要用户发射信号,设备功耗较大,用户数量有限;RDSS单向授时需要已知用户位置,授时精度较低;RNSS授时过程中,定位和钟差信息可以同时产生,授时精度

收稿日期:2017-03-15;修订日期:2017-03-28

作者简介:唐斌(1978-),男,博士,高级工程师,主要从事卫星导航信号处理与接收机技术方面的研究。

E-mail:dongnss@126.com

较高,成为目前最为主要的北斗授时手段^[2]。但是,在最近的两次闰秒过程中,也有部分北斗 RNSS 授时时钟出现授时错误问题,授时误差达到秒级。

北斗 RNSS 授时与 GPS 授时类似,很多文献对 GPS 和北斗等卫星导航系统授时的误差来源进行了探讨,包括与卫星有关的误差(卫星钟差、星历误差、相对论效应等)、与传播路径有关的误差(电离层延迟、对流层延迟、多路径效应等)、与接收机有关的误差(设备延迟、测量噪声等)等^[3]。通过对各类误差源的预算分析,得出 GPS 和北斗的授时误差一般在十几至数十纳秒量级^[4-5]。一些文献也分析了压制式干扰对卫星导航授时的影响,在重度干扰时,授时误差会达毫秒级,当再增加干扰强度时,授时设备会停止工作^[6-7];另外,欺骗干扰也会对授时精度产生影响,欺骗干扰通过改变接收机中信号处理相关峰的位置,进而改变接收机伪距测量值,影响授时精度,但所造成的误差也只有纳秒级^[8]。因此,闰秒过程中,当授时误差达秒级时,无法用传统的授时误差分析方法进行分析,而是一种新出现的错误现象。

本文从阐述北斗时钟授时原理入手,详述了北斗系统时间北斗时(BDT)与协调世界时(UTC)转换方法,找出闰秒过程中北斗时钟时间显示误差达秒级这一新错误现象的症结,最后以 2016 年 12 月 31 日的闰秒调整为例,结合北斗授时实际错误现象,进行原因分析,并给出了正确的算法,为用户正确使用北斗系统授时提供参考。

1 北斗时钟授时原理

授时就是获取当前的时刻,而卫星授时就是获得接收机本地钟与卫星系统时间的偏差,进而依据偏差完成本地时间、频率的调整^[9]。北斗时钟授时一般流程如图 1 所示。

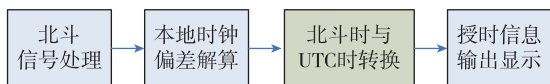


图 1 北斗时钟授时一般流程

Fig. 1 The general process for BeiDou clock timing

1.1 北斗接收机处理流程

基于北斗系统授时的时钟内部一般都有北斗接收机。根据卫星导航定位理论,接收机对卫星导航信号的处理一般流程是:信号经过搜索捕获、精确跟踪、位同步、帧同步、导航电文解调等一系列步

骤;然后依据导航电文参数和信号捕获跟踪信息,计算卫星信号发射时刻和卫星位置,完成卫星至接收机的伪距测量;最后根据伪距观测量和卫星位置信息,以及导航电文给出的卫星钟差和大气传播时延模型参数,进行导航解算,在导航解算过程中获取接收机本地钟与卫星系统时间的偏差^[10]。

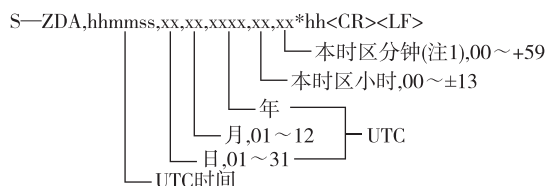
1.2 BDT 向 UTC 时转换

接收机在修正本地钟差后,此时获取的是卫星系统时间,对于北斗系统来说,则是 BDT,属于原子时系统,接收机需要完成 BDT 向 UTC 转换。

BDT 采用国际单位制(SI)秒为基本单位连续累计,不闰秒,起始历元为 2006 年 1 月 1 日 00 时 00 分 00 秒 UTC。BDT 与 UTC 的偏差保持在 100ns 以内(模 1s),BDT 与 UTC 之间的转换参数在北斗卫星导航电文中播发^[11]。UTC 以原子秒长为基础秒长,并采用了闰秒的方法尽量接近世界时,并保持与世界时之间的时间差不超过 $\pm 0.9s$ 。位于法国巴黎的国际地球自转和参考系统服务组织负责确定是否闰秒以及什么时候闰秒,一般在每年的 6 月 30 日或 12 月 31 日的最后一秒加入,最近分别在 2015 年 6 月 30 日和 2016 年 12 月 31 日进行了闰秒^[12]。

1.3 北斗授时信息输出

接收机在完成 BDT 向 UTC 转换后,则进行时间信息输出,常用的输出接口方式有串口时间报文输出、脉冲输出、时间编码输出等^[13]。其中,脉冲输出一般为秒脉冲 1PPS,用于具备 1PPS 输入设备时间同步;时间编码输出通常采用 IRIG-B 编码,常用于靶场测控设备时间同步^[14]。对于北斗时钟,一般由接收机通过串口对其进行时间输出。北斗接收机常用的串口协议为 NMEA 0183 协议,通过 GGA、ZDA 等语句完成向时钟时间输出^[15]。在 ZDA 语句中,含有时、分、秒、日、月、年、本地时区等信息,经过时区转换时钟直接显示即可,如图 2 所示。



注1:本地时区(小时加分钟,以及表示本地区时区的符号)加上本地时间,得到UTC时间。通常以负值表示东经,靠近国际日更线的地区除外。

图 2 NMEA 0183 协议中的 ZDA 语句

Fig. 2 ZDA statement in the NMEA 0183 protocol

从上述北斗授时原理可以看出,在没有闰秒时,北斗时钟授时正确,说明接收机信号处理、本地时钟偏差解算和授时信息输出显示流程都是正确的。因此,在闰秒过程部分北斗时钟出现授时错误,主要原因在于 BDT 向 UTC 转换时出现了错误。因此,要分析北斗时钟出现授时错误的原因,首先需要阐述 BDT 与 UTC 之间的转换关系。

2 BDT 与 UTC 的转换关系

2.1 北斗系统闰秒调整方法

北斗系统广播星历播发 BDT 与 UTC 的时间同步参数包括: A_{0UTC} , A_{1UTC} , Δt_{LS} , WN_{LSF} , DN , Δt_{LSF} 。其中, A_{0UTC} 表示 BDT 相对于 UTC 的钟差; A_{1UTC} 表示 BDT 相对于 UTC 的钟速; Δt_{LS} 表示新的闰秒生效前 BDT 相对于 UTC 的累积闰秒改正数; WN_{LSF} 表示新的闰秒生效的周计数; DN 表示新的闰秒生效的周内日计数; Δt_{LSF} 表示新的闰秒生效后 BDT 相对于 UTC 的累积闰秒改正数^[11]。

在整个闰秒调整过程中,北斗系统会陆续更新各个参数,此处重点关注 Δt_{LS} 、 WN_{LSF} 、 DN 、 Δt_{LSF} 四个参数。以 2016 年 12 月 31 日的闰秒为例,在北斗系统闰秒调整操作前,四个参数分别为 3、239、2、3。到闰秒前 10 周时,北斗系统会向卫星发送闰秒调整指令,上述四个参数会变为 3、61、6、4。在闰秒调整时刻 6h 后,北斗卫星发播的上述四个参数则分别为 4、61、6、4。需要指出的是,GPS 卫星播发的 DN 参数与北斗卫星不同,其取值范围是 1~7(周日至周六)^[16],而北斗卫星播发的 DN 参数取值范围是 0~6(周日至周六)。

2.2 BDT 与 UTC 的转换关系

基于上述北斗卫星的闰秒调整策略,《北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件——公开服务信号(2.1 版)》(下文简称北斗 ICD 文件)给出了 BDT 与 UTC 的转换关系^[11]。

1) 当指示闰秒生效的周计数 WN_{LSF} 和周内天计数 DN 还没到来时,而且用户当前时刻 t_E 处在 $DN + 2/3$ 之前,也就是新的闰秒生效的周计数 WN_{LSF} 和周内天计数 DN 更新后,并且闰秒生效时刻前 8h 之前,则 UTC 与 BDT 之间的变换关系为

$$t_{UTC} = (t_E - \Delta t_{UTC}) [\text{模 } 86400] \quad (1)$$

式中:

$$\Delta t_{UTC} = \Delta t_{LS} + A_{0UTC} + A_{1UTC} \times t_E \quad (2)$$

2) 当用户当前时刻 t_E 处在指示闰秒生效的周

计数 WN_{LSF} 和周内天计数 $DN + 2/3$ 到 $DN + 5/4$ 之间,也就是在闰秒生效时刻前 8h 或后 6h 之内,则 UTC 与 BDT 之间的变换关系为

$$t_{UTC} = W [\text{模}(86400 + \Delta t_{LSF} - \Delta t_{LS})] \quad (3)$$

式中:

$$W = (t_E - \Delta t_{UTC} - 43200) [\text{模 } 86400] + 43200 \quad (4)$$

$$\Delta t_{UTC} = \Delta t_{LS} + A_{0UTC} + A_{1UTC} \times t_E \quad (5)$$

3) 当指示闰秒生效的周计数 WN_{LSF} 和周内天计数 DN 已经过去,且用户当前时刻 t_E 处在 $DN + 5/4$ 之后,也就是闰秒生效时刻后 6h 之后,且下次闰秒调整的指示信息未出现之前,则 UTC 与 BDT 之间的变换关系为

$$t_{UTC} = (t_E - \Delta t_{UTC}) [\text{模 } 86400] \quad (6)$$

式中:

$$\Delta t_{UTC} = \Delta t_{LSF} + A_{0UTC} + A_{1UTC} \times t_E \quad (7)$$

3 部分北斗授时时钟闰秒解算错误分析

下面根据 2.1 节北斗系统闰秒调整方法和 2.2 节中的三个转换公式对部分北斗授时时钟闰秒解算错误进行分析。

3.1 错误现象

依据中国科学院国家授时中心闰秒通知,闰秒前后 UTC 秒信号所标志的时刻依次如图 3 所示^[17]。

2016年12月31日	23h 59m 59s	UTC
2016年12月31日	23h 59m 60s	UTC
2017年 1月 1日	00h 00m 00s	UTC

图 3 闰秒前后 UTC 变化

Fig. 3 UTC changes before and after leap second

北斗时钟出现的错误现象首先是闰秒时刻不闰秒的情况,如图 4 所示(北斗时钟显示的时间为北京时间,与 UTC 时相差 8h)。



图 4 闰秒前后部分北斗时钟错误时间显示

Fig. 4 Error time display for some BeiDou clock before and after part of leap second

对比图3和图4可以看出,北斗时钟出现的错误是没有闰秒,即缺少了07:59:60的时间显示。

还有一部分北斗授时时钟,虽然在闰秒时刻没有跳秒,但是在闰秒时刻6h后出现了连续两次相同时间显示,往后时间显示反而正确了,如图5所示。



图5 闰秒时刻6h后连续两次相同时间显示

Fig. 5 The same time displays twice 6 hours after leap second

3.2 错误原因分析

从第2节的阐述可以看出,部分北斗授时时钟闰秒过程出现错误,主要原因在于BDT与UTC转换关系使用错误。

3.2.1 闰秒时刻不闰秒错误情况分析

从2.1节可以知道,2016年12月31日闰秒前,BDT与UTC累积闰秒改正数为3s,因此闰秒时刻BDT为2017年1月1日0时0分3秒(对应BDT574周3秒),此时用户系统从广播电文中解算出的时间同步参数为 $A_{0UTC}=1 \times 10^{-9}$, $A_{1UTC}=0$, $\Delta t_{LS}=3$, $WN_{LSF}=61$, $DN=6$, $\Delta t_{LSF}=4$ 。而依据北斗ICD文件给出BDT与UTC的转换关系,在闰秒时刻,本应该按照式(3)进行转换,但出现错误的北斗时钟一直按照式(1)进行转换。按照式(1)转换的错误过程如下:

$$\begin{aligned} t_{UTC} &= (t_E - \Delta t_{UTC})[\text{模 } 86400] \\ &= [t_E - (\Delta t_{LS} + A_{0UTC} + A_{1UTC} \times t_E)][\text{模 } 86400] \\ &= [3 - (3 + 1 \times 10^{-9} + 0 \times 3)][\text{模 } 86400] \\ &= 0 \end{aligned}$$

因此,就会出现图4所示闰秒时刻北斗时钟直接由07:59:59跳至08:00:00,而没有发生闰秒。

3.2.2 闰秒后6h时间反而显示正确情况分析

对于闰秒后6h时间突然显示正确的现象,原因仍在于北斗时钟一直按照式(1)进行转换。依据2.1节北斗系统闰秒调整方法,在闰秒调整时刻后6h之前,参数 Δt_{LS} 一直为3,因此只依据式(1)进行

BDT与UTC时的转换北斗时钟不会发生跳秒;而在闰秒调整时刻6h后,北斗卫星播放的参数 Δt_{LS} 变为4,依据式(1)计算,发生跳秒。

分别选取闰秒生效时刻后6h前后的BDT2017年1月1日6时0分3秒和4秒(分别对应BDT574周21603s和21604s),此时北斗时钟从广播电文中解算出的时间同步参数在0分3秒时 $\Delta t_{LS}=3$,在0分4秒时 $\Delta t_{LS}=4$,利用式(1)进行计算。0分3秒时:

$$\begin{aligned} t_{UTC} &= (t_E - \Delta t_{UTC})[\text{模 } 86400] \\ &= [t_E - (\Delta t_{LS} + A_{0UTC} + A_{1UTC} \times t_E)][\text{模 } 86400] \\ &= [21603 - (3 + 1 \times 10^{-9} + 0 \times 21603)][\text{模 } 86400] \\ &= 21600 \end{aligned}$$

0分4秒时:

$$\begin{aligned} t_{UTC} &= (t_E - \Delta t_{UTC})[\text{模 } 86400] \\ &= [t_E - (\Delta t_{LS} + A_{0UTC} + A_{1UTC} \times t_E)][\text{模 } 86400] \\ &= [21604 - (4 + 1 \times 10^{-9} + 0 \times 21604)][\text{模 } 86400] \\ &= 21600 \end{aligned}$$

因此,就会出现图5所示两次显示14:00:00,相当于发生了跳秒,时间反而显示正确了。

3.3 正确计算方法

对于BDT与UTC的正确转换,应该严格依据ICD文件的相关说明。

对于闰秒时刻,时间处于闰秒生效时刻前8h或后6h之内,应使用式(3)进行转换:

$$\begin{aligned} t_{UTC} &= W[\text{模}(86400 + \Delta t_{LSF} - \Delta t_{LS})] \\ &= \{(t_E - \Delta t_{UTC} - 43200)[\text{模 } 86400] + 43200\} \cdot \\ &\quad [\text{模}(86400 + \Delta t_{LSF} - \Delta t_{LS})] \\ &= \{(t_E - (\Delta t_{LS} + A_{0UTC} + A_{1UTC} \times t_E) - 43200) \cdot \\ &\quad [\text{模 } 86400] + 43200\}[\text{模}(86400 + \Delta t_{LSF} - \Delta t_{LS})] \\ &= \{[3 - (3 + 1 \times 10^{-9} + 0 \times 3) - 43200] \cdot \\ &\quad [\text{模 } 86400] + 43200\}[\text{模 } 86401] \\ &= 86400 \end{aligned}$$

86400对应的UTC时为2016年12月31日23时59分60秒,正好与国家授时中心闰秒通知相吻合,对应北京时间2017年1月1日7时59分60秒,北斗时钟时间显示正确。

对于闰秒后6h,考虑部分卫星可能还没有入境, Δt_{LS} 可能没有更新,导致部分卫星播发的是 $\Delta t_{LS}=4$,部分卫星播发的是 $\Delta t_{LS}=3$ 。因此,应该选用式(6)进行转换,直至下次闰秒调整的指示信息出现,再改用式(1)。下面分别重新计算BDT2017年1月1日6时0分3秒和4秒时的转换。

在BDT2017年1月1日6时0分3秒时,时间处于闰秒生效时刻前8h或后6h之内,应使用式(3)进行转换:

$$\begin{aligned} t_{UTC} &= W[\text{模}(86400 + \Delta t_{LSF} - \Delta t_{LS})] \\ &= \{(t_E - \Delta t_{UTC} - 43200)[\text{模} 86400] + 43200\} \cdot \\ &\quad [\text{模}(86400 + \Delta t_{LSF} - \Delta t_{LS})] \\ &= \{(t_E - (\Delta t_{LS} + A_{0UTC} + A_{1UTC} \times t_E) - 43200) \cdot \\ &\quad [\text{模} 86400] + 43200\}[\text{模}(86400 + \Delta t_{LSF} - \Delta t_{LS})] \\ &= \{[21603 - (3 + 1 \times 10^{-9} + 0 \times 21603) - 43200] \cdot \\ &\quad [\text{模} 86400] + 43200\}[\text{模} 86401] \\ &= 21599 \end{aligned}$$

在BDT2017年1月1日6时0分4秒时,时间处于闰秒生效时刻6h之后,应使用式(6)进行转换(使用式(6),即使部分卫星 Δt_{LS} 未更新也不受影响):

$$\begin{aligned} t_{UTC} &= (t_E - \Delta t_{UTC})[\text{模} 86400] \\ &= [t_E - (\Delta t_{LSF} + A_{0UTC} + A_{1UTC} \times t_E)][\text{模} 86400] \\ &= [21604 - (4 + 1 \times 10^{-9} + 0 \times 21604)][\text{模} 86400] \\ &= 21600 \end{aligned}$$

21599、21600分别对应UTC时2017年1月1日5时59分59秒和6时0分0秒,对应北京时间2017年1月1日13时59分59秒和14时0分0秒,北斗时钟时间显示正确。

4 结论

北斗卫星导航系统授时,对于卫星、传播路径、接收机有关的误差源,造成的授时误差仅为纳秒级;存在电磁干扰或欺骗干扰时,造成的授时误差最多也只有毫秒级。对于闰秒调整过程中,部分北斗时钟出现的授时误差达秒级错误,主要问题在于这些北斗时钟没有严格按照北斗ICD文件进行BDT与UTC之间的转换。为了避免这一错误现象,北斗时钟在闰秒过程中,需要按照用户当前时刻与闰秒生效时刻之间的关系,在闰秒生效时刻前8h之前、闰秒生效时刻前8h至后6h之内、闰秒生效时刻后6h之后分别选用相应的BDT与UTC转换关系式,才能确保授时正确。

参考文献

[1] The State Council Information Office of the People's Republic of China. China's BeiDou Navigation Satellite System [M]. Beijing: Foreign Languages Press,

- 2016:1-2.
- [2] 沙海, 占建伟, 王建辉, 等. 北斗卫星导航系统授时方法的比较与研究[C]. 第四届中国卫星导航学术年会, 2013.
- [3] Wikipedia. Error analysis for the Global Positioning System [EB/OL]. [2017-01-31]. https://en.wikipedia.org/wiki/Error_analysis_for_the_Global_Positioning_System.
- [4] 王天. 北斗卫星导航系统授时性能评估研究[D]. 西安: 长安大学, 2014:15-20.
- [5] 杨帆, 袁海波, 董绍武. 基于北斗监测型接收机和定制GPS时间传递接收机的单向授时精度分析[C]. 第四届中国卫星导航学术年会, 2013.
- [6] Khan F A. Behavior of the GPS Timing Receivers in the Presence of Interference [EB/OL]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.144.5173&rep=rep1&type=pdf>.
- [7] 焦海松, 万安民, 王博, 等. 电磁干扰对GPS/北斗设备授时精度的影响[J]. 全球定位系统, 2013, 38(6): 26-30.
- [8] 许益乔, 曾芳玲, 胡燕燕. 一种对GPS授时干扰的新方法[J]. 电子测试, 2013, 2(3):99-102.
- [9] 杨俊, 单庆晓. 卫星授时原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016:1-3.
- [10] 陈军. GPS接收机单向授时算法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2010:21-22.
- [11] 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件——公共服务信号(2.1版)[M]. 中国卫星导航系统管理办公室, 2016:1-2.
- [12] UTC TIME STEP on the 1st of January 2017 [EB/OL]. <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc>.
- [13] 吴海涛, 李变, 武建锋, 等. 北斗授时技术及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016:129-130.
- [14] 杨志刚, 郑丽丽. IRIG-B码终端中闰秒时间的处理[J]. 电子科技, 2013, 26(6):89-93.
- [15] Betke K. The NMEA 0183 Protocol [C]//Standard for Interfacing Marine Electronics Devices, National Marine Electronics Association, Maryland, 2001: 19-20.
- [16] Global Positioning System Directorate. Systems Engineering & Integration Interface Specification IS-GPS-200F [M]. Global Positioning Systems Directorate, 2011:125-126.
- [17] 中国科学院国家授时中心. UTC闰秒通知[J]. 时间频率公报, 2016(7).