



北斗 RNSS 授时技术在智能电网 雷电定位系统中的应用

张浩¹, 杨鸿珍², 邵炜平², 姚继明¹

(1. 全球能源互联网研究院有限公司, 江苏 南京 210003;

2. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310007)

摘要: 智能电网雷电定位系统是一项重要的电力业务, 其雷电定位精度很大程度上取决于时间同步的精度。研究并比较了 3 种北斗授时方式, 发现 RNSS 授时方式最适合应用于雷电定位系统。进而研究了 RNSS 授时的原理和特点, 并提出了一种低成本的用户终端授时软硬件架构和算法, 利用经过卡尔曼滤波的北斗秒脉冲信号, 通过 PID 算法, 校准用户时钟并调节压控温补晶振, 使得用户终端时间和 GNSS 时间的偏差在任何时刻都控制在 100 ns 以下, 以满足雷电定位系统的精度要求。

关键词: 北斗; RNSS; 授时; 智能电网; 雷电定位; 时间同步

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019032

Application of BeiDou RNSS timing technology in smart grid lightning locating system

ZHANG Hao¹, YANG Hongzhen², SHAO Weiping², YAO Jiming¹

1. Global Energy Internet Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210003, China

2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China

Abstract: The smart grid lightning location system is an important power service, and its lightning location accuracy largely depends on the accuracy of time synchronization. Three kinds of BeiDou timing methods were studied and compared, and the RNSS timing method was found to be most suitable for lightning location systems. Furthermore, the principle and characteristics of RNSS timing were studied, and a low-cost user terminal timing hardware and software architecture and algorithm were proposed. The Kalman filter-based BeiDou second pulse signal was used to calibrate the user clock and adjust the voltage through the PID algorithm. The temperature-controlled crystal oscillator made the deviation between the user terminal time and the GNSS time below 100 ns at any time to meet the accuracy requirements of the lightning positioning system.

Key words: BeiDou, RNSS, timing, smart grid, lightning locating, time synchronization

收稿日期: 2018-10-08; 修回日期: 2019-01-24

基金项目: 国家电网公司科学技术项目“北斗三代精确定位技术研究及其在智能电网中的应用”(No.5211XT180047)

Foundation Item: State Grid Science and Technology Project “Research on the Third-generation Precise Positioning Technology of BeiDou and its Application in Smart Grid” (No.5211XT180047)

1 引言

智能电网的大部分设施都部署在室外和野外,例如变压器和输电线路,它们受外部自然环境的影响比较大。对电力系统稳定运行影响最大的是雷击。雷击会产生雷电过电压,造成设备损坏甚至人员伤亡。因此,对雷电的定位、分析和防护是电力安全生产的重要工作。雷电定位系统是基于网络技术的大面积、全自动、实时监测雷电活动的计算机在线系统,是目前电力系统研究雷电活动最先进的手段。雷电定位系统对时间同步的要求极高。根据《电力系统雷电定位监测系统技术规程》DL/T 1283-2013的规定,其时钟同步的精度应优于 $0.1\ \mu\text{s}$,即 $100\ \text{ns}$,是所有电力应用中对时钟同步要求最高的。北斗授时技术在雷电定位系统中的成功应用,将标志着北斗授时技术可以满足所有智能电网应用对时间同步的精度要求,具有广泛的应用价值。

2 雷电定位的应用及原理

2.1 雷电定位系统应用

我国电网防雷工作,基于“发现问题—分析问题—解决问题”的技术路线,已形成一套较为成熟的电网防雷技术和规程。发现问题是防雷工作的关键,主要依靠雷电定位和监测技术,广域雷电定位系统的雷电探测站目前都是数字式,总体探测效率提升至90%以上,330 kV及以上电路雷击故障查找率提升至98%以上,定位误差 $\leq 500\ \text{m}$;分布式雷击故障监测技术及系统进一步推广应用,监测设备在26个省级电网共200多回输电线路上安装800余套,雷击故障识别准确率达到98%以上,绕击/反击识别准确率达到95%以上,故障点定位准确率达到92%以上^[1]。

2.2 雷电定位原理

当雷电发生时,雷击所产生的电磁波会辐射到监测站。监测站通过对波形的判别和分析,可

以监测出雷击的强度、方位和类型等信息,并记录下监测到雷击的时间。之后通过联合分析多个监测站的数据,可以实现对雷击位置的准确估计。

雷电定位系统一般同时使用两种基本方法实现综合定位:一种是定向法;另一种是时差法。时差法是效果更好的一种定位方法,其定位精度很大程度上取决于时钟同步的精度。随着北斗授时精度的不断提高,利用RNSS(radio navigation satellite system)授时技术可以极大地提高雷电定位系统时钟同步的精度,从而提升雷电定位的应用水平^[2]。

2.2.1 定向雷电定位

定向定位的监测点可以探测到雷电的方向,并且达到一定的精度要求。理论上,联合两个监测点的数据,就可以实现雷电定位,如图1所示。受探测器精度的限制,定向法的定位误差较大。而且雷电发生的位置距离监测点越远,误差越大。

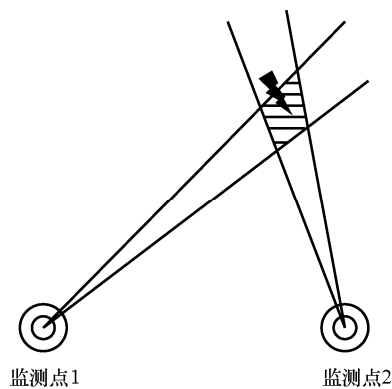


图1 定向雷电定位原理

2.2.2 时差雷电定位

利用时差定位法的监测点可以记录下监测到雷电信号时的时间,通过比对多个监测点记录的监测到同一雷电信号的时间,实现雷电定位。这种方法和卫星定位以及基站AGPS定位方法在本质上是一样的,都是利用时差换算成距离差实现定位,如图2所示。

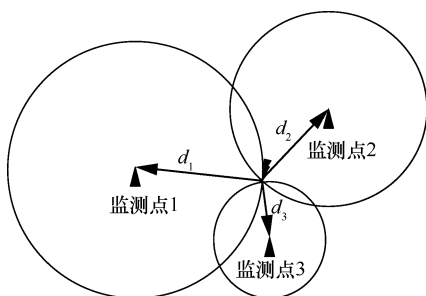


图2 时差雷电定位原理

图2中:

$$d_2 = d_3 + c(t_2 - t_3) \quad (1)$$

$$d_1 = d_3 + c(t_1 - t_3) \quad (2)$$

其中, d_1 、 d_2 、 d_3 是雷击位置到监测点 1、2、3 之间的距离, t_1 、 t_2 、 t_3 是监测点 1、2、3 监测到雷电的时间, c 是雷击形成的电磁波传播的速度。因为监测点的位置已知, 合适的 d_3 会使得 3 个圆交于一点, 即系统通过计算得到的雷击位置。

从时差定位原理中不难看出, 雷电定位系统时钟同步的精度直接决定了定位精度。如果按照北斗最低的 100 ns 的授时精度计算, 定位误差约为 30 m。与定向定位技术相比, 误差主要取决于时钟同步误差和雷电电磁信号的传播时延, 其定位精度比定向定位高 5~10 倍^[2]。

3 卫星授时技术选择

北斗授时技术主要分为 RDSS (radio determination satellite service) 单向授时、RDSS 双向授时和 RNSS 授时。

RDSS 单向授时是由北斗主控站通过卫星, 将北斗系统时间传递给用户终端, 授时的误差主要取决于对于时间信号传递的估计, 如图 3 所示。在北斗主控站、中继卫星和用户终端位置已知的情况下, 可以测算出信号传播时延, 但是这个时延受信号传输的影响较大, 用户终端对这个时间的估计和计算通常存在较大的误差, 一般精度只能控制在 100.6 ns 以下。

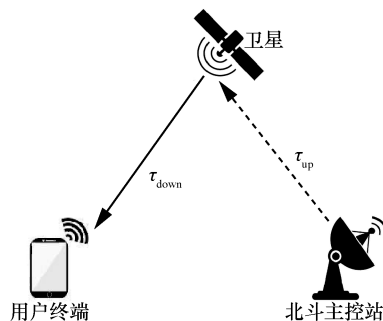


图3 RDSS 单向授时原理

RDSS 双向授时通过用户终端和北斗主控站之间进行时间信息的交换, 可以测量出信号传输时延, 如图 4 所示。相比 RDSS 单向授时的估算方式, 精度得到极大的提高, 可以控制在 10.8 ns 以下。RDSS 双向授时的方式精度很高, 但是因为有时钟信息交互, 需要卫星以及北斗主控站对用户的同步需求进行响应, 占用了卫星和北斗主控站的资源, 因此有用户容量限制。

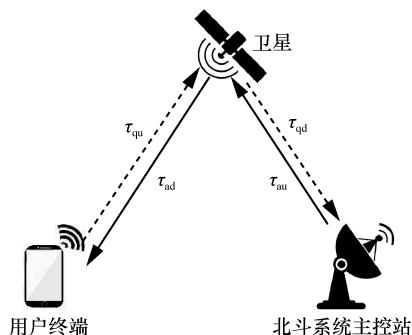


图4 RDSS 双向授时原理

RNSS 授时方式也是一种单向的时钟同步方式, 不同的是, RNSS 的目标是将用户时钟和卫星时钟进行同步, 此时只需要计算卫星到用户终端的时钟传输时延, 并且可以利用多星的时间进一步降低下行时延的估计误差, 一般误差在 20 ns 以内, 如图 5 所示。由于卫星时间和系统时间之间的误差极小, 综合测算, RNSS 授时方式的误差, 即用户终端和北斗系统之间误差可以控制在 23.7 ns 以内。

表 1 对比了 3 种授时方式的主要指标。从时间同步精度上来说, RNSS 授时方式的精度不是最

表1 北斗3种授时方式比较

	RDSS 单向授时	RDSS 双向授时	RNSS 授时
授时精度/ns	100.6	10.8	23.7
可用范围	区域地区	区域地区	全球
前提条件	位置已知	无	无
首次授时时间	快	快	需要首先定位
连续性	连续授时	间断授时	连续授时
用户机功率	小	要求发射射频信号, 功率大	小
动态范围	静止用户	较低动态	高动态
用户数目	无限制	受系统容量限制	无限制
保密性	较差	较差	高

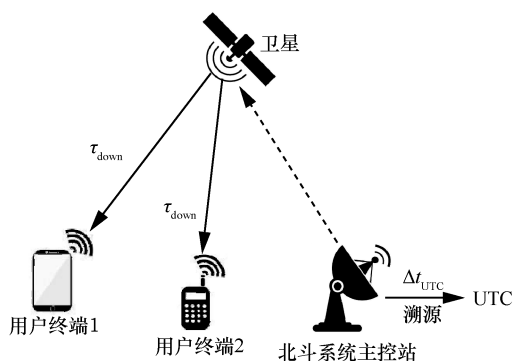


图5 RNSS授时原理

高的,但是完全可以满足电力应用需要,而且RNSS授时方式可连续授时,并且具有用户机功率小、用户数目无限制、保密性高等优点,是北斗授时技术应用于电力系统时最好的技术选择^[3-4]。

4 北斗 RNSS 授时原理

4.1 基本原理和参量

授时的目的是要使得待授时的时钟（用户钟面时间）和基准时间（UTC时间）之间的误差控制在一个允许的范围内。这里涉及几个时间概念和关键的量,具体如图6所示^[5],具体介绍如下。

- UTC时间——采用了以原子时秒长为尺度,时刻上接近于世界时的一种折中时间系统,称为协调世界时(coordinated universal time),是本文中的基准时间。

- GNSS(global navigation satellite system)时间——全球卫星导航系统的系统时间。
- 卫星钟面时间——不同卫星利用自身时钟源所维持的钟面时间。
- 用户钟面时间——用户终端利用自身时钟源所维持的钟面时间。

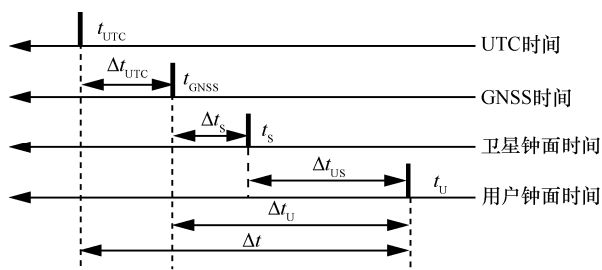


图6 4种重要的时间参量示意图

GNSS导航电文中携带相关的时间信息,通常包括整周计数、周内秒计数、卫星钟与GNSS系统时钟差参数、GNSS系统时间与UTC时间同步参数信息。这些信息通过扩频调制,由卫星发送,经过空间传播到达用户终端。RNSS单向授时指用户终端通过接收卫星信号,由用户终端自主计算出用户钟面时间和卫星钟面时间之差 Δt_{US} ,并根据卫星钟面时间和GNSS时间之差 Δt_s 、GNSS时间和UTC时间之差 Δt_{UTC} ,使得用户钟面时间和UTC时间同步^[4]。

卫星导航系统为了保证其授时和定位的精



度,必须保证 GNSS 时间和 UTC 时间之差 Δt_{UTC} 以及卫星钟面时间和 GNSS 时间之差 Δt_s 足够小。这个过程是卫星导航系统自身的时间同步,在整个系统运行的过程中不断地进行。

4.2 Δt_{UTC} 的计算方式

GNSS 时间和 UTC 时间之差 Δt_{UTC} 的计算方法为:

$$\Delta t_{UTC} = A_0 + A_1(t_{GNSS} - t_{OU}) + \Delta t_{LS} \quad (3)$$

其中,参数 $\{A_0, A_1, t_{OU}, \Delta t_{LS}\}$ 均可以通过导航电文获得,经过计算,卫星导航系统可以将 GNSS 时间溯源到 UCT 时间,并保持极高精度的同步。

4.3 Δt_s 的计算方式

卫星钟面时间和 GNSS 时间之差 Δt_s 的计算方法为:

$$\Delta t_s = a_{f0} + a_{f1}(t_{GNSS} - t_{OC}) + a_{f2}(t_{GNSS} - t_{OC})^2 + \Delta t_r - t_{GD} \quad (4)$$

其中, $\{a_{f0}, a_{f1}, a_{f2}\}$ 是卫星电文中包含的参数; t_{OC} 是模型以 GNSS 时间为基础的参考时间; t_{GD} 为星上设备时延差; $\Delta t_r = Fe_s \sqrt{a_s} \sin E_k$ 为相对论参数,其中常数 $F = -4.442\ 807\ 633 \times 10^{-10} \text{ s/m}^{1/2}$, e_s 为卫星轨道偏心率, a_s 为轨道长半径, E_k 为偏近点角。

利用这些计算式和数据,卫星导航系统可以不断地进行时间同步,将 Δt_{UTC} 和 Δt_s 控制在极小的范围内。

4.4 Δt_{US} 的计算方式

最后要解决的是用户钟面时间和卫星钟面时间差 Δt_s 的计算,计算的过程主要是比对卫星时钟和用户时钟。卫星发送基于自身时钟的授时报文给用户终端,用户终端得到报文内的时间信息和自身的时钟进行比对,得到时钟差 τ_{delay} ,再考虑卫星信号传输到用户终端的时延 τ_{down} ,则:

$$\Delta t_{US} = \tau_{\text{delay}} - \tau_{\text{down}} \quad (5)$$

其中, τ_{down} 的计算是关键:

$$\tau_{\text{down}} = \frac{\sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2 + (z-Z)^2}}{c} + \tau_{\text{ion}} + \tau_{\text{tro}} + \tau_{\text{mul}} + \varepsilon \quad (6)$$

其中, (x,y,z) 是用户终端的位置, (X,Y,Z) 是卫星的位置。不难理解,卫星和用户之间的距离除以光速 c ,得到的是信号下行传输时延。但还需要考虑其他因素的影响。其中, τ_{ion} 是电离层带来的时延, τ_{tro} 是对流层带来的时延, τ_{mul} 是多径效应带来的时延, ε 是其他因素带来的综合时延。从式 (6) 中可以看出,北斗 RNSS 单向授时,在计算 τ_{down} 时,需要知道用户终端的位置。对于静态终端,如果有精确的位置信息,可以实现准确的授时;对于动态终端,则需要首先利用北斗系统进行定位,计算出自身的位置,然后才能够实现精确授时。

4.5 Δt 的计算方式

有了上面 3 个量,用户钟面时间和 UTC 时间之间的误差 Δt 就可以得到了,是上述 3 个量的和。

$$\Delta t = \Delta t_{UTC} + \Delta t_s + \Delta t_{UTC} \quad (7)$$

5 用户终端时钟同步系统设计

5.1 硬件架构

用户终端的时钟同步系统的硬件架构如图 7 所示。

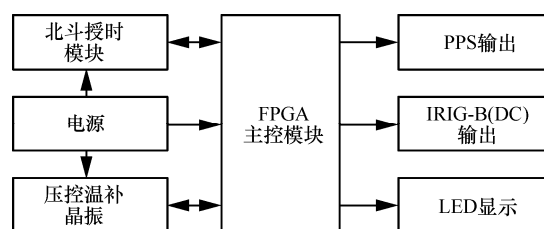


图 7 用户终端硬件架构

北斗授时模块采用合纵思创公司研制的 U 系列 UGC-RT 授时接收机,可以实现北斗和 GPS 组合授时,相比单一卫星系统更加可靠,在复杂电磁环境下具有较强的抗带外干扰能力。

晶振采用具有 0.1 ppm 精度的压控温补晶振。这种晶振成本较低,频率稳定度受温度的影响较小,并可通过电压的调整控制输出的频率。该晶振输出 10 MHz 的振荡波形。

FPGA 主控模块采用 Intel 的 10M08 芯片。该

芯片具有 8×10^3 个逻辑单元, 并且具有锁相环和 DAC, 方便实现利用电压对晶振的频率进行调节, 是主要授时算法的执行器件。通过对 FPGA 的编程, 最终将产生用户终端的 PPS 输出、IRIG-B (DC) 输出, 并通过 LED 显示用户钟面时间。

5.2 软件算法

利用 RNSS 授时, 北斗授时模块会产生与 UTC 时间同步的秒脉冲, 但是总存在一定的误差 Δt 。这个误差因为不同的授时条件而不同, 但是一般都能保证 $\Delta t < 23.7$ ns。 Δt 是随机的, 服从均值为 0 的正态分布。秒脉冲从长期来看是准确的, 但每次的误差是随机的。用户终端时间来源于终端的时钟源 (通常是晶振), 其随机误差非常小, 具有良好的短期稳定性, 但受老化率、温度等客观因素的影响, 长期时间内会累积较大误差。因此, 利用北斗 RNSS 授时模块提供的秒脉冲信号, 结合本地晶振, 不断修正用户终端时间, 是时钟同步的普遍做法。本文给出一种时钟同步与跟随的方法, 具体实现方案如图 8 所示。

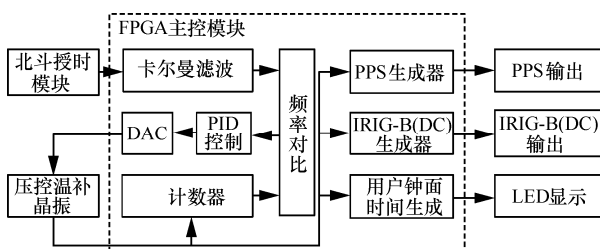


图 8 用户终端软件实现方案

北斗授时模块产生的秒脉冲信号经过卡尔曼滤波后, 可以消除无卫星信号时无脉冲信号带来的影响, 并且提高秒脉冲信号的精度。晶振产生的信号经过计数器计数后与秒脉冲信号进行频率比对, 利用 PID (proportion, integral & derivative) 算法来决定对晶振频率进行加快或减慢的调整。通过 DAC 得到调节电压, 对压控温补晶振进行调整, 使其振荡频率更接近秒脉冲信号的频率, 实现驯钟。以基准秒脉冲为准确的整秒时刻, 在整秒时刻之间驯服后

的 10 MHz 振荡器输出波形为更小的时间单位, 实现时钟同步与跟随, 生成 PPS 信号、IRIG-B 信号以及用户钟面时间^[6-7]。

5.2.1 卡尔曼滤波

本质上来讲, 卡尔曼滤波就是一个信号处理与变换的过程, 这个过程通过使用 Verilog HDL 对 FPGA 编程来实现。卡尔曼滤波的基本思想是: 以最小均方误差为最佳估计准则, 采用信号与噪声的状态空间模型, 利用前一时刻的估计值和当前时刻的观测值更新对状态变量的估计, 求出当前时刻的估计值, 算法根据建立的系统方程和观测方程对需要处理的信号做出满足最小均方误差的估计。北斗的秒脉冲信号和系统时间之间存在的误差 Δt_s 服从正态分布, 因此卡尔曼滤波特别适合对卫星秒脉冲进行滤波, 可以有效地提高秒脉冲的精度。有时因为干扰和其他原因, 用户终端无法接收到卫星信号时, 秒脉冲信号只能通过估计获得, 而卡尔曼滤波可以很好地解决这类问题, 实现对秒脉冲信号的准确估计。卡尔曼滤波的原理和算法比较复杂, 相关细节可见参考文献[8]。

5.2.2 频率比对和 PID 算法

应用终端晶振选择 10 MHz 的压控温补型振荡器, 精度优于 0.1 ppm, 即每百万个周期误差 0.1 个周期。对于 10 MHz 的晶振来说, 每秒误差一个周期, 每个周期是 100 ns, 即每秒误差 100 ns。利用卡尔曼滤波后得到的秒脉冲是非常准确的, 保守估计其精度优于 20 ns, 而且没有累计误差。可以利用长时间的频率统计, 以秒脉冲为基准, 与晶振输出的周期波形进行更精确的频率比对。例如, 可以进行长达 n s 的频率计数, 通过 PID 控制算法实现压控温补振荡器在 n s 内, 和基准秒脉冲之间的误差控制在 1 个振荡周期内。这样, 晶振的精度可以提高到每 n s 误差 100 ns, 频率精度得到极大提高。PID 控制算法具体如图 9 所示。

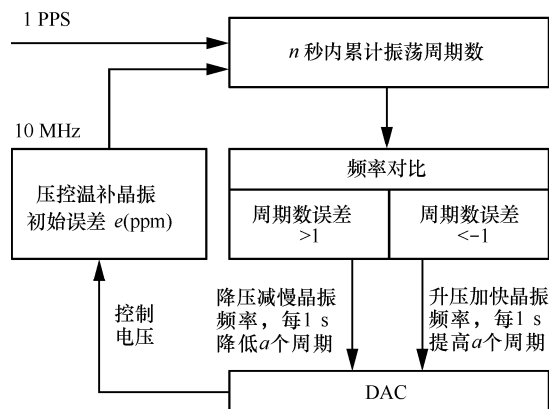


图9 PID控制算法示意图

例如, $n=50$ 时, PID 算法统计 50 s 内的振荡周期数, 如果大于 $5 \times 10^8 + 1$ 个周期, 则说明振荡过快, 将控制电压下调一个最小单位, 使其振荡得慢一些; 如果小于 $5 \times 10^8 - 1$ 个周期, 则说明振荡过慢, 将控制电压上调一个最小单位, 使其振荡得快一些; 如果正好是 $5 \times 10^8 - 1$ 、 5×10^8 、 $500 \times 10^8 + 1$ 个周期, 则不进行调整。利用 PID 算法调整后的振荡精度能够得到提高, 每次调整的颗粒度是 a 个周期, 理论上可以将压控温补晶振的精度提高到 0.01 ppm 左右。

5.2.3 误差分析

按照这样的设计, 每个整秒的时间采用经过卡尔曼滤波的秒脉冲, 其误差优于 20 ns。在之后的 1 s 内, 采用振荡器的输出为时间刻度计时, 其 1 s 内的累计误差优于 10 ns。此时整体误差优于 30 s, 对于雷电定位系统, 优于 100 ns 的精度要求完全能够满足要求。即使在 8 s 内失去北斗时间信号, 仅利用本地授时, 也能够保证时钟的误差在 100 ns 以内。

5.3 仿真分析

利用 MATLAB 对 PID 控制算法进行仿真, 其结果如图 10 所示。可以看出在用户设备开机初期, 用户终端晶振与秒脉冲之间的误差比较大。PID 算法在不断减小误差, 并在约 400 s 之后逐渐收敛并稳定下来, 使得每 50 s 的时钟漂移始终控制在 100 ns 以内。

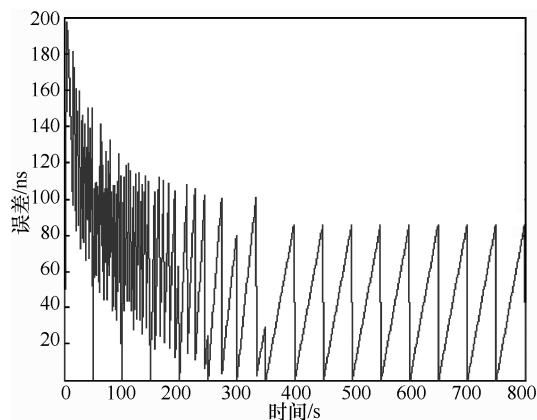


图10 用户终端晶振与秒脉冲之间的误差仿真结果

算法收敛的速度与控制电压调节的幅度有关, 幅度较大的情况下, 收敛比较快, 但是后期频率的稳定度不高, 频率漂移比较快。减小调节的幅度, 有利于提高后期频率的稳定度, 但是前期收敛的速度会变慢。通过仿真, 比较合适的调整幅度为每秒加快或减慢 0.01~0.02 个周期。

6 结束语

北斗三号卫星系统的建设, 使得其定位和授时精度都得到了进一步的提升, 从而更广泛地应用于各行各业。雷电定位是电力系统中一种重要的应用, 对电力系统的可靠稳定运行具有重要意义, 而时间同步的精度是雷电定位的关键。电力系统有自己的同步支撑系统, 而北斗作为一种新的时钟同步的技术路线, 可以应用于雷电定位系统。北斗卫星信号覆盖广, 在我国区域范围内其服务质量更高, 其 RNSS 授时的秒脉冲精度优于 23.7 ns, 而且没有累计误差, 通过无线方式授时, 灵活方便, 是一种非常理想的时钟同步技术。利用本文所述的终端授时和守时技术, 可以实现低成本、高精度的电力系统授时, 大幅提升雷电定位系统的性能, 使其能够更快速准确地确定雷击位置, 这对于电力系统降低雷击带来的风险和经济损失、快速排查雷击故障、在最短时间内恢复电力生产都具有积极意义, 将产生良好的经济效

益和社会效益。而雷电定位系统是所有电力业务中对时间同步要求最高的应用系统,北斗授时技术在雷电定位系统中的成功应用,也标志着北斗技术理论上可以满足所有电力业务对时钟同步精度的要求,北斗授时技术在电力系统中必将有着更为广泛的应用。

参考文献:

- [1] 陈家宏, 赵淳, 谷山强, 等. 我国电网雷电监测与防护技术现状及发展趋势[J]. 高电压技术, 2016, 42(11).
CHEN J H, ZHAO C, GU S Q, et al. Current status and development trend of lightning monitoring and protection technology in China's power grid[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11).
- [2] 王泳. 雷电定位监测在电力系统中应用浅析[J]. 供用电, 2003, 20(2): 29-30.
WANG Y. Analysis of the application of lightning location monitoring in power systems[J]. Power Supply, 2003, 20(2): 29-30.
- [3] 张琪, 林辉. 基于 STK 轨道预报数据的北斗卫星导航系统频谱监测选址分析[J]. 电信科学, 2018, 34(5): 72-80.
ZHANG Q, LIN H. Analysis of spectrum monitoring and location selection of Beidou satellite navigation system based on STK orbit prediction data[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(5): 72-80.
- [4] 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年5月15—17日, 中国, 武汉. [S.l.:s.n.], 2013.
SHA H, ZHAN J W, WANG J H, et al. Comparison and research on the timing method of Beidou satellite navigation system[C]//The 4th China Satellite Navigation Academic Annual Conference, May 15-17, 2013, Wuhan, China. [S.l.:s.n.], 2013.
- [5] 刘良江, 李庆先, 曹雄恒, 等. 基于北斗的智能电网 RNSS 授时及同步技术探讨[J]. 电子世界, 2014(9): 42-43.
LIU L J, LI Q X, CAO X H, et al. Discussion on the RNSS timing and synchronization technology based on Beidou's smart grid [J]. Electronic World, 2014(9): 42-43.
- [6] 赵东艳, 原义栋, 石磊, 等. 用于智能电网建设的北斗/GPS 高精度授时方案关键技术[J]. 电网技术, 2013, 37(9).
ZHAO D Y, YUAN Y D, SHI L, et al. Key technology of Beidou/GPS high-precision timing scheme for smart grid construction [J]. Power Grid Technology, 2013, 37(9).

- [7] 童伟. 基于北斗 II 代/GPS 的电力系统双模时间同步时钟的研制[J]. 电力建设, 2014, 34(4).
TONG W. Development of dual-mode time-synchronous clock for power system based on BeiDou II/GPS[J]. Electric Power Construction, 2014, 34(4).
- [8] 胡国荣, 欧吉坤. 改进的高动态 GPS 定位自适应卡尔曼滤波方法[J]. 测绘学报, 1999, 28(11).
HU G R, OU J K. Improved high dynamic GPS positioning adaptive Kalman filtering method [J]. Journal of Surveying and Mapping, 1999, 28(11).

[作者简介]



张浩 (1981—), 男, 全球能源互联网研究院有限公司研究室副主任、高级工程师, 主要从事电力系统无线通信领域的技术研究工作。



杨鸿珍 (1975—), 女, 国网浙江省电力有限公司运检中心书记/副主任、高级工程师, 主要从事电力通信系统的管理和运维工作。



邵炜平 (1976—), 男, 国网浙江省电力有限公司科技信通部通信处副处长、高级工程师, 主要从事电力通信系统的管理工作。



姚继明 (1987—), 男, 全球能源互联网研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为电力通信技术。