

电缆故障在线测距中高速 同步采集卡精确时标获取方法

陈玉林,陈允平,龚庆武

(武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072)

摘要: 为减小全球定位系统(GPS)同步时钟误差对双端行波测距的影响,使电缆故障在线测距能达到实用化水平,提出一种能够获取精确时标的高速同步采样方案。利用 GPS 时钟无累计误差和高精度晶振频率稳定性高的特点,并将高速采样与秒脉冲捕捉有机结合,通过硬件方式无延时地捕捉秒脉冲以获取精确的时间计数值。对秒脉冲间的计数值进行滑动平均处理和最小方差估计,可获得高精度的时间标签,平均误差可达到 30 ns。设计中采用复杂可编程逻辑器件 CPLD (Complex Programmable Logic Device) 实现高速时序控制,并考虑了抗干扰和异常处理措施,提高了系统的可靠性和工作性能。

关键词: GPS; 精确时标; 同步采样; 电力电缆; 行波测距

中图分类号: TM 711; TP 274^{+.2} **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)10-0035-04

0 引言

全球定位系统 GPS(Global Position System)同步时钟已广泛应用于电力系统,基于 GPS 同步时钟对架空输电线路故障进行双端行波测距的技术基本上已经成熟,其定位误差可以达到 400 m 左右(约 1 个档距),能够满足现场的需求^[1]。借鉴输电线的双端行波测距技术,将电力电缆故障测距由离线方式发展为在线方式有着重要的意义,是电缆故障测距的发展趋势^[2-3]。

电缆在线监测也极具潜力,文献[4]对电缆的局部放电在线监测和放电位置行波方法定位进行了研究。但由于电缆特殊的结构和敷设环境,现场对电缆故障测距的精度要求远远高于架空线,能被现场所接受的定位误差约为几米至几十米。电缆中行波波速约为光速的一半,若波速按 $160 \text{ m}/\mu\text{s}$ 计算,在不考虑硬件采样率和行波波波形畸变的情况下,仅 $1 \mu\text{s}$ 的时间同步误差就会导致 160 m 的定位误差,因此,同步误差是电缆双端行波测距需要考虑的一个关键问题。对于架空输电线路行波测距,若同步时间精度能够提高到纳秒级,则其定位精度也有进一步提高的可能。因此,有必要研究 GPS 同步时间误差的规律和校正方法,以获得尽可能高精度的时标。

1 同步时钟误差及校正

GPS 精确授时通过每秒 1 次的秒脉冲 PPS (Pulse Per-Second) 实现,不同型号的 GPS 接收机输出的秒脉冲与国际标准时间 UCT(Universal Coor-

dated Time) 的时间偏差不同,如 GARMIN 25 型接收机秒脉冲偏差为 $1 \mu\text{s}$ (1σ , 对应概率为 0.682 8), Motorola VP ONCORE 精度则可以达到 50 ns^[5-9]。高精度定时型 GPS 接收机虽然可以提供精度为纳秒级的秒脉冲,但是由于价格昂贵,所以不适合于大面积的推广应用。

为了用较低的成本实现高精度的秒脉冲,一个非常有效的解决方法是将 GPS 秒脉冲和高精度晶振互补^[7-8],它利用了秒脉冲虽有随机误差、但无累计误差的特点,以及高精度晶振虽有累计误差、但稳定度很高的特点,如国外可达到 10^{-11} (每 1000 s) 的稳定度^[10],国内产品一般可达到 10^{-10} (每天) 的稳定度。在一些精度要求较高的场合,可用精度更高的原子钟(铷、铯)来代替高精度石英晶振^[11-13]。现在普遍的做法是将修正后的秒脉冲直接送入 CPU 处理,CPU 通过中断方式捕捉该秒脉冲会引入一定的延时,此延时一方面具有一定的随机性,同时也跟 CPU 的工作频率密切相关,CPU 工作频率较低时,会导致较大的延时。由于时间同步误差会直接影响到双端行波测距方法的精度,因此应尽可能用硬件方式(见本文方案)或高速 CPU 捕捉此秒脉冲,这对于电缆故障双端行波测距尤为重要。

考虑到行波故障测距只需实时采集而不是实时控制的特点,若能实时准确记录秒脉冲与高精度晶振之间的时间偏差,而事后又可以根据此偏差值计算出采样数据的准确时刻,则同样可以达到双端数据精确同步的目的。基于这种思想,本文提出一种可以事后推算出准确时标的算法和相应的硬件支持,以最大限度地减小时间同步误差给双端行波测距带来的定位误差。该方法记录相邻秒脉冲间隔内

的计时器计数值,此计数值包含有前后 2 个秒脉冲的随机误差信息。对多个这样的计数值进行滑动平均,将得到的平均值 $\bar{n}$ 作为每秒内计时器的计数估计值 $\hat{n}$,并对多个秒脉冲的随机误差变量求最小方差,从而得到最新 1 次秒脉冲的误差估计值 $\hat{\varepsilon}_0$ 。利用 $\bar{n}$ 、 $\hat{\varepsilon}_0$ 和 GPS 时间解码信息(年、月、日、时、分、秒)就可以得到此次采集数据的精确时间标签。由于本文所提出的算法计算量较小,因此误差的校正计算也可由 CPU 在线完成,这样做的另一个好处是可以用 $\bar{n}$ 对 GPS 工作正常与否进行监测。

2 滑动平均法和最小方差估计

取样本数为 N ,记最新一次秒脉冲的随机误差为 ε_0 ,其余依次为 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_i, \dots, \varepsilon_N$ 。 $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$,且相互独立。相邻的秒脉冲之间计数器的计数值依次为 $n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_N$ (计数值约为 $1 \times 10^8, 100 \text{ MHz}$ 晶振)。记高精度晶振的实际周期为 ΔT ($\Delta T \approx 10 \text{ ns}$)。现已知各计数值 n_i ,需求取 $\hat{n}$ 和 $\hat{\varepsilon}_0$ (其余秒脉冲的随机误差可由 $\hat{n}$ 和 $\hat{\varepsilon}_0$ 计算得到)。秒脉冲随机误差示意图如图 1 所示,图中虚线为国际标准时间,小箭头表示实际 GPS 秒脉冲, ε_0 对应最新一次秒脉冲的误差。

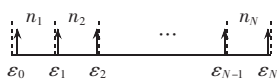


图 1 秒脉冲序列示意图
Fig.1 Sketch diagram of PPS series

2.1 滑动平均法求 $\bar{n}$

对最近的 N 个计数值进行滑动平均,得到 N 秒内的平均计数值:

$$\bar{n} = \frac{n_1 + n_2 + \dots + n_N}{N} \quad (1)$$

取 $\hat{n} = \bar{n}$ 作为对每秒实际计数值的估计,易知 $\bar{n}$ 为无偏估计。为分析 $\bar{n}$ 的方差,可写为

$$\bar{n} = \frac{N + \varepsilon_N - \varepsilon_0}{N \Delta T} = \frac{1}{\Delta T} (1 + \frac{\varepsilon_N - \varepsilon_0}{N}) \quad (2)$$

设 ε_i 的方差为 σ^2 ,则易知 n_i 的方差为

$$D(n_i) = \frac{2}{\Delta T^2} \sigma^2 \quad (3)$$

虽然 n_i 并不独立,但从式(2)可知 $\bar{n}$ 的方差为

$$D(\bar{n}) = \frac{2}{N^2} \frac{1}{\Delta T^2} \sigma^2 \quad (4)$$

可见 $\bar{n}$ 的方差为 n_i 方差的 $1/N^2$,当样本数 N 比较大时(如取 $N=100$), $\bar{n}$ 将会非常逼近真实值,因此,可以把滑动平均值 $\bar{n}$ 作为真实值的估计值。

由于 n_i 是比较大的值($n_i \approx 1 \times 10^8$),为减小 CPU 的计算量,宜采用滑动平均方法求取 $\bar{n}$ 。设下一秒的计数值为 n_0 ,则新的滑动平均值可采用下式计算:

$$\bar{n}' = \frac{n_0 + n_1 + \dots + n_{N-1} + n_N - n_N}{N} = \bar{n} + \frac{n_0 - n_N}{N} \quad (5)$$

由式(2)可知,样本序列的首末误差 ε_0 和 ε_N 会影响 $\bar{n}$ 的大小,当 ε_0 和 ε_N 的误差均较大且偏差方向相反时(如分别接近 $\pm 3\sigma$),则会导致较大的 $\bar{n}$ 误差。由于 $\bar{n}$ 的准确程度会影响到下一步中 $\hat{\varepsilon}_0$ 的求取,因

此在此应进一步提高估计值 $\bar{n}$ 的准确性。仍然采用滑动平均的思想,对最近 3 次估计值 $\bar{n}_i$ 再取平均值(或中间值),便可以比较可靠地排除首末端秒脉冲大误差的影响。

2.2 最小方差法求 $\hat{\varepsilon}_0$

为估计 $\hat{\varepsilon}_0$,由于 $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$,所以可以取目标函数为

$$\text{Min } J(\varepsilon_i) = \varepsilon_0^2 + \varepsilon_1^2 + \dots + \varepsilon_N^2 \quad (6)$$

式中的 ε_i ($i=1, 2, \dots, N$)均可用 ε_0 表示(以 s 为单位):

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \varepsilon_0 + n_1 \Delta T - 1 \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_0 + (n_1 + n_2) \Delta T - 2 \\ &\vdots \\ \varepsilon_N &= \varepsilon_0 + (n_1 + \dots + n_N) \Delta T - N \end{aligned} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),得:

$$J(\varepsilon_0) = \varepsilon_0^2 + \sum_{i=1}^N [\varepsilon_0 + (n_1 + \dots + n_i) \Delta T - i]^2 \quad (8)$$

为求 $J(\varepsilon_0)$ 的极值,对 ε_0 求导得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial \varepsilon_0} &= 2\varepsilon_0 + 2 \sum_{i=1}^N [\varepsilon_0 + (n_1 + \dots + n_i) \Delta T - i] = \\ &2(N+1)\varepsilon_0 + 2 \sum_{i=1}^N (n_1 + \dots + n_i) \Delta T - N(N+1) \quad (9) \end{aligned}$$

令 $\frac{\partial J}{\partial \varepsilon_0} = 0$,可解出 ε_0 :

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 &= \frac{N}{2} - \frac{\Delta T}{N+1} \sum_{i=1}^N (n_1 + \dots + n_i) = \\ &\frac{N}{2} - \frac{\Delta T}{N+1} \sum_{i=1}^N [(n_1 - \bar{n}) + \dots + (n_i - \bar{n}) - i \bar{n}] = \\ &\left(\frac{N}{2} - \frac{N}{2} \bar{n} \Delta T \right) - \frac{\Delta T}{N+1} \sum_{i=1}^N (d_1 + \dots + d_i) \approx \\ &- \frac{\Delta T}{N+1} \sum_{i=1}^N (d_1 + \dots + d_i) \quad (10) \end{aligned}$$

式中 $d_i = n_i - \bar{n}$, $\bar{n} \Delta T \approx 1$ 。

由于精确的 ΔT 是未知的,但是可以用近似值 $\Delta T \approx 1/\bar{n}$ 代入式(10),得到 ε_0 的估计值为

$$\hat{\varepsilon}_0 = - \frac{1}{(N+1)\bar{n}} \sum_{i=1}^N (d_1 + \dots + d_i) \quad (11)$$

2.3 利用 $\bar{n}$ 和 $\hat{\varepsilon}_0$ 求精确时标

设 CPU 发出停止采样控制信号时,读取到的时间计数值为 m ,则最后一个采样点在秒以下的精确时间为 $(m \Delta T - \hat{\varepsilon}_0)$,结合 GPS 时间的解码信息,可以给最后一个采样数据打上精确到纳秒级的高精度时间标签(对于 100 MHz 晶振,时间分辨率为 10 ns)。其他采样点的精确时标经过简单的推算就可获得。

需要指出的是,以上算法是在 GPS 正常工作时采用,若 GPS 的秒脉冲工作异常,则上述算法应暂时关闭,系统转入守时工作模式(见下节),用 $\bar{n}$ 对时间计数器进行清零。

3 硬件原理及工作流程

考虑到电缆行波测距对采集系统的要求,本文设计的高速同步采集卡的采样频率为 50 MHz,8 位

AD,512 KB 存储容量,可存储约 10 ms 的采样波形,同步时间综合误差设计值小于 40 ns。晶振采用高精度晶振,频率 100 MHz,频率精度 10^{-9} ,频率稳定度 10^{-11} 量级。为满足高速采样的要求,减小系统规模,提高可靠性,本文采用 MAX 7000 系列的复杂可编程逻辑器件(CPLD)实现对采样和存储的硬件时序控制。该系列 CPLD 具有高密度、高性能的特点,是 Altra 公司最成功的产品之一,其中 MAX 7000B 系列最高工作频率可达到 250 MHz^[14-15]。

总的硬件原理框图如图 2 所示。

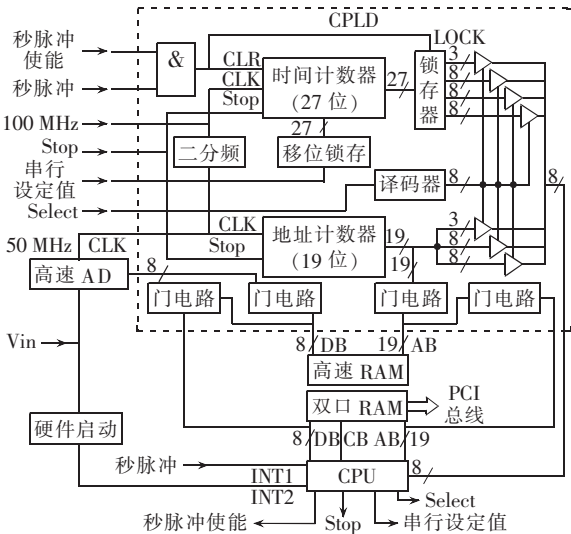


图 2 硬件原理框图

Fig.2 Block diagram of hardware principle

本采集系统中有 4 个关键设计。

- a. 利用秒脉冲对时间计数器的计数值进行无延时锁存,并触发 CPU 中断,通知 CPU 读取该计数值。该过程不会影响 AD 采样和时间计数,且对 CPU 的工作速度无特殊要求。用此硬件方式捕捉秒脉冲,时间延时偏差可小于 3.5 ns。
- b. CPU 响应行波启动信号的中断,继续采样 5 ms 后 CPU 发出停止采样信号(Stop),可同时捕捉到地址计数器和时间计数器的计数值,由此建立了精确时标和相应采样点之间的联系。
- c. GPS 正常工作时,为防止秒间干扰,CPU 在 0.1~0.9 s 之间关闭秒脉冲所经的门电路^[16]。GPS 工作异常时,CPU 通过门电路屏蔽秒脉冲信号,系统转入守时模式,用 $\bar{n}$ 对时间计数器清零。
- d. 采用环形存储器进行循环存储,CPU 捕捉到最后一个采样点的地址后,其下一相邻存储单元即对应本次采样序列的第 1 个采样点。由最后一个点的精确时标可推算任意点的相应时标。

4 精确时标获取试验

为对本文提出的获取精确时标的方案进行可行性研究,笔者先用 Matlab 做了仿真试验验证。试验中秒脉冲随机误差服从均值为零的正态分布, $1\sigma=0.333\text{ }\mu\text{s}$ 。晶振频率 100 MHz,频率精度 10^{-9} ,频率稳

定度 10^{-11} 。时间计数值样本数 $N=100$ (对应时间长度 1 min 40 s)。采用本文提出的算法进行精确时标推算,仿真结果如图 3 所示。其中, ε_i 为实际误差值(用随机函数产生), $\hat{\varepsilon}_i$ 为其估计值。

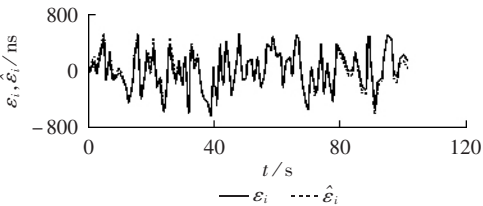


图 3 秒脉冲误差估算结果

Fig.3 Estimation of PPS error

从图 3 可以看出,秒脉冲误差估计值非常接近于真实值,估计效果良好。

经多次随机仿真试验发现,采用此方法对秒脉冲随机误差进行校正后,最小时间误差可以达到 1~2 ns,平均误差约 30 ns,最大误差约 80 ns。进一步研究发现大的时间误差主要是 ε_i 的均值偏离零值较远引起的。如某次随机试验中 ε_i 的均值为 0.049 2 μs ,利用最小方差估计得到的 $\hat{\varepsilon}_i$ 均值为 0.005 5 μs , ε_0 与其估计值 $\hat{\varepsilon}_0$ 相差 43.7 ns, ε_i 和 $\hat{\varepsilon}_i$ 的样本标准差均为 0.335 6 μs 。在实验室中对 2 套独立的 GPS 的输出秒脉冲按上述方法处理后,平均同步时钟误差也可达到 30 ns。由此可见本文提出的方法非常适合 GPS 秒脉冲误差服从零均值正态分布的规律,对无均值偏差的样本序列有很好的估计效果。在实际应用中不可避免地会遇到秒脉冲随机误差样本序列均值偏离零值的情况,要克服此问题,可适当增大样本容量 N ,但此时应尽可能保证环境温度恒定,使高精度晶振有足够的长期稳定度^[7,11]。

5 结论

本文根据电缆在线行波测距的需求,提出一种能够获取精确时标的高速同步采样方案。该方法将 GPS 同步时钟信号与高精度晶振相结合,互为补充。并将高速采样与秒脉冲捕捉有机结合,通过硬件方式精确捕捉秒脉冲,对秒脉冲间的计数值进行滑动平均处理和最小方差估计,可还原出高精度的时间标签,平均误差达到 30 ns。设计中采用 CPLD 实现高速时序控制,并考虑了抗干扰和 GPS 异常处理措施,大大提高了系统的可靠性和性能。本文设计的精确时标高速同步采样系统有望应用到电缆故障在线行波测距中。

参考文献:

[1] 陈平,徐丙垠,李京,等. 现代行波故障测距装置及其运行经验[J]. 电力系统自动化,2003,27(3):66-69.
CHEN Ping,XU Bing-yin,LI Jing,et al. Modern travelling wave based fault locator and its operating experience[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(3):66-69.
[2] KAZUO A,HIROYUKI K,YOSHINORI K. Fault location system for power cable using global positioning system—flag[EB/OL].

- [2005-10-20]. <http://www.fujikura.co.jp/gihou/gihou31e/gihou31e.html>.
- [3] 鹿洪刚,覃剑,陈祥训,等. 电力电缆故障测距综述[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 58-63.
LU Hong-gang, QIN Jian, CHEN Xiang-xun, et al. Overview of power cable fault location[J]. Power System Technology, 2004, 28(20): 58-63.
- [4] BOWMER C L. On-line diagnostic trials on London electricity's 11 kV cable system[C]//Asset Management of Cable Systems, IEE Seminar. [S.l.]: IEE, 2000: 711-717.
- [5] 王元虎,周东明. 卫星时钟在电网中应用的若干技术问题[J]. 中国电力, 1998, 31(2): 10-13.
WANG Yuan-hu, ZHOU Dong-ming. Some technical problems of satellite clock applied on power network[J]. Electric Power, 1998, 31(2): 10-13.
- [6] ESKELINEN P. Problems in estimating some timing uncertainties of commercial frequency and time standards[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1999, 48(1): 62-65.
- [7] 曾祥君,尹项根,林干,等. 晶振信号同步 GPS 信号产生高精度时钟的方法及实现[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 49-53, 89.
ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, LIN Gan, et al. Clock of high accuracy implemented by crystal oscillator in synchronism with GPS-clock [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 49-53, 89.
- [8] 曾祥君,尹项根,LI K K,等. GPS 时钟在线监测与修正方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 41-46.
ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, LI K K, et al. Methods for monitoring and correcting GPS-clock[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 41-46.
- [9] 丁仁杰,闵勇,冯亚东,等. 基于 GPS 的全网同步时钟的建立和误差校正[J]. 清华大学学报:自然科学版, 1997, 37(7): 74-77.
DING Ren-jie, MIN Yong, FENG Ya-dong, et al. Development of power system dynamic monitoring unit based on GPS [J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 1997, 37(7): 74-77.
- [10] WEISS K, LISOWIEC A, STEPLEWSKI W. Limit parameters of GPS disciplined quartz frequency sources[C]//Advanced Optoelectronics and Lasers, 2003. Proceedings of CAOL 2003. First International Conference. Crimea, Ukraine: [s.n.], 2003: 262-264.
- [11] PENROD B M. Adaptive temperature compensation of GPS disciplined quartz and rubidium oscillators [C]//Frequency Control Symposium, 1996. 50 th, Proceedings of the 1996 IEEE International. [S.l.]: IEEE, 1996: 980-987.
- [12] KARLQUIST R K, CUTLER L S, INGMAN E M, et al. A low-profile high-performance crystal oscillator for timekeeping applications[C]//Frequency Control Symposium, 1997. Proceedings of the 1997 IEEE International. [S.l.]: IEEE, 1997: 873-884.
- [13] KUSTERS, J A, HO K, GIFFARD R P, et al. A no-drift and less than 1×10^{-13} long-term stability quartz oscillator using a GPS SA filter[C]//Frequency Control Symposium, 1994. 48th, Proceedings of the 1994 IEEE International. [S.l.]: IEEE, 1994: 572-577.
- [14] 张原. 可编程逻辑器件设计及应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [15] 陈靖,张承学. 高速数据采集系统中精确时标的 CPLD 实现方法[J]. 继电器, 2004, 32(2): 31-33.
CHEN Jing, ZHANG Cheng-xue. A method of realizing precise time label in high-speed data acquisition system [J]. Relay, 2004, 32(2): 31-33.
- [16] 龚庆武,刘美观,左克锋,等. GPS 同步采样装置中防止干扰 GPS 秒脉冲信号的措施[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(1): 45-47.
GONG Qing-wu, LIU Mei-guan, ZUO Ke-feng, et al. Anti-jamming methods for pulse per second signal in synchronized sampling unit based on GPS [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(1): 45-47.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

陈玉林(1980-),男,湖北武汉人,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护和运行控制以及故障诊断(E-mail: cylvbox@sina.com.cn);

陈允平(1945-),男,湖南新化人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统继电保护、电力系统运行及自动化方面的研究;

龚庆武(1967-),男,湖南新邵人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统继电保护和自动化方面的研究。

Acquisition of precise time in synchronized high speed sampling unit for on-line cable fault locating

CHEN Yu-lin, CHEN Yun-ping, GONG Qing-wu
(College of Electrical Engineering, Wuhan University,
Wuhan 430072, China)

Abstract: A synchronized high-speed sampling scheme is proposed, which can obtain high precise time to diminish the influence of GPS(Global Position System) clock error on two-terminal traveling wave fault locating for implementing on-line power cable fault locating. Owing to GPS clock, which has no accumulative error, and quartz oscillator, which is very stable, the time counting value is obtained without delay via hardware by combining high speed sampling and PPS(Pulse Per-Second)-snapping. The value between two PPSs snapped is processed using the moving-average method and the least square error algorithm to increase the time precision with an average error of 30 ns. The CPLD(Complex Programmable Logic Device) is used for high-speed sequential control and the anti-interference and abnormality-remediation measures are taken to improve the system reliability and performance.

Key words: GPS; precise time label; synchronized sampling; power cable; traveling wave fault locating