变电站无线录波系统时间同步方法

结合无线录波系统的特点，设计了一种基于参考信号广播的时间同步方法。该方法首先基于统计分析原理计算参数估计所需要的历史数据量，然后通过滑动平均进行时钟偏差估计，确保在测量的同时完成时间同步。仿真结果表明，该方法可以适用于不同的时钟标记机制和网络状况，在无需添加额外硬件的情况下，可以有效减少时间同步误差,降低时钟偏差线性度对时间同步精度的影响。

柳正青[1,2] 尚志军[1] 仝杰[3] 金鹏[4] 苏斓[5]/1.中国科学院沈阳自动化研究所 2.中国科学院大学 3.中国电力科学研究院 4.国网辽宁省电力有限公司沈阳供电公司 5.国网北京经济技术研究院

柳正青/硕士研究生

关键词/Keywords
无线录波系统·
时间同步·
参数估计·
统计分析·

0 引言

为保证输变电设备的可靠运行，电力公司状态评价中心要对高电压等级变电站的重要设备进行起动调试试验，记录主变电容器、电抗器投切时二次回路中电流互感器和电压互感器的瞬态波形，检验系统过压水平和开关性能可靠性，为二次保护提供参考数据。

传统的启动调试试验通过高精度录波仪测录数据，由于其布线繁琐，易引起事故，无线录波系统应运而生，系统构成如图1所示。采集端采集电流/电压数据，并通过无线方式将数据发送到监控端，由监控端完成数据的记录。

在实际应用中，无线方案减少了试验工作量。但是，这种方案也产生新的问题，即多个采集端的时间同步问题。如果要保证波形数据的有效性，采集端的同步精度必须高于1 ms。而一般的商用晶振的时钟漂移率在（1~100）× 10^{-6} [1]，则两采集端的时钟偏差可达3.6~360 ms/h，无法满足录波系统的要求。尽管在硬件设计方面可以采用一定的温度补偿措施，但时间同步还受到多种因素的影响，在实际中如不采取措施，很难保证录波系统所要求的同步精度。本文提出一种面向变电站无线录波系统的时间同步方法实现时钟偏差的软补偿，可以在不添加硬件的基础上，满足采集端的时间同步要求。

1 时间同步原理

数据传输的延迟是影响时间同步精度的主要原因之一。数据传输延迟分为发送时间、访问时间、传输时间、传播时间、接收时间和接收处理时间六部分[2]，如图2所示。

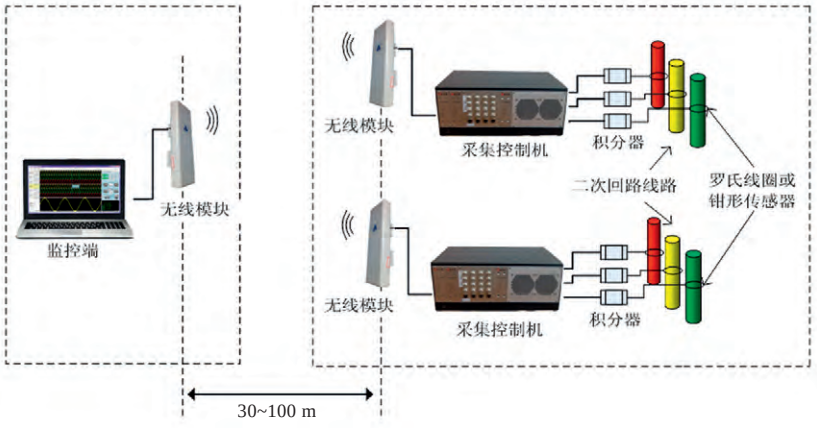


图1 录波测试的无线解决方案

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

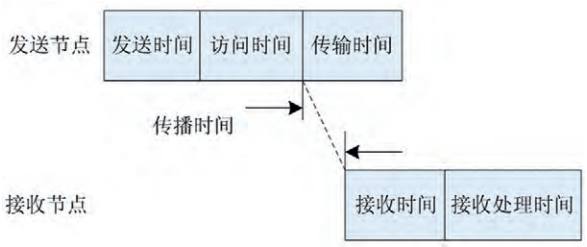
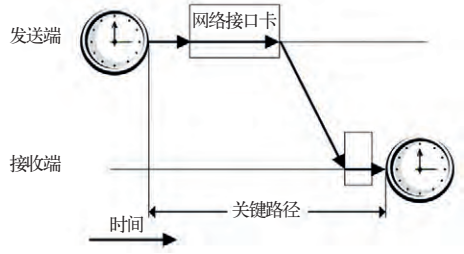


图2 无线链路中延迟构成

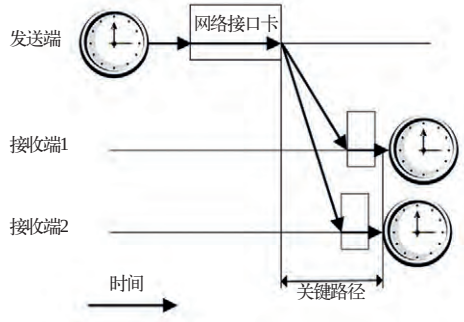
目前，无线网络的时间同步方法主要分为三类[3]：单向同步方法、双向同步方法和参考广播同步方法。

单向同步方法要求接收节点通过发送节点发来的时间信息调节自身时钟实现全网的同步，如DMTS[4]和FTSP[5]。双向同步方法要求发送者和接收者通过双向的信息交换机制完成同步，如TPSN[2]、Tiny-Sync和Mini-Sync[6]。参考广播同步方法则要求接收节点监听同一节点的广播报文，并交换接收时间进行同步，如RBS[7]。

单向时间同步方法时间同步精度较低，双向同步方法和参考广播同步方法都可以达到较高的同步精度。双向同步方法的同步精度受到从发送端到接收端全部延迟因素的影响，而参考广播的同步精度只受到传播时间、接收时间和接收处理时间的影响，如图3所示。从同步原理上，参考广播同步优于双向同步，有更高的精度。



（a）双向同步方法



（b）参考广播同步方法

图3 各同步方法的关键路径分析

2 录波系统时间同步方法

在实际的录波系统中，电压采集端和电流采集端均为嵌入式设备，负责完成电压和电流数据的采样和存储；监控端的接收主机为工控机，负责收集所有采样数据，形成波形，完成记录显示。

录波过程中，采集端定时上传采集到的电流/电压数据，并同时上传数据的采集时间，监控端根据数据的采集时间把不同采集端的数据显示到同一界面。由于采集端时钟存在偏差，导致同一时间采集的数据标记的采集时间不同，因此，监控端必须确定采集端间的时钟偏差，在显示数据之前对数据的采集时间进行调整，确保采集端的时间同步。录波系统的时间同步主要完成监控端对采集端时钟偏差的精确估计。

以双采集端的录波系统为例，录波系统的同步分为两个阶段：初始化阶段和同步阶段。

2.1 初始化阶段

录波系统启动后，首先进行初始化，这一阶段通过录波系统的精度要求确定在同步阶段计算时钟偏差需要的数据量$m_{\min}$。监控端在给定的一段初始时间t_{init}（单位：s)内以T_{init}为周期广播同步报文。采集端收到同步报文，记录同步报文的接收时间，并立刻将该时间返回给监控端。监控端得到两采集端记录的接收时间后，求出对于不同采集端同步报文接收时间的差值，并对这些差值做最小二乘线性回归得到接收处理时间的方差σ^2。再通过接收处理时间的方差σ^2推算满足录波系统要求所需的同步报文数量。

1.接收处理时间的方差（σ^2）的估计

采集端A、B在收到第k个同步报文时记录接收时间$T_{\text{A}k}$和$T_{\text{B}k}$。由于初始化阶段时间很短，可以近似认为在这段时间内两采集端的时钟漂移不变，即采集端的实际时钟偏差呈线性变化，则有

$$T_{\text{B}k}-T_{\text{A}k}=\phi+\omega(T_{\text{A}k}-T_{\text{A}1})+\Delta d_k^{\text{prop}}+\Delta d_k^{\text{recp}}+\Delta d_k^{\text{recv}} \quad (1)$$

式中，ϕ为采集端A、B收到第一个同步报文时，采集端间的真实时钟偏差；ω为B相对于A的时钟漂移；Δd_k^{prop}、Δd_k^{recp}、Δd_k^{recv}分别为接收第k个同步报文时，采集端A与采集端B的传播时间差、接收时间差和接收处理时间差。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

考虑到两采集端距监控端的距离基本相等及无线电信号传播速度，可以忽略Δd_k^{prop}对结果的影响。又因采集端的网卡相同，接收速率相同，那么采集端接收同一报文的时间基本相等，因此，Δd_k^{recp}也可忽略。式(1)变为

$$T_{Bk}-T_{Ak}=\phi+\omega(T_{Ak}-T_{A1})+\Delta d_k^{\text{recv}} \quad (2)$$

根据文献[7]可以推断出，接收处理时间Δd_k^{recv}相互独立，且均服从期望为0的正态分布，设$\Delta d_k^{\text{recv}}\sim N(0,\sigma^2)$，$k=1,2,\cdots,n$，其中$n=t_{\text{init}}/T_{\text{init}}$为初始化阶段各采集端记录的接收时间的数量。定义$x_k=T_{Ak}-T_{A1}$、$y_k=T_{Bk}-T_{B1}$，有

$$y_k=\phi+\omega x_k+\Delta d_k^{\text{ecv}} \quad (3)$$

通过最小二乘法估计ω、ϕ的值，有

$$\begin{cases}\hat{\omega}=\dfrac{\sum_{k=1}^{n}(xk-\bar{x})(yk-\bar{y})}{\sum_{k=1}^{n}(xk-\bar{x})^2}\\ \hat{\phi}=\bar{y}-\hat{\omega}\bar{x}\end{cases} \quad (4)$$

其中

$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}x_k$，$\bar{y}=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}y_k$。

记，$\hat{y}k=\hat{\phi}+\hat{\omega}xk$，则称$y_k-\hat{y}_k$为$x_k$处的残差

$$Q_e=\sum_{k=1}^{n}(y_k-\hat{y}_k)^2=\sum_{k=1}^{n}(y_k-\hat{\phi}-\hat{\omega}x_k)^2 \quad (5)$$

式中，Q_e为残差平方和。

记

$$\begin{cases}S_{xy}=\sum_{k=1}^{n}(x_k-\bar{x})(y_k-\bar{y})\\ S_{yy}=\sum_{k=1}^{n}(y_k-\bar{y})^2\end{cases}$$

则$Q_e=S_{yy}-\hat{\omega}S_{xy}$，可证明$\frac{Q_e}{\sigma^2}\sim\chi^2(n-2)$，

于是$E(\frac{Q_e}{\sigma^2})=n-2$，$\sigma^2$的无偏估计为

$$\hat{\sigma}^2=\frac{Q_e}{n-2}=\frac{1}{n-2}(S_{yy}-\hat{\omega}S_{xy}) \quad (6)$$

2.最少历史数据量（$m_{\min}$）的估计

对于录波系统，由于其采集端在室外，受环境及电磁干扰的影响，不同采集端的时钟偏差的非线性度将增大。如果使用过长时间积累的历史数据，估计值对时钟偏差变化的反应将不灵敏，进而增大同步误差。因此，根据录波系统同步精度的要求使用最少的历史数据$m_{\min}$十分必要。

当收到第k个同步报文时，根据式(2)有

$$T_{Bk}-T_{Ak}=\delta_k+\Delta d_k^{\text{recv}} \quad (7)$$

式中，$\delta_k=\phi+\omega(T_{Ak}-T_{A1})$，$A$为采集端 和采集端$B$收到第$k$个同步报文时的实际时钟偏差。

当采集端A和采集端B接收到第n个同步报文时，它们之间时钟偏差的真实值为

$$Offset_{act}=\delta_n \quad (8)$$

若通过最新的m组接收时间估计采集端之间的时钟偏差，那么偏差的估计值为

$$\begin{aligned}\text{Offset}_{\text{est}}&=\frac{1}{m}\sum_{k=n-m+1}^{n}(T_{Bk}-T_{Ak})\\&=\overline{T_B}-\overline{T_A}\\&=\bar{\delta}+\overline{\Delta d^{\text{recv}}}\end{aligned} \quad (9)$$

式中，$\overline{T_B}$、$\overline{T_A}$、$\bar{\delta}$和$\overline{\Delta d^{\text{recv}}}$分别为最近$m$次同步$T_{Bk}$、$T_{Ak}$、$\delta^2$、$T_{Bk}$的平均值。

由式（8）和式（9），得出同步误差为

$$\begin{aligned}\varepsilon&=\text{offset}_{\text{act}}-\text{offset}_{\text{est}}\\&=\delta_n-\bar{\delta}-\overline{\Delta d^{\text{recv}}}\end{aligned} \quad (10)$$

由于时钟的偏移率很小，$\delta_n-\bar{\delta}$的值很小，为了分析简单，忽略$\delta_n-\bar{\delta}$对结果的影响，式(10)变为

$$\begin{aligned}\varepsilon&=-\overline{\Delta d^{\text{recv}}}=-\frac{1}{m}\sum_{k=n-m+1}^{n}\Delta d_k^{\text{recv}}\\&=-\frac{\Delta d_{n-m+1}^{\text{recv}}+\Delta d_{n-m+2}^{\text{recv}}+\ldots+\Delta d_n^{\text{recv}}}{m}\end{aligned} \quad (11)$$

接收处理时间Δd_k^{recv}的期望值为0，方差σ^2由式（6）得到。

因此，ε是m个随机变量的算术平均值，该随机变量服从正态分布，有

$$f(\varepsilon)=\frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon}{\sigma/\sqrt{m}}\right)^2}}{\sqrt{2\pi}(\sigma/\sqrt{m})}$$

偏差ε小于允许的最大同步误差$\varepsilon_{\max}$的概率为

$$\begin{aligned}f(|\varepsilon|\leqslant\varepsilon_{\max})&=\frac{\int_{-\varepsilon_{\max}}^{\varepsilon_{\max}}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon}{\sigma/\sqrt{m}}\right)^2}d\varepsilon}{\sqrt{2\pi}(\sigma/\sqrt{m})}\\&=2\text{erf}(\frac{\varepsilon_{\max}\sqrt{m}}{\sigma})\end{aligned} \quad (12)$$

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其中，$\mathrm{erf}(u)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^u \mathrm{e}^{-\frac{t^2}{2}}\mathrm{d}t$ 。

在给定最大同步误差 $\varepsilon_{\max}$ 的情况下，通过式(12)可以算出需要的最少时间数据对的数量 $m_{\min}$。$m_{\min}$ 为满足式(12)且 $m_{\min}\geqslant 1$ 的整数。

2.2 同步阶段

初始化阶段结束后，进入同步阶段。同步阶段采用滑动平均估计两采集端的时钟偏差，具体过程如下：

（1）监控端根据采集端上传电流电压数据的周期确定同步报文的广播周期，使同步报文的广播周期与采集端上传数据的周期相同。

（2）采集端 A（或B）在每次数据采集开始时记录数据的采集时间 T_{A}（或 T_{B}）。在数据采集过程中，收到第 i 个同步报文时，记录接收时间 $T_{\mathrm{A}i}$（或 $T_{\mathrm{B}i}$），当本次数据采集完成时候，将采集到的电流电压数据，数据采集时间 T_{A}（或 T_{B}）和同步报文的接收时间 $T_{\mathrm{A}i}$（或 $T_{\mathrm{B}i}$）一起返回到监控端。

（3）监控端提取并存储上传数据包中的同步报文接收时间 T_{A}（或 T_{A}）。等 $T_{\mathrm{A}i}$ 和 $T_{\mathrm{B}i}$ 上传后，监控端收集最近 $m_{\min}$ 组时间数据，根据式(9)求时钟偏差offset的值。

（4）监控端根据数据的采集时间显示数据。由于监控端以采集端A的时间为横轴显示数据，因此，当监控端收到采集端A上传的数据时，则根据采集时间 T_{A} 直接把数据显示到界面上；收到采集端B上传的数据时，根据存储的数据偏差offset，调整采集时间 T_{B} 为 $T_{\mathrm{B}}-\mathrm{offset}$，再显示采集端B的数据。

分析式（9）可知，时钟偏差估计值与采集端记录的收到同步报文的时间有关，与采集端何时返回自己的时间无关，因此，在上传电压电流数据时，在数据包中附加上时间同步信息既可以减少网络负载，又不会对同步精度产生明显影响。

3 仿真结果

采用一阶自回归模型模拟时钟（时钟偏移率噪声的方差为 10^{-16}，时钟偏移噪声的方差为 10^{-12}）[8]，观测噪声（由时钟标记机制和网络状况等因素引起的时延）的变化区间为 $[10^{-7}, 10^{-4}]$。

对初始化阶段进行仿真。取 t_{init}=3 s，T_{init}=10 ms，当要求同步误差小于1 ms，且99%的情况达到要求精度时，根据式(12)可以计算出需要的最少时间数据对的数量 。图4为不同观测噪声下最少时间数据对的数量。

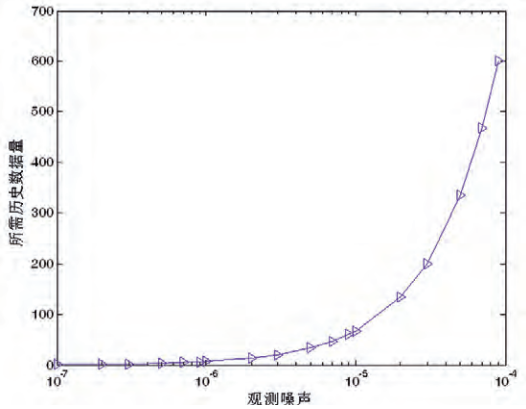


图4 不同观测噪声下同步报文的广播周期

当观测噪声较小时，用很少的历史数据便可精确估计两采集端的时钟偏差；随着观测噪声的增大，所需的历史数据量也不断增加。可知，本方法可以根据当前的时钟标记机制，选择历史数据量，尽可能的减少时钟偏差的非线性度对同步结果的影响。

对同步阶段进行仿真。在同步阶段，采集端上传电流电压的周期为0.1 s，即每0.1 s广播一次同步报文。

图5中观测噪声为 10^{-6}，双向同步方法与本文中同步方法的同步精度对比。双向同步方法的同步周期与本文同步方法的同步周期均为0.1 s。

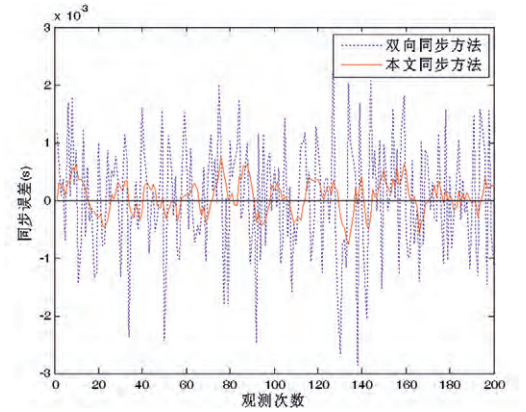


图5 同一观测噪声双向同步方法与本文同步方法的对比

由图5可知，在同一观测噪声下，本文同步方法同步精度优于双向同步方法，并且随着观测次

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

数的增加，本文同步方法的同步误差不会增大，始终维持在1 ms以内，满足录波系统的要求。

图6为在不同观测噪声下，双向同步方法与本文中同步方法的同步精度对比。

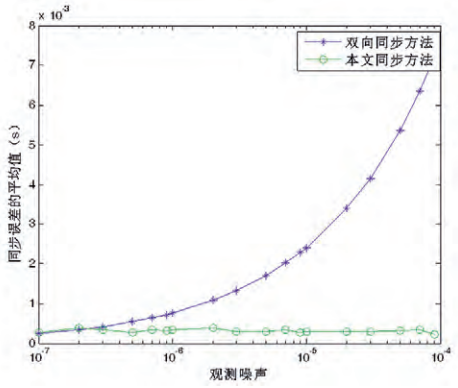


图6　不同观测噪声双向同步方法与本文同步方法的对比

从图6可以看出，当观测噪声较小时，两同步方法的同步误差均值相同。随着观测噪声的增大，双向同步方法的同步误差不断增大，而本文同步方法的同步误差保持平稳，观测噪声的增大不会导致同步效果变差。可知，双向同步方法只在硬件的时钟标记机制，且网络状况良好的情况下才有较高的同步精度，而本文同步方法适用于不同的时钟标记机制和网络状况。

4　结束语

采集端的精确时间同步是保证录波系统正常运行的前提，本文为无线录波系统设计了可行的时间同步方法。该方法无需增加额外硬件，采用参考信号广播方式完成采集端的时间同步。同步初期，根据同步精度要求及接受处理时间的方差动态地确定同步所需的历史数据量，尽可能的减少时钟偏差的非线性度对同步结果的影响。仿真结果表明，在不同网络状况和时钟标记机制下，本同步方法的同步精度均可以满足录波检测要求。

参考文献

[1] 叶玲.无线传感器网络环境下基于卡尔曼滤波器的精确时间同步协议研究[D].重庆：西南大学，2013.

[2] Ganerwal S, Kumar R, Srivastava B. Timing-sync protocol for sensor networks[C].Procedings of The 1st International ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2003:138-149.

[3] 杨雨陀. 面向硬实时工业无线网络的高精度时间同步方法研究与实现[D].沈阳：中国科学院沈阳自动化研究所.2011.

[4] Ping S. Delay measurement time synchronization for wireless sensor networks[J].Intel Research Berkeley Lab,2003(6):3-13.

[5] Maroti M, Kusy B, Simon G, et al. The flooding time synchronization protocol[C].Proceedings of The 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York:ACM,2004: 39-49

[6] Sichitiu M L, Veerarittiphan C. Simple, accurate time synchronization for wireless sensor networks[C]. Proceedings of IEEE WCNC 2003. Piscataway, NJ: 2003: 1266-1273.

[7] Elson J, Girod L, Estrin D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts[C]. Proceedings of the Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation. New York: ACM,2002:147-163.

[8] Ganeriwal S,Tsigkogiannis I,Shim H,et al. Estimating clock uncertainty for efficient duty-cycling in sensor networks[C].IEEE-ACM Transactions on Networking, 2009:843-856.

[9] Correll K,Barendt N,Branicky M. Servo design considerations forsoftware-only implementations of the precision time protocol[C]. ISPCS. Zurich,Switzerland, 2005:10-12.

[10] 杨涛，段斌.基于IEC 61850/61499的分布式控制系统设计[J].信息与控制，2014.43(2):241-247.

[11] 行鸿彦，冒海微，徐伟.基于全局指数吸引集的统一变形混沌系统同步[J].信息与控制，2014,43(4):385-391.

（收稿日期：2015-03-30）EA

作者简介

柳正青（1990-），女，硕士研究生，从事工业无线网络以及无线传感器网络方面的研究。

尚志军（1972-），男，博士，硕士生导师，副研究员，从事工业通信、测试计量仪器等方面的研究。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net