DOI: 10.3901/JME.2019.15.202

机械振动无线传感器网络跨层同步采集累积误差控制方法^{*}

肖鑫 汤宝平 邓蕾 黄艺

(重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400030)

摘要: 针对机械振动无线传感器网络同步采集过程中同步采集误差随时间累积的问题,在分析机械振动无线传感器网络跨层同步采集误差累积机理基础上,提出了一种基于同步信息跨层实时跟踪的机械振动无线传感器网络同步采集累积误差控制方法。以节点物理层跨层实时捕获同步信息,避免任务抢占所导致同步信息捕获迟滞;研究基于卡尔曼滤波的晶振频率偏移计算方法,提升晶振频率偏移计算精度;构建反馈控制系统动态反馈和补偿同步采集累积误差,避免同步采集误差累积效应;设计嵌入式多任务优先级管理固件系统,在采样率极高的机械振动信号采集过程中确保采样任务和同步任务实时性。实际测试表明,在高达 51.2 kHz 的采样率下连续采集 30 s,节点间同步采集误差始终保持在 0.6 μ s 以内,同步采集误差最大值仅为采样周期的 3%,满足机械振动信号同步采集需求。

关键词: 机械振动监测; 无线传感器网络; 同步采集; 累积误差控制

中图分类号: TH17; TP393

Accumulated Synchronous Acquisition Error Control Method Based on Cross-layer Design for Mechanical Vibration Wireless Sensor Networks

XIAO Xin TANG Baoping DENG Lei HUANG Yi

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030)

Abstract: Aimed at the problem that the synchronous error would accumulate with time in mechanical vibration acquisition using wireless sensor networks, according to the mechanism analysis of accumulated synchronous error, an accumulated synchronous error control method based on synchronous information tracking method is presented. Hardware layer of acquisition node is employed to capture the synchronous information to avoid hysteresis caused by task preemption; Crystal oscillator frequency offset estimate method based on Kalman filter is researched to improve the estimate accuracy. A feedback control system is built to feedback and compensate the synchronous error dynamically to avoid synchronous error accumulation. An embedded multitask priority management firmware is designed to guarantee the real-time performance of sampling task and accumulate synchronous error control task in mechanical vibration acquisition with high sampling rate. Experiments show that the synchronous error is kept within 0.6 μ s in 30 s with the sampling rate up to 51.2 kHz, and the maximum synchronous error does not exceed 3% of the sampling period, which can meet the requirement of synchronous acquisition in mechanical vibration monitoring.

Key words: mechanical vibration monitoring; wireless sensor networks; synchronous acquisition; accumulated error control

0 前言

高精度同步采集是无线传感器网络(Wireless sensor networks, WSNs)在机械振动监测应用中的关键问题^[1]。针对现有无线传感器网络同步采集过程存在时钟同步算法精度不高、采样触发不同步等问

题,我们在前期研究中提出了基于跨层设计的 WSNs 同步采集(Synchronous acquisition based on cross-layer design,SACD)方法^[1-2],利用帧起始定界符(Start of frame delimiter,SFD)作为同步信息,采用硬件跨层设计将节点间同步触发精度控制在 190 ns 以内。但由于各 WSNs 节点晶振频率存在差异,采集启动后,节点间同步误差将随时间迅速累积,使得各节点仅能在启动采集后几十毫秒内保持 1 000 ns 以内的同步采集精度,这极大的限制了无线传感器

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51675067, 51775065)。20180801 收到初稿,20190604 收到修改稿

网络在同步采集精度要求极高的机械振动监测中的应用。因此解决机械振动无线传感器网络同步采集误差累积问题是十分必要和迫切的。

目前 WSNs 主要通过节点周期性地同步全局时钟来抑制同步采集累积误差^[3-6], 由于同步任务需要与数据采集等其他任务竞争 CPU, 且强制同步全局时钟会造成剧烈的时钟抖动, 这种方法精度不高, 仅适用于任务负载较轻, 同步精度要求较低的温湿度、压力等缓变量及低频土木结构振动监测中^[7-10]。机械振动信号采集频率高^[11-12], CPU 负担重, 同步精度要求高, 为避免同步任务干扰数据采样实时性, 我们所提出的 SCD 方法只能在采集启动后关闭同步任务, 仅通过采集前所测量晶振频偏离线补偿晶振。虽然同步累积误差在一定程度上得到抑制, 但由于晶振频率测量误差及由温度等因素所导致的晶振频率漂移, 未补偿的同步误差仍会逐步累积, 最终不能满足机械振动信号同步采集的要求。

由于晶振频偏测量误差及温漂只能削弱而不能消除, 本文通过构建反馈控制系统动态反馈和补偿同步采集累积误差, 而在振动数据采集过程中同时保证采样任务和同步任务实时性又是其中的关键和难点。一方面, 机械振动信号采集对采样实时性要求极高, 这要求同步任务在不影响采样任务实时性前提下捕获同步信息, 计算和校准同步累积误差。另一方面, 机械振动信号采样频率高, 高频执行的采样任务将严重干扰同步任务实时性, 导致同步采集精度剧烈下降。因此, 本文从硬件和嵌入式固件两个方面入手, 提出基于同步信息跨层实时跟踪的节点架构, 采用嵌入式多任务优先级管理固件保障任务实时性, 通过同步信息跨层实时跟踪、高精度晶振频率偏移估算、同步累积误差动态反馈补偿来控制同步误差累积效应, 使得无线传感器网络在机械振动数据采集过程中始终保持同步采集精度。

1 跨层同步采集误差累积机理分析

在我们前期研究中所提出 SCD 方法中, 为同步采集振动数据, 网关周期性广播携带 SFD 信号的信标帧, 采集节点无线模块检测到 SFD 信号后将跨通信协议各层, 直接使能物理层向采集模块发送同步脉冲, 提高时钟同步精度。采集模块通过定时器计数同步信息周期计算晶振频率偏移, 并利用 SFD 信号直接触发数据采集, 保证同步触发精度。采集启动后, 为避免同步任务对数据采样的干扰, SCD 方法关闭同步任务, 仅通过采集前所测量晶振频偏离线补偿晶振。

机械振动数据采集过程中, 同步采集误差累积的根本原因是晶振频偏实际补偿值与理想补偿值间存在偏差, 而未补偿部分随时间累积。如图 1 所示, 晶振频偏测量误差和频率漂移是导致补偿误差的主要原因。导致晶振频偏测量误差的原因有网关及采集节点晶振随机抖动、同步信息传播路径随机迟滞, 造成同步信息传播路径随机迟滞的原因有硬件处理随机迟滞及无线电传输路径受机械设备运动干扰而发生的变化。造成晶振频率漂移的原因有板载元器件发热和机械设备运行发热。

图1 晶振频率补偿误差机理树图

为确定各环节的影响, 如图 10 所示, 采用 1 个网关节点和 6 个采集节点构建星型网络并实际测试。网关节点采用 32 MHz 无源晶振, 采集节点采用有源晶振 SG-210STF8.0000ML。网关每 0.5 s 广播一次同步信息, 采用逻辑分析仪记录网关节点所发出同步信息周期和采集节点 1 所接收同步信息周期, 并减去网关数据平均值后显示为图 2。

图2 网关节点和采集节点同步信息周期

由图 2 可知, 网关节点发出的同步信息周期抖动很小, 证明所采用 32 MHz 晶振性能优异, 但采集节点所接收同步信息周期抖动却十分剧烈。考虑无线电传播速度快, 在机械设备尺度上不会造成如此剧烈得随机抖动, 因此节点硬件处理过程中的随机迟滞是同步信息抖动的主要原因。另外, 由于网关节点板载元器件发热等原因, 信标周期有略微缩短的趋势。

设置各采集节点每 60 000 个时钟周期输出一脉冲, 使用逻辑分析仪记录各节点脉冲周期, 并减去节点 1 数据平均值后显示为图 3。由图可知, 各节点晶振随机抖动很小, 但不同节点脉冲周期存在

明显差异。且即使环境温度不变化,节点唤醒后板载元器件发热对晶振频率的影响仍不可忽视,而机械设备运行发热将使得晶振频率变化更加剧烈。

图3 采集节点脉冲周期变化趋势

最后进行同步采集试验,图4为各采集节点实际采样时间与理想采样时间偏差。实验结果表明,即使SACD方法对晶振频偏进行动态补偿,同步采集误差仍然会随时间迅速累积,仅1s就超过1000ns(51.2kHz采样率下超过采样周期的5%),此时的精度已经不能满足对同步采集精度要求极高的机械振动监测需求。而由于温度的变化,误差累积速度随时间加剧。

图4 节点间同步采集误差累积

由以上分析可知,虽然造成晶振频率补偿误差的因素有很多,但同步信息传输路径随机迟滞是其中的主要原因。且采集时间较长、温度变化剧烈时必须考虑采集节点晶振频率漂移的影响。因此在本文所构建反馈控制系统中,将周期性的同步脉冲视为时间传感器,而将同步信息传输路径中的随机迟滞视为测量误差,通过周期性的传感对同步累积误差和晶振频偏两个参数进行反馈和控制以校准同步累积误差,反馈控制系统如图5所示。

图5 同步采集累积误差反馈控制系统

与一般的反馈控制系统不同的是,作为机械振动监测系统,本设计中反馈控制任务和作为控制目标的振动数据采样任务都具有极高的实时性要求,实现机械振动无线传感器网络同步累积误差控制不仅需要高性能的反馈控制方法,还需要优异的硬件架构和嵌入式多任务优先级管理固件。

2 同步信息跨层实时跟踪节点架构

本文所提出基于同步信息跨层实时跟踪的采集节点架构如图1所示,采用基于ARM Cortex-M4内核的STM32F405微控制器作为采集模块控制核心,无线通信模块使用无线射频芯片TI CC2530,内嵌增强型8051微处理器。通信模块与采集模块通过串口交互命令与数据,并采用硬件跨层设计传输同步信息。与SACD方法仅将SFD状态位输出引脚连接至采集模块外部中断不同的是,本架构将该引脚同时连接到外部中断和定时器输入捕获通道,利用定时器捕获通道实现同步信息实时跟踪。

图6 同步信息跨层实时跟踪方法架构框图

机械振动信号采集频率高,51.2kHz采样率下不足20μs就需要采样一次振动信号,而存储这些数据同样需要大量时间,这给CPU带来极重的负担。而为保证机械振动信号采样精度,采样任务和同步任务都具有极高的实时性要求,采样任务实时性降低会导致剧烈的采样时间抖动,而同步任务实时性不足又会造成严重的空间抖动。因此,设计嵌入式多任务优先级管理架构同时保证各个任务实时性。

如图7所示,该架构中包含定时器溢出中断服务、外部中断服务和后台任务3个优先级的服务。振动数据采集时,定时器计数晶振脉冲计时并周期性触发溢出中断,并在溢出中断服务中执行振动信号采样及本地时钟维护任务。为避免振动数据采集时间抖动,溢出中断享有最高优先级。模数转换后,溢出中断服务并不直接存卡,而是将数据写入

SRAM 缓存, 利用后台任务调用文件系统, 通过 DMA 方式整块存储振动数据, 降低文件系统调用次数。并且运行于物理层的 DMA 任务和运行于应用层的振动数据采样任务可以并行执行, 有效降低 CPU 负载。采集模块检测到 SFD 状态翻转后, 定时器输入捕获通道将实时捕获同步信息而无需 CPU 参与, 同时触发外部中断, 在该中断服务中访问捕获时间戳, 计算晶振频偏及同步采集累积误差, 并反馈至定时器校准采样周期, 实现机械振动数据同步采集。由于外部中断服务优先级低于定时器溢出中断, 该服务只能在振动数据采样间隙占用 CPU 而执行。考虑晶振补偿是一个动态过程, 在实时同步信息捕获前提下, 轻微的晶振频率和同步采集累积误差计算迟滞不会影响晶振补偿精度, 由此, 振动数据采样任务和同步任务实时性得以同时保证。

图 7 多任务优先级管理架构示意图

3 跨层同步采集累积误差控制方法

3.1 多任务时钟访问冲突避免机制

本地时钟维护是实现同步采集的关键, 而不同任务交叉访问本地时钟将出现多任务时钟访问冲突。本设计通过硬件和软件两部分构建本地时钟, 硬件部分为定时器寄存器当前计数值 C , 软件部分为定时器总溢出值 K 。每次定时器溢出后, 溢出中断服务将累加 K 值并更新下一次溢出值 O 。

如图 8 所示, 设定时器捕获值为 C_i , 则实际的同步信息捕获时间为 $T_i = K + C_i$ 。捕获事件发生后, 外部中断服务将利用采样间隙时间访问本地时钟获取 K 和 C_i 值。但由于定时器中断服务可以在任意时刻抢占 CPU 而优先执行, 当抢占事件发生在外部中断服务读取 K 值之前, 定时器溢出中断服务将率先把 K 更新为 $K+O$ 值, 而外部中断服务只能等待采样任务释放 CPU 后读取更新后的 K 值, 读取错误

图 8 多任务时钟访问冲突示意图

的捕获时间。目前主流的多任务访问冲突避免机制是进入临界代码段关闭时钟更新, 但这严重影响时钟实时性。

因此提出多任务时钟访问冲突避免机制。在该机制中, 考虑定时器计数寄存器在溢出事件发生后将被清 0, 在溢出中断服务中检测到外部中断标识被置位, 且定时器计数值小于捕获值时将备份 K 和 O 值后再更新这些数据, 同时置位一个任务抢占标识以通知外部中断。外部中断读取本地时钟数据后需要检测任务抢占标识, 如果检测到抢占事件则需要读取备份数据计算捕获时间。

3.2 基于卡尔曼滤波的晶振频率偏移计算方法

提高晶振频偏计算精度可以有效减缓同步采集误差累积速度。考虑晶振频偏计算误差主要来源于同步信息周期随机抖动, 本文将时间视为匀速运动的动力学参量, 同步信息传输路径中的随机迟滞视为测量过程误差, 从而利用卡尔曼滤波器对同步信息随机抖动进行校准。

由于网关节点晶振抖动及温度等环境因素变化将导致同步信息发送周期发生微小变化, 且同步信息在父子链路间传输存在随机迟滞, 设 Z_i 和 N_i 分别为第 i 次的网关节点同步信息发送周期和采集节点同步信息捕获周期, W_i 为 Z_i 的误差, V_i 为采集节点与网关节点同步信息周期偏差, 则卡尔曼滤波状态方程和测量方程分别为

$$\begin{cases} Z_i = Z_{i-1} + W_i \\ N_i = Z_i + V_i \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可建立卡尔曼滤波器, 设 $N(i-1|i-1)$ 为上一个 SFD 间隔的最优估计值, $N(i|i-1)$ 为本次 SFD 间隔估算值, $P(i-1|i-1)$ 为 $N(i-1|i-1)$ 的方差, 而 $P(i|i-1)$ 为 $N(i|i-1)$ 方差, 系统控制过程噪声方差即为 Z_i 的方差 R , 测量过程噪声方差为 N_i 的方差 Q 。则构建卡尔曼滤波器

$$\begin{cases} N(i|i-1) = N(i-1|i-1) \\ P(i|i-1) = P(i-1|i-1) + R \\ Kg(i) = \frac{P(i|i-1)}{P(i|i-1) + Q} \\ N(i|i) = N(i|i-1) + Kg(i)(N_i - N(i|i-1)) \\ P(i|i) = (1 - Kg(i))P(i|i-1) \end{cases} \quad (2)$$

式中, N_i 为卡尔曼滤波器输入, 其值由采集节点测量得到, $N(i|i)$ 为卡尔曼滤波器输出, 表征第 i 次同步信息周期最优估算值, $Kg(i)$ 为卡尔曼增益, $P(i|i)$ 同步信息周期最优估算值的方差。设 $N(i)$ 为第 i 次 SFD 间隔的最优估算值 $N(i|i)$, 以上公式可记为

$$N(i) = KF(N_i) \quad (3)$$

设理想信标周期内节点计数次数为 N ，则采集节点晶振频率偏移观测值为

$$B_i = \frac{KF(N_i) - N}{N} \quad (4)$$

可将卡尔曼滤波器初始参数设为 $N(0)=N_1$, $P(0)=Q$ 。分析图2数据可得同步信息周期随机抖动方差 $DX=1\ 681\ \text{ns}^2$ 。由于滤波器在节点本地运行，时钟分辨力为 $6.25\ \text{ns}$ ，因此使用节点本地时钟表达测量过程噪声方差时有 $Q=2DX/6.25^2=86.06$ 。系统控制过程噪声方差 R 主要受温度影响，由于温度变化较为缓慢， R 取值较小，试验表明在机械振动监测中取 $R=3$ 。

图9为卡尔曼滤波器性能测量结果，测试时将网关节点 SFD 状态位输出引脚通过导线连接至采集节点定时器输入捕获通道2，采集节点同时捕获网关节点和自身同步脉冲，并通过卡尔曼滤波器修正自身同步信息周期。为模拟机械设备运行发热，测试中对节点加热。测试结果表明，滤波后的采集节点同步信息周期与理论周期十分接近，卡尔曼滤波器对温度变化具有较强的适应能力。

图9 卡尔曼滤波器效果

3.3 同步采集累积误差动态校准

设节点理论晶振频率为 f_0 ，采样率为 fs ，采集启动前所测得晶振频偏为 B_0 ，为补偿晶振频偏，每次振动数据采样后的理想补偿值为

$$c_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f_0}{fs} \cdot \sum_{j=1}^n B_0^j = \frac{f_0}{fs} \cdot \frac{B_0}{1-B_0} \quad (5)$$

设节点捕获到第 i 个同步信息时节点采样次数为 S_i ，定时器捕获值为 C_i ，每次捕获同步信息后可计算同步累积误差

$$A_i = S_i \cdot \frac{f_0}{fs} + (1-B_0)C_i - N_0i \quad (6)$$

由于晶振频率漂移会加剧同步误差累积速度，数据过程中节点仍通过卡尔曼滤波器实时估算晶振

频率偏移并反馈至晶振补偿任务。此外，由于同步触发延时会导致首个同步信息周期测量出现偏差，将第1次同步信息接受时间(i 从0开始计数)作为基准时间计算同步累积误差。为同时补偿晶振频偏和同步累积误差，每次采样后晶振补偿值为

$$c_i = \begin{cases} \frac{f_0}{fs} \cdot \frac{B_0}{1-B_0} & i < 2 \\ \frac{f_0}{fs} \left(\frac{(S_i - S_1)f_0}{N_0 \cdot fs} + (1-B_i) \frac{C_i - C_1}{N_0} + \frac{B_i}{1-B_i} - i + 1 \right) & i \geq 2 \end{cases} \quad (7)$$

4 性能验证与分析

为验证本文所提出机械振动无线传感器网络跨层同步采集累积误差控制方法性能，以6个采集节点和1个网关节点组建星型网络进行同步采集实验，采样频率设置为 $51.2\ \text{kHz}$ ，利用逻辑分析仪记录节点各次采样时间，测试现场和测试结果分别如图10和图11所示。测试结果表明，在长达30s的振动信号采集过程中，节点间同步采集误差始终被控制在 $0.6\ \mu\text{s}$ 以内，有效避免了图4中所示同步采集误差累积现象。在高达 $51.2\ \text{kHz}$ 的采样率下，节点间最大同步采集误差仅为振动数据采样周期的3%，满足机械振动信号同步采集需求。

图10 同步采集精度测试

图11 节点间同步采集误差

5 结论

本文针对机械振动数据同步采集过程中同步采集误差随时间累积的问题,分析同步采集误差累积机理,针对误差累积主要原因和误差控制关键问题和难点,提出一种基于同步信息跨层实时跟踪的机械振动无线传感器网络同步采集累积误差控制方法,通过同步信息跨层实时捕获、基于卡尔曼滤波的晶振频偏计算及控制参量动态反馈补偿实现同步采集累积误差控制,设计嵌入式多任务优先级管理固件保障振动数据采样任务和同步任务实时性。实际测试表明,在高达 51.2 kHz 的采样率下节点间同步采集误差不随时间累积,最大误差仅为采样周期的 3%,满足机械振动信号同步采集需求。该方法有效扩展了无线传感器网络在同步采集精度要求极高的机械振动监测领域的应用范围。

参 考 文 献

- [1] HUANG Q, TANG B, DENG L. Development of high synchronous acquisition accuracy wireless sensor network for machine vibration monitoring[J]. *Measurement*, 2015, 66: 35-44.
- [2] 黄庆卿, 汤宝平, 邓蕾, 等. 机械振动无线传感器网络跨层同步采集方法[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(5): 1143-1148.
HUANG Qingqing, TANG Baoping, DENG Lei, et al. Synchronous acquisition method based on cross-layer design for machine vibration wireless sensor networks[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(5): 1143-1148.
- [3] PING S. Delay measurement time synchronization for wireless sensor networks[J]. *Intel Research Berkeley Lab*, 2003.
- [4] GARONE E, GASPARRI A, LAMONACA F. Clock synchronization protocol for wireless sensor networks with bounded communication delays[J]. *Automatica*, 2015, 59: 60-72.
- [5] HUANG D J, TENG W C, YANG K T. Secured flooding time synchronization protocol with moderator[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2013, 26(9): 1092-1115.
- [6] SARI I, SERPEDIN E, NOH K L, et al. On the joint synchronization of clock offset and skew in RBS-protocol[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2008, 56(5): 700-703.
- [7] KARRAY F, GARCIA-ORTIZ A, JMAL M W, et al. EARNPIPE: A testbed for smart water pipeline monitoring using wireless sensor network[J]. *Procedia Computer Science*, 2016, 96: 285-294.
- [8] KRIDI D S, CARVALHO C G N D, GOMES D G. Application of wireless sensor networks for beehive monitoring and in-hive thermal patterns detection[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2016, 127: 221-235.
- [9] CHAE M J, YOO H S, KIM J Y, et al. Development of a wireless sensor network system for suspension bridge health monitoring[J]. *Automation in Construction*, 2012, 21(1): 237-252.
- [10] FLAMMINI A, FERRARI P, MARIOLI D, et al. Wired and wireless sensor networks for industrial applications[J]. *Microelectronics Journal*, 2009, 40(9): 1322-1336.
- [11] 何国林, 丁康, 林慧斌. 基于匹配追踪的齿轮箱耦合调制振动信号分离方法研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(1): 102-108.
HE Guolin, DING Kang, LING Huibin. Matching pursuit method for coupling modulation signal separation of gearbox vibration[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(1): 102-108.
- [12] 鄢小安, 贾民平. 基于改进奇异谱分解的形态学解调方法及其在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(7): 104-112.
YAN Xiaolan, JIA Minping. Morphological demodulation method based on improved singular spectrum decomposition and its application in rolling bearing fault diagnosis[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(7): 104-112.

作者简介: 肖鑫, 男, 1991 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机械振动无线传感器网络。

E-mail: xiaoxincqu@163.com

汤宝平(通信作者), 男, 1971 年出生, 博士, 教授、博士研究生导师。主要研究方向为无线传感器网络、机电装备安全服役与寿命预测、测试计量技术及仪器。

E-mail: bptang@cqu.edu.cn