

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210710

机械振动 WSN 比例补偿跨层同步采集触发方法^{*}

叶泉兵, 汤宝平, 黄 艺, 赵春华, 汤恒行

(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网络同步采集中的同步触发精度低问题,提出了一种比例补偿跨层同步采集触发方法。首先,基于跨层同步架构设计超宽带机械振动无线传感器网络节点,分析采集节点实际采集时钟构成;然后,使用单一硬件定时器作为采集控制时钟,跨层获取同步信息并进行同步触发延时控制;最后,根据周期性同步信息建立节点间的时间比例模型,根据采集节点上行链路时间比例对同步触发延时进行比例补偿,减小同步采集触发误差。实验结果表明,所提方法在单跳网络中同步采集触发误差均值为 20 ns,最大值为 50 ns,在两跳网络中同步采集触发误差均值为 37 ns,最大值为 76 ns,有效提高了机械振动无线传感器网络同步采集触发精度。

关键词:机械振动监测;无线传感器网络;比例补偿;同步采集触发

中图分类号: TP393.1 TH17 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Cross-layer synchronous acquisition trigger method with proportional compensation for mechanical vibration WSN

Ye Quanbing, Tang Baoping, Huang Yi, Zhao Chunhua, Tang Hengxing

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

Abstract: To address the problem of low synchronization trigger accuracy in synchronous acquisition of mechanical vibration in wireless sensor networks, a cross-layer synchronous acquisition trigger method with proportional compensation is proposed. Firstly, the ultra wide band mechanical vibration wireless sensor network nodes based on cross-layer synchronous architecture are designed, and the composition of the actual acquisition clock of the acquisition node is analyzed. Then, a hardware timer is used as the acquisition control clock to obtain the synchronization information across layers and carry out the delay of synchronous trigger. Finally, the time scale model between nodes is formulated according to the periodic synchronization information, and the delay time of synchronous trigger is proportionally compensated according to the uplink time scale of the acquisition node to reduce the synchronous trigger error. Experimental results show that the mean value and maximum value of synchronous acquisition trigger error in single-hop network are 20 and 50 ns, and the mean value and maximum value of synchronous acquisition trigger error in two-hop network are 37 and 76 ns, which effectively improve the synchronous acquisition trigger accuracy of mechanical vibration wireless sensor network.

Keywords: mechanical vibration monitoring; wireless sensor networks; proportional compensation; synchronous acquisition trigger

0 引 言

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)实际应用于信号监测领域时,各传感器节点间通过无线组网进行信息交互,缺乏同一硬件时钟源,且多点数据采集往往有同步采集要求,所以节点间时间同步尤为重要。

特别是在机械振动无线传感器网络^[1]中,机械振动信号频率高,一般为 2~20 kHz,信号幅值随时间变化快,当多点数据采集不同步时,将导致不同测点数据间出现严重的相位偏差,振动幅值数据在时间上被错误对齐,对后续分析造成严重影响,因此振动信号的采集需要更高的同步采集精度^[2]。当采样频率为 64 kHz 时,采样周期长度为 15.625 μ s,若要求同步误差小于采样周期 1%,则需要

收稿日期:2022-11-14 Received Date: Data:2022-11-14

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(52275087,51675067)项目资助

同步误差小于 156 ns,同步误差越小则相位偏差越小,幅值更准确。同时需要监测的机械振动频率越高,同步采集精度要求就越高,文献[2]要求同步误差小于采样周期的 5%,本文提出的方法以同步触发误差小于采集节点最高采样频率的采样周期的 1% 为目标。

在实际机械振动监测中,各节点的晶振受漂移及环境影响,提供给节点的本地时钟往往都存在一定偏差,直接导致节点间信号采集的不同步,实现同步采集需要同步采集控制方法的参与^[3]。不同的同步采集控制方法适用于不同的硬件架构,同步速度、同步精度以及计算复杂度不同,对机械振动测量结果最直接的影响体现在其能实现的同步采集精度不同。同步采集控制方法通过同步采集触发控制与同步采集频率控制来实现节点间采集时钟的同步,前者旨在实现各采集节点从同一时刻开始进行数据采集,后者旨在实现各采集节点同步触发后生成频率相同的采集时钟^[4-6]。

针对无线传感器网络的同步采集触发问题,一种思路是首先同步传感器节点时钟^[7-9],随后由同步的节点时钟提供同步的采集触发。在节点时钟同步方面,Huan等^[10]在反向非对称时间同步框架基础上,提出了一种非对称无时间戳的时间同步方案,实验结果表明可在多跳网络中实现 1.85 μs 的时间同步精度。Asgarian等^[11]提出了一种蓝牙兼容的时间同步协议,使用信标进行数据传输,考虑不同漂移管理方法和同步数据包配置方法,权衡了能源效率、同步误差以及同步速度,在单跳网络下实现了 320 ns 的时间同步精度。Perez-Solano等^[12]基于超宽带(ultra wide band, UWB)无线通信技术,分析 UWB 技术时钟同步涉及的不同因素,将无线模块自有时间戳与线性回归算法结合,在单跳网络信标周期为 200 ms 的情况下,使得微控制器时钟同步精度达到了 31 ns。

另一种思路是分析传感器节点的采集触发控制流程,直接对采集触发进行同步^[13]。在这方面,Gao等^[14]采用硬件跨层架构并提出了一种多跳网络同步触发补偿算法,通过信标帧中断信号启动延时定时器,延时后触发,但将路由节点晶振频率偏移视为固定值,路由节点引入的同步触发误差无法被完全补偿,在多跳网络中同步触发精度可达 2.43 μs 。Bengherbia等^[15]基于现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)提出了一种物理层同步触发方法,物理层接收到有效数据包后立即进入中断进行同步触发,实验表明其平均同步触发精度可达 83.33 ns,但仅适用于单跳网络且未解决数据包传输路径延迟。

为实现更高同步精度的机械振动信号采集,本文针对节点间采集时钟的触发时刻同步,设计了基于跨层同步架构的超宽带机械振动无线传感器网络节点,使用单一硬件计时器作为采集控制时钟,在此时钟基础上跨层

捕获准确的物理层时间戳作为同步信息,并使用此时钟进行同步采集触发控制和后续同步采集频率控制,消除同步信息获取与同步控制的时钟源差异,基于设计的节点提出了一种同步延时比例补偿方法,通过跨层同步架构获取的周期性同步信息,对各采集节点的同步触发延时进行比例补偿,实现采集过程中触发时刻的高精度同步。本文采集节点最大采样频率为 64 kHz,此时采样周期为 15.625 μs ,本文方法多跳同步触发误差 37 ns 仅为采样周期的 0.236 8%,小于 1%。与现有方法相比,本文方法同步触发精度更高,20 ns 的单跳同步触发误差较文献[12]方法的 31 ns 减少了 35%,37 ns 的多跳同步触发误差较文献[2]方法的 320 ns 减少了 88%。此外本文方法同步采集触发速度更快,仅使用一个信标周期获取同步信息并在下一个信标周期即可完成同步采集触发,同时同步触发误差不受时间推移与采集节点晶振偏移影响。

1 WSN 跨层同步采集架构

1.1 架构设计思想

机械振动无线传感器网络由网关节点、路由节点与采集节点组成。在多跳网络中,每个采集节点接收到采集开始命令的时间都有差异,为实现同步采集触发,采集节点都需要在采集触发前进行相应延时,然后在同一时刻进行采集触发。

为提高同步触发精度,使用硬件定时器捕获无线模块时间相关的物理层信号,并以该信号为延时起点执行同步触发延时,延时完毕后进行采集触发。同步触发延时长度由同步触发方法计算。同步触发延时由硬件定时器在物理层执行,可避免软件层误差的引入。

1.2 节点跨层同步架构

选用微控制器(microcontroller unit, MCU)STM32F405RG 作为节点的控制模块,8 MHz 晶振为其提供时钟。选用 DWM1000 模块作为节点的无线通信模块,DWM1000 模块可在物理层提供收发中断信号。选用 AD7766-1 芯片作为采集节点的模数转换芯片(analog to digital converter, ADC),最高采样频率为 64 kHz,16 倍过采样率,需在 MCLK 引脚输入采集频率控制时钟,并通过 SYNC/PD 引脚电平控制采集开始与结束,两个引脚的输入信号组合成了实际采集时钟。

STM32F405RG 拥有 14 个硬件定时器。网关节点使用硬件定时器 9(timer 9, TIM9)作为全网同步采集参考时钟;路由节点使用 TIM9 提供同步信息;采集节点使用 TIM9 作为节点采集控制时钟。采集节点使用硬件定时器 1(timer 1, TIM1)为 AD7766-1 提供 MCLK 时钟,并在采集过程中调整 MCLK 周期长度以实现对采集的同步控制。

此时采集节点内部时钟传递流程如图1所示。此时TIM9的一个硬件时钟计数值(count, CNT)理论时间长度为6.25 ns,这也是后续同步触发延时补偿的最小时间补偿单位。TIM1与TIM9时钟源相同,计数器计数长度可直接转换。

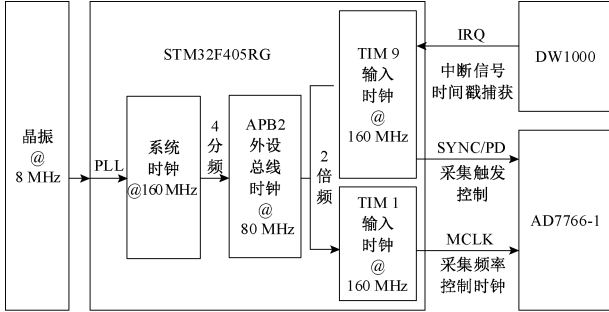


图1 采集节点时钟传递过程

Fig. 1 Clock transfer process of acquisition node

在所有节点中,连接TIM9的时间捕获引脚与DWM1000收发中断信号引脚,跨越软件层直接捕获DWM1000收发中断信号发生时刻的TIM9硬件时钟计数值作为物理层帧收发捕获时间戳。

在采集节点中,TIM9作为采集控制时钟进行时间戳捕获、同步触发延时控制与后续同步采集频率控制,可保障同步采集时钟的同步信息与同步控制皆来源于同一时钟,没有时钟源差异,且不引入软件层误差。

1.3 节点采集触发控制

在TIM9控制的同步触发补偿延时结束后,TIM9产生溢出中断信号,在随后的溢出中断服务子程序中进行采集触发控制,建立时间模型如图2所示。

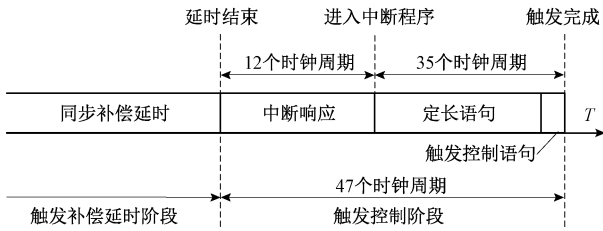


图2 采集触发控制时间模型

Fig. 2 Time model of acquisition trigger control

从同步触发补偿延时结束到进入定时器中断溢出服务子程序,此阶段为STM32的中断响应阶段,执行时间 Δt_{IRT} 为12个时钟周期。进入中断服务子程序后,在固定位置进行采集触发控制(即拉高AD7766-1的SYNC/PD引脚电平),编程时确保触发控制之前的语句长度固定。通过反汇编查看,确定从中断服务子程序开始到触发控制语句结束一共有16条汇编语句,根据Cortex-M4内核指令标准执行周期以及三级流水线结构,可得语句执行时间 $\Delta t_{TRIGGER}$ 为35个时钟周期。

触发控制时间 Δt_{TC} 表示从延时结束到触发完成这段时间, $\Delta t_{TC} = \Delta t_{IRT} + \Delta t_{TRIGGER}$,此阶段均由系统时钟160 MHz提供运行时钟,因为TIM9的160 MHz也是由系统时钟分频倍频而来,可忽略其中时钟源差异将 Δt_{TC} 等值转换为TIM9的计数值。

1.4 同步采集触发精度保持

AD7766-1的同步采集触发时序如图3所示。其中, $T_{TRIGGER}$ 为全网同步采集触发时刻; $\Delta t_{SAMPLING}^{REFER}$ 为此次采样的标准采样周期长度,由网关TIM9提供长度参考。

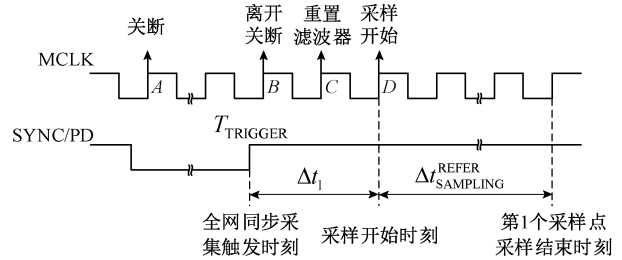


图3 同步采集触发时序模型

Fig. 3 Time model of synchronous acquisition trigger

同步采集触发时刻,SYNC/PD引脚电平被拉高,AD7766-1在随后第1个MCLK时钟上升沿B离开关断状态,在第2个上升沿C进行内部滤波器复位,在第3个上升沿D开始采样,并在以D为起始的16个MCLK时钟周期内完成第1个采样点的采样转换。

使同步采集触发时刻与采样开始时刻之间的时间长度 Δt_1 保持为 $\Delta t_{SAMPLING}^{REFER}$ 的1/8,并在同步触发补偿延时阶段提前计算 $\Delta t_{SAMPLING}^{REFER}$ 对应于TIM1的CNT数目,得到 Δt_1 对应于TIM1的CNT数目。

在同步采集触发时刻,记录TIM9与TIM1计数值,随后计算以B、C为起始的两个MCLK周期对应于TIM1的CNT数目,并在每个周期开始后设置自动重载计数器以进行周期长度调整。随后调整以D为起始的16个MCLK时钟周期的周期长度为 $\Delta t_{SAMPLING}^{REFER}$ 的1/16。由此同步采集触发时刻的同步触发精度被保持到第1个采样点采样完成。

2 同步延时比例补偿方法

2.1 周期性同步信息传递

网络采用多跳树状拓扑结构进行组网,采用单信道时分复用(time division multiple access, TDMA)策略^[16-17],为网络中每个节点分配其自有时隙。

网关节点每512 ms周期性的广播定长信标帧,路由节点接收其父节点信标广播并在自有时隙转发该信标广播,采集节点仅接收其父节点信标广播。

将信标广播的物理层帧收发捕获时间戳作为同步信息层层传递。在信标广播时,网关节点使用 TIM9 捕获其自身信标广播的物理层发送捕获时间戳,并随后将该时间戳作为同步信息向子节点广播;路由节点使用 TIM9 捕获其父节点信标广播的物理层接收捕获时间戳与自身转发信标广播的物理层发送捕获时间戳,随后将两个时间戳加上网关同步信息向子节点广播;采集节点使用 TIM9 捕获其父节点信标广播的物理层接收捕获时间戳,并加上随后接收的父节点同步信息广播组成一个信标广播的完整同步信息。

2.2 信标帧收发时间模型

帧发送时,MCU 提前将帧数据写入 DW1000 发送缓冲区并命令其开始发送,DW1000 从数据低字节位开始依次进行信号调制并随即发送调制后数据,帧发送完成后 DW1000 内部完成相关寄存器操作,随后发出中断信号。帧接收时,MCU 命令 DW1000 开启接收,DW1000 接收到信号后随即解调校验信号,确定数据正确后从字节低位依次放入接收缓冲区,帧接收完成后 DW1000 内部完成相关寄存器操作,随后发出中断信号。

研究信标帧的收发并建立信标帧的收发时间模型如图4所示。

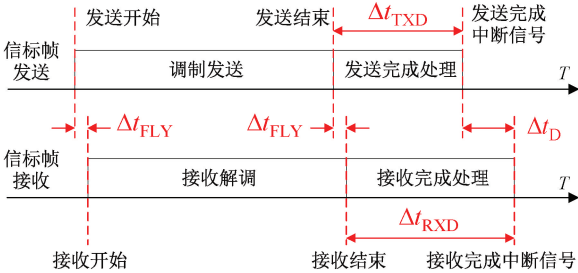


图4 信标帧收发时间模型

Fig. 4 Time model of beacon frame transmitting and receiving

其中,信标帧收发捕获延时 Δt_D 为信标帧接收中断信号捕获与发送中断信号捕获的延迟时间;时间 Δt_{FLY} 为信标帧飞行时间;发送完成延时 Δt_{TXD} 为信标帧发送后中断信号发出前的发送完成处理时间;接收完成延时 Δt_{RXD} 为信标帧接收后中断信号发出前的接收完成处理时间。

$$\Delta t_{RTXD} = \Delta t_D - \Delta t_{FLY} = \Delta t_{RXD} - \Delta t_{TXD} \quad (1)$$

信标帧收发延时 Δt_{RTXD} 为 Δt_{RXD} 与 Δt_{TXD} 的差值。时间 Δt_{TXD} 、 Δt_{RXD} 均为 DW1000 内部逻辑电路信号处理耗时,时长与 DW1000 内部时钟周期的时间长度成正比,为固定值,可知信标帧收发延时 Δt_{RTXD} 也是固定值。

即使无线模块 DWM1000 是同一批次生产,其天线也存在细微差异,因此在节点焊接完成后对各节点天线

进行测量校准,补偿其接收与发送延迟,此时,式(1)中的 Δt_{FLY} 仅与节点天线间距离有关。设计实验测量信标帧收发延迟 Δt_{RTXD} ,实验中两个实验节点天线间隔 30 cm,保证信标帧飞行时间 Δt_{FLY} 约为 1 ns,其中一个节点发送定长信标帧,另一节点接收,并在开始前微调接收方 DWM1000 的时钟频率使其相对于发送方的频率偏移不超过 1.5×10^{-6} 。使用逻辑分析仪 LA5016 测量两节点间的 Δt_D ,减去 1 ns 飞行时间 Δt_{FLY} 即为 Δt_{RTXD} 。设置逻辑分析仪采样频率 500 MHz,一组实验连续测量 400 个 Δt_D ,每组实验使用不同收发节点,测量 4 组实验。在 1 600 次实际测量中,测得 Δt_{RTXD} 最小为 4 906 ns,最大为 4 926 ns,平均值 4 916 ns。本文在后续方法中将 Δt_{RTXD} 确定为固定值 4 916 ns。

UWB 物理层定义了物理层内部收发时间戳,该时间戳指示帧发送或接收过程中物理帧帧头第 1 个字符发送或者接收的时刻。

节点组网后,在子节点的自有时隙中,依据双边双向测距原理^[18],使用 DW1000 物理层内部时间戳,测量父子节点间信号帧的飞行时间 Δt_{FLY} 。

由测量得出的帧飞行时间 Δt_{FLY} 与信标帧收发延迟 Δt_{RTXD} ,可得出信标帧收发捕获延时 Δt_D 。

2.3 时间比例模型

采集节点周期性获取同步信息,最新一组信标广播的完整同步信息减去上一组可以获得上一信标周期中采集节点数据上行链路中所有节点的一周期 TIM9 累计计数值。理论上 TIM9 的 1 个 CNT 代表的时间长度为 6.25 ns,但因为各节点本地晶振的频率偏移,各节点的 1 个 CNT 时间长度也不一致,因此在同一周期相同时间长度下,不同节点的 TIM9 累计计数值也不同。父子节点同一周期计数值与各自 TIM9 计时长度可以构成一个比例关系,随着各节点本地时钟频率的变化,这个比例也在不断变化。

当采集节点位于网络第 2 跳末端时,其上行链路的各节点时间比例模型如图5所示。

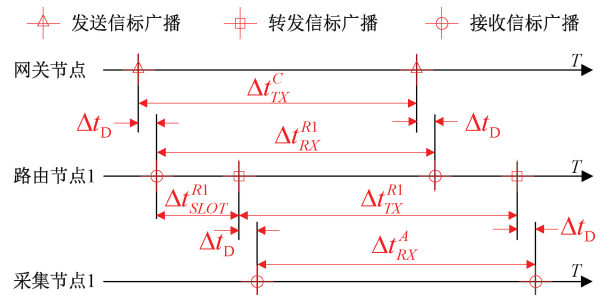


图5 时间比例模型

Fig. 5 Time scale model

其中,上标 C 表示网关节点, $R1$ 表示第 1 跳路由节点, A 表示采集节点;下标 TX 表示信标发送周期时间, RX 表示信标接收周期时间, $SLOT$ 表示信标转发延迟时间; Δt 表示该节点该段时间的 TIM9 计数数值。

$\Delta t_{TX}^C, \Delta t_{RX}^{R1}, \Delta t_{TX}^{R1}, \Delta t_{RX}^A$ 这一组数值为该采集节点的比例尺。由比例尺可以进行上行链路中节点间的 TIM9 计数数值转换,因微控制器中进行浮点运算会导致精度损失,所以保留原始比例尺数值,并尽量把浮点运算安排在算法计算流程的末尾,以求最小程度的精度损失。

在进行同步采集触发延时补偿时,最好的比例尺为当前周期比例尺,但因为当前周期的末端信标广播同步信息还未下发,因此当前周期比例尺无法获取,在比例尺选择时可选择上一周期比例尺,也可选择前几个周期的平均比例尺。

2.4 延时同步触发模型与比例补偿方法

网关节点确定全网同步采集触发时刻 $T_{TRIGGER}$,在当前周期下发同步开始命令,以下一个信标广播的物理层发送捕获时间戳作为全网延时基准时刻 T_{DATUM}^C 。各采集节点以下一个信标广播的物理层接收捕获时间戳为起点进行同步触发补偿延时,延时完成后进入采集触发控制阶段,并在时刻 $T_{TRIGGER}$ 完成同步触发。

在同步采集触发流程中,网关节点的 TIM9 时钟做为全网同步采集参考时钟,信标帧收发延迟时间 Δt_{RTXD} 和帧飞行时间 Δt_{FLY} 在测定后均转换成网关节点 TIM9 时钟长度 Δt_{RTXD}^C 和 Δt_{FLY}^C 。

在单跳网络中,采集节点延时同步触发模型如图 6 所示。

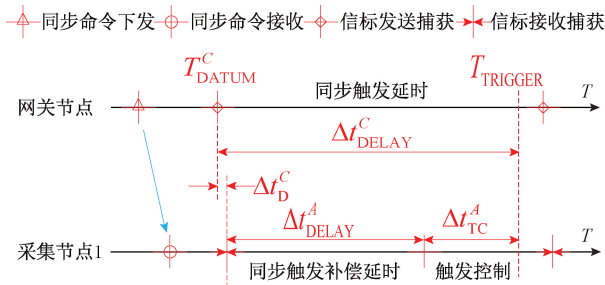


图 6 单跳同步采集触发时间模型

Fig. 6 Time model of single-hop network synchronous acquisition trigger

其中, Δt_{DELAY}^C 为网关同步触发延时; Δt_D^C 为信标帧接收中断信号捕获与发送中断信号捕获的延时; Δt_{DELAY}^A 为采集节点同步触发补偿延时; Δt_{TC}^A 为采集节点触发控制时间。比例尺为 $\Delta t_{TX}^C, \Delta t_{RX}^A$, 可得:

$$\Delta t_D^C = \Delta t_{RTXD}^C + \Delta t_{FLY}^C \quad (2)$$

$$\frac{\Delta t_{DELAY}^A + \Delta t_{TC}^A}{\Delta t_{DELAY}^C - \Delta t_D^C} = \frac{\Delta t_{RX}^A}{\Delta t_{TX}^C} \quad (3)$$

由式(2)、(3)得单跳网络采集节点同步触发补偿延时计算公式为:

$$\Delta t_{DELAY}^A = \frac{\Delta t_{RX}^A}{\Delta t_{TX}^C} (\Delta t_{DELAY}^C - \Delta t_{RTXD}^C - \Delta t_{FLY}^C) - \Delta t_{TC}^A \quad (4)$$

在两跳网络中,采集节点延时同步触发模型如图 7 所示。

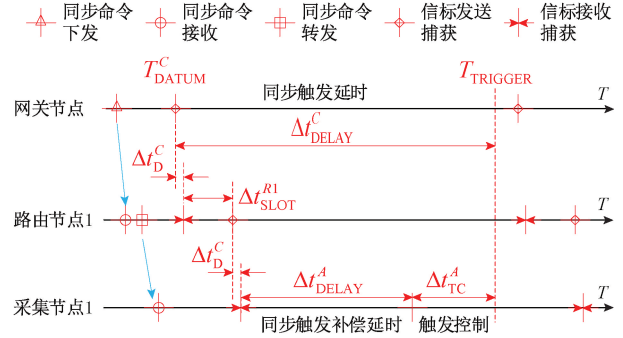


图 7 两跳同步采集触发时间模型

Fig. 7 Time model of two-hop network synchronous acquisition trigger

其中, Δt_{DELAY}^C 为网关同步触发延时; Δt_D^C 为信标帧接收中断信号捕获与发送中断信号捕获的延时; Δt_{SLOT}^{R1} 为第 1 跳路由节点信标转发时隙延时; Δt_{DELAY}^A 为采集节点同步触发补偿延时; Δt_{TC}^A 为采集节点触发控制时间。比例尺为 $\Delta t_{TX}^C, \Delta t_{RX}^{R1}, \Delta t_{TX}^{R1}, \Delta t_{RX}^A$, 加入变量 Δt_{SLOT}^C 、变量 $\Delta t_{DELAYTC}^{R1}$ 可得:

$$\frac{\Delta t_{SLOT}^C}{\Delta t_{SLOT}^{R1}} = \frac{\Delta t_{TX}^C}{\Delta t_{RX}^{R1}} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta t_{DELAY}^C - \Delta t_D^C - \Delta t_{SLOT}^C}{\Delta t_{DELAYTC}^{R1}} = \frac{\Delta t_{TX}^C}{\Delta t_{RX}^{R1}} \quad (6)$$

$$\frac{\Delta t_{DELAYTC}^{R1}}{\Delta t_{DELAY}^A + \Delta t_{TC}^A} = \frac{\Delta t_{TX}^{R1}}{\Delta t_{RX}^A} \quad (7)$$

由式(2)、(5)~(7)得两跳网络采集节点同步触发补偿延时计算公式为:

$$\Delta t_{DELAY}^A = \frac{\Delta t_{RX}^{R1} \times \Delta t_{RX}^A}{\Delta t_{TX}^C \times \Delta t_{TX}^{R1}} \left(\Delta t_{DELAY}^C - 2 \times (\Delta t_{RTXD}^C + \Delta t_{FLY}^C) - \frac{\Delta t_{TX}^C}{\Delta t_{RX}^{R1}} \times \Delta t_{SLOT}^{R1} \right) - \Delta t_{TC}^A \quad (8)$$

以此类推,也可得第 3 跳网络与第 4 跳网络中采集节点延时同步触发模型与同步触发补偿延时计算公式。

3 性能验证与分析

3.1 节点硬件设计与同步触发测试方法

基于跨层同步架构的超宽带 WSN 采集节点硬件架构如图 8 所示。

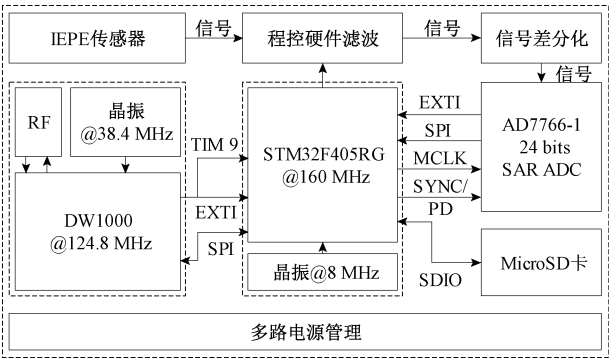


图 8 采集节点硬件架构

Fig. 8 Hardware architecture of acquisition node

节点微控制器为 STM32F405RG, 8 MHz 晶振为其提供时钟, 控制节点的组网、采集、存储、传输等事务。采集模块中模数转换芯片为专业低功耗振动模数转换芯片 AD7766-1 (24 bits SAR ADC), 最高采样频率 64 kHz, 16 倍过采样率。无线通信模块为 DWM1000 模块, 该模块由 UWB 无线通信芯片 DW1000 与晶振、电源滤波、天线等周围电路组成。UWB 无线脉冲信号特性使得其天然拥有低功耗与高定位精度的特点^[18-20], 被广泛用于定位, 在需要高同步精度与大量数据传输的机械振动无线传感器网络中有较好的应用前景。使用时 DWM1000 作为无线收发从机, 通过串行外设接口 (serial peripheral interface, SPI) 与 MCU 通信, 提供收发中断信号通知。存储模块使用 8 G MicroSD 卡。设计多路电源管理模块, 为其余 4 个模块提供不同需求的电压, 为 IEPE 传感器提供恒流源。

节点实物如图 9 所示, 实验平台如图 10 所示。路由节点硬件由控制模块、无线模块以及 3.3 V 电源模块组成。网关节点在路由节点硬件基础上增加一个串口通信模块与上位机通信。

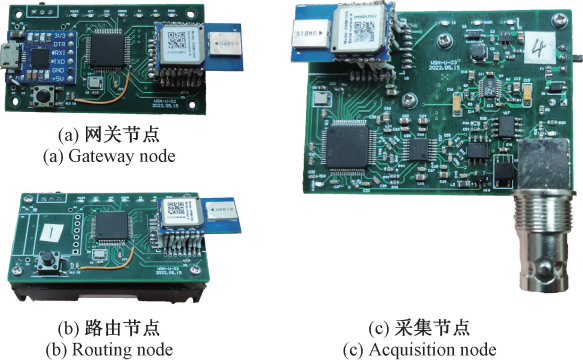


图 9 节点实物

Fig. 9 Prototype of nodes

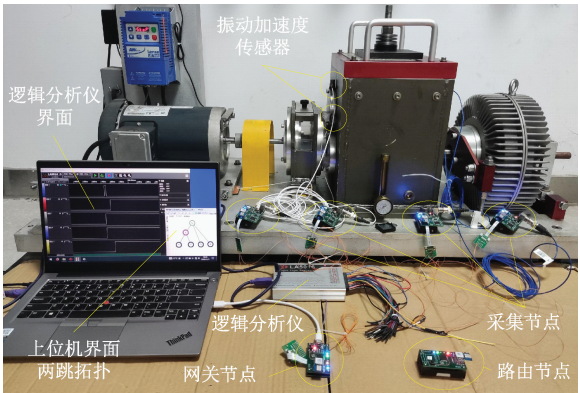


图 10 同步采集触发实验平台

Fig. 10 Synchronous acquisition trigger experimental platform

为验证本文所提方法的实际性能, 焊接 1 个网关节点、1 个路由节点、4 个采集节点, 可组建单跳网络或两跳网络。在一组同步触发精度测试实验中, 组网完成后进行连续 100 次同步采集, 使用逻辑分析仪监测每一次采集开始时的网关节点的全网同步采集触发时刻与各采集节点 ADC 的 SYNC/PD 引脚上的同步采集触发时刻, 选择各采集节点中的同步触发误差最大值作为该次的同步触发误差。

3.2 同步采集触发精度测试

测试本文提出方法的实际效果, 在单跳网络中, 设置无同步方法组 (A 组)、仅使用本文跨层同步架构组 (B 组)、完整本文方法组 (跨层同步架构+触发延时比例补偿方法) (C 组) 3 类实验组, 分别设置同步触发延时为 10、200、500 ms, 比例尺选择上一周期比例尺, 测试不同方法与不同时间延时补偿的同步触发精度。实验共 7 个组, 实验结果如图 11 和表 1 所示。

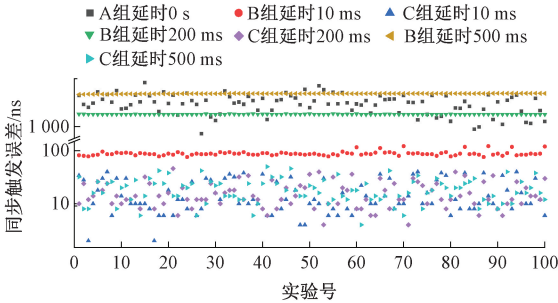


图 11 同步触发方法精度

Fig. 11 Accuracy of synchronous trigger methods

从结果可以看出, 无同步方法组同步触发效果较差, 100 次测试同步触发误差均值达到了 2 887 ns; 仅使用本文跨层同步架构的组随着同步触发延时的增加其同步触发误差也开始大幅增大; 使用完整本文方法的组随同步触发延时的增加其同步触发误差仅有非常轻微幅度的增长。

表1 不同方法同步触发误差统计

Table 1 Synchronous trigger error statistics of different methods

组类别	A				B				C			
延时/ms	0	10	200	500	10	200	500		10	200	500	
最小值/ns	740	76	1 694	4 046	2	4	4		2	4	4	
最大值/ns	6 796	122	1 766	4 256	40	46	50		40	46	50	
平均值/ns	2 887	89	1 714	4 200	17	17	20		17	17	20	
方差/ns ²	1 279 555.0	84.8	169.2	1 940.2	125.3	85.8	96.6		125.3	85.8	96.6	

延时 10 ms, B 组无同步方法补偿时钟偏移, 100 组同步误差均来自于时钟偏移最大的节点, 而 C 组的 100 组同步误差选自于 4 个采集节点同步误差的最大值, 数据离散程度被此最大值选取机制放大, 延时 10 ms, C 组方差大于 B 组。而在延时 200 与 500 ms, C 组有同步方法补偿时钟偏移并进行了同步控制, 同步误差数据方差小于了无同步方法的 B 组。

在一个信标周期 512 ms 内, 单跳网络使用本文方法可在同步触发延时 500 ms 时保持同步触发误差平均值为 20 ns、最大值为 50 ns。单跳平均同步触发误差 20 ns 占最高采样频率的采样周期长度 15.625 μ s 的 0.128%, 远小于 1%。

3.3 网络跳数对同步触发精度影响

为测试网络跳数对同步触发精度影响, 分别测试单跳网络组与两跳网络组, 设置同步触发延迟 500 ms, 比例尺选择上一周期比例尺, 测试网络跳数对同步触发精度的影响, 实验结果如图 12 所示。

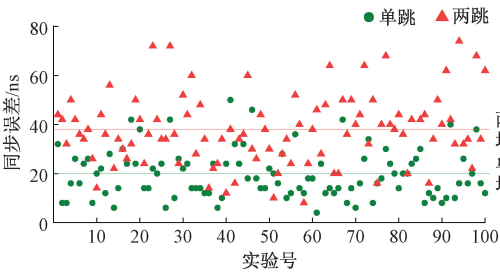


图 12 单跳与两跳同步触发精度

Fig. 12 Single-hop and two-hop synchronous trigger accuracy

在 100 次测试中, 单跳网络组同步触发误差最大值 50 ns、平均值 20 ns、方差 96.6 ns²; 两跳网络组同步触发误差最大值 76 ns、平均值 37 ns、方差 199.8 ns²。多跳平均同步触发误差 37 ns 占最高采样频率的采样周期长度 15.625 μ s 的 0.236 8%, 远小于 1%。

从实验结果可以看出, 使用本文方法后网络跳数对同步触发精度仍有一定影响, 通过分析发现其主要原因为 TIM9 最小理论时间单位为 6.25 ns, 每一次捕获都会

产生捕获误差, 捕获误差在网络跳数增加的情况下开始累积, 在一定程度上降低了同步触发精度。

3.4 比例尺对同步触发精度影响

为测试比例尺选择对同步触发精度的影响, 组建两跳网络, 同步触发延迟 500 ms, 选择最近几个连续周期比例尺的平均值作为比例尺, 共 6 个组, 实验结果统计如图 13 和表 2 所示。

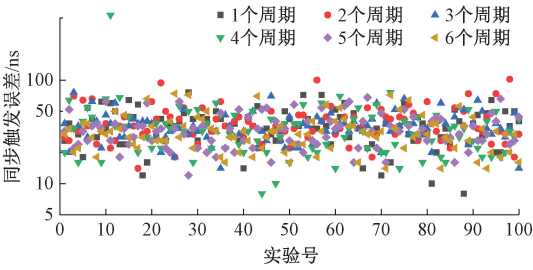


图 13 不同周期比例尺同步触发精度

Fig. 13 Synchronous trigger accuracy of different cycle scales

表2 不同比例尺同步触发误差统计

Table 2 Synchronous trigger error statistics of different scales

周期	1 个	2 个	3 个	4 个	5 个	6 个
最小值/ns	8	14	14	8	12	14
最大值/ns	76	102	76	426	68	74
平均值/ns	37	40	36	38	34	33
方差/ns ²	199.8	269.0	142.8	1 735	154.6	179.4

在 6 组实验结果中, 4 周期组出现一个离群值, 除开 4 周期组后 2 周期组同步触发误差最大。分析可得, 参与比例尺平均的周期数增加会降低上一周期比例尺在平均比例尺中的权重, 理论上会让平均比例尺的变化更平稳, 但同时会降低比例尺灵敏度, 导致在本地晶振偏移过快时无法及时补偿, 且对于提高同步精度效果不大, 综合考虑本方法仍然选择上一周期比例尺。此时只需要一个信标周期即可获取同步采集触发所需的同步信息, 并在下一周期完成同步延时采集触发, 从同步采集开始命令下达后两个信标周期内即可完成同步采集触发。在信标周期为 512 ms 时, 命令下达到同步采集触发完成不超过 1 s, 与其他研究相比具有同步触发速度快的优点, 不需要额外存储前面多个周期的同步信息。

3.5 不同方法同步采集触发精度比较

不同同步采集触发方法所需硬件架构不同, 因此本文方法在与其他研究方法相比时直接对比不同方法在各自最优架构下最终实现的同步采集触发精度。

对比结果如表 3 所示。在单跳平均同步误差上,本文方法比文献[12]方法精度提高了 11 ns、比文献[15]方法精度提高了 63.33 ns;在单跳最大同步误差上,本文方法比文献[14]方法精度提高了 890 ns、比文献[15]方法精度提高了 120 ns;在多跳平均同步误差上,本文方法比文献[2]方法精度提高了 283 ns;在多跳最大同步误差上,本文方法比文献[2]方法精度提高了 554 ns,比文献[14]方法精度提高了 2 354 ns。

表 3 不同同步方法的同步触发误差比较
Table 3 Comparison of synchronous trigger error of different synchronization methods ns

方法	本文	文献 [2]	文献 [12]	文献 [14]	文献 [15]
单跳最小值	4.00				60.00
单跳平均值	20.00		31.00		83.33
单跳最大值	50.00			940.00	170.00
多跳最小值	8.00	110.00			
多跳平均值	37.00	320.00			
多跳最大值	76.00	630.00		2 430.00	

3.6 框架模态测试实验

为验证本文提出方法在实际测试中的同步效果,对钢材框架进行框架模态测试实验如图 14 所示,分别使用有线监测系统和本文的机械振动无线传感器网络(单跳网络)进行测试。值得注意的是节点程序中同时使用了基于本文同步架构的同步采集频率控制方法以及本文提出的同步采集触发方法,这是因为同步采集触发控制与同步采集频率控制在同步采集中皆为不可或缺的部分,同时影响振动数据的同步采集精度。



图 14 有线监测系统框架模态测试实验

Fig. 14 Model test experiment of the wired monitoring system

为钢材框架确定 16 个测点,因为传感器节点数目不足 16 个,选择固定力锤激励点,并将 16 个测点分成两个

一组,一次使用两个传感器,采用移动传感器的方式实现全部测点的测量,传感器和力锤信号均使用刺刀螺母连接器(bayonet nut connector, BNC)接口与本文采集节点或有线监测系统连接。设置采样频率为 12 500 Hz,采样长度为 50 000 个数据点。

将采集到的数据导入到自研的模式分析软件进行模态分析处理,机械振动无线传感器网络模态测试稳定图如图 15 所示,有线监测系统模态测试稳定图如图 16 所示,测量出的前五阶固有频率如表 4 所示。可以发现两个稳定图图像有细微差别,但本文机械振动无线传感器网络与有线监测系统测量出的前五阶固有频率相对误差均不高于 0.45%,结果表明本文提出的同步采集触发方法可以实现高频振动信号的同步采集触发。

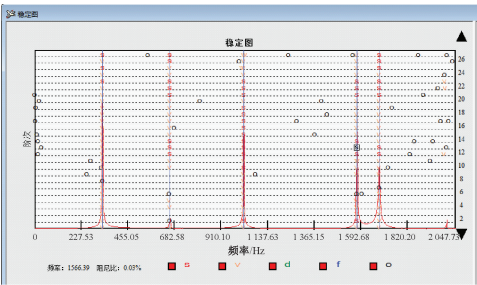


图 15 机械振动无线传感器网络模态测试稳定图

Fig. 15 Modal test stability diagram of wireless sensor network for mechanical vibration

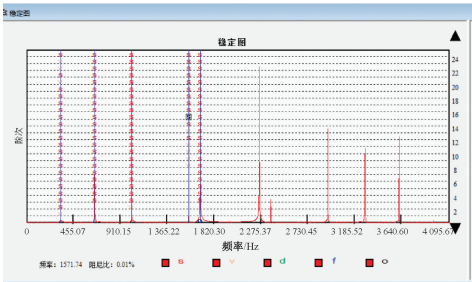


图 16 有线监测系统模态测试稳定图

Fig. 16 Modal test stability diagram of the wired monitoring system

表 4 模态测试实验结果对比
Table 4 Comparison of modal test results

阶次	机械振动无线传感器网络固有频率测试	有线监测系统固有频率测试	固有频率相对误差/%
1	330.188	330.731	0.164
2	658.245	659.960	0.260
3	1 017.144	1 019.128	0.195
4	1 566.459	1 571.743	0.336
5	1 676.280	1 683.466	0.427

4 结 论

针对机械振动无线传感器网络高精度同步采集中的同步触发问题,从采集节点实际采集时钟、同步信息获取与同步采集控制等方面进行研究,设计了基于跨层同步架构的 WSN 节点并提出了一种同步延时比例补偿方法,使用同一个采集控制时钟获取同步信息并进行比例补偿的同步触发延时控制,不引入软件层误差,比例补偿物理层延时,实现采集节点触发时刻的高精度同步。最后从不同同步触发方法的精度对比、网络跳数影响与比例尺影响等方面对本方法进行了实验测试,并与有线监测系统进行了模态测试对比。结果表明,所提方法在单跳网络中平均误差为 20 ns,在多跳网络中平均误差为 37 ns,模态测试中固有频率相对误差小于 0.45%,精度达到预期目标,优于其他现有同步采集触发方法,有效提高了机械振动无线传感器网络的同步采集触发精度,为同步采集控制提供良好基础。

参考文献

- [1] 黄艺,赵春华,汤宝平,等. 冗余策略下的机械振动 WSN 高效可靠传输方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3): 146-152.
HUANG Y, ZHAO CH H, TANG B P, et al. Efficient and reliable transmission method for mechanical vibration of WSN based on redundancy strategy [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43 (3): 146-152.
- [2] 肖鑫. 基于跨层设计的机械振动无线传感器网络同步采集方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
XIAO X. Synchronous acquisition based on cross-layer design for mechanical vibration wireless sensor networks[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [3] TIRADO-ANDRES F, ARAUJO A. Performance of clock sources and their influence on time synchronization in wireless sensor networks [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2019, DOI: 10.1177/1550147719879372.
- [4] XIAO X, DENG L, TANG B P, et al. On-chip order tracking method using wireless sensor networks based on hardware cross-layer design [J]. Measurement, 2019, 147(1): 106852.
- [5] JIANG B, CHEN M, CHEN F. A clock drift compensation method for synchronous sampling in sensor

networks [J]. Measurement Science and Technology, 2018, DOI: 10.1088/1361-6501/aaf6c7.

- [6] GAO S, ZHANG X, DU C, et al. A multichannel low-power wide-area network with high-accuracy synchronization ability for machine vibration monitoring [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6 (3): 5040-5047.
- [7] SHI F R, YANG S X, TUO X G, et al. A novel rapid-flooding approach with real-time delay compensation for wireless-sensor network time synchronization [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2022, 52(3): 1415-1428.
- [8] HUAN X T, KIM K S, LEE S, et al. Improving multi-hop time synchronization performance in wireless sensor networks based on packet-relaying gateways with per-hop delay compensation [J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(9): 6093-6105.
- [9] SUN X B, SU Y X, HUANG Y, et al. Design and development of a wireless sensor network time synchronization system for photovoltaic module monitoring [J]. International Journal of Distributed Sensor networks, 2020, 16(5): 1-8.
- [10] HUAN X T, HE H X, WANG T L, et al. A timestamp-free time synchronization scheme based on reverse asymmetric framework for practical resource-constrained wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(9): 6109-6121.
- [11] ASGARIAN F, NAJAFI K. BlueSync: Time synchronization in bluetooth low energy with energy-efficient calculations [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(11): 8633-8645.
- [12] PEREZ-SOLANO J J, FELICI-CASTELL S, SORIANO-ASENSI A, et al. Time synchronization enhancements in wireless networks with ultra wide band communications [J]. Computer Communications, 2022, 186: 80-89.
- [13] 付豪, 汤宝平, 黄艺, 等. 机械振动无线传感器簇状网络路径感知同步触发方法 [J]. 振动与冲击, 2022, 41(6): 147-152.
FU H, TANG B P, HUANG Y, et al. Path perception synchronization trigger method for mechanical vibration wireless sensor cluster network [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(6): 147-152.
- [14] GAO S, SHANG F, DU C. Design of multichannel and

- multihop low-power wide-area network for aircraft vibration monitoring [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68 (12): 4887-4895.
- [15] BENGHERBIA B, ZMIRLI M O, TOUBAL A, et al. FPGA-based wireless sensor nodes for vibration monitoring system and fault diagnosis[J]. Measurement, 2017, 101: 81-92.
- [16] AKBAR S R, ICHSAN M H H, DARMAWAN A A. Reference broadcast synchronization and time division multiple access implementation on WSN [J]. Telkomnika: Indonesian Journal of Electrical Engineering, 2019, 17(1): 291-298.
- [17] HUANG Y, ZHAO C H, TANG B P, et al. Beacon synchronization-based multi-channel with dynamic time slot assignment method of WSNs for mechanical vibration monitoring[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(13): 13659-13667.
- [18] WANG J, YU K G, BU J W, et al. Multi-classification of UWB signal propagation channels based on one-dimensional wavelet packet analysis and CNN[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(8): 8534-8547.
- [19] KONG X, XU L, SONG X, et al. An accurate and reliable positioning methodology for land vehicles in tunnels based on UWB/INS integration[J]. Measurement Science and Technology, 2022, 33 (9): 095107-095107.

- [20] 从飞云, 洪纵横, 汤子安, 等. 基于脉冲响应消歧重结构的 UWB 测距优化方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(10): 13-21.

CONG F Y, HONG Z H, TANG Z AN, et al. An optimization method of UWB ranging based on pulse response disambiguation and reconstruction[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(10): 13-21.

作者简介



叶泉兵, 2020 年于重庆大学获得学士学位, 现为重庆大学硕士研究生, 主要研究方向为机械振动无线传感器网络。

E-mail: Yqb@cqu.edu.cn

Ye Quanbing received his B.Sc. degree from Chongqing University in 2020. He is currently a M.Sc. candidate at Chongqing University. His main research interest is mechanical vibration wireless sensor network.



汤宝平 (通信作者), 1996 年于重庆大学获得硕士学位, 2003 年于重庆大学获得博士学位, 现任重庆大学教授、博士生导师, 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

Tang Baoping (Corresponding author) received his M.Sc. degree and Ph.D. degree both from Chongqing University in 1996 and 2003, respectively. He is currently a professor and a Ph.D. supervisor at Chongqing University. His main research interests include wireless sensor networks, mechanical and electrical equipment security service and life prediction, and measurement technology and instruments.