

面向钢结构探伤的置信加权时间同步算法研究^①

艾青林^② 夏晗雄 徐巧宁

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室 杭州 310023)

摘 要 针对无线传感器网络(WSN)各节点之间时间同步误差引起的钢结构损伤检测不同步,且洪泛时间同步算法(FTSP)容错性差的问题,设计了一种时间同步精度高、容错能力强的无线传感器网络时间同步算法。在 FTSP 算法的基础上,对线性回归表内的同步偏差进行参数估计,利用置信区间剔除异常时间同步数据。建立时钟漂移率数据表,动态解算加权系数,实现时钟漂移率的加权平均,从而拟合有效数据,提高时间同步算法的稳定性和容错性。仿真与实验表明,改进的时间同步算法较 FTSP 算法具有更好的容错能力,实现了无线传感器网络的高精度时间同步,完全满足钢结构损伤检测的要求。

关键词 钢结构探伤;无线传感器网络(WSN);置信加权;容错;时间同步

0 引 言

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSNs)由大量具有无线通信功能的传感器节点构成,各节点能够自主感知获取局部环境信息,并以多跳传输的形式汇聚至 sink 节点,进而实现多传感器数据融合得到全局信息。传感器节点自组织不需要基础网络设施,成本低、体积小、部署方便,使得无线传感器网络广泛地应用于环境监测、工业控制、抢险救灾等领域^[1]。基于无线传感器网络的结构健康监测系统安装维护方便、可靠性好,是目前研究热点之一^[2,3]。本文以探伤机器人编队为载体,构建移动无线传感器网络,可对钢结构建筑进行全方位的损伤检测。

无线传感器网络的时间同步是多传感器节点数据融合以获取全局信息的关键支撑技术,但由于各传感器节点的初始时钟不同步、晶振工艺误差等因素,无线传感器网络存在时间不同步的现象。钢结构损伤检测需要对多个测点同时进行振动信号的采集,若存在较大的时间同步误差后期进行振动信号

分析时会引起频域曲线的相位偏移,对损伤位置的分析产生显著的影响^[4]。因此面向钢结构损伤检测的无线传感器网络必须具有较高的时间同步精度。

针对无线传感器网络的时间同步问题,Elson 等人^[5]提出了一种基于 Receiver-Receiver 机制的参考广播同步算法(reference broadcast synchronization, RBS)。RBS 算法选取参考节点发送同步消息,忽略传输时延,假设其他节点同时接收到同步消息,通过彼此交换接收时间戳,计算相对时间偏差实现接收节点间的时间同步。该算法随着节点数量的增加,开销迅速增高,故适用于单跳网络。Ganeriwal 等人^[6]提出了一种基于 Sender-Receiver 双向消息交换机制的时间同步协议(timing-sync protocol for sensor network, TPSN)。TPSN 算法选取根节点后,逐层分级建立树形的层次网络,以根节点为中心,通过双向数据交换使子节点同步到父节点,最终实现全网的时间同步。该算法利用传输时延的对称性消除同步误差,同步精度高,可扩展性好,但随跳数增大同步精度变差。对动态拓扑支持较弱,一旦根节点失效,

① 国家自然科学基金(51275470, 51705456)和 NSFC-浙江两化融合联合基金(U1509212)资助项目。

② 男,1976 年生,博士,教授;研究方向:智能移动机器人,钢结构探伤机器人,多足机器人控制及钢带并联机器人技术等;联系人, E-mail: aqlaql@163.com
(收稿日期:2019-02-19)

需要重新建立层次网络,鲁棒性较差。Maroti 等人^[7]基于 Sender-Receiver 单向广播同步机制,提出了洪泛时间同步算法 (flooding time synchronization protocol, FTSP),该算法采用根节点动态选举机制、网络分层策略,建立多级层次网络,周期性洪泛广播同步消息实现全网同步。FTSP 算法支持在 MAC 层嵌入时间戳,大幅减少由于消息传输引起的不确定时延,且对节点失效有较高的容忍度,支持动态拓扑且同步精度较高,可扩展性好,适合面向钢结构损伤检测的移动传感器网络。

面向钢结构损伤检测的工业无线传感器网络,容易受到钢结构屏蔽、温湿度变化、射频干扰等因素的影响,而导致时间同步数据的异常^[8,9]。为了提高 FTSP 算法的容错性和抗干扰能力,文献[10]运用局部加权回归对时间戳数据对进行拟合,提高了时间同步精度,降低了网络开销,对复杂环境有更好的适应能力。但是该方法需要的样本集过大、计算复杂,具有一定的局限性。文献[11]针对异常数据,提出容错 FTSP 算法,过滤异常数据并获取邻居节点同步消息修正本地时钟,但导致了额外开销,网络能耗大。文献[12]通过设置过滤器检测出异常数据,对时钟漂移率进行修正,提高了容错性、稳定性和同步精度,但阈值的选取依靠经验值,无法根据外界环境自适应调整。

鉴于以上算法存在的问题,本文提出了一种基于置信加权的无线传感器网络时间同步算法,在 FTSP 算法的基础上,引入置信区间剔除异常数据,提高对异常数据的容错能力。针对弱干扰环境,较小的异常数据位于置信区间内导致算法失效的问题,结合动态随机加权平均,建立时钟漂移率数据表,动态解算加权因子,实现时间漂移率的加权处理,降低异常数据的权重,提高了时间同步算法的稳定性,从而满足面向钢结构探伤的无线传感器网络容错性、稳定性要求。

1 FTSP 算法

1.1 FTSP 算法基本原理

基于 FTSP 算法的无线传感器网络各节点 ID

唯一,采用根节点动态选举机制选取 ID 最小的节点为系统时钟源。以洪泛方式广播分级报文依次逐层扩散,建立层级网络,直至实现全网分级。建立层级网络后,根节点周期性广播同步消息,子节点根据存储的时间戳数据对,采用线性回归方式补偿时间偏差实现单跳同步,已同步节点继续广播进而实现全网同步,具体如图 1 所示。

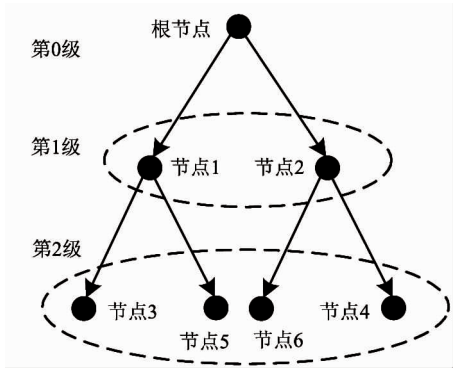


图 1 FTSP 算法层次结构

FTSP 算法的同步过程分为网络分级和时间同步 2 个阶段。在网络分级阶段,根节点洪泛广播分级消息,1 跳邻居节点(节点 1、2)获取父节点级别号 0 后,更新本地级别号为 1 并继续洪泛广播,继而 2 跳邻居节点(节点 3、4、5、6)更新级别号为 2。以此类推子节点级别号为父节点的级别加 1,依次逐层扩散最终完成全网分级。无线传感器网络的时间同步机制与分级策略相似,根节点周期性洪泛广播同步消息,第 1 级节点接收到同步消息后维护 n 对时间戳作为参考点进行拟合,对时间偏差进行补偿。在完成时间同步后,继续广播同步消息实现下一级节点的同步,单向广播逐级同步最终使全网保持统一的时钟。

FTSP 算法支持在 MAC 层嵌入时间戳,大幅降低了消息传输引起的不确定时延。故无线传感器网络的时间同步误差主要来源于初始时钟偏移和节点间相对时钟漂移。时钟偏移表示 2 节点间同一时刻的时钟偏差,而时钟漂移由晶振频率的差异而引起。在一定时间范围内晶振频率恒定,FTSP 算法针对时间同步误差,利用线性回归算法计算相对时钟漂移率,进而预测节点的时钟偏差,补偿本地时钟,提高时间同步精度。因传感器节点计算、存储能力的限

制,线性回归表一般存储 8 个参考点,每个参考点由时钟偏差和本地接收时间构成。

在理想工作环境下,时钟偏差与接收时间满足线性关系,建立一元线性回归模型:

$$d = skew \times t + d_0 + \varepsilon \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (1)$$

式中, $skew$ 为时钟漂移率, d 为发送节点的发送时间戳与接收节点的接收时间戳之差, d_0 为初始的偏差, ε 为服从正态分布的随机误差, t 为接收节点接收到同步消息时的本地时间戳。

节点接收到 n 对时间戳数据对后以此为参考点,建立线性回归表。为了实现回归系数 $skew$ 、 d_0 精确估计,使残差尽可能小,采用最小二乘法对残差平方和进行最优求解。

其中样本回归直线为

$$\hat{d} = \hat{skew} \times t + \hat{d}_0 \quad (2)$$

残差方程为

$$Q = Q(d_0, skew) = \sum_{i=1}^n \varepsilon^2 = \sum_{i=1}^n (d_i - skew \times t_i - d_0)^2 \quad (3)$$

$$Q_e = Q(\hat{d}_0, \hat{skew}) = \min_{d_0, skew} Q(d_0, skew) \quad (4)$$

为使残差尽可能小,对残差平方和函数求极值可得 d_0 与 $skew$ 的最优估计:

$$\hat{skew} = \frac{\sum_{i=m-n+1}^m (d_i - \bar{d})(t_i - \bar{t})}{\sum_{i=m-n+1}^m (t_i - \bar{t})^2}, \quad m > n \quad (5)$$

$$\hat{d}_0 = \bar{d} - \hat{skew} \times \bar{t} \quad (6)$$

式中, n 表示线性回归表中时间戳的对数, m 为节点同步周期的序数。 $\hat{skew}$ 为时钟漂移率的估计值, d_i 为线性回归表中第 i 个参考点的时钟偏差, t_i 为接收节点的第 i 个时间戳, $\bar{d}$ 、 $\bar{t}$ 为平均时钟偏差和平均接收时间。

FTSP 算法通过最小二乘法解算得到回归系数 $skew$ 、 d_0 , 从而获得最优拟合曲线对接收节点进行补偿, 实现无线传感器网络的时间同步。

1.2 FTSP 算法的缺陷

FTSP 算法线性回归表的参考点数量有限, 节点易受外界射频干扰、晶振频率波动等因素的影响而产生异常同步数据。如图 2 所示, 若回归表中参考

点的时钟偏差存在异常, 进行线性回归分析时, 拟合曲线的时钟漂移率会出现较大偏差。因此对本地时钟漂移进行补偿时, 往往导致本地时间的过补偿或欠补偿, 扩大时间同步误差。当父节点的级数越小, 越接近根节点, 影响越大, 各级节点产生累积误差, 最终导致全网同步精度下降。因此如何剔除异常数据, 提高 FTSP 算法的同步精度和容错性成为亟待解决的问题。

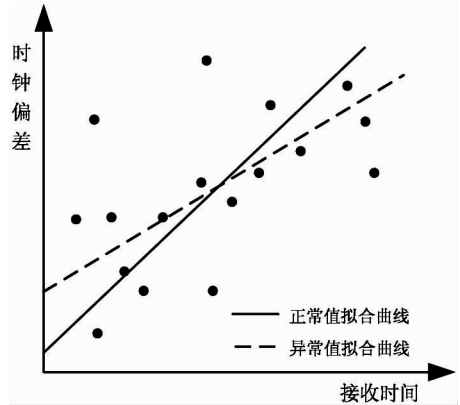


图 2 FTSP 算法异常拟合曲线

2 基于置信加权的改进 FTSP 算法

FTSP 算法采用线性回归来补偿时间偏差, 易受异常数据的干扰, 导致时间补偿不仅不会提高同步精度, 反而引入更大的误差。因此必须对回归表中的数据进行可信度的分析, 剔除置信区间之外的异常数据^[13], 实现线性回归算法的优化。但置信区间并不能完全消除干扰环境引起的误差, 故引入随机加权平均算法^[14,15], 对时钟漂移率进行加权平均, 降低异常数据的权重, 提高时间同步算法的稳定性、容错性。

2.1 基于置信区间的异常数据检测机制

本算法引入参数估计理论, 对时间同步偏差进行参数估计, 设置置信区间剔除异常数据。

总拟合误差即残差平方和 Q_e 与无偏估计 $\hat{\sigma}^2$ 的关系为

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{Q_e}{n-2} \quad (7)$$

残差平方和与 σ^2 的商服从 χ^2 分布:

$$\frac{Q_e}{\sigma^2} \sim \chi^2(n-2) \quad (8)$$

将式(7)代入式(8)得:

$$\frac{(n-2)\hat{\sigma}^2}{\sigma^2} \sim \chi^2(n-2) \quad (9)$$

由于 ε_i 服从正态分布,故 d 也服从正态分布:

$$d \sim N(d_0 + skew \times t, \sigma^2) \quad (10)$$

$$var(skew) = \frac{\sigma^2}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (11)$$

$$var(\hat{d}_0) = \left[\frac{1}{n} + \frac{\bar{t}^2}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \right] \sigma^2 \quad (12)$$

设 $l_{xx} = \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2$, 其为 t 的 2 阶中心距。

结合式(2)可得:

$$\hat{d} \sim N\left(skew \times t + d_0, \left[\frac{1}{n} + \frac{(t - \bar{t})^2}{l_{xx}} \right] \sigma^2\right) \quad (13)$$

故 $d - \hat{d}$ 服从正态分布:

$$d - \hat{d} \sim N\left(0, \left[1 + \frac{1}{n} + \frac{(t - \bar{t})^2}{l_{xx}} \right] \sigma^2\right) \quad (14)$$

由 χ^2 分布、正态分布以及 t 分布之间的关系可得 d 服从 t 分布:

$$P\left\{ \frac{|d - \hat{d}|}{\hat{\sigma} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(t - \bar{t})^2}{l_{xx}}}} < t_{\alpha/2}(n-2) \right\} = 1 - \alpha \quad (15)$$

取置信度为 0.95,查表可得 $t_{\alpha/2}(n-2)$ 为 1.860,样本个数为 8,式(15)的根式约为 1,由此确定时间偏差 d 的置信区间为

$$\hat{d} - 1.9\hat{\sigma} \leq d \leq \hat{d} + 1.9\hat{\sigma} \quad (16)$$

由于 $\hat{\sigma}^2$ 为 σ^2 的无偏估计, $E(\hat{\sigma}^2) = \sigma^2$, 可用 σ 近似代替 $\hat{\sigma}$, 其中 σ 一般根据传感器节点测试得到。 $\hat{d}$ 由线性回归表中的样本估计得到。

由于钢结构环境的干扰作用,若在持续多个同步周期中时间同步偏差位于置信区间外作为异常值被剔除,导致线性回归表无法更新,进而难以准确地对时间同步误差进行补偿。故针对持续较大偏差的问题,改进算法对连续异常次数进行统计,若异常次数大于设定的阈值则清空线性回归表,重新维护 8 对时间戳,根据参数估计自适应更新置信区间,拟合出线性回归曲线,对本地时钟进行补偿,实现高精度

的时间同步。

2.2 基于随机加权平均的稳定性优化

置信区间的引入消除了大部分异常数据对时间同步算法的干扰,由于 σ 一般大小固定,主要用于剔除固定范围内的异常值。无线传感器网络工作在钢结构环境下,干扰作用具有不确定性,若异常值较小使得同步时间偏移量位于置信区间内,从而避开了异常数据的检测机制,但较小的偏移量误差依然会对节点的时间同步造成影响。若持续以较小的误差同步,则会形成误差累积,最终将导致较大的同步误差。

针对以上问题,本文在置信区间的基础上引入了随机加权平均,根据式(17)和(18)解算得到加权因子,动态加权因子能够自适应调整以降低异常数据的权重,大大减缓了异常数据的干扰作用,提高了时间同步算法的稳定性。

随机加权平均需要维护具有 n 个时钟漂移率的数据表,计算各时钟漂移率的方差,解算加权因子,进而对时钟漂移率进行加权平均,以提高时间同步算法的稳定性。

其中时钟漂移率数据表中参考点 i 的方差 σ'_i 为

$$\sigma'^2_i = (skew_i - skew)^2 \quad (17)$$

时钟漂移率的加权因子为

$$v_i = \frac{1}{\sigma'^2_i \sum_{j=1}^n \frac{1}{\sigma'^2_j}} \quad (18)$$

由此可得第 m 个同步周期的时钟漂移率:

$$skew'(m) = \sum_{i=1}^n v_i \times skew_i \quad (19)$$

根据式(19)调整后的时钟漂移率拟合出来的线性回归线能够更好地跟踪时间同步误差的动态变化,很好地弥补了 FTSP 算法线性回归易受异常数据影响而不稳定的缺陷,解决了弱干扰情况下误差累积问题。

2.3 基于置信加权的异常数据检测机制

基于上述内容,置信加权的时间同步算法具体运行机制如图 3 所示。子节点接收到父节点的时间同步消息后,利用置信区间对同步消息进行合法性判断。若时钟偏差在预测区间内,则将数据对作为

参考点加入到线性回归表,反之判定为异常数据,剔除该数据。针对持续较大偏差的问题,对连续异常次数进行统计,若该值大于设定的阈值则清空线性回归表,重新维护 8 对时间戳,更新置信区间。在获取 8 对时间戳数据后,利用线性拟合计算时钟漂移率,建立时间漂移率数据表,解算得到动态加权系数,对时钟漂移率进行加权修正,从而降低强干扰情况下异常数据的权重,提高时间同步算法的稳定性。最终根据拟合得到的最优线性回归曲线计算时钟偏差来补偿本地时钟实现高精度的时间同步。

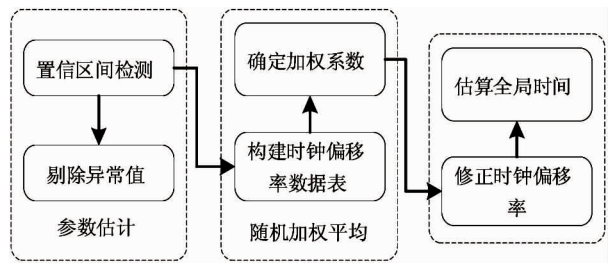


图 3 异常值检测机制

3 时间同步算法仿真分析

为检验改进 FTSP 算法对异常时间同步数据的容错能力,本文在 Matlab 仿真环境下,针对理想状况和异常状况分别对 FTSP 算法和改进算法进行仿真。设置同步周期为 30 s,线性回归表的参考点数为 8,时钟漂移率数据表点数为 5,对 100 个同步周期的时间同步误差和时钟漂移率进行统计分析。

3.1 理想情况下的时间同步

由图 4 所示,在理想状况下,FTSP 算法的平均时间同步误差为 1.74 μs ,方差为 4.69。而改进 FTSP 算法的平均时间同步误差为 1.44 μs ,方差为 3.37。如图 5 所示,改进 FTSP 算法的时钟漂移率相对于 FTSP 算法的时钟漂移率更加平滑,波动更小。故较于原 FTSP 算法,改进算法的时间同步精度更高,稳定性更好。

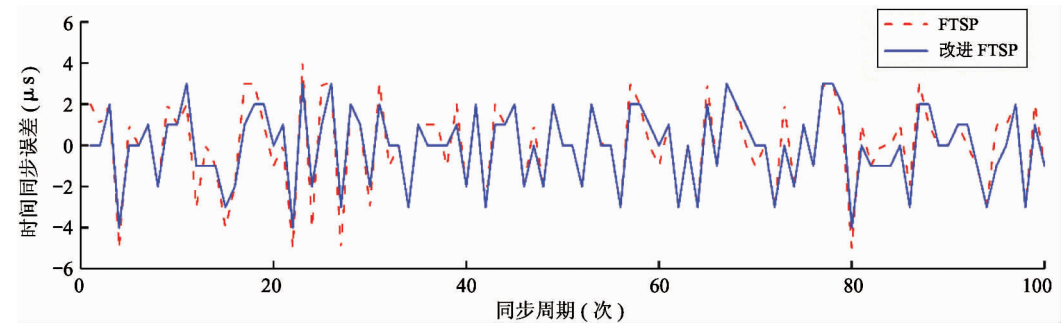


图 4 理想情况下时间同步误差对比

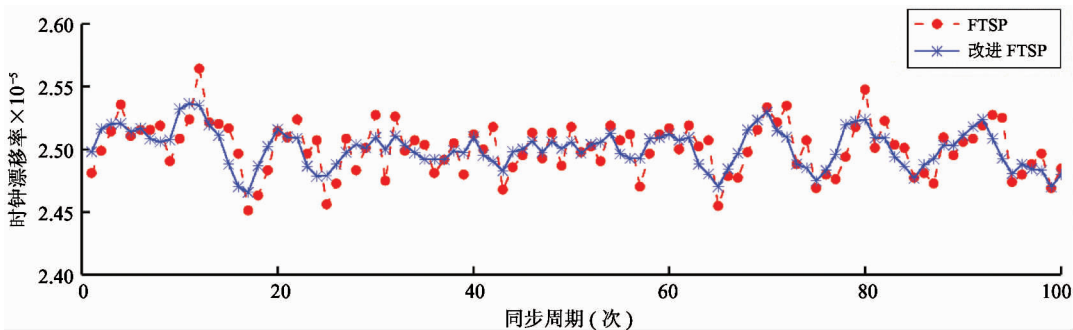


图 5 理想情况下时钟漂移率对比

由以上分析可知,在理想状况下,由于时间同步偏差位于置信区间内时,故改进算法无需剔除异常值。而改进算法的随机加权平均对时钟漂移率进行

优化,时钟漂移率波动更小,使得改进算法相较于 FTSP 算法具有更好的同步精度和稳定性。

3.2 异常情况下的时间同步

为进一步检验改进 FTSP 算法对于异常值的容错能力,在第 30、60 次同步中引入异常同步数据。由图 6 可知,FTSP 算法的平均时间同步误差为 $3.06\ \mu\text{s}$,方差为 28.24。而改进 FTSP 算法的平均时间同步误差为 $1.76\ \mu\text{s}$,方差为 5.0。在第 30 次、60 次的异常同步情况下,该同步周期后续的时间同

步误差出现突变,其中相邻同步误差最大为 $26\ \mu\text{s}$,最小为 $-15\ \mu\text{s}$,远大于平均同步误差。此外如图 7 所示,改进 FTSP 算法相对于 FTSP 算法时钟漂移率没有出现跳变,更加平滑,波动更小。故较于原 FTSP 算法,改进算法的时间同步精度更高,稳定性更好。

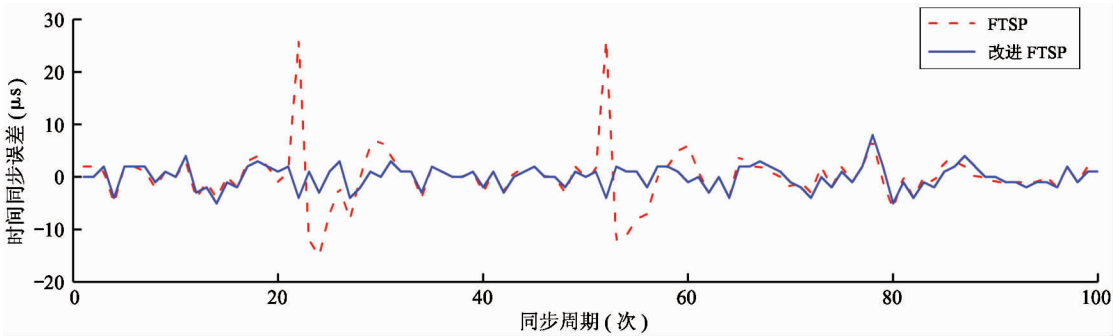


图 6 异常情况下时间同步误差对比

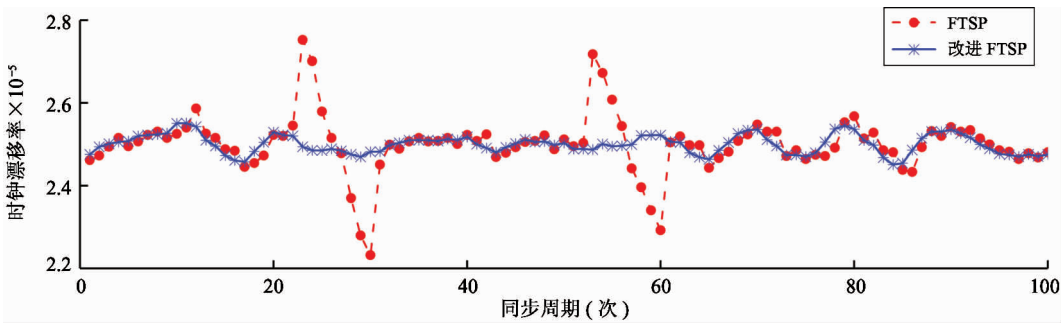


图 7 异常情况下时钟漂移率对比

由以上分析可知,在异常情况下,当子节点接收到异常数据时,改进算法通过置信区间剔除了异常值,不进行拟合,具有更好的抗干扰能力。而 FTSP 算法在异常数据的影响下,将其存储到线性回归数据表中,导致同步误差扩大,此时时钟漂移率波动较大,若对本地时钟进行补偿,不但无法提高本地时钟的精度反而引入了更大的误差。

4 时间同步算法实验分析

4.1 异常情况下时间同步误差测试

本文以 Telosb 节点为硬件平台,TinyOS 为软件平台进行时间同步测试。其中 Telosb 节点采用

CC2420 射频芯片、MSP430 处理器,由 32 kHz,40 ppm 晶振提供时钟信号,因此该设备时钟的时间粒度为 $30.52\ \mu\text{s}$ 。

为了检验改进 FTSP 算法对异常时间同步数据的容错能力,本文选取了存在晶振老化且本地时钟波动较大的节点 0 为系统时钟源,节点 1 为子节点进行时间同步误差测试。当时间同步偏差出现较大跳变时,该时间偏差被改进算法判定为异常同步数据,触发改进算法的置信加权作用,剔除异常数据,并对时钟漂移率进行加权优化。针对持续较大偏差的问题,改进 FTSP 算法对连续异常时间同步次数进行统计,若大于设定的阈值,则清空线性回归表,重新维护 8 对时间戳,利用参数估计自适应更新置

信区间,拟合出新的线性回归曲线,进而对本地时钟进行补偿。

设置查询节点,以 30 s 为查询周期,周期性广

播查询报文,节点在接收到查询报文后,将本地时间发送至 Base 节点并在终端显示,总共执行 100 次查询。统计两节点时间同步误差,如图 8 所示。

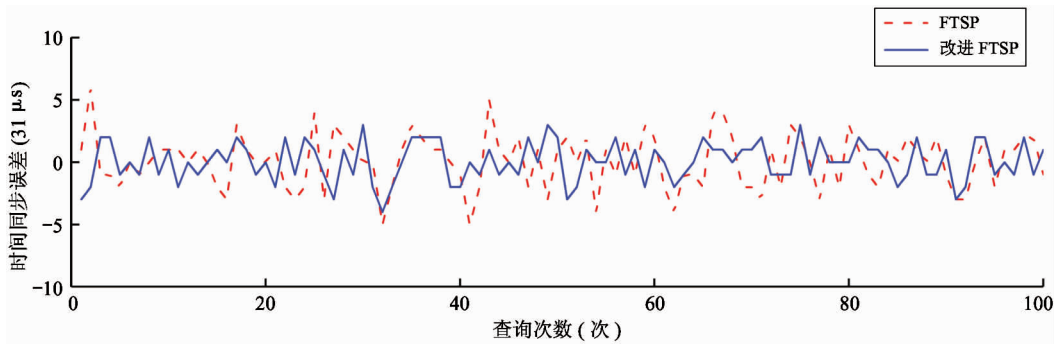


图 8 时间同步误差对比

由图 8 可知,改进算法较于原 FTSP 算法,节点间平均同步误差由 70.0 μs 降至 52.5 μs ,方差由 10.1 降为 5.56,表明改进算法有效地剔除了异常数据,时间同步误差的波动更加平缓,有效地改善了 FTSP 算法易受到异常数据影响而不稳定的缺陷。

4.2 多跳网络时间同步误差测试

为了更好地对比分析改进算法在提高时间同步精度和稳定性上的作用,本文分别对 FTSP 算法和改进算法进行多跳同步误差测试。本测试平台由 6 个节点组成多跳网络,并设置查询节点。

具体测试过程如下。

(1) 节点 0 为根节点作为时钟源,节点 1、2、3、4、5 为子节点,分别位于不同网络层次,构成 5 跳网络。

(2) 设置查询节点,以 30 s 为查询周期,周期性广播查询报文,各节点在接收到查询报文后,将本地时间发送至 Base 节点并在终端显示。总共连续执

行 100 次查询。

(3) 对各个节点与时钟源的同步误差进行统计分析。

其中 5 跳的时间同步误差对比如图 9 所示,多跳同步误差如表 1 和表 2 所示。

由表 1、表 2 对比可知,随着无线传感器网络跳数的增加,时间同步误差逐步累积。网络跳数越大,大于 31 μs 的时间同步误差所占的比例越高。本文改进的 FTSP 算法剔除了较大的异常同步数据,相较于 FTSP 算法时间同步误差更小,收敛性更好,且波动小、稳定性好。而且随着跳数的增大,改进算法的优化作用越明显。

文献[16]提出了基于 TPSN 算法的冗余主时钟同步偏差线性反馈算法(ITPSN)。其实验所采用节点的晶振频率与本文相同,且均用于实现工业无线传感器网络的多跳时间同步,故以此为标准进行时间同步误差对比。

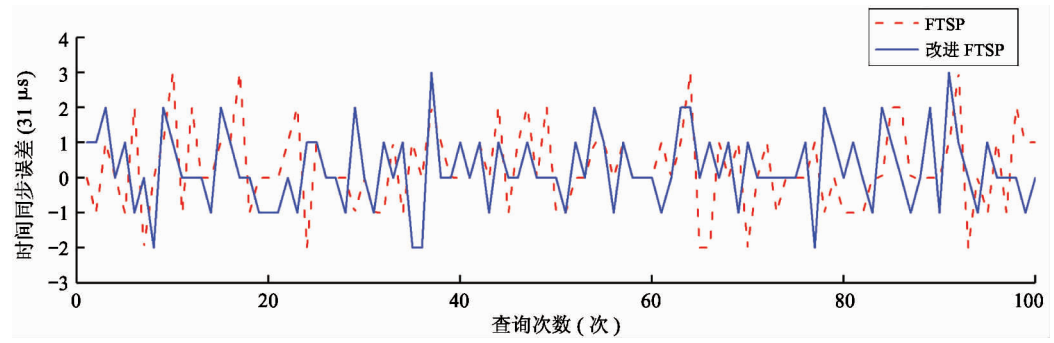


图 9 5 跳时间同步误差对比

表 1 FTSP 算法多跳同步误差

节点 层次	平均误差 (μs)	方差	误差比例 (%)		
			0 μs	31 μs	>31 μs
1	10.9	0.35	65.8	36.2	0
2	18.0	0.67	51.0	40.4	8.6
3	22.0	1.07	47.1	36.2	16.7
4	26.7	1.37	38.3	42.8	19.9
5	28.8	1.50	36.2	40.2	33.6

表 2 改进算法多跳同步误差

节点 层次	平均误差 (μs)	方差	误差比例 (%)		
			0 μs	31 μs	>31 μs
1	8.3	0.27	73.2	26.8	0
2	13.0	0.55	65.2	27.5	7.3
3	18.3	0.87	55.0	32.4	12.6
4	23.9	1.12	40.7	43.2	16.1
5	23.9	1.11	43.1	39.2	27.7

如图 10 所示,随着网络跳数的增加,改进 FTSP 算法较 FTSP 和 ITPSN 算法同步误差更小,且增速更加平缓,有效地减缓了跳数对同步误差累积的影响。在 100 Hz 采样频率下,FTSP 算法与改进算法的相位偏移如表 3 所示。

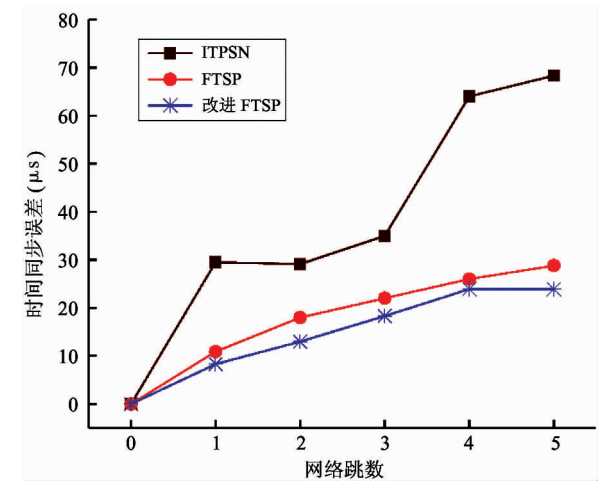


图 10 不同网络跳数的同步误差对比

综上所述,改进的时间同步算法在多跳网络中时间同步精度有明显的提高,稳定性更好。在 100 Hz 的采样频率下,改进算法第 5 跳节点相应的频域相位偏移为 0.86°,对于钢结构损伤位置的判断影响

较小,完全满足钢结构损伤检测的要求。

表 3 100 Hz 采样频率下 FTSP 算法与改进算法相位偏移

节点层次	FTSP 相位偏移($^{\circ}$)	改进算法相位偏移($^{\circ}$)
1	0.39	0.30
2	0.65	0.47
3	0.79	0.66
4	0.96	0.86
5	1.04	0.86

5 结 论

由于工业环境温湿度变化大,且外界存在射频干扰,面向钢结构探伤的无线传感器网络在时间同步过程中,时间同步数据容易产生异常值,使得 FTSP 算法出现过补偿和欠补偿现象。本文在 FTSP 算法的基础上,设计了一种时间同步精度高、抗干扰能力强的时间同步算法。利用置信区间剔除异常同步数据,构建时钟漂移率数据表,解算动态加权系数,引入加权平均提高算法的稳定性和容错性,提高拟合曲线的跟踪精度。本文分别针对理想和异常情况,对改进算法与 FTSP 算法进行仿真分析,并进行单跳容错性同步实验,对多跳网络进行时间同步误差测试。仿真和实验结果表明,本文提出的基于置信加权的时间同步算法较传统的 FTSP 算法具有更高的时间同步精度,对于异常数据有更好的容错性、稳定性,更适用于存在异常值的无线传感器网络,能够很好地满足钢结构损伤检测对于时间同步的要求。

参考文献

[1] Kreibich O, Neuzil J, Smid R. Quality-based multiple-sensor fusion in an industrial wireless sensor network for MCM[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(9):4903-4911

[2] 刘志强,李娜,喻言,等. 全功能无线同步桥梁结构监测系统的研究及应用[J]. *传感技术学报*, 2017, 30(3):484-490

[3] Giammarini M, Isidori D, Pieralisi M, et al. Design of a low cost and high performance wireless sensor network for structural health monitoring[J]. *Microsystem Technologies*, 2016, 22(7):1845-1853

- [4] Krishnamurthy V, Fowler K, Sazonov E. The effect of time synchronization of wireless sensors on the modal analysis of structures[J]. *Smart Materials & Structures*, 2008, 17(5):23-35
- [5] Elson J, Girod L, Estrin D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts[C]//Proceedings of the 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation, Boston, USA, 2002: 147-163
- [6] Ganeriwal S, Kumar R, Srivastava M B. Timing-sync protocol for sensor networks[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Los Angeles, USA, 2003: 138-149
- [7] 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, Baltimore, USA, 2004: 39-49
- [8] Dong J D, Gu L C, Zheng C X. Research on time synchronization for industrial wireless sensor network[J]. *Carcinogenesis*, 2010, 31(9):14
- [9] Lee S, Jang U, Park J. Fastfault-toleranttime synchronization for wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-time Distributed Computing, Orlando, USA, 2008: 178-185
- [10] 宋晓雪,魏路,林水生. 无线自组网的自适应同步技术研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2018,40(9):2113-2118
- [11] Gheorghe L, Rughinis R, Tapus N. Fault-tolerant floodingtime synchronization protocol for wireless sensornetworks[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Networking and Services, Cancun, Mexico, 2010: 143-149
- [12] 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
- [13] 吴宝明,李声飞. 基于最优线性拟合的 WSN 时间同步算法研究[J]. *传感技术学报*, 2010,23(12):1787-1791
- [14] 秦绍华,陈冬岩. 具有容错性的无线传感器网络时间同步协议[J]. *软件学报*, 2012,23(1):126-133
- [15] Aissaoua H, Aliouat M, Ahcene Bounceur, et al. A distributed consensus-basedclock synchronization protocol for wireless sensor networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 95(1):1-22
- [16] 章涵,冯冬芹,褚健,等. 基于冗余时钟源的工业无线网络时钟同步方法[J]. *控制与决策*, 2008,23(11):1249-1252

Confidence weighted time synchronization algorithm for steel structure damage detection

Ai Qinglin, Xia Hanxiong, Xu Qiaoning

(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

Aiming at the problems that the steel structure damage detection is not synchronized due to the time synchronization error between the nodes of the wireless sensor network (WSN) and poor fault tolerance of the flooding time synchronization algorithm (FTSP). An improved time synchronization algorithm for wireless sensor networks with high-precision time synchronization and strong fault-tolerance ability is researched. Based on FTSP, by means of the parameter estimation of the synchronization deviation in the linear regression table, the abnormal time synchronization data is eliminated by using the confidence interval. The clock drift rate data table is established. The weighting coefficients are dynamically calculated to obtain a weighted average of the clock drift rate, for fitting the valid synchronization data and improving the stability and fault tolerance of the time synchronization algorithm. The simulation and experiment results show that the improved time synchronization algorithm has better fault-tolerance ability and higher precision time synchronization than FTSP, which completely meets the requirements of steel structure damage detection.

Key words: steel structure damage detection, wireless sensor network (WSN), confidence weighted, fault-tolerant, time synchronization