

文章编号:1671-251X(2014)07-0056-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2014.07.016

李菲菲,张然,张申,等.一种适用于矿山设备振动监测的WSNs改进时间同步算法[J].工矿自动化,2014,40(7):56-60.

一种适用于矿山设备振动监测的 WSNs改进时间同步算法

李菲菲, 张然, 张申, 韩丽娜

(中国矿业大学 物联网(感知矿山)研究中心, 江苏 徐州 221008)

摘要:结合矿山设备振动监测的实际情况,给出了矿山设备振动监测的无线传感器网络模型;针对TPSN时间同步算法能耗大、DMTS时间同步算法精度低的问题,提出一种改进的无线传感器网络时间同步算法——TPDM算法。该算法采用动态簇首选择算法选出簇首节点,簇首节点之间的同步采用TPSN算法以保证同步精度,簇内节点之间的同步采用DMTS算法以降低能耗,并采用基于最小平方线性回归方法的时钟漂移补偿技术对同步时钟进行时间补偿。仿真结果表明,与TPSN算法和DMTS算法相比,TPDM算法在能耗和精度方面得到了折中,能更好地满足矿山设备振动监测的要求。

关键词:矿山物联网; 矿山设备; 设备感知; 振动监测; 无线传感器网络; 时间同步

中图分类号:TD655 文献标志码:A 网络出版时间:

网络出版地址:

An improved WSNs time synchronization algorithm adapted to
vibration monitoring of mine equipment

LI Feifei, ZHANG Ran, ZHANG Shen, HAN Lina

(Internet of Things (Perception Mine) Research Center, China University of Mining and Technology,
Xuzhou 221008, China)

Abstract: A WSNs model of vibration monitoring of mine equipment was given combined with actual situation of vibration monitoring of mine equipment. In order to solve problems of large energy consumption of TPSN algorithm and low precision of DMTS algorithm, an improved WSNs time synchronization algorithm named TPDM algorithm was proposed. In TPDM algorithm, cluster head nodes are selected by use of dynamic selection algorithm of cluster head. TPSN algorithm is used for time synchronization among the cluster head nodes to improve synchronization precision and DMTS algorithm is used among nodes in a cluster to reduce energy consumption. Meanwhile, synchronous clock is compensated by use of clock skew compensation algorithm based on the minimum square linear regression. The simulation results show that TPDM algorithm gets a compromise between precision and energy consumption compared with TPSN algorithm and DMTS algorithm, which can meet with requirements of vibration monitoring of mine equipment preferably.

Key words: mine Internet of things; mine equipment; equipment sensing; vibration monitoring; wireless sensor networks; time synchronization

收稿日期:2013-11-28;修回日期:2014-04-16;责任编辑:李明。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51204177);“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2013BAK06B05)。

作者简介:李菲菲(1989—),女,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向为无线传感器网络,E-mail:ziyifei0605@163.com。

0 引言

人员感知、设备感知和灾害感知是矿山物联网的核心理论架构^[1]。煤矿生产需要大量的采、掘、运等机械设备,对其进行连续状态监测和故障诊断是设备感知的有效手段,对于提高生产效率、预防事故发生具有重要意义^[2]。机械设备的振动信号经过适当的处理和分析即可反映整台设备的运行健康状况,还可预警设备发生故障的可能性^[3]。无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)^[4]由于具有部署方便灵活、检测范围极具弹性的特点,在基于振动信号的矿山设备感知方面得到了广泛应用。振动监测需要采用多个传感器进行分布式协同观测,以便对设备的健康状态做出预测或对故障进行定位,这就要求协同观测的传感器节点之间的时间高度同步,否则将失去协同能力。本文给出了矿山设备振动监测网络模型,进而对广泛使用的 TPSN(Timing-sync Protocol for Sensor Networks)和 DMTS(Delay Measurement Time Synchronization)算法进行改进,提出了适用于矿山设备振动监测的 WSNs 时间同步算法。

1 矿山设备振动监测网络模型

大部分矿山设备监测的前提是不影响正常生产,因此常采用在设备外壳布设振动传感器的方式进行监测。WSNs 用于矿山设备振动监测时,同一个设备采集簇内的采集节点通过簇首节点互相通信。设备与设备之间的节点采集的是不同的振动信号,那么不同设备的节点可以实现采集同步,也可以不实现采集同步,因此不同设备的采集节点之间可以相对独立,这就形成了感知同一设备的节点相对集中、感知不同设备的节点相对分散的分布式网络模式。感知每台设备的采集节点将采集信息传输到基站或网关,为了不造成网络资源的浪费和网络链路堵塞,延长采集节点的生存时间,在节点中选出汇聚节点。该节点可对数据进行融合,同时进行远距离传输。生成的网络模型如图 1 所示。

2 典型的 WSNs 时间同步算法

2.1 TPSN 算法

TPSN 算法采用一种双向报文成对同步机制,实现在整个 WSNs 内的时间同步^[5]。TPSN 算法中网络采用分层结构,同步过程分 2 步:首先发布分层消息,使整个网络的节点按照位置层次结构分层;

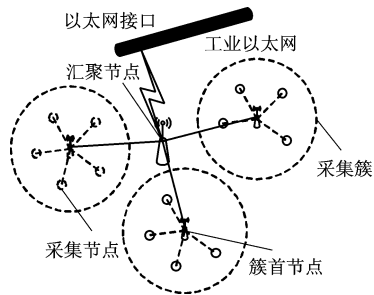


图 1 矿山设备振动监测网络模型

然后每个节点与其上一级节点进行时间同步,最终实现所有节点与根节点的同步。

相邻级别的 2 个节点通过交换时间同步消息进行同步,如图 2 所示。其中 T_1, T_4 为节点 S 的本地时钟测量时间; T_2, T_3 为节点 R 的本地时钟测量时间; d 为消息传输时延。

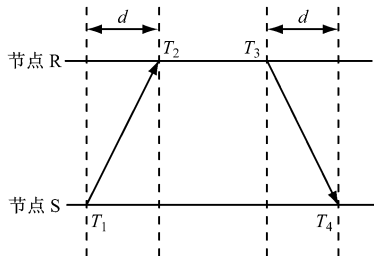
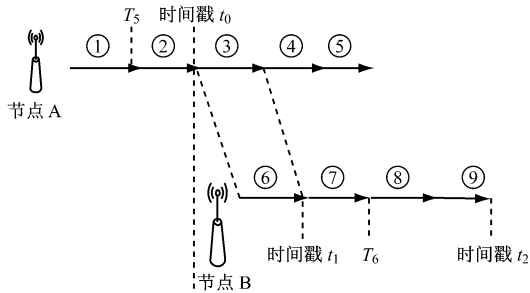


图 2 TPSN 算法原理

TPSN 算法基于双向成对同步机制,同步效果较好,但能耗较大,且鲁棒性不好。

2.2 DMTS 算法

DMTS 算法通过从开始发送同步消息到实现同步过程中标记的延时时间戳计算出与同步节点的时间差值,然后对本身时间做出调整,实现与同步节点的时间同步^[6],如图 3 所示,其中 T_5, T_6 分别为节点 A、节点 B 的本地时钟测量时间。发送节点通过侦听信道情况为发送数据包打上时间戳,以此减少访问、发送时间的影响。



- ①—发送同步信息; ②—MAC 延时; ③—发送前导码;
④—发送数据; ⑤—接收 ACK; ⑥—接收前导码;
⑦—接收数据; ⑧—发送 ACK; ⑨—节点同步

图 3 DMTS 算法原理

DMTS 算法是一种简单灵活、信息传输量和计

算复杂度都很小的单向报文传输同步算法。其缺点是精确度比较低。

3 改进的 WSNs 时间同步算法

3.1 基本思想

TPSN 算法和 DMTS 算法尽管应用广泛,但是因能耗和精度方面的缺陷而无法直接应用于矿山物联网的时间同步中。本文在其基础上提出一种改进的 WSNs 时间同步算法—TPDM (Timing-sync Protocol and Delay Measurement) 算法。该算法分为 2 个阶段:第一阶段为层级发现阶段,通过汇聚节点广播级别信息包进行层的建立;第二阶段为时间同步阶段。根节点带有外部的标准时间源,同步过程中首先通过簇首选择算法从一层节点中选取合适的节点作为簇首节点,汇聚节点广播同步信息包,节点接收同步信息,但只有选择出的簇首节点之间为保持同步精度使用 TPSN 算法,簇首节点与簇内节点采用 DMTS 算法。具体的同步过程分为簇首节点同步和簇内节点同步 2 部分,如图 4 所示。

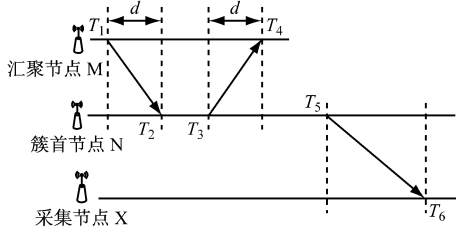


图 4 TPDM 算法同步过程

簇首同步过程:汇聚节点 M 广播同步信息,组包中包括节点 M 的层次号和 ID 号,各簇节点之间通过簇首选择算法选出节点 N 作为簇首,节点 N 接收到节点 M 的广播信息后将自己的层次号加 1,并作出应答,实现层次确立并进行时间同步。

簇内节点同步过程:簇首节点完成同步后,簇内节点再进行同步过程。在簇内,节点 N 以广播形式发送同步信息包,簇内节点 X 接收到信息包后,修改自己的本地时间,以达到与簇首节点的同步。

3.2 簇首选择算法

正确选择簇首节点是 TPDM 算法实现准确同步的关键。簇首节点用于应答上层节点的广播信息。本文选用成熟的 LEACH 协议中的簇首选择算法^[7]。该算法的基本思想是以循环方式随机选择簇首节点,将整个网络的能量负载平均分配到每个传感器节点中,从而达到降低网络能耗、提高网络生命力的目的。在该协议中的簇首选择阶段,每个节

点根据所建议网络簇首的百分比和节点已成簇首的次数来确定是否可以成为簇首。每个节点产生 1 个 >0 且 <1 的随机数,如果该随机数小于阈值 $F(x)$,则该节点当选为簇首。

$$F(x) = \begin{cases} \frac{q}{1 - qr \bmod(1/q)} & x \in G \\ 0 & x \notin G \end{cases} \quad (1)$$

式中: q 为簇首个数占节点总数的百分比; r 为当前轮数; $\bmod(1/q)$ 为取 $1/q$ 的整数部分; G 为最近 $1/q$ 轮里没有成为簇首节点的集合。

簇首节点确立后,广播告知整个网络自己已成为簇首。在该过程中,其他节点通过判断接收到的信号强度值加入数值最大的簇,并告知簇首节点自己成为簇内组员。

尽管使用了簇首选择算法,但是仍不能保证所有节点都能接收到信息。因此每个节点设定 1 个计时器,并在启动同步时开始计时。当计时器超时,该节点随即向上层节点发送请求同步信息,上层节点做出应答,从而实现遗漏节点的同步。

3.3 时钟漂移补偿方法

时钟漂移和消息传输延迟是影响时间同步算法精度的重要误差源。消息传输延迟可通过采用 3.1 和 3.2 所述方法得以减小,这里研究时钟漂移的解决方案,其基本思路是采用最小平方线性回归方法进行线性拟合补偿。

时钟漂移补偿的数学模型:

$$T = nt + m + \xi \quad (2)$$

式中: T 为测量值; n 为时钟漂移率; t 为实时值; m 为时钟漂移量; ξ 为高斯白噪声,服从 $N(0, \sigma^2)$ 的正态分布。

通过同步报文交换获取多组时间戳信息,从而拟合回归直线 L 。在 L 误差允许范围内,处理器直接根据 L 计算,以达到减少报文交换、降低能耗的目的。

记录 p 组数据,根据 p 个采样值得到估计值 $\hat{m}$ 和 $\hat{n}$,进一步得到线性回归方程 R :

$$R = \sum_{i=1}^p (T_i - nt_i - m) \quad (3)$$

式中: (t_i, T_i) 为第 i 组时间对信息。

要使所有数据的偏差平方和 R^2 最小,则分别对 m, n 求偏导,得

$$\begin{cases} n = \frac{p \sum_{i=1}^p T_i t_i - \sum_{i=1}^p T_i \sum_{i=1}^p t_i}{p \sum_{i=1}^p t_i^2 - (\sum_{i=1}^p t_i)^2} \\ m = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p T_i - \frac{n}{p} \sum_{i=1}^p t_i \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4)计算出的时间漂移量对节点进行时钟补偿,能够提高时间同步的精度和平滑度,且可以较好地提高时间同步的周期。

4 性能分析

4.1 同步误差分析

采用参考文献[8]所述方法对簇首节点之间的同步误差进行分析。簇首节点之间采用MAC层打时间戳的TPSN同步算法,由图2得

$$T_2 = T_1 + S_S + N_S t + P_{S \rightarrow R} + R_R + D_{t'_1}^{S \rightarrow R} \quad (5)$$

$$T_4 = T_3 + S_R + N_R t + P_{R \rightarrow S} + R_S + D_{t'_3}^{R \rightarrow S} \quad (6)$$

式中: t'_1, t'_3 是由标准时钟确定的时间,即实际时间, t'_1 对应 T_1 , t'_3 对应 T_3 ; S_S, S_R 分别代表节点S和节点R的消息发送时间; N_S, N_R 为传输的同步分组的长度; $P_{S \rightarrow R}$ 为节点S的消息传播到节点R的时间; $P_{R \rightarrow S}$ 为节点R的消息传播到节点S的时间; R_R, R_S 分别为节点R、节点S的消息接收处理时间; $D_{t'_1}^{S \rightarrow R}$ 为在 t'_1 时刻节点S和节点R之间的时间漂移, $D_{t'_1}^{S \rightarrow R} = D_{t'_1}^{S \rightarrow R} + D_{R_{t'_1}^{S \rightarrow R} \rightarrow t'_4}$, $D_{R_{t'_1}^{S \rightarrow R} \rightarrow t'_4}$ 表示 $t'_1 - t'_4$ 时间段内,节点S与节点R增加的相对漂移。

采用在MAC层打时间戳的方法消除发送与访问时间对误差的影响,则可算出簇首节点之间的同步误差为

$$e_1 = \frac{(N_S - N_R)t}{2} + \frac{P_{S \rightarrow R} - P_{R \rightarrow S}}{2} + \frac{R_R - R_S}{2} + \frac{D_{R_{t'_1}^{S \rightarrow R} \rightarrow t'_4}^{S \rightarrow R}}{2} \quad (7)$$

采用参考文献[9]所述方法对簇内节点间的同步误差进行分析。由图3可得

$$T_6 = T_5 + T_{A \rightarrow B} + P_{A \rightarrow B} + R_B + D_{t_0}^{A \rightarrow B} \quad (8)$$

$$\Delta = P_{A \rightarrow B} + T_e + R_e + D_{R_{t_0}^{A \rightarrow B} \rightarrow t_2}^{A \rightarrow B} \quad (9)$$

簇内节点之间的同步误差为

$$e_2 = \Delta - D_{t_4}^{S \rightarrow R} = P_{A \rightarrow B} + T_e + R_e + D_{R_{t_0}^{A \rightarrow B} \rightarrow t_2}^{A \rightarrow B} \quad (10)$$

式中: $T_{A \rightarrow B}$ 为节点A和节点B按比特传输和接收报文所需时间; $P_{A \rightarrow B}$ 为节点A的消息传播到节点B的时间; R_B 为节点B的消息处理时间; T_e 为传输比特

误差; R_e 为打时间戳过程中存在的误差; $D_{R_{t_0}^{A \rightarrow B} \rightarrow t_2}^{A \rightarrow B}$ 为 $t_0 - t_2$ 时间段,节点A和节点B增加的相对漂移。

设定网络覆盖范围为100 m,电磁波的传播速度为300 m/ μ s。根据参考文献[9]可知节点之间的接收处理时间的差异呈均值为0、方差为11 μ s的高斯分布,本地时钟的相对漂移为40~50 μ s/s。设定 T_e 最大值为2 μ s, R_e 受时钟精度的影响,设定为25 μ s。分别对DMTS算法、TPSN算法和TPDM算法的节点同步误差进行仿真,结果见表1。

表1 3种算法的节点同步误差仿真结果

节点跳数	同步误差/ μ s		
	DMTS	TPSN	TPDM
1	40	20	20
2	70	30	55
3	100	40	70
4	120	45	100

从表1可看出,DMTS算法的同步精度最低,TPSN算法的同步精度最高,TPDM算法由于在汇聚节点和簇首节点之间采用精度较高的TPSN算法,在簇内采用精度较低但能耗较少的DMTS算法,所以同步精度位于二者之间。

4.2 同步能量消耗

对于多跳网络,深度为 h ,每层节点数为 c 时,记TPSN,DMTS,TPDM 3种算法建立1次时间同步的能量消耗分别为 $E_{\text{TPSN}}, E_{\text{DMTS}}, E_{\text{TPDM}}$ 。假设节点发送和接收信息时的能耗分别为 E_{Tx} 和 E_{Rx} ,则有

$$E_{\text{TPSN}} = h(2c - 1)E_{\text{Tx}} + 3h(c - 1)E_{\text{Rx}} \quad (11)$$

$$E_{\text{DMTS}} = hE_{\text{Tx}} + h(c - 1)E_{\text{Rx}} \quad (12)$$

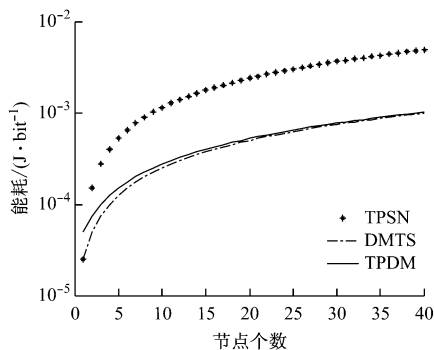
$$E_{\text{TPDM}} = hE_{\text{Tx}} + 2h(c - 1)E_{\text{Rx}} \quad (13)$$

根据节点数据收发模型,设 $E_{\text{Tx}} = E_{\text{Rx}} = 5 \times 10^{-6}$ J/bit, $h = 5, c = 10$,对3种算法的能耗进行仿真,结果如图5所示。

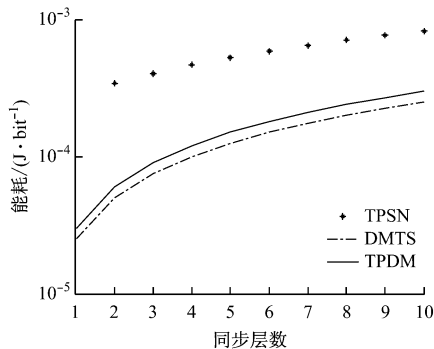
从图5可看出,在1次全网同步的过程中,TPDM算法的能耗略大于DMTS算法,明显小于TPSN算法。可见TPDM算法较TPSN算法和DMTS算法在能耗和精度方面得到了折中,延长了网络同步节点的生存时间,符合矿井实际应用的需求。

5 结语

针对矿山设备振动监测对WSNs的高精度、低能耗要求,TPDM算法采用动态簇首选择算法挑选簇首节点,簇首节点对数据进行整合传输,簇内节点



(a) 节点数与能耗关系



(b) 层数与能耗关系

图 5 3 种算法的能耗

进行数据的采集转发,从而延长了同步网络的生存时间。另外,该算法采用时钟漂移补偿技术对时钟偏差进行补偿,从而在保证同步精度的前提下,延长了 WSNs 的寿命,能够满足矿山物联网大部分实际应用的需要。

参考文献:

[1] 张申. 煤矿自动化发展趋势[J]. 工矿自动化, 2013, 39(2):27-33.

[2] 武永胜. 浅谈矿井安全监控系统在煤矿应用中存在的问题[J]. 山东煤炭科技, 2010(4):223-224.

[3] 楼建忠. 大型旋转机械振动监测系统研究[D]. 杭州:浙江大学, 2005.

[4] 杨春明. 无线传感器网络时间同步算法的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2008.

[5] 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, New York, 2003:138-149.

[6] SU Ping. Delay measurement time syn-chronization for wireless sensor networks[R]. Berkeley: Intel Research Berkeley Lab, 2003.

[7] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]// Proceedings of the 33rd International Conference on System Science, Hawaii, 2000: 3005-3014.

[8] 封红霞,周莹. 无线传感器网络的时间同步算法误差分析[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2006(6):30-33.

[9] PALCHAUDHURI S, SAHA A K, JOHNSIN D B. Adaptive clock synchronization in sensor networks [C]// Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, New York, 2004:340-348.