

文章编号:1671-251X(2015)02-0075-04

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.02.021

卑璐璐,张然,韩丽娜,等.一种线型结构无线传感器网络的时间同步算法[J].工矿自动化,2015,41(2):75-78.

一种线型结构无线传感器网络的时间同步算法

卑璐璐^{1,2}, 张然^{1,2}, 韩丽娜^{1,2}, 李菲菲^{1,2}

(1. 中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 物联网(感知矿山)研究中心, 江苏 徐州 221008)

摘要:针对煤矿井下液压支架模糊控制监测系统网络拓扑,提出了一种适用于线型结构无线传感器网络的时间同步算法。该算法同步过程分为簇间同步和簇内同步,簇间同步采用双向同步机制修正时间偏移的方法减少同步误差,簇内同步通过最小平方线性拟合方法构造逻辑时钟函数,从而得到簇内任一节点与簇首节点的频偏和相偏估计值,以提高同步精度。仿真结果表明,该算法能有效减少时间同步误差和能量消耗。

关键词:线型结构;无线传感器网络;时间同步;簇间同步;簇内同步

中图分类号:TD655

文献标志码:A

网络出版时间:2015-02-03 15:24

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20150203.1524.021.html>

A time synchronization algorithm for wireless sensor network of linear structure

BEI Lulu^{1,2}, ZHANG Ran^{1,2}, HAN Lina^{1,2}, LI Feifei^{1,2}

(1. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology,

Xuzhou 221116, China; 2. Internet of Things (Perception Mine) Research Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: In view of network topology of fuzzy control and monitoring system of underground hydraulic support, the paper proposed a time synchronization algorithm adapted to wireless sensor network of linear structure which includes adjacent cluster synchronization and internal cluster synchronization. The adjacent cluster synchronization adopts bisynchronous mechanism which corrects time offset to decrease synchronization errors. The internal cluster synchronization obtains frequency and phase offset between any node and head node in the cluster by constructing logic clock function through least square linear fitting method to improve synchronization precision. The simulation results show that the algorithm can effectively reduce synchronization errors and energy consumption.

Key words: linear structure; wireless sensor network; time synchronization; adjacent cluster synchronization; internal cluster synchronization

0 引言

在煤矿井下放顶煤开采和安全生产过程中,液压支架工作状态的实时监测非常重要。现有的液压支架监测系统存在线路易中断、不便于数据传输等缺点^[1]。无线传感器网络因其布置灵活、维护方便、控制简单而得到越来越多的应用^[2-3],因此将无线传

感器网络应用于液压支架监测系统具有重要的意义。时间同步是无线传感器网络应用的关键技术,关于无线传感器网络时间同步算法的研究主要归为3类:①提高时间同步精度的相关算法研究,如传感器网络时间同步协议(Timing-sync Protocol for Sensor Networks,TPSN)算法;②提高时间同步中相关指标,如开销、鲁棒性等的相关算法研究,如参

收稿日期:2014-12-24;修回日期:2015-01-12;责任编辑:盛男。

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAH12B01)。

作者简介:卑璐璐(1981—),女,辽宁铁岭人,博士研究生,主要研究方向为无线通信和微波技术,E-mail:beilulu@163.com。

考广播同步(Reference Broadcast Synchronization, RBS)算法;③时间同步算法用于某一特定网络拓扑结构的优化及改进,如针对网状网络的洪泛时间同步协议(Flooding Time Synchronization Protocol, FTSP)算法^[4]。本文基于煤矿井下液压支架模糊控制监测系统的线型结构网络拓扑,提出了一种适用于线型结构的无线传感器网络时间同步算法(Time Synchronization Algorithm of Linear Structure, TSALS)。该算法通过基于双向同步机制的簇间同步和采用最小平方线性拟合的簇内同步方法,可提高全网时间同步精度,有效解决由于时间同步误差造成的液压支架模糊控制偏差问题。

1 液压支架模糊控制监测系统

液压支架模糊控制监测系统对监测到的压力数据进行模糊识别,得到液压支架所处的工作状态,当判断液压支架处于增阻工作状态且增阻时间过长时,系统可及时通知液压支架操作人员增大液压支架压力,辅助实现顶煤破碎,提高放顶煤开采效率^[5]。

采用 2.4 GHz 无线传输的无线传感器网络节点可有效避免有线网络布线带来的不便,能够很好地适应煤矿井下的实际应用环境。液压支架模糊控制监测系统无线传感器网络部署:在液压支架的前后柱和顶板布置终端节点,终端节点将采集的液压支架压力数据实时传递到簇首节点,簇首节点将数据转发至汇聚节点,最后通过煤矿井下千兆以太网传送至地面监测中心。液压支架模糊控制监测系统网络拓扑如图 1 所示,工作面无线传感器网络覆盖的宽度及高度范围远小于其长度范围,网络节点基本呈线型结构分布。

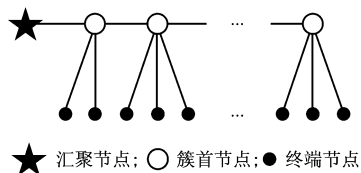


图 1 液压支架模糊控制监测系统网络拓扑

2 算法实现

为了使整个网络结构更加合理,且不至于产生额外的能量消耗,首先在 TSALS 中设定如下条件:①簇首节点时间同步请求能且仅能被其他簇首节点接受并进行传递;②终端节点能且仅能和距离其最近的簇首节点通信。

TSALS 分为网络结构建立阶段和时间同步阶段。网络结构建立阶段由汇聚节点发起,每个簇首

节点将与其相邻的簇首节点保存至本地路由表中。在形成簇时,簇首节点需限制终端节点数目,平衡网络结构,防止 1 个簇内终端节点过多,影响通信质量。时间同步阶段分为簇间同步和簇内同步。

2.1 簇间同步

簇间同步由汇聚节点周期性发起,汇聚节点或上层簇首节点向与其相邻的下层簇首节点发送同步分组数据包,其中包含源节点 ID、目标节点 ID、层次号和同步序号。

下层簇首节点接收到汇聚节点或上层簇首节点的同步分组数据包后,立即返回应答分组数据包,其中包含源节点 ID、同步序号和发送时间 t_1 。

汇聚节点或上层簇首节点收到下层簇首节点回复的应答分组数据包后记录本地时间 t_2 ,比较同步序号是否和其发送的同步序号一致。如果一致则返回应答确认分组数据包,其中包含 t_1, t_2 以及返回应答确认分组数据包的时间 t_3 ;如果不一致则丢弃该数据包,继续等待下层簇首节点应答。若在超过设定的时间内汇聚节点或上层簇首节点仍没有收到下层簇首节点的应答,则重新发起同步过程。

下层簇首节点接收到应答确认分组数据包后,记录本地时间 t_4 。通过 3 次信息交换,下层簇首节点可得到 t_1-t_4 4 个时间点,并通过式(1)得出与汇聚节点或上层簇首节点的时钟偏差 Δ ,进而可以调整本地时钟与汇聚节点或上层簇首节点时钟同步。

$$\Delta = \frac{(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)}{2} \quad (1)$$

下层簇首节点修改其时钟偏移量后,保证此时与汇聚节点或上层簇首节点时钟一致,同步过程结束。

2.2 簇内同步

簇内同步采用基于发送-接收机制和接收-接收机制相结合的方式完成同步过程。首先簇首节点周期性发送广播同步数据包,同时选择簇内某一节点为参考节点进行双向同步。簇首节点通过与参考节点交换时间戳信息得到参考节点接收广播信息的基准时间 $T(i)$,然后簇首节点将该基准时间进行广播发送,其他簇内节点接收该基准时间后与本地记录时间 $t(i)$ 组成时间戳对 $[t(i), T(i)]$ (i 为正整数,表示时间戳对组数),并将其存入数据缓冲区,通过读取缓冲区内一定时间的历史数据完成曲线拟合,得到本地逻辑时钟函数,进而修改和调整本地时钟,完成簇内节点的同步。

2.3 逻辑时钟构造

为得出本地逻辑时钟函数,首先需建立其对应

的数学模型^[6]:

$$T(i) = a_k t(i) + b_k \quad (2)$$

式中: a_k 为簇内任一节点 k 的本地记录时间相对簇基准时间的频偏; b_k 为簇内任一节点 k 的本地记录时间相对簇基准时间的相偏。

若要通过该模型求出实际物理时间,需对变量 a_k, b_k 进行求解。通过多轮簇内同步过程,所有簇内节点能够获取多组时间戳对 $[t(i), T(i)]$,对多组历史数据进行曲线拟合,就可得到簇内任一节点 k 的本地记录时间与该簇基准时间的频偏 a_k 和相偏 b_k 。

设数据缓冲区中有 m 个时间戳对 $[t(i), T(i)]$,根据最小平方线性拟合方法,残差平方和为

$$Q = \sum_{i=1}^m [a_k t(i) + b_k - T(i)]^2 \quad (3)$$

对 Q 求偏导并令其为0,则

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a_k} = \sum_{i=1}^m 2t(i)[T(i) - a_k t(i) - b_k] = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b_k} = \sum_{i=1}^m 2[T(i) - a_k t(i) - b_k] = 0 \end{cases} \quad (4)$$

整理可得

$$\begin{cases} a_k \sum_{i=1}^m t^2(i) + b_k \sum_{i=1}^m t(i) - \sum_{i=1}^m T(i)t(i) = 0 \\ a_k \sum_{i=1}^m t(i) + b_k - \sum_{i=1}^m T(i) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

则

$$\begin{cases} a_k = \frac{m \sum_{i=1}^m [T(i)t(i)] - \sum_{i=1}^m t(i) \sum_{i=1}^m T(i)}{m \sum_{i=1}^m t^2(i) - [\sum_{i=1}^m t(i)]^2} \\ b_k = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m T(i) - \frac{a_k}{m} \sum_{i=1}^m t(i) \end{cases} \quad (6)$$

采用8个数据进行线性回归拟合能够在保证计算结果较为精确的条件下尽可能减少计算量^[7],因此需在簇内任一节点 k 的本地内存中建立1个可包含8组时间戳对的队列形式数据缓冲区。当缓冲区数据数量达到设置的8时,可按式(6)计算得出簇首节点与簇内任一节点 k 的相对时钟频偏 a_k 和相偏 b_k ,簇内节点则可根据该值调整其内部时钟。

3 算法仿真

采用NS2平台^[8]对TSALS进行仿真验证。为增强仿真环境的真实性,所有节点按实际情况进行布置:终端节点呈直线分布,共有160个终端节点,其中距离汇聚节点最近的终端节点编号为0,距离汇聚节点最远的终端节点编号为160,相邻2个终

端节点之间的距离为1.5 m;簇首节点平均分布在终端节点的上方,共有17个簇首节点,相邻2个簇首节点之间的距离为15 m。设仿真时间为4 000 s,仿真周期为20 s,则仿真轮数为200。分别从同步精度及能量消耗2个方面比较TPSN与TSALS的性能。

3.1 同步误差

3.1.1 全网同步误差

在线型网络拓扑结构中,较远节点必须通过多跳才能与汇聚节点通信,导致同步误差增大。TPSN与TSALS同步误差如图2所示,2种算法的同步误差均随着时间同步报文传输跳数的增加而增大,但采用TPSN产生的同步误差远高于采用TSALS产生的同步误差,且TSALS同步误差的增加幅度并不明显。这是由于TSALS在簇间同步时采用双向同步技术,能够保证其同步精度较高;在簇内同步时采用基于接收-接收机制和发送-接收单向同步机制相结合的方法,消除了同步消息的发送时延和传播时延^[9-11],并且在簇内节点采用构造逻辑

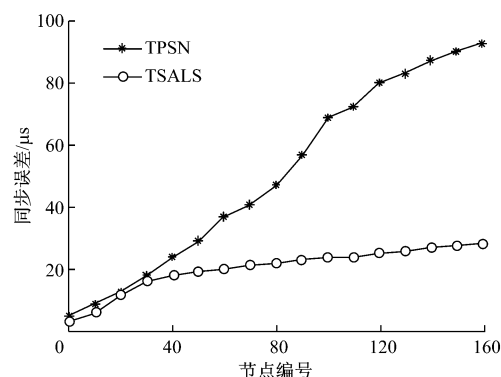


图2 TPSN与TSALS同步误差比较

辑时钟的方式完成本地时钟与网络真实时钟的转换,提高了簇内节点时钟的同步精度。

3.1.2 不同时间同步周期下的同步误差

TPSN与TSALS在不同时间同步周期下的同步误差如图3所示。随着时间同步周期的增加,导致误差累积,TPSN和TSALS的同步误差都随之增大。但因TSALS在簇内同步中使用单跳同步,无误差累积,同时TSALS对簇内节点构造逻辑时钟函数,对晶振频率进行漂移补偿,使簇内节点时钟参照簇首节点时钟进行频偏修正,可有效减小时间同步误差随时间同步周期增加而累积的程度。所以随着时间同步周期的增加,TSALS同步误差的增大趋势比TPSN小。

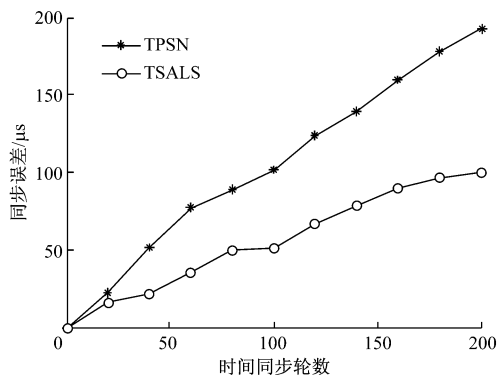


图3 TPSN与TSALS在不同时间同步周期下的同步误差比较

3.2 能量消耗

在无线传感器网络中,绝大部分能量消耗在节点数据发送和接收时,所以可通过分析TPSN与TSALS的同步报文数来近似分析算法能耗。通过仿真得到TPSN的总报文数为12 179个,TSALS的总报文数为7 479个,可知TSALS比TPSN更加节省能量,从而可延长整个网络及节点的生存周期。这是由于TSALS同步过程分为簇间同步和簇内同步,当远端节点需要同步时,只要和簇首节点进行簇间同步即可,而TPSN则需消耗更多能量转发同步报文。

4 结语

结合液压支架模糊控制监测系统的网络拓扑,提出了一种适用于线型结构的时间同步算法——TSALS。该算法中簇间同步采用标准的双向同步机制减小同步误差;簇内同步采用构造逻辑时钟的方法,并对多组时间戳对进行最小平方线性拟合来提高同步精度。仿真结果表明,与TPSN相比,TSALS在线型结构的无线传感器网络中具有更高的时间同步精度和较小的能量消耗。

参考文献:

- [1] 王桃,刘晓文,乔欣,等.基于无线传感器网络的液压支架压力监测系统[J].工矿自动化,2014,40(6):7-10.
- [2] 周嗣勇.煤矿安全监控无线传感器网络协议与定位技术研究[D].北京:北京交通大学,2007.
- [3] ZHANG X H. Automatic calibration of methane monitoring based on wireless sensor network[C]//International Conference on Wireless Communications,Networking and Mobile Computing, Beijing,2008:1-4.
- [4] 张然,李菲菲,张申,等.一种矿震监测的WSNs按需分层时间同步算法[J].中国矿业大学学报,2014,43(6):1046-1050.
- [5] 张申,黄欢,翟彦蓉,等.液压支架工作状态模糊识别系统研究[J].工矿自动化,2012,38(6):52-55.
- [6] 全渝娟,刘桂雄,刘波,等.具有漂移补偿的RCR时钟同步模型[J].华南理工大学学报:自然科学版,2010,38(5):76-79.
- [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,2004:39-49.
- [8] 徐雷鸣,庞博,赵耀.NS与网络模拟[M].北京:人民邮电出版社,2003.
- [9] 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,2003:138-149.
- [10] 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.
- [11] SICHITIU M L,VEERARITTIPHAN C. Simple, accurate time synchronization for wireless sensor networks[C]//Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Los Angeles,2003:1266-1273.