

文章编号:1671-251X(2015)07-0072-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.07.017

闫玉萍,胡青松,韩丽娜,等. 矿井电网故障检测 WSNs 分层时间同步算法[J]. 工矿自动化,2015,41(7): 72-77.

矿井电网故障检测 WSNs 分层时间同步算法

闫玉萍^{1,2,3}, 胡青松^{2,3}, 韩丽娜^{1,2,3}, 张申^{2,3}

(1. 中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 物联网(感知矿山)研究中心, 江苏 徐州 221008; 3. 矿山互联网应用技术国家地方联合工程实验室, 江苏 徐州 221008)

摘要:结合经典时间同步算法 TPSN、RBS 的优点,提出了一种能量有效且满足一定精度要求的同步算法 RBTP。该算法利用无线通信的广播特性并采用最大似然估计和最小二乘法计算时钟偏移和频偏,进而对时钟进行补偿。仿真结果表明,与 TPSN 和 RBS 算法相比, RBTP 算法明显减少了节点的能量消耗,提高了同步精度,能够满足井下电网故障定位系统对时间同步的需求。

关键词:无线传感器网络; 时间同步; 最大似然估计; 最小二乘法

中图分类号:TD655 文献标志码:A 网络出版时间:2015-07-01 11:18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20150701.1118.017.html>

WSNs hierarchical time synchronization algorithm adapted to grid fault detection in mine

YAN Yuping^{1,2,3}, HU Qingsong^{2,3}, HAN Lina^{1,2,3}, ZHANG Shen^{2,3}

(1. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. IoT (Perception Mine) Research Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 3. The National and Local Joint Engineering Laboratory of Internet Application Technology on Mine, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Combining advantages of classical time synchronization algorithm TPSN and RBS, a new energy-efficient and high-accuracy algorithm RBTP was proposed. The algorithm utilizes character of broadcast in wireless communication and adopts the maximum likelihood estimation and the least square algorithm to calculate clock offset and clock skew, then uses the results to compensate the clock. The simulation results show that RBTP algorithm reduces energy consumption compared with TPSN and RBS algorithm, improves synchronization precision, and it can meet the needs of underground grid fault location system for time synchronization.

Key words: wireless sensor networks; time synchronization; maximum likelihood estimate; least square algorithm

0 引言

煤矿井下配电网为煤矿工业生产提供动力,保障配电网的稳定安全运行,对煤矿的安全生产

起着至关重要的作用^[1]。目前我国煤矿配电线路的故障定位方法主要依靠人工巡线^[2],人工成本高,可靠性低。考虑到无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)部署方便灵活的特点,可以在煤

收稿日期:2014-12-23;修回日期:2015-05-14;责任编辑:胡娴。

基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAK06B05);国家自然科学基金项目(51204177);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2011CB707102);江苏省自然科学基金项目(BK20140202)。

作者简介:闫玉萍(1988—),女,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为无线传感器网络,E-mail:lxzyyp@126.com。通信作者:张申(1957—),男,江苏兴化人,教授,博士研究生导师,研究方向为矿山物联网,E-mail:yunnan05@tom.com。

矿井下用 WSNs 构建电网故障定位系统, 传感器节点利用电磁感应以及零序互感器原理采集电流、电压信息, 从而判断电缆是否正常工作, 并能准确、快速、可靠地确定出故障点所处位置。不过, 这种基于 WSNs 的故障点定位依赖于大量传感器节点的实时协同监测, 而精确时间同步则是协同工作的前提和保障。目前已有许多学者对时间同步及其相关理论进行了改进, 提出了多种时间同步方法^[3]。然而, 同步精度与同步能耗作为时间同步中相互矛盾但颇为重要的性能指标, 经典时间同步算法未很好地实现两者之间的平衡, 不能满足 WSNs 井下电网故障定位系统的要求。

TPSN (Timingsync Protocol for Sensor Networks) 和 RBS (Reference Broadcast Synchronization) 算法是 2 种应用广泛的经典时间同步算法, 然而在煤矿井下电网故障定位系统中, 由于网络拓扑的独特性, 这 2 种算法都不能达到较好的实际应用效果。因此, 本文结合典型的 TPSN 和 RBS 算法, 利用无线通信的广播特性和双向成对同步机制, 提出了一种能量有效且满足一定精度要求的同步算法 RBTP (Reference Broadcast and Timing-sync Protocol), 该算法分别利用最大似然估计以及最小二乘法对 TPSN 以及 RBS 算法进行改进, 降低同步能耗的同时提高了同步精度。

1 电网故障定位系统网络模型

煤矿井下电缆累计长度一般为几十至上百千米, 是煤矿供电系统中电能传输的主要介质^[4], 因此, 对其进行故障检测对于矿山安全生产非常重要。在井下电网故障定位系统中, 无线传感器节点安装在井下变电所的馈出线上^[2], 其迅速收集相对微弱的配电网故障信息; 系统将监测到的电缆故障信息实时传输到本地变电所基站, 再经井下环网传送至地面智能监控中心; 监控中心对传感器节点采集的故障数据进行处理, 自动判断出故障发生位置^[5]。由参考文献^[6]可知, 树型多层网络结构适用于矿井电网故障定位系统。井下电网故障定位模型如图 1 所示。

正常情况下, 节点均处于休眠状态以节省能耗, 一旦电缆出现异常情况, 传感器节点中的数据采集装置立刻将采集的电流、电压信息传至自己的簇首节点; 簇首节点对信息进行融合、处理后传输至上一级簇首节点或汇聚节点, 并通过井下环网光缆实现基站与地面智能监控中心的通信; 地面智能监控中

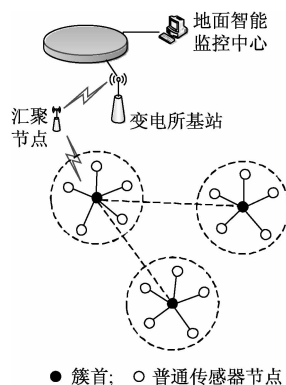


图 1 井下电网故障定位模型

心对无线传感器网络采集的信息进行分析处理, 以实时监控井下电网的运行情况。

2 经典时间同步算法

2.1 TPSN 算法

TPSN 是实现 WSNs 全网节点时间同步的算法, 采用层次型网络结构, 分为层次建立和时间同步 2 个阶段。在层次建立阶段, 由根节点广播级别发现分组, 并将根节点级别设为 0 级, 网络中的各节点按照位置层次结构进行分层, 直至全网节点都被赋予一个级别。时间同步原理如图 2 所示, 首先, $i+1$ 级的节点 S 向 i 级的节点 R 发送同步请求报文, 其中包含节点 S 发送该信息时的本地时间 T_1 , 节点 R 在收到此条信息后记录本地时间 T_2 ; 然后, 节点 R 向节点 S 发送应答报文, 其中包含 T_2 和节点 R 发送该信息时的本地时间 T_3 , 节点 S 收到此信息后记录本地时间 T_4 。图 2 中, d 表示节点 S 和 R 之间的消息传播延迟。节点 S 根据 T_1, T_2, T_3 和 T_4 计算与节点 R 的时钟偏差, 以实现与上层节点的同步, 最终, 全网节点时钟都同步到根节点时钟。

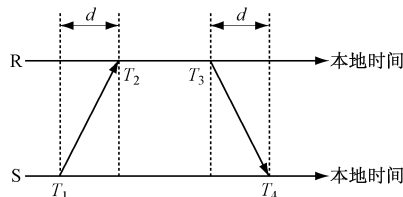


图 2 TPSN 算法同步原理

TPSN 算法在 MAC 层给信息加时间戳, 并采用双向消息交换机制使得时间同步精度较高。但是每个晶振器都有自己独立的时钟频率, 即存在时钟频偏, 因此, 2 个节点间的时钟偏移会不断增大, 为保证 2 个节点间的时钟偏差小于某个限值, 需要频繁执行 TPSN 算法。另外, 采用双向消息交换机制

会导致全网同步能耗较高。而电网故障定位系统中布置的传感器节点大多采用电池供电,因此,TPSN 算法在能耗上不满足需求。

2.2 RBS 算法

RBS 算法是一种基于接收端-接收端的时间同步方法,RBS 算法的信令机制如图 3 所示。节点 A 和节点 B 是参考节点 S 通信域内的 2 个节点,设 $T_{2,j}^A$ 和 $T_{2,j}^B$ 分别表示节点 A 和节点 B 接收到第 j 个分组时记录的时间戳, N 表示节点 A 和节点 B 接收到的相同分组的参照广播次数,那么节点 A 和节点 B 之间的时钟偏移 $\text{offset}[A,B]$ 可以表示如下^[7]:

$$\text{offset}[A,B] = (1/N) \sum_{j=1}^N (T_{2,j}^A - T_{2,j}^B) \quad (1)$$

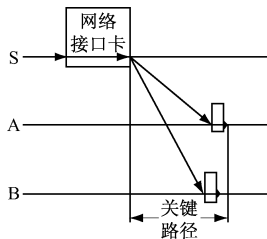


图 3 RBS 算法的信令机制

RBS 算法采用广播同步机制,消除了发送时延、访问时延和传输时延的影响,但接收端需要相互交换各自的记录时间,虽然相比于 TPSN 算法能耗有所降低,但计算量和同步开销依然相对较大,导致能耗较高。

3 RBTP 算法

尽管 TPSN 和 RBS 算法的计算都比较复杂,能耗也较高,但是 TPSN 的层次性结构和双向同步思想与 RBS 的广播同步机制的优点依然值得借鉴,本文在二者的基础上提出了一种高效精确的时间同步算法 RBTP。该算法采用以等级广播为基础的单向广播和双向同步相结合的机制,在 MAC 层打时间戳,并采用最大似然估计以及最小二乘法同时补偿时钟偏移和频偏,降低了同步能耗,提高了同步精度。RBTP 算法分为层次发现及子节点收集和时间同步 2 个阶段。

3.1 层次发现及子节点收集阶段

层次发现及子节点收集阶段通过广播消息包的形式实现分级,采用适当的头结点选择算法选取根节点,并设定它的级别为 0 级;之后根节点广播层次发现信息包,该信息包包含发送节点的 ID、层级;接收到该信息包的所有节点提取信息包中节点级别并将自己的级别设为 1 级,同时向上级节点发送同步

应答报文,并发送新的包含自己级别的层次发现数据包。依此类推,直到网络中每个节点都被赋予一个层次号,实现全网节点的分级。

分级完成后,计算各节点广播范围内下级节点的个数。 i 级节点每收到一个 $i+1$ 级节点发送的同步应答报文,对应的 i 级节点的下级节点数就加 1。依此类推,可计算出每个非叶子节点的下级节点个数,且每层非叶子节点都有了自己广播域内下层节点的信息。通过比较,将同级节点中下级节点数最大的节点确定为应答节点。RBTP 算法的层次生成树如图 4 所示, i 级节点 2 包含 3 个子节点,与同级的其他节点相比,节点 2 的下层子节点数目最多,因此,节点 2 被选为 i 级的应答节点。

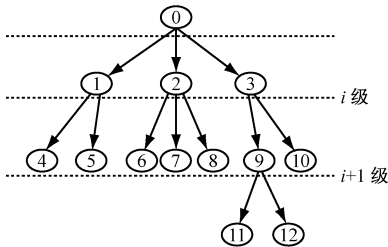


图 4 RBTP 算法的层次生成树

3.2 时间同步阶段

在时间同步阶段,根节点通过广播时间同步消息包启动同步过程,该消息包中包含根节点的级别、应答节点的 ID 和当前时间戳 T_1 。所有在根节点广播范围内的 1 级子节点接收到同步消息后,将各自的本地时间作为消息的接收时间 T_2 。如果是同步消息包中所指定的应答节点,则向上级节点返回应答消息,该应答消息中包括应答节点 ID, T_1 , T_2 以及返回应答消息的时间 T_3 。根节点记录应答消息的接收时间 T_4 ,采用双向成对机制以及最大似然估计的方法,估算根节点和应答节点之间的时钟偏移 φ 和频偏 θ 。随后,根节点广播一个包含根节点级别、 T_2 、 φ 和 θ 的消息包;接收到此消息的应答节点根据 φ 和 θ 调整自己的本地时钟,广播域内的其他子节点根据 T_2 和自身接收到同步报文的时间 T_2' ,并结合最小二乘法计算得出相对于根节点的时钟偏移和时钟频偏,根据计算结果调整各自的本地时钟。

各级节点重复上述过程,最终使整个网络的节点时钟都同步到根节点时钟。

4 RBTP 时间同步原理

RBTP 算法的时间同步原理如图 5 所示。传统的双向消息交换算法如 TPSN 是由下层需要同步的节点向上层的相邻节点请求时间同步,而 RBTP

算法很好地利用了无线通信的广播特性, 减少了同步消息的交换量, 分为同步请求报文和同步调整报文 2 个阶段。

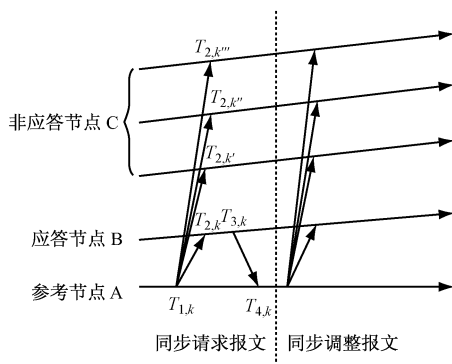


图 5 RBTP 时间同步原理

4.1 同步请求报文阶段

由参考节点 A 发起同步请求报文, 广播域内的下级子节点分别标记接收到此消息的时间为 $T_{2,k}$, $T_{2,k'}$, $T_{2,k''}$, 依次类推, 但只有指定的应答节点 B 回复应答消息, 并标记回复时间戳 $T_{3,k}$; 参考节点 A 在时间 $T_{4,k}$ 接收到这个回复消息并根据成对同步机制计算节点 A 和节点 B 之间的时钟偏移和频偏。节点 A 和节点 B 的双向信息交换模型如图 6 所示。将 $T_{1,1}$ 作为参考时间, 设 $T_{1,1} = 0$, 结合上述分析并根据参考文献[8]可得

$$T_{2,k} = (T_{1,k} + d + X_k)\theta + \varphi \quad (2)$$

$$T_{3,k} = (T_{4,k} - d - Y_k)\theta + \varphi \quad (3)$$

式中: d 为固定部分延迟; X_k, Y_k 为可变部分延迟。

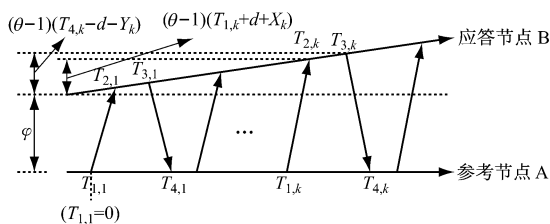


图 6 双向信息交换模型

由式(2)、式(3)可得

$$X_k = (T_{2,k} - \varphi)/\theta - T_{1,k} - d \quad (4)$$

$$Y_k = T_{4,k} - d - (T_{3,k} - \varphi)/\theta \quad (5)$$

根据中心极限定理 (Central Limit Theory, CLT), 如果将延迟看作一些独立随机过程之和, 则可变延迟 X_k 和 Y_k 可以采用高斯模型。另外, 一些学者通过实验室测试已经证实了随机传输延迟服从高斯分布是一种合理的假设^[9], 因此, 可假设 $\{X_k\}_{k=1}^N$ 和 $\{Y_k\}_{k=1}^N$ 是均值为 0、方差为 σ^2 的相互独立且同属于高斯分布的随机变量, 同时假设固定延迟 d 是定值, 则似然函数 $L(\varphi, \theta, \sigma^2)$ 为^[8]

$$L(\varphi, \theta, \sigma^2) = (2\pi\sigma^2)^{-N} \times \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^N \left[\left(\frac{T_{2,k} - \varphi}{\theta} - (T_{1,k} + d) \right)^2 + \left(\frac{\varphi - T_{3,k}}{\theta} + (T_{4,k} - d) \right)^2 \right] \right\} \quad (6)$$

对式(6)取对数并分别对 φ 和 θ 求偏导数, 得到时钟偏移和频偏的联合最大似然估计为

$$\hat{\varphi}_{MLE} = \frac{\sum_{k=1}^N P \sum_{k=1}^N (T_{2,k}^2 + T_{3,k}^2) - \sum_{k=1}^N QG}{\sum_{k=1}^N Q \sum_{k=1}^N P - 2NG} \quad (7)$$

$$\hat{\theta}_{MLE} = \frac{-2N \left[\sum_{k=1}^N P \sum_{k=1}^N (T_{2,k}^2 + T_{3,k}^2) - G \sum_{k=1}^N Q \right] + \sum_{k=1}^N Q}{\sum_{k=1}^N P \left[\sum_{k=1}^N Q \sum_{k=1}^N P - 2NG \right]} + \frac{\sum_{k=1}^N Q}{\sum_{k=1}^N P} \quad (8)$$

式中: $P = T_{1,k} + T_{4,k}$; $Q = T_{2,k} + T_{3,k}$; $G \triangleq \sum_{k=1}^N [T_{1,k}T_{2,k} + T_{3,k}T_{4,k} + (T_{2,k} - T_{3,k})d]$ 。

4.2 同步调整报文阶段

参考节点 A 将计算得到的 $\hat{\varphi}_{MLE}$ 和 $\hat{\theta}_{MLE}$ 以及时间戳信息 $T_{2,k}$ 通过广播调整报文发送出去; 广播域内的节点接收到此报文后, 应答节点 B 根据时钟偏移 $\hat{\varphi}_{MLE}$ 和时钟频偏 $\hat{\theta}_{MLE}$ 调整自己的本地时钟, 使之与参考节点同步; 其余非应答子节点 (以图 5 中的节点 C 为例) 根据时间戳 ($T_{2,k'}$, $T_{2,k}$) 以及 $\hat{\varphi}_{MLE}$ 和 $\hat{\theta}_{MLE}$ 计算相对于参考节点的时钟偏移和频偏, 具体过程类似于 RBS 算法。设 T 为参考节点时间, t 为本地时间, φ' 为时钟偏移, θ' 为时钟频偏, 则本地时间相对于参考时间的数学模型为

$$T = \theta' t + \varphi' \quad (9)$$

由于电磁波在自由空间的传播速度近似等于光速, 且传感器节点间的距离在几十米范围内, 所以由传播时延带来的时间误差很小, 可将其忽略^[10], 则可以假设应答节点和非应答节点在相同时刻接收到同步请求报文。另外, 如果不考虑外界因素的影响和本地晶体振荡器的频率变化, 可以认为在较短的时间内节点晶振的频率是不变的^[11], 那么对于图 5 中的节点 B 和节点 C, 有如下关系式成立:

$$T = \theta'_1 T_{2,k} + \varphi'_1 \quad (10)$$

$$T = \theta'_2 T_{2,k'} + \varphi'_2 \quad (11)$$

式中: k 表示第 k 次同步。

由式(10)、式(11)可得

$$T_{2,k} = \theta'_2 / \theta'_1 T_{2,k'} + (\varphi'_2 - \varphi'_1) / \theta'_1 \quad (12)$$

式(12)中, $T_{2,k}$ 与 $T_{2,k'}$ 已知, $k=k'=1, 2, \dots, n$, 则由 n 个这样的方程式, 可以利用最小二乘法计算出 θ'_2/θ'_1 和 $(\varphi'_2 - \varphi'_1)/\theta'_1$ 的值。

令 $y_k = T_{2,k}$, $x_k = T_{2,k'}$, 利用最小二乘法计算出 θ'_2/θ'_1 和 $(\varphi'_2 - \varphi'_1)/\theta'_1$ 的值分别为

$$\theta'_2/\theta'_1 = \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})(y_k - \bar{y}) / \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2 \quad (13)$$

$$(\varphi'_2 - \varphi'_1)/\theta'_1 = \bar{y} - (\theta'_2/\theta'_1) \bar{x} \quad (14)$$

因为节点 B 为应答节点, 所以容易求得 $\varphi'_1 = \hat{\varphi}_{MLE}/\hat{\theta}_{MLE}$, $\theta'_1 = 1/\hat{\theta}_{MLE}$, 则通过式(13)、式(14)可得

$$\theta'_2 = \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})(y_k - \bar{y}) / \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2 \hat{\theta}_{MLE} \quad (15)$$

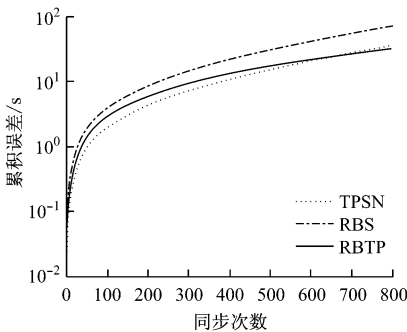
$$\varphi'_2 = [\hat{\varphi}_{MLE} + (\bar{y} - \theta'_2 \hat{\theta}_{MLE}) \bar{x}] / \hat{\theta}_{MLE} \quad (16)$$

节点 C 可根据计算得出的时钟频偏 θ'_2 和时钟偏移 φ'_2 对本地时钟进行补偿。

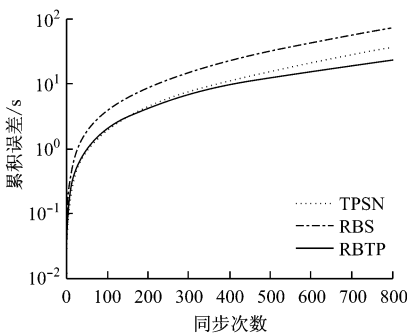
5 性能分析

5.1 同步误差分析

利用 Matlab 软件对 RBS, TPSN, RBTP 算法的同步误差进行仿真, 仿真参数设置: 由时钟频偏引起的相对时钟漂移为 $40 \sim 50 \mu\text{s/s}^{[12]}$ 。在每层应答节点数与非应答节点数之比不同的情况下, 得到的累积同步误差与同步次数的关系如图 7 所示。



(a) 累积同步误差与同步次数的关系(节点数之比为 1:8)



(b) 累积同步误差与同步次数的关系(节点数之比为 1:4)

图 7 累积同步误差与同步次数的关系

由图 7(a)可知, 在同步次数小于 670 次时, RBTP 算法的累积同步误差介于 RBS 算法与 TPSN 算法之间; 同步次数大于 670 次时, RBTP 算法的累积同步误差比 RBS 算法和 TPSN 算法低。由图 7(b)可知, RBTP 算法的同步精度与图 7(a)中相比提高了很多。因此, 可以得到如下结论:

(1) 应答节点采用双向成对同步机制并利用最大似然估计对时钟偏移和频偏进行估计并校正, 而非应答节点采用广播同步机制以及最小二乘法对时钟偏移和频偏进行估计并校正, 因此, 应答节点的估计值更接近于实际的时钟偏差, 当应答节点数所占比例较大时, 累积同步误差较低。

(2) 随着同步次数的增加, 未校正时钟频偏的 RBS 与 TPSN 算法的时钟偏移不断增加, 导致累积误差增大, 相比之下校正时钟频偏的 RBTP 算法的累积误差变化缓慢, 所以误差较小, 即同步精度相比于 RBS 与 TPSN 算法得到了优化。

5.2 能量消耗分析

在 WSNs 中, 将 1 bit 数据传输 100 m 需要 3 J 的能量, 近似等于执行 300 万条指令所需的能量^[13], 数据通信需要的能量远大于数据处理所需要的能量, 而数据通信所需能量与同步报文数成正比, 因此, 可以通过同步报文交换数目来衡量算法能耗大小。在节点层数为 n 、每层节点数为 m 的 WSNs 中, 各算法同步所需报文数分别为

$$N_{TPSN} = \frac{2m(m^{(n-1)} - 1)}{m - 1} \quad (17)$$

$$N_{RBS} = \frac{m^2(m^{(n-3)} - 1)}{m - 1} + m^n + 1 \quad (18)$$

$$N_{RBTP} = \frac{3(m^{(n-1)} - 1)}{m - 1} \quad (19)$$

在树状分层模型下, 分别对 RBS, TPSN, RBTP 算法进行仿真。当每层节点数为 10 时, 各算法节点层数与同步消息开销关系如图 8 所示, 其中 TPSN 和 RBS 算法所需同步报文数分别约为 RBTP 算法的 6.7 倍和 30 倍。当节点层数为 8 时, 各算法每层节点数与同步消息开销关系如图 9 所示, 随着每层节点数 m 的增加, TPSN 和 RBS 算法同步所需报文数相比 RBTP 算法成指数倍增加。

从上述仿真结果可得出如下结论: RBTP 算法通过增加计算的量, 减少了数据的无线传输, 且对时钟偏移和频偏联合估计增加了重同步周期, 因此, 在相同条件下, RBTP 算法所需的同步报文数较经典的 TPSN 和 RBS 算法明显减少, 能量消耗大大

降低。

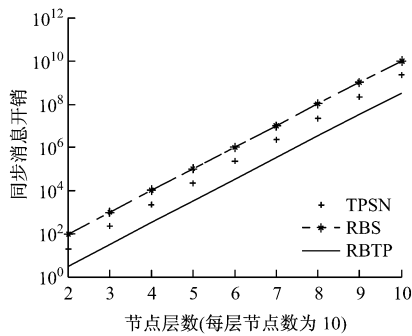


图 8 各算法节点层数与同步消息开销的关系

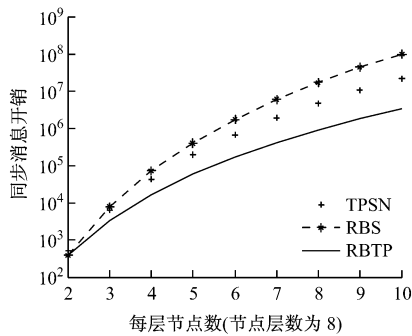


图 9 各算法每层节点数与同步消息开销的关系

6 结语

针对煤矿井下电网故障定位系统的特点及其对时间同步的特定需求,提出了一种 RBTP 同步算法。RBTP 以树状 WSNs 分层结构为同步模型,利用无线信道的广播特性并联合最大似然估计以及最小二乘法同时校正节点时钟偏移和时钟频偏。仿真结果表明, RBTP 算法在能耗上明显低于 RBS 以及 TPSN 算法,延长了系统节点的使用寿命;且同步精度有所提高,增加了故障点定位精度,能够满足井下电网故障定位系统对时间同步在能耗和精度方面的需求。

参考文献:

[1] 王旭波. 煤矿井下供电监控系统的设计及应用[D]. 西安:西安科技大学,2013.

[2] 冯海龙. 井下电网故障定位系统无线传感器网络的研究[D]. 青岛:青岛科技大学,2012.

[3] ELSON J, RÖMER K. Wireless sensor networks: a new regime for time synchronization [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2003, 33(1):149-154.

[4] 任子晖, 仇润鹤, 张艳. 煤矿电网谐波分析模型的建立与滤波器设计[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(1): 48-52.

[5] 王世斌. 配电网故障快速定位系统研究[J]. 工矿自动化, 2013, 39(8):52-55.

[6] 张嘉怡. 无线传感器网络在煤矿安全监测中的应用[D]. 成都:西南交通大学,2008.

[7] ELSON J, GIROD L, ESTRIN D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts [J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2002, 36(SI):147-163.

[8] CHAUDHARI Q M, SERPEDIN E. Maximum likelihood estimation of clock parameters for synchronization of wireless sensor networks[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Las Vegas, NV, 2008:2517-2520.

[9] 史昕. 面向交通监测的无线传感器网络时间同步方法研究[D]. 西安:长安大学,2014.

[10] 王义君, 钱志鸿, 王桂琴, 等. 无线传感器网络能量有效时间同步算法研究[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(9):2174-2179.

[11] 苗永刚. 无线传感器网络时间同步中数学方法应用的研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2009.

[12] 封红霞. 无线传感器网络中时间同步的分析研究[D]. 北京:北京邮电大学,2007.

[13] POTTIE G J, KAISER W J. Wireless integrated network sensors [J]. Communications of the ACM, 2000, 43(5):51-58.