

# 基于 WIA-PA 传感器网络的能量有效 时间同步算法

季云峰<sup>1</sup>, 马 上<sup>2</sup>

(1. 江苏信息职业技术学院, 江苏 无锡 214000;

2. 电子科技大学 通信抗干扰技术国家级重点实验室, 四川 成都 611731)

**摘要:** WIA-PA 协议是一种新型工业级无线传感器网络国际标准; 当 WIA-PA 网络内节点数目增多时, 传统的参考广播同步算法 RBS 以及改进型 ERBS 算法网络开销非常大; 针对这一严峻的问题, 提出了一种能量有效的局部最优时间同步算法; 该算法对相邻的接收节点在多个参考广播消息的条件下求取平均相位偏差, 然后对此平均相位偏差进行最大后验估计, 最后根据此估计值调整本地时钟; 仿真结果表明, 所提时间同步算法在同步精度方面比 RBS 约提高 168%, 比 ERBS 约提高 24%; 同时, 同步过程中的网络能耗也大大减少。

**关键词:** WIA-PA 协议; 时间同步; 能量有效; 局部优化

## An Energy-Efficient Algorithm for Time Synchronization Based on WIA-PA Sensor Networks

Ji Yunfeng<sup>1</sup>, Ma Shang<sup>2</sup>

(1. Jiangsu College of Information Technology, Wuxi 214000, China; 2. University of Electronic Science and Technology, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** WIA-PA protocol is a new type of international communication standards for industrial wireless sensor networks. With the incensement of the number of the sensor nodes in the WIA-PA network, the overhead and the energy consumption of the whole network appear to be very large based on the traditional reference broadcast synchronization algorithm RBS and its modified version algorithm ERBS. In order to solve this serious problem, this paper puts forward a kind of energy efficient local optimal algorithm for the time synchronization process. The algorithm solves out the average phase deviation according to the adjacent receiving node under the condition of multiple reference broadcast messages, and then carries out maximum posteriori estimation for this calculated phase deviation, and finally adjusts the local clock according to the estimate. The simulation results show that the synchronous accuracy of the proposed time synchronization algorithm is about 168% higher than that of RBS and is about 24% higher than that of ERBS. At the same time, the energy consumption in the process of time synchronization is also greatly reduced.

**Keywords:** WIA-PA Protocol; time synchronization; energy-efficient; local optimization

## 0 引言

WIA-PA (wireless networks for industrial automation process automation), 一种面向工业过程自动化的工业无线网络标准在 2010 年被中国工业无线联盟提出, 并与 Wireless HART 协议并称两大无线通信国际标准。WIA-PA 协议能够广泛应用于森林防火、医疗检测、工业监控以及过程自动化等领域, 有着广泛的商业前景<sup>[1]</sup>, 但是由于传输时延、传感器节点处理时延以及随机时延误差等因素, WIA-PA 的时间同步总是面临巨大的挑战。因此, 必须有一种简易合理的同步机制来实时地调整时间误差, 使得数据传输能够在正确的时隙链路中进行。

针对 WIA-PA 网络对时间同步的特殊要求, 近几年很多学者提出了低复杂度、节能的同步算法<sup>[2-6]</sup>, 但是这些算法存在没有考虑 WIA-PA 网络的低发射功率特性、不适宜大规模

组网、未减少同步数据交换的次数, 不适合大规模的工业应用等问题。为此, 本文提出了一种能量有效的局部最优时间同步算法。该算法可以取得较高的时间同步精度, 并且使得同步过程所需要的能量损耗大大减少, 符合实际的工业应用需求。

## 1 系统模型

### 1.1 WIA-PA 网络体系构架

WIA-PA 网络的体系构架如图 1 所示, 整个网络包含路由器、现场设备、手持设备、网络管理器等。现场设备负责现场信息传感, 路由器则负责网络的组建以及信息的传输, 网络管理器负责整个通信链路的调度。路由器与现场设备的连接采用星形网络, 一个路由器可以负责多个现场设备的信息汇聚与转发; 各个路由器之间则组建成分层的网状网络拓扑结构, 路由器在转发数据时可以有多条冗余路径的选择, 使得网络传输的可靠性大大提升。

由于在实际的网络结构中, 具有路由转发功能的是路由器节点, 因此 WIA-PA 网络拓扑结构简化为考虑路由节点的拓扑构造。与传统的 WSN 不同, WIA-PA 网络的分层拓扑如图 2 所示。网络以度分层, 形成网状网的结构, 处在同一层的

收稿日期: 2014-10-07; 修回日期: 2014-11-20。

作者简介: 季云峰(1978-), 男, 江苏无锡人, 硕士, 讲师, 主要从事无线传感器网络等方向的研究。

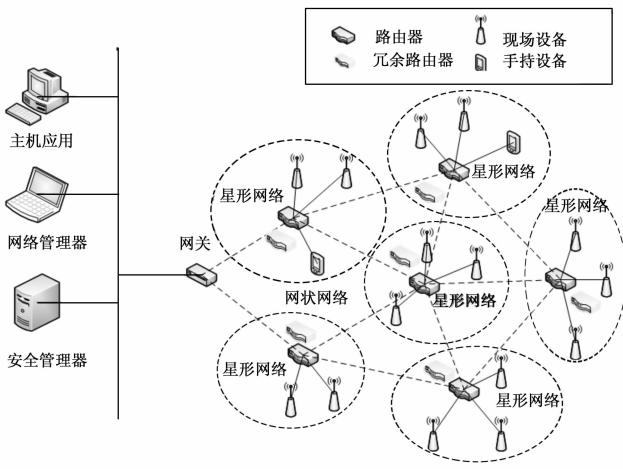


图 1 WIA-PA 网络构架

节点彼此之间不建立链路连接, 被称为兄弟节点, 处在上下层的节点被称为父节点和子节点, 统称为邻居节点, 我们假设在实际的 WIA-PA 网络中邻居节点的数量是固定的。

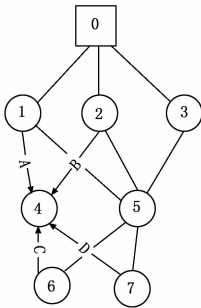


图 2 WIA-PA 网络模型

1.2 RBS 和 ERBS 同步算法

WIA-PA 网络工作于 TDMA 和 FHSS 模式, 路由器节点之间的通信遵循严格的时序关系。网络在组建时或在工作状态时都需要进行节点之间的时间同步。以网关作为主时钟源, 各层路由器节点通过彼此之间的时间戳交换来估算与主时钟的偏差, 继而进行时间同步。

WIA-PA 网络完成时间同步使用的传统的代表算法是参考广播时间同步协议 RBS (reference broadcast synchronization)<sup>[7]</sup>。如图 3 所示, RBS 基于接收方—接收方的同步算法, 是 Elson 等人以“第三节点”实现同步的思想而提出的。其基本思想为: 在发送端发送多个参考广播同步消息, 而且消息中不包含时间戳, 接收节点间通过计算彼此接收到的时间同步消息的本地时间差来调整自身时间, 从而实现同步。

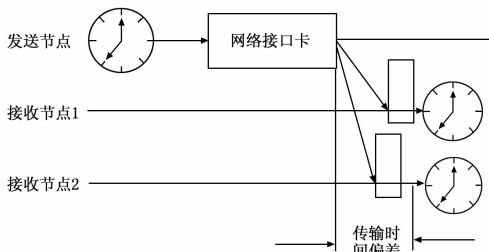


图 3 RBS 算法示意图

通过 RBS 时间同步算法, 任意接收到广播参考包的节点  $i$  与节点  $j$  之间的平均时间偏差可以计算如下:

$$\forall i \in n, j \in n; offset[i, j] = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (T_{j,k} - T_{i,k}) \quad (1)$$

其中  $n$  表示接收者的数量,  $m$  表示参考包的数量, 而  $T_{j,k}$  表示接收节点  $j$  接收到参考包  $k$  时的时钟。

此算法并不是同步发送者和接收者, 而是使接收者彼此同步, 有效避免了发送访问时间对同步的影响, 将发送方延迟的不确定性从关键路径中排除, 误差的来源主要是传输时间和接收时间的不确定性, 从而获得了比利用节点间双向信息交换实现同步的方法更高的精确度。这种方法的最大弊端是信息的交换次数太多, 发送节点和接收节点之间、接收节点彼此之间, 都要经过消息交换后才能达到同步。计算复杂度较高, 网络流量开销和能耗太大, 不适合能量供应有限的场合。

此外, 文献 [3] 提出的改进型的 ERBS 算法, 该算法中, 节点只与不与之相邻的节点交换参考消息, 并对每个节点计算出来的平均时间偏差进行了最大后验估计, 最后通过该估计值调整所有节点的本地时钟。该算法在一定程度上改善了同步精度, 缩减了算法复杂度, 但是对于 WIA-PA 能量有限性网络依然是无法承载的。

根据图 2, 由于传感器节点的能量有限性, 节点的发射功率有限, 有连接的节点之间可以建立链路, 本文提出的局部最优时间同步算法就是充分考虑了 WIA-PA 的节点链路连接情况, 采取了复杂度低、精确度高、节能的算法来实现。

2 能量有效时间同步算法

2.1 算法复杂度

能量有效的局部最优时间同步算法分为两个部分, 第一部分对同步源 (网关) 的同步消息包接收时间进行邻居间的信息交换, 第二部分根据最大后验估计估算各个节点的时间偏差并及时做出调整。

如图 2 所示, 节点 4 的邻居节点分别为 1, 2, 6 和 7, 节点 4 和节点 5 是兄弟节点, 他们之间无链路连接, 需要注意。节点 4 的同步过程如下: 首先邻居节点 1, 2, 6 和 7 将各个收包时间发送给节点 4, 传输方向如箭头所示, 节点 4 计算出平均时间偏差, 并对这些偏差进行最大后验估计, 得到时间偏差的估计值, 继而进行调整。相对于 ERBS 而言, 本算法忽略了邻居节点外的其他节点, 保证了最大的相关性; 同时极大地简化了算法复杂度, 使得同步能耗大大减少。我们假定节点的邻居数量为 5, 那么对于  $N$  各节点和  $M$  条同步信息的同步复杂度为  $5MN$ 。

对于 RBS 算法, 假如该算法在网络中有  $n$  个接收节点  $m$  个参考广播包, 则任意一个节点接收到  $m$  个参考包后, 会拿这些参考包到达的时间与其它  $n-1$  个接收节点接收到的参考包到达的时间进行比较, 然后进行信息交换, 那么对于  $N$  各节点和  $M$  条同步信息的同步复杂度为  $MN(N-1)$ 。

对于 ERBS 算法, 对于同样的网络模型, 则任意一个节点接收到  $m$  参考包后, 会拿这些参考包到达的时间与其它  $n-5$  个接收节点接收到的参考包到达的时间进行比较, 然后进行信息交换, 那么对于  $N$  各节点和  $M$  条同步信息的同步复杂度为  $MN(N-5)$ 。

3 种算法的复杂度对比如表 1 所示。通过对比可以发现, 本文算法的时间复杂度相对较低, 尤其当网络拓扑足够大之后, 算法的能量有效性将显得格外突出。

表 1 3 种算法的复杂度分析

同步算法	广播一条参考消息的时间复杂度	广播 $m$ 条参考消息的时间复杂度
RBS	$n$	$mn(n-1)$
ERBS	$n$	$mn(n-5)$
本文算法	5	$5mn$

2.2 算法流程

能量有效的局部最优时间同步算法的具体流程如下所示。首先，在统一时钟源广播  $m$  个消息包的情况下，路由节点  $p$  接收到其他邻居节点的  $m$  个参考包，并根据  $m$  个包的情况获得他们之间的平均时间误差，计算公式如 (2) 所示：

$$\theta = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (T_{p,k} - T_{q,k}) \quad (2)$$

文献 [6] 已经证明，接收节点之间的相位偏差符合高斯分布，那么，最大后验估计方法可以有效的实现对接收节点时间偏差的预测。通过实验表明接收节点的相位偏移符合零均值的高斯随机分布，那么时间偏差的测量值可以通过估计得到。以时间偏差  $\theta$  为条件的的时间偏差测量值  $x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_N]$   $T$ ，在统计学上的条件概率密度为：

$$p(x | \theta) = \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_n} \right)^N \exp\left(-\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \theta)^2}{2\delta_n^2}\right) \quad (3)$$

其中： $N$  表示的是邻居节点的数量， $\theta$  表示时间偏差的估计值， $\delta_n$  则表示第  $n$  个邻居节点的时间偏差的方差。根据测量结果，接收节点之间的时间偏差符合  $\mu=0.061$ 、 $\delta=10.221$  的高斯随机分布，其相位偏差的概率密度为：

$$p(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \exp\left(-\frac{(\theta - \mu)^2}{2\delta^2}\right) \quad (4)$$

此外，成本函数  $C$  的取值为：

$$C = \int_{-\infty}^{\theta-\tau} p(\varphi | x) d\varphi + \int_{\theta+\tau}^{+\infty} p(\varphi | x) d\varphi = 1 - \int_{\theta-\tau}^{\theta+\tau} p(\varphi | x) d\varphi \quad (5)$$

很显然，若假设  $\theta$  为相位偏差的估计值，那么，当  $C$  取到最小时， $p(\theta | x)$  必须满足：

$$\frac{\partial p(\theta | x)}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\hat{\theta}} = 0 \quad (6)$$

公式 (6) 是计算时间偏差估计的最大后验方程，拆分此方程如公式 (7) 所示：

$$p(\theta | x) = \frac{p(x | \theta)p(\theta)}{p(x)} \quad (7)$$

$$p(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(x, \varphi) d\varphi = \int_{-\infty}^{+\infty} p(x | \varphi)p(\varphi) d\varphi \quad (8)$$

将公式 (7) 带入 (8)，并进行以下求导运算，可得：

$$\left[ \frac{\partial \ln p(x|\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial \ln p(\theta)}{\partial \theta} \right] \Big|_{\theta=\hat{\theta}} = 0 \quad (9)$$

结合公式 (4)，相位偏差  $\theta$  符合高斯分布，因此上式可以化为：

$$\frac{\partial \ln \left\{ \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_n} \right)^N \exp\left(-\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \theta)^2}{2\delta_n^2}\right) \right\}}{\partial \theta} + \frac{\partial \ln \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \exp\left(-\frac{(\theta - \mu)^2}{2\delta^2}\right) \right\}}{\partial \theta} = 0 \quad (10)$$

继续化简，可得：

$$\sum_{i=1}^N \frac{x_i - \theta}{\delta_n^2} + \frac{\mu - \theta}{\delta^2} = 0 \quad (11)$$

令  $\theta = \hat{\theta}$ ：

$$\hat{\theta} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{\delta_n^2} \times \frac{\delta_n^2 \delta^2}{N\delta^2 + \delta_n^2} \quad (12)$$

以上便求得了接收节点相位偏差的理论估计量，将实际的  $N$  和  $\delta_n$  等参数带入方程 (12) 可以求得每个接收点的时间偏差估计值，节点将依据此偏差来修正节点的当前时钟。

3 实验分析

3.1 实验环境搭建

为了还原 WIA-PA 网络的真实场景，本实验采用 OM-NeT++ 软件对路由器节点的模型进行了严谨的设计。具体如下：能量模型统一设置为固定值 1；能量消耗模型设置为矩阵模式，300 个节点那么矩阵模式为  $300 \times 300$  的方形矩阵，表示任意节点之间信息传输的能量损耗值；节点的物理层封装为 IEEE 802.15.4 协议；节点之间的通信基于 TDMA 和 FDMA 模式，网络层路由算法根据文献 [8] 改进，并采用文献 [9] 给出的基于边缘染色的链路调度算法进行 MAC 层的资源调度。

此外，仿真环境的其他参数为：仿真区域中节点数量 50~300 个；节点之间的间隔大约 60 m，节点通信距离 100 m，每个节点的邻居节点数量维持为 5 个左右；节点信息处理的时延以及信息无线传输的时延根据数据包的大小以及通信距离衡量；网络仿真的时间为 1 小时，每隔 10 分钟进行一次全网范围的时间同步，节点传输的数据包大小恒定，标准时间参考网关节点的时钟。需要特别说明的是，对于本文算法，节点的通信距离略微大于实际距离可以使得节点与邻居节点正常通信，且看不见更远的节点，符合 WIA-PA 网络节点设定要求。而对于 RBS 以及 ERBS 算法，则将节点的最大通信距离调整至整个网络范围，其余参数设置保持不变。

3.2 实验结果分析

首先，在仿真平台的基础上，分别利用 ERBS、RBS 和本文算法补偿节点间的同步时间，3 种算法误差概率分布情况如图 4 所示。

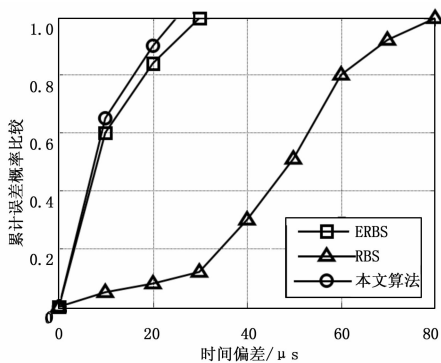


图 4 3 种算法的累积误差概率。

由图 4 可以看出，3 种算法依然积累了一定的时间偏差，这是不可避免的。但是，RBS 和 ERBS 累计最大概率的时间偏差较本文算法多出不少，其中 RBS 大约在 80  $\mu s$ ，ERBS 大约

2011, 19 (5): 998-1001.

[2] Foster I, Zhao Y, Raicu I, et al. Cloud computing and grid computing 360-degree compared [A]. Proceedings of the 2008 Grid Computing Environments Workshop [C]. Washington, D. C: IEEE Computer Society, 2008; 1-10.

[3] Armbrust, Fox, Griffith, et al. Above the Clouds: A Berkeley View of Cloud Computing [EB/OL]. [2-010-01-25]. <http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2009/E ECS-2009-28.pdf>.

[4] 王庆波, 金 津, 何 乐, 等. 虚拟化与云计算 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.

[5] Garg S K, Yeo C S, Buyya R, et al. Energy-Efficient Scheduling of HPC Application in Cloud Computing Environment [EB/OL]. (2009-09-07). <http://www.cloudbus.org/reports/EE-Scheduling-AcrossClouds-2009.pdf>.

[6] Cherkasova L, Gupta D, Vahdat A. When virtual is harder than real: Resource allocation challenges in virtual machine based IT environments [R]. California: Technical Report HPL, 2007.

[7] 熊聪聪, 冯 龙, 陈丽仙, 等. 云计算中基于遗传算法的任务调

度算法研究 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2012, 40 (增刊 I): 1-4.

[8] 刘 永, 王新华, 邢长明, 等. 云计算环境下基于蚁群优化算法的资源调度策略 [J]. 计算机技术与发展, 2011, 21 (9): 19-23.

[9] 李建锋, 彭 舰. 云计算环境下基于改进遗传算的任务调度算法 [J]. 计算机应用, 2011, 31 (1): 184-186.

[10] Holland J H. Adaptation in natural and artificial systems [M]. Ann Arbor University of Michigan Press, 1975.

[11] DeJong K A. The analysis of the behavior of a class of Genetic adaptive systems [D]. Ann Arbor University of Michigan, 1975.

[12] Goldberg D E. Genetic algorithms in search optimization and machine learning [M]. Boston: Addison - Wesley Longman Press, 1989.

[13] CloudSim: A Framework for Modeling and Simulation of Cloud Computing Infrastructures and Services Introduction [EB/OL]. <http://www.buyya.com/gridbus/>.

(上接第 1648 页)

在 31  $\mu$ s, 而本文算法则在 25  $\mu$ s。很显然, 本文算法对于同步误差的精确度的改善较为明显, 较 RBS 提升了 168%, 较 ERBS 则提升了 24%。

通过改变 WIA-PA 网络中节点的数量, 分别对三中同步算法进行仿真, 1 小时后得到能量损耗模型中的能量矩阵, 通过分析矩阵各个因子, 得到了 3 种算法对应的能量损耗如图 5 所示。

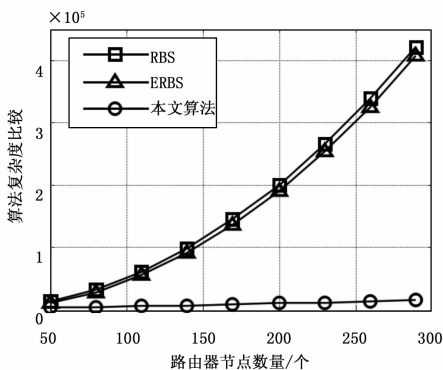


图 5 3 种算法的算法复杂度比较

从图 5 中可以看出 RBS 和 ERBS 的能耗很接近, 因为 ERBS 算法随着节点数目的增加, 只对不相邻的两个节点完成时间信息交换, 节点间交换信息的数量相对于 RBS 算法而言有所减少, 但减少的交换次数甚少。由于本文算法只与相邻的最相关的节点进行信息交换, 所以能耗将大大降低。由图 5 可以看出本文算法的能耗大大低于 RBS 算法和 ERBS 算法, 并且, 随着节点数目的不断增加, RBS 和 ERBS 算法能耗的增长率越来越高, 而本文算法能量消耗的增大趋势则渐进平稳, 很符合 WIA-PA 网络的实际应用需求。

#### 4 结论

本文提出了一种基于能量有效性的局部最优化时间同步算法, 解决了 WIA-PA 网络中大规模节点同步通信的问题。本文算法与传统的 RBS 算法以及改进型 ERBS 算法不同, 该算

法在采用“接收方-接收方”同步的前提下, 节点只与之相邻的节点进行时间戳交换, 并根据时间偏差求取偏差的平均值, 继而对此偏差值进行最大后验估计, 获得时间偏差的估计值。本文算法在通过 OMNeT++ 构建的逼近真实 WIA-PA 网络的环境中进行实测, 取得了与较好的效果。不仅同步的精确度有了明显提升, 同步过程中的能量损耗也被降到了极低的水平, 适合大规模工业应用。

#### 参考文献:

[1] 于海斌, 梁 炜, 曾 鹏. 工业无线网络技术体系与 WIA 标准 [J]. 自动化博览, 2009 (1): 17-20.

[2] Zennaro D, Dall'Anese E, Erseghe T, et al. Fast clock synchronization in wireless sensor networks via ADMM-based consensus [A]. in Proc. 9th Int. Symp. Model. Optim. Mobile, Ad Hoc, Wireless Netw [C]. Princeton, 2011: 148-153.

[3] 杨照峰, 时合生, 樊爱宛. 基于 ZigBee 的低延时 PDA 网络系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2014 (7): 2182-2184.

[4] Wang Y, Qian Z, Wang G, et al. Research on Energy-efficient Time Synchronization Algorithm for Wireless Sensor Networks [J]. Journal of Electronic and Information Technology, 2012 (9): 2174-2179.

[5] Samanta A K, Mukherjee A, Hossein S M. Efficient time synchronization by KD tree in WSN [A]. Computer and Automation Engineering (ICCAE2010) [C]. 2010: 655-659.

[6] Wang Y, Nunez F, Doyle III F J. Energy-efficient pulse-coupled synchronization strategy design for wireless sensor networks through reduced idle listening [J]. IEEE transactions on signal processing, 2012 (10): 127-134.

[7] Elson J, Girod L, and Estrin D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts [A]. The Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation, Boston [C]. USA, 2002: 147-163.

[8] 许婧祺, 王 敏. 一种基于网格的无线传感器网络动态分簇路由协议 [J]. 计算机测量与控制, 2012 (6): 1729-1732.

[9] 王 沁, 赵金东. WIA-PA 网络中的无冲突资源调度算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2010 (9): 1726-1730.