

无线传感器网络能量有效时间同步算法研究

王义君 钱志鸿* 王桂琴 张旭
(吉林大学通信工程学院 长春 130012)

摘要: 针对无线传感器网络中随着节点数目增多, 传统的参考广播同步算法网络开销非常大的问题, 该文提出一种能量有效的参考广播同步算法。该算法首先只对不相邻的两个接收节点在多个参考广播消息的条件下求平均相位偏差, 并且对计算得出的相位偏差进行最大后验估计; 其次采用最小二乘线性回归方法周期性地拟合时钟偏移, 完成同步过程。仿真结果表明, 能量有效的参考广播同步算法在同步精度方面有所改进的同时, 有效减少了无线传感器网络的能量消耗。

关键词: 无线传感器网络; 时间同步; 能量有效; 参考广播同步

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)09-2174-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00236

Research on Energy-efficient Time Synchronization Algorithm for Wireless Sensor Networks

Wang Yi-jun Qian Zhi-hong Wang Gui-qin Zhang Xu

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: The traditional Reference Broadcast Synchronization (RBS) algorithm has a problem that network overhead is very large as the network nodes increase in Wireless sensor networks. An Energy-efficient RBS (ERBS) scheme is presented to work out the network overhead issue. Firstly, every receiving node, which is required to receive a couple of reference messages, computes mean phase offset to its nonadjacent receiving nodes, and estimates phase offset by maximum posteriori estimation; Secondly, the algorithm uses least-squares linear regression to fit clock skew periodically. The analysis on simulation result indicates that ERBS algorithm improve synchronization precision and reduce energy usage over RBS.

Key words: Wireless Sensor Networks (WSNs); Time synchronization; Energy-efficient; Reference Broadcast Synchronization (RBS)

1 引言

作为物联网底层网络的重要组成部分^[1], 美国军方最早提出对无线传感器网络的理论和应用进行研究。无线传感器网络是由部署在监测区域内大量的传感器节点相互通信形成的一个多跳自组织网络系统。随着无线通信、传感器等技术的日趋成熟, 无线传感器网络可以在任何时间、任何地点、任何环境条件下获取人们所需信息, 为物联网的发展奠定基础。时间同步作为无线传感器网络的一项核心支撑技术^[2], 在多传感器数据融合、节点数据处理、低能耗链路层协议设计、测距定位^[3]等方面起着关键作用。

根据同步机制可将现有的算法分为 4 类: (1)基

于接收端—接收端的同步算法, RBS(Reference Broadcast Synchronization)^[4]和 BTSA(Bio-inspired Time Synchronization Algorithm)^[5]属于此类同步机制, 其特点是误差来源主要集中在接收节点之间的处理时间, 同步精度较高; (2)基于发送端—接收端的单向同步算法, FTSP(Flooding Time Synchronization Protocol)^[6]属于此类同步机制, 其特点是通信量较低, 能量高效, 可实现全网同步; (3)双向同步算法, 文献[7]属于此类同步机制, 其特点是适用于不能忽略传播时延的应用环境中, 但其只能实现相位偏差瞬时同步; (4)基于多种机制相互融合的同步算法, 文献[8]和文献[9]提出的算法属于此类同步机制, 其特点是具有更快的收敛速度及较低的能量消耗, 但是对于较大规模网络同步精度及能耗存在较大的不确定性。

由于同步算法的设计需要面向不同的应用, 因此本文在分析 RBS 算法的基础上, 针对接收端同步

2012-03-08 收到, 2012-04-28 改回

国家自然科学基金(61071073)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20090061110043)资助课题

*通信作者: 钱志鸿 dr.qzh@163.com

应用，提出了一种能量有效参考广播同步算法 (Energy-efficient Reference Broadcast Synchronization, ERBS)。该算法首先只对不相邻的两个接收节点在多个参考广播消息的条件下求平均相位偏差，并且对计算得出的相位偏差进行最大后验估计；然后再采用最小二乘线性回归方法周期性拟合时钟偏移，从而完成整个同步过程。本文组织结构如下：第 2 节对 RBS 算法进行了系统分析，指出 RBS 算法存在的问题；第 3 节从相位偏差估计和时钟漂移估计两个方面实现了基于 ERBS 算法的节点时间同步；第 4 节对 ERBS 算法进行了仿真及分析；第 5 节对本文的研究作出结论，总结全文。

2 RBS 算法分析

RBS 算法利用无线信道的广播特性，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。首先，式(1)给出了传播时间延迟的计算公式，其中 D_e 为传播时延， L 为信道长度， V_e 为电磁波在信道上的传播速度。由于电磁波在自由空间的传播速度近似等于光速，所以由传播时间时延带来的时间误差约为数十纳秒，可以将其忽略。

$$D_e = L/V_e \quad (1)$$

由此可见 RBS 算法的主要误差来源集中在接收端时间延迟，其最大的特点是消除了参考广播消息从发送节点到接收节点之间的关键路径上的发送时间延迟和访问时间延迟。延迟分析示意图如图 1 所示。

其次，Elson 等人^[4]通过实验证明在接收到参考消息后，接收端任意两个节点间本地时间差的相位偏差符合 $\mu = 0, \sigma = 11.1 \mu\text{s}$ 的高斯分布。本文利用 OMNeT++ 实验仿真系统证明相位偏差的最佳拟合参数为： $\mu = 0.054, \sigma = 11.357 \mu\text{s}$ ，该数据与文献^[4]的实验数据非常接近，统计学分布图如图 2 所示。这一结论对于通过数学方法估计相位偏差从而提高同步精度具有重要的理论意义。

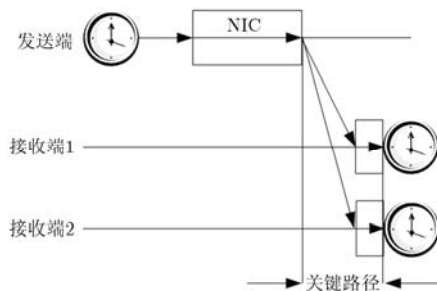


图 1 RBS 算法传输延迟分析

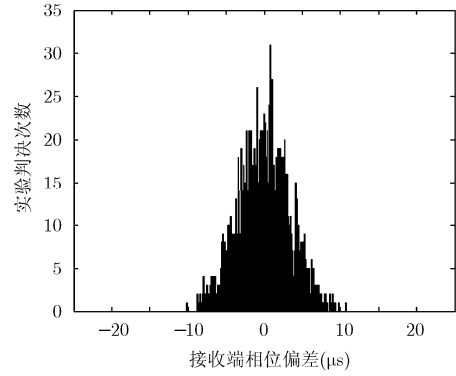


图 2 相位偏差统计学分布图

最后，在由 n 个节点组成的单跳范围无线传感器网络中，在执行 RBS 算法过程中，一个发送节点发送一条参考消息时，整个网络至少需要交换 n 次消息。对于 n 个节点和 m 条参考消息的无线传感器网络来说，RBS 算法的复杂度为 $O(mn^2)$ ，即对每个参考消息来说，每个接收节点都与其他 $n-2$ 个节点交换该参考消息。因此，RBS 算法复杂度较高，网络开销较大。

3 ERBS 算法

针对 RBS 算法相位偏差具有的统计学特性和存在的网络开销问题^[10]，ERBS 算法分两部分实现网络内节点的时间同步。第 1 部分是对消息传送延迟带来的非确定性相位偏差进行估计；第 2 部分是对由节点内部晶振带来的确定性频率偏移进行估计，称之为时钟漂移估计。

3.1 相位偏差估计

在包含 $N+1$ 个节点的网络中，发送节点发送每个参考消息时，RBS 算法要求每个节点与其他 N 个节点交换该消息的本地时间，计算两者之间的本地时间差，如图 3 显示了 3 个接收节点情况下 RBS 算法相位偏差估计示意图。在这种情况下，随着节点数目的增多以及发送参考广播消息的增多，整个算法语句重复执行的次数会急剧增加，算法复杂度会以成倍的平方阶速度增长，给网络带来较大负担。图 4 同样以 3 个接收节点为例显示了 ERBS 算法对相位偏差估计的基本思想：在接收端放弃了每个节点都与网内任何其他接收节点交换参考消息的方法，取而代之的是仅仅对于不相邻的节点交换参考消息，计算不相邻接收节点间接收到多个参考消息后的本地时间差的平均值，从而得到网内任意 2 个不相邻接收节点间的相位偏差；利用数学估计方法计算出所有相位偏差的估计值，通过该估计值调整所有节点的本地时间。具体实现步骤为：

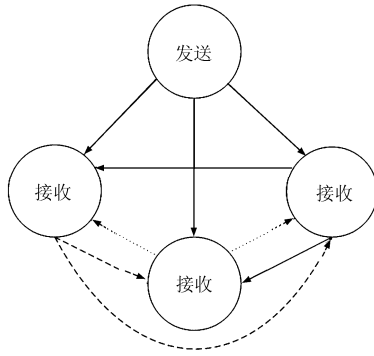


图3 RBS 算法

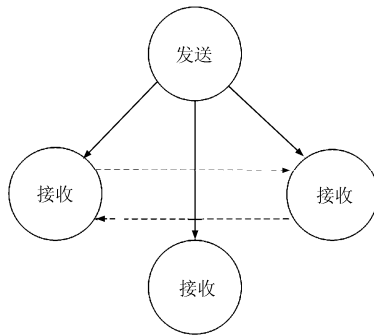


图4 ERBS 算法

- (1) n 个接收节点按邻近位置关系依次编号;
- (2) 发送节点发送 m 个参考消息广播包;
- (3) n 个接收节点根据其本地时钟记录参考广播包到达的时间;
- (4) n 个接收节点交换记录的 m 个参考广播包到达时间;
- (5) 每个接收节点 p 计算在 m 个参考广播消息包条件下自身与其不相邻节点 q 间的本地时间差的平均值, 即为两不相邻节点间的相位偏差;
- (6) 计算网内所有任意不相邻 2 个接收节点间的相位偏差;
- (7) 利用最大后验估计方法计算出所有相位偏差的一个估计值, 通过该估计值调整所有节点的本地时间, 实现网内接收节点间的同步。

对于实现步骤(5), 步骤(7)的说明:

(1) 在步骤(5)中, 通过式(2)计算得出两个不相邻节点间的相位偏差。其中 p 和 q 分别代表两个不相邻的接收节点编号, 且 $p \in n, q \in n$, 此处需要指出的是 $(p - q) \neq \pm 1$; $T_{r,k}$ 代表接收节点 r 接收到参考包 k 时记录的本地时间, 且 $r \in n$; m 表示发送节点发送参考消息广播的数量; φ 代表 2 个不相邻节点交换 m 个参考消息包的相位偏差。

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

(2) 在步骤 7 中, 由于前面已经证明接收节点间

的相位偏差 φ 符合 $\mu = 0.054, \sigma = 11.357 \mu\text{s}$ 的高斯分布, 因此采用最大后验估计方法对相位偏差进行估计^[11]。假定相位偏移符合均值为 0, 方差为 σ_n 的高斯分布, 则以 φ 为条件的相位偏差测量值 $\mathbf{x}=[x_1, x_2, \dots, x_N]^T$, 在统计学上的条件概率密度函数为

$$p(\mathbf{x} | \varphi) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \right)^N \exp \left[-\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \varphi)^2}{2\sigma_n^2} \right] \quad (3)$$

相位偏差 φ 的概率密度函数为

$$p(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{(\varphi - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (4)$$

设条件平均代价为

$$\begin{aligned} C &= \int_{-\infty}^{\varphi-\tau} p(\varphi | \mathbf{x}) d\varphi + \int_{\varphi+\tau}^{\infty} p(\varphi | \mathbf{x}) d\varphi \\ &= 1 - \int_{\varphi-\tau}^{\varphi+\tau} p(\varphi | \mathbf{x}) d\varphi \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)可知, 当 C 取到最小值时, 右侧积分需取最大。如果 $p(\varphi | \mathbf{x})$ 的最大值在 φ 的允许范围之内, 令 $\hat{\varphi}$ 为相位偏差估计值, 则获取最大值的必要条件是

$$\left. \frac{\partial \ln p(\varphi | \mathbf{x})}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\hat{\varphi}} = 0 \quad (6)$$

该式即为计算相位偏差估计的最大后验方程。再由概率论及统计学关系式

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

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

将式(8)代入式(7), 两边取对数, 并对 φ 求偏导, 则可将相位偏差估计量 $\hat{\varphi}$ 的求解形式定义为

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

因为相位偏差 φ 符合 $\mu = 0.054, \sigma = 11.357 \mu\text{s}$ 的高斯分布, 则式(9)可化为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \ln \left[\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \right)^N \exp \left[-\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \varphi)^2}{2\sigma_n^2} \right] \right]}{\partial \varphi} \\ & + \frac{\partial \ln \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{(\varphi - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \right]}{\partial \varphi} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

将式(10)化简可得

$$\sum_{i=1}^N \frac{x_i - \varphi}{\sigma_n^2} + \frac{\mu - \varphi}{\sigma^2} = 0 \quad (11)$$

令 $\varphi = \hat{\varphi}$, 则

$$\hat{\varphi} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{\sigma_n^2} \times \frac{\sigma_n^2 \sigma^2}{N\sigma^2 + \sigma_n^2} \quad (12)$$

式(12)计算所得 $\hat{\varphi}$ 即为相位偏差的估计量, 基于此完成网内节点相位偏差估计。

3.2 时钟漂移估计

节点的时钟漂移是由内部晶体振荡器的频率变化产生的，与每个晶振相关的是两个寄存器、一个计数器和一个保持寄存器。晶振每振荡一次计数器减 1，当计数器减为 0 时，产生一次中断，计数器重新从保持寄存器中装入起始值。计时器在规定的范围内工作，制造商标明的常数 ρ 是最大漂移速度。若两个时钟相对于 UTC 时间以相反方向漂移，在它们同步后的 Δt 时间内，它们可能的差值为 $2\rho\Delta t$ ，对于无线传感器网络操作系统假设要保证每两个时钟之间的相差不超过 δ ，那么两个时钟必须至少在每 $\delta/2\rho$ 内重新同步。可以用锁相环将晶振的相位和频率与外部标准锁定，也可以采用物理层方法降低同步误差，但对于无线传感器网络低能耗、低复杂度的设计要求来说，必然会给节点的硬件设计增加额外的难度。

对于每个节点 i 在物理时间 t 的本地时间定义为

$$T_i(t) = \frac{1}{f_0} \int_{t_0}^t f_i(t) dt + \sigma_i \quad (13)$$

其中 f_0 为节点晶体振荡器的标称频率， $f_i(t)$ 是晶振在 t 时刻的实际频率，通常 $f_i(t) \neq 1$ ， σ_i 是节点 i 在 t 时刻以前积累的时间偏差。 t 和 t_0 为实际的物理时间。由于在短时间内可以认为晶振频率是恒定不变的，假定 $f_i(t) = v$ ，可以得到一个更为简化的线性时间模型：

$$y = vx + \sigma \quad (14)$$

式中 v 代表节点频率漂移，而 σ 代表节点初始相位偏差。

由于节点时钟漂移满足式(14)所示的线性模型，因此本文采用最小二乘法实现对参量的拟合。最小二乘法不需要其他统计学参量，只需给出关于参量的线性模型即可实现拟合。该算法虽然在性质转换及评价方面没有特别的优势，但由于其易于实现，算法复杂度较小，能够满足无线传感网络能量受限要求^[12]。基于此，本文以 $\delta/2\rho$ 为时间间隔，周期性采用最小二乘法求出式(14)中的线性回归拟合参数 v 和 σ ，如式(15)。

$$\left. \begin{aligned} v &= \bar{y} - \sigma \bar{x} \\ \sigma &= \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

拟合度 r 可以由式(16)计算得出，无线传感器网络中的每个接收端传感器节点都可以通过拟合参数 v 和 σ 完成对本节点时钟漂移的补偿。

$$\begin{aligned} r &= \frac{\sigma_{xy}^2}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})(y_k - \bar{y})}{\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}{n}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2}{n}}} \\ &= \frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})(y_k - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2}} \end{aligned} \quad (16)$$

4 算法仿真与分析

为了验证算法的有效性，利用 OMNeT++ 仿真软件，通过在仿真区域内布置 100 个基于 IEEE 802.15.4 的无线传感器网络节点进行同步算法仿真实验，节点间接收及转发消息时间统计及存储互操作界面如图 5 所示。相关仿真条件如下：判决次数为 250 次，每两次判决之间的时间延迟为 6.5 s，仿真时间为 35 min，节点间最大通信距离理论值为 80 m。

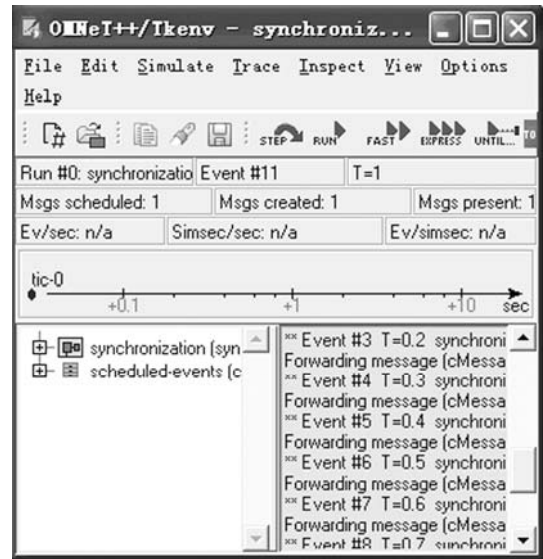


图 5 同步算法仿真环境

首先，在仿真平台的基础上，分别利用 ERBS 算法和 RBS 算法补偿节点间的同步时间，两种算法误差概率分布情况如图 6 所示：随着同步误差的增加，ERBS 计算所得误差的最大累积误差概率在 39 μs 发生，而 RBS 的最大累积误差概率在 77 μs 发生，由此可见，相比于 RBS，ERBS 在降低同步误差方面提高了将近一倍。图 7 给出了 ERBS 和 RBS 的同步误差分布图，由仿真结果可知，ERBS 的平均误差为 16.39 μs ，而 RBS 的平均误差达到了 30.12 μs 。所以，尽管 ERBS 算法减少了节点间参

考广播信息的交换次数,但是通过对所有相位偏差进行最大后验估计后,同步误差不但没有增加,相反,ERBS在同步精度方面取得了一定的改进。

其次,通过增加节点的数量,即分别布置100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240个节点对ERBS, RBS和TPSN算法在网络能量消耗方面进行了仿真实验,表1给出了3种算法在不同节点数量下的能量消耗实际值。图8给出了不同节点数量下,3种算法的能耗和能耗增长趋势的对比。因为ERBS算法随着节点数目的增加,节点间交换信息的数量相对于RBS算法和TPSN算法明显减少,所以由图8

可以看出在ERBS算法的能耗只有RBS算法的1/2,而TPSN算法在相应节点数量下的能耗最大。与此同时,随着节点数量的不断增加,ERBS算法能量消耗的增大趋势越来越平稳,这也正是ERBS算法的重要优势之一。

表1 算法能量消耗实际值(mW)

节点数	100	120	140	160	180	200	220	240
ERBS	115	131	147	164	184	203	221	240
RBS	220	258	300	333	369	404	438	478
TPSN	241	270	315	350	388	425	451	485

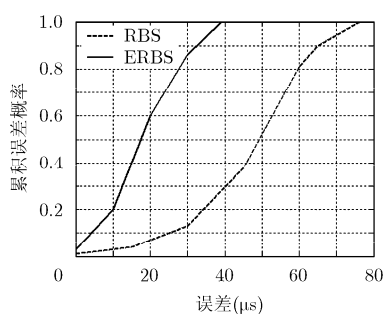


图6 算法误差分析

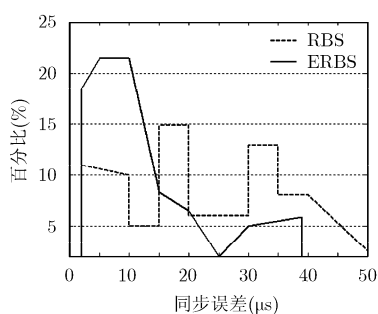


图7 同步误差分布图

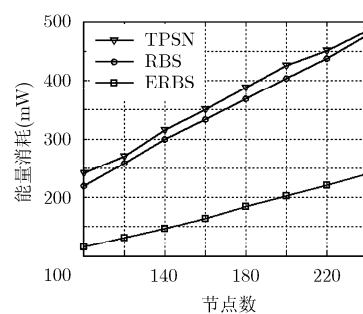


图8 算法能量消耗对比

5 结束语

本文在分析传统RBS算法的基础上,提出一种能量有效的同步算法。首先只对不相邻的两个接收节点在多个参考广播消息的条件下求平均相位偏差,降低了整个同步过程的计算复杂度,由于接收节点间相位偏差符合高斯分布特性,所以,采用最大后验估计方法对所得相位偏差进行估计,每个接收节点根据相位偏差的估计值对自身节点时间进行调整,实现对相位偏差的纠正;其次采用最小二乘线性回归方法周期性的拟合时钟偏移,从而完成整个同步过程。理论分析和仿真结果表明,改进的ERBS算法保证同步精度优于RBS算法的同时,在能耗方面相比于RBS算法也表现出优越性能。在后续的研究工作中,将ERBS算法与FTSP算法相结合,实现无线传感器网络跨层时间同步,并进一步提升时间同步精度,扩大时间同步机制应用范围。

参考文献

- [1] Liu Qiang, Huang Xiaohong, Leng Supeng, *et al.* Deployment strategy of wireless sensor networks for Internet of Things[J]. *China Communications*, 2011, 8(8): 111-120.
- [2] Faranak H, Julien S, Frits V, *et al.* Analysis of a clock synchronization protocol for wireless sensor networks[J].

Theoretical Computer Science, 2012, 413(1): 87-105.

- [3] 刘影, 钱志鸿, 王雪, 等. 基于到达时间差的无线传感器网络质心定位算法[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2010, 40(1): 245-249.
Liu Ying, Qian Zhi-hong, Wang Xue, *et al.* Wireless sensor network centroid localization algorithm based on time difference of arrival[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2010, 40(1): 245-249.
- [4] Elson J, Girod L, and Estrin D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts[C]. *The Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation*, Boston, USA, Dec. 9-11, 2002: 147-163.
- [5] Li L, Yang X, and Zhang J Y. A bio-inspired time synchronization algorithm for wireless sensor networks[C]. *IC CET 2010 International Conference on Computer Engineering and Technology*, Chengdu, China, Apr. 16-18, 2010, 4: 306-311.
- [6] Marotim M, Kusy B, and Simon G. The flooding time synchronization protocol[C]. *The Second International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Baltimore, USA, Nov. 3-5, 2004: 39-49.
- [7] 汪付强, 曾鹏, 于海斌. 一种低开销的双向时间同步算法[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(6): 1357-1363.
Wang Fu-qiang, Zeng Peng, and Yu Hai-bin. Low overhead two-way time synchronization algorithm[J]. *Chinese Journal*

- of Scientific Instrument*, 2011, 32(6): 1357-1363.
- [8] 李立, 刘勇攀, 杨华中, 等. 无线传感器网络分布式一致时间同步协议的收敛分析及加速设计[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9): 2045-2051.
- Li Li, Liu Yong-pan, Yang Hua-zhong, *et al.* Convergence analysis and accelerating design for distributed consensus time synchronization protocol in wireless sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(9): 2045-2051.
- [9] Samanta A K, Mukherjee A, Hossein S M, *et al.* Efficient time synchronization by K-D tree in WSN[C]. The Second International Conference on Computer and Automation Engineering, Singapore, Feb. 26-28, 2010, 5: 655-659.
- [10] Chaudhari Q M, Serpedin E, and Qaraqe K. On maximum likelihood estimation of clock offset and skew in networks with exponential delays[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(4): 1685-1697.
- [11] Yan Ning-ning. Superconvergence Analysis and a Posteriori Error Estimation in Finite Element Methods[M]. Beijing: Science Press, 2008: 67-95.
- [12] Gradowska P L and Cooke R M. Least squares type estimation for Cox regression model and specification error[J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2012, 56(7): 2288-2302.
- 王义君: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为 WSNs 时间同步及路由策略、物联网底层网络接入技术.
- 钱志鸿: 男, 1957年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为基于蓝牙、ZigBee 等短距离无线通信技术的无线个域网、无线传感器网络、物联网协议构架及关键技术.
- 王桂琴: 女, 1960年生, 副教授, 研究方向为数字信号处理.
- 张旭: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为无线网络 QOS 机制.