

# 无线传感器网络时钟参数追踪与一致性同步\*

万羊所, 蔡春扬, 曾培  
(重庆邮电大学自动化学院, 重庆 400065)

**摘要:** 针对无线传感器网络分布式时钟同步问题,在不可靠网络以及随机性干扰的情况下,提出了基于卡尔曼滤波的最大一致性时钟同步算法。在获得硬件时钟参数后,通过设置预定偏斜目标,各节点可不通过网络交换来调整时钟偏斜。为了进一步使节点间时钟偏移达到同步,设计了最大一致性控制方案来补偿节点,并基于图论给出算法收敛性证明。仿真结果表明算法能够快速跟踪硬件时钟参数,较加权最大一致性时钟同步算法收敛速度更快,全局平均同步误差下降了一个数量级。

**关键词:** 无线传感器网络; 分布式时钟同步; 卡尔曼滤波; 一致性

**中图分类号:** TP393.04; TP301.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2018)05-1479-05

**doi:**10.3969/j.issn.1001-3695.2018.05.043

## Clock parameters tracking and consensus synchronization in wireless sensor network

Wan Yangsuo, Cai Chunyang, Zeng Pei

(School of Automation, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of distributed clock synchronization in wireless sensor network (WSN), in the case of unreliable network and random interference, this paper proposed a maximum clock synchronization algorithm based on Kalman filter (KF-MTS) after establishing state space model of clock synchronization. The algorithm set a predetermined skew target after obtaining the hardware clock parameters. Each node could adjust the clock skew without network exchanging. In order to further synchronize the clock offset between the nodes, it designed the maximum consensus control scheme to compensate the nodes, and given the proof of convergence of the algorithm based on graph theory. Simulation results show that the proposed algorithm can quickly track hardware. Compared with the weighted maximum time synchronization (WMTS) protocol, the clock synchronization algorithm converges faster and the global average synchronization error was lower one order than WMTS.

**Key words:** wireless sensor network; distributed clock synchronization; Kalman filter; consensus

## 0 引言

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)近年来被广泛应用于监控环境、控制工业机器、目标跟踪和事件监测等方面,这些应用程序大多数都要求由一些已完成时钟同步的传感器节点协作完成<sup>[1-3]</sup>。

近几年来,统计信号处理技术逐步被用来解决时钟同步问题,其中具有代表性的是一致性理论。根据不同的网络结构,时钟同步算法可以简单地划分为集中式和分布式两种。集中式时钟同步算法,如参考广播同步(reference broadcast synchronization, RBS)<sup>[4,5]</sup>、简单的精确时间同步(simple accurate time synchronization, SATS)<sup>[6]</sup>、无线传感网时间同步协议(timing-sync protocol for sensor network, TPSN)<sup>[7,8]</sup>等基于协议的同步方案。但是,这类协议存在一定的缺陷,当一个节点死亡或加入新的节点到WSN,需要较大的能量开销去重构生成树或簇拓扑结构,并且离参考节点越远的那些节点,累积同步误差会越来越大。因此,这些协议不能满足节能和较高同步精度的需求。

相对于依靠网络结构的时钟同步协议,分布式时钟协议不

需要建立分层的网络结构,它只需要和邻居节点通信即可,所以其相对于依靠网络结构的时钟同步协议具有较强的鲁棒性。其中较为典型的有RFA(reachback firefly algorithm)<sup>[9]</sup>,它是一种完全的分布式时钟同步协议,但是它只补偿了时钟偏移,没有对时钟偏斜进行补偿。文献[10]提出了既补偿时钟偏斜又补偿时钟偏移的分布式时钟同步协议,但是上述两种协议的同步精度是以计算复杂度、计算开销大、需要的信息多、需要的能量多、而且会增加计算和存储的负担。为了减少节点通信所需的信息,文献[11,12]提出了基于脉冲耦合的分布式时钟同步方法,该方法利用物理层脉冲实现同步,该算法简单且不需要复杂的理论支撑,但是该方法只能实现统一的计时节奏,并不能实现精确的时钟读数。考虑到上述协议的缺点,以任何两个节点交换数据包为基础,文献[13~15]提出了基于平均一致性的时钟同步协议(average time-synch, ATS)和加权最大一致性同步协议(weighted maximum time synchronization, WMTS),文献[16]则提出了梯度时间同步协议(gradient time synchronization protocol, GTSP),这些算法直接将收集到的邻居节点各状态采取平均或设置某一阈值进行分级等选择策略补偿到节点自身状态,但该方法较易受网络规

收稿日期: 2017-01-15; 修回日期: 2017-03-13 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51605065); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1600402)

作者简介: 万羊所(1993-),男,安徽庐江人,硕士研究生,主要研究方向为网络化控制、无线传感器网络时钟同步(974896411@163.com); 蔡春扬(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为网络化控制、无线传感器网络时钟同步; 曾培(1990-),女,硕士研究生,主要研究方向为网络化控制、无线传感器网络时钟同步。

模及节点间状态的影响,算法收敛速度慢。

本文前期研究工作已完成对基于网络控制观点的时钟同步算法的研究<sup>[17,18]</sup>,但是由于所使用的相对时钟模型缺陷,在扩展到大规模网络时存在一定困难。在文献[19]中已经获得了晶振的运行规律,但是由于所采用的时钟参数追踪算法依赖于网络,在文献[20]中,提出一种本地化的时钟参数追踪方法,弥补了文献[19]的缺陷。所以本文考虑在之前研究的基础上,通过结合文献[19,20]和一致性算法的优势,在获得的底层硬件时钟参数的基础上,进一步采取某种策略,进行节点间时钟同步的研究。

本文在上述研究的基础上,作出的主要工作有:a)通过对时钟读数模型和晶振运行规律的演化,建立时钟同步状态空间模型,基于改进的模型,本文提出了基于卡尔曼滤波的最大一致性时钟同步算法,从理论上证明了本文算法的收敛性;b)设计了仿真对比实验,从收敛速度、同步误差等方面分析了本文时钟同步算法的有效性优势。

## 1 状态空间模型

在ATS<sup>[13]</sup>、WMTS<sup>[14,15]</sup>和GTSP<sup>[16]</sup>等时钟同步协议中指出,对于时钟同步而言,时钟偏斜和时钟偏移的真实值并不重要,重要的是所有的时钟收敛到一个共同的虚拟参考时钟,但是这是以牺牲同步时间为代价的。考虑在知道时钟偏斜和时钟偏移的真实值后,对于时钟偏斜可设计一个预定的斜率,这样对于时钟偏斜便可以在一步之内达到同步,而对于时钟偏移,虽然不能按照预定的偏移进行补偿,但是由于时钟偏斜已达到同步,在此后的偏移同步过程中,并不会产生大的变化,这样便能实现更快的时钟偏移同步。

在理想模式下,晶体振荡器的角频率为常数。但是,由于时钟晶振的不完美性及受到环境因素的影响,使得不同节点的晶体振荡器拥有不同的频率,进而使时钟偏离理想情况。WSN中每个节点的硬件时钟采用积分模型进行描述<sup>[21]</sup>:

$$\theta_i(t) = \int_{t_0}^t \beta_i(\tau) d\tau + \theta_i^0 \quad (1)$$

其中: $\beta_i(\tau)$ 表示硬件时钟偏斜; $\theta_i^0$ 表示 $t_0$ 时刻硬件的初始时钟偏移。式(1)的模型把线性模型和非线性模型都包括在内,是一个通用模型。

将式(1)按照 $\tau_0$ 采样间隔进行周期采样,可得

$$\theta_i(k) = \sum_{m=1}^k \beta_i(m) \tau_0 + \theta_i^0 \quad (2)$$

由于其他的硬件组件可能依赖于一个连续运作的硬件时钟,所以硬件时钟的值不能被修改。因此,需要设计一个逻辑时钟用来代表需要被同步的时间。对时钟偏移设计一逻辑时钟偏移补偿量 $u_i(k-1)$ ,在每一个同步周期调节当前周期时钟读数。按照GTSP<sup>[16]</sup>思想,考虑在每一周期将 $\beta_i(k) \tau_0$ 作为一个整体, $\beta_i(k) \tau_0$ 表示第 $k$ 周期的时长,可由底层硬件时钟读数获取,对 $\beta_i(k) \tau_0$ 设计一调节系数 $\alpha_i(k-1)$ 来改变当前时刻时长,即 $\alpha_i(k-1) \beta_i(k) \tau_0$ ,等同于从逻辑上更改了时钟偏斜,其递推式如下:

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}_i(k) &= \sum_{m=1}^k \alpha_i(m-1) \beta_i(m) \tau_0 + \theta_i^0 + \sum_{m=0}^{k-1} u_i(m) + v_i(k) = \\ &= \underbrace{\sum_{m=1}^{k-1} \alpha_i(m-1) \beta_i(m) \tau_0 + \theta_i^0 + \sum_{m=0}^{k-2} u_i(m)}_{\tilde{\theta}_i(k-1)} + \alpha_i(k-1) \beta_i(k) \tau_0 + u_i(k-1) + v_i(k) \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $\tilde{\theta}_i(k)$ 表示逻辑时钟读数; $v_i(k)$ 表示随机的测量误差和其他类型的噪声叠加量,噪声 $v_i(k)$ 可被假设为服从均值为 $\mu$ ,方差为 $\sigma_v^2$ 的独立高斯分布<sup>[20]</sup>,相关矩阵为 $E[v_i(k) v_i^T(k)] = R = \sigma_v^2$ 。该逻辑时钟可在应用层创建一个时间进程来维护,由设计的函数来读取时钟值,该函数仅在被调用时根据给定的硬件时钟读数来计算逻辑时钟读数。

由式(3)可得

$$\theta_i(k) = \theta_i(k-1) + \alpha_i(k-1) \beta_i(k) \tau_0 + u_i(k-1) \quad (4)$$

在文献[19]中,通过对底层晶振计时规律的研究,有

$$\beta_i(k) = \xi_i + \sqrt{p_i} B'(k) \quad (5)$$

其中: $\xi_i$ 为标准化晶振频率;这里 $B'(k)$ 代表在第 $k$ 个采样时间 $B(t)$ 的导数, $B(t)$ 为标准的维纳过程。

由于标准维纳过程的导数为高斯白噪声,所以可以用高斯—马尔可夫模型描述第 $i$ 个节点的时变时钟偏斜:

$$\beta_i(k) = \beta_i(k-1) + w_{i,\beta}(k) \quad (6)$$

其中: $w_{i,\beta}(k) = \sqrt{p_i} [B'(k) - B'(k-1)]$ 是均值为0,方差为 $\sigma_{\delta_i}^2$ 的高斯噪声。

将式(6)代入式(4)得

$$\begin{aligned} \theta_i(k) &= \theta_i(k-1) + \alpha_i(k-1) \beta_i(k-1) \tau_0 + \\ &\quad \alpha_i(k-1) w_{i,\beta}(k) \tau_0 + u_i(k-1) \end{aligned} \quad (7)$$

联立式(4)(7),选取状态 $x_i(k) = [\beta_i(k); \theta_i(k)]$ 得

$$x_i(k) = A_i(k-1) x_i(k-1) + B u_i(k-1) + w_i(k) \quad (8)$$

其中: $A_i(k-1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \alpha_i(k-1) \tau_0 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ ,  $w_i(k) = \begin{bmatrix} w_{i,\beta}(k) \\ \alpha_i(k-1) \tau_0 w_{i,\beta}(k) \end{bmatrix}$ ,相关矩阵为 $E[w_i(k) w_i^T(k)] = Q$ 。

从WSN资源分配角度来说,时钟同步过程应该仅占用所有资源的一小部分。假设时钟同步过程中执行每一步所需的时间是采样周期 $\tau_0$ 的 $\Delta$ 倍,定义 $l_k = \Delta k$ ,即每间隔 $\Delta \tau_0$ 时间进行一次时间同步,可得到系统状态模型为

$$x_i(l_k) = A_i(l_{k-1}) x_i(l_{k-1}) + B u_i(l_{k-1}) + w_i(l_k) \quad (9)$$

在同步周期由 $l_{k-1}$ 到 $l_k$ 运行过程中,逻辑时钟进程应继续保持周期 $\tau_0$ 运行,并且在此过程中保持 $A_i(l_{k-1}) = A_i(l_{k-1} + 1) = \dots = A_i(l_{k-1} + \Delta - 1)$ 。为了保证尽可能高的时钟精度,同步周期 $\Delta \tau_0$ 应尽可能小,很明显此时 $\Delta \tau_0$ 应在时钟精度和资源分配之间作出权衡。

## 2 时钟参数追踪

由于硬件时钟偏斜 $\beta_i(l_k)$ 并不能直接通过测量手段获得,因此本文为了获取状态 $x_i(l_k)$ ,采用最优线性滤波——卡尔曼滤波。在式(4)中, $\theta_i(l_k)$ 表示时钟偏移的真实值,观测方程可建模为关于时钟偏移的噪声观测等式,即从式(3)获得的逻辑时钟读数为

$$\tilde{\theta}_i(l_k) = \theta_i(l_k) + w_i(l_k) = c x_i(l_k) + v_i(l_k) \quad (10)$$

其中: $c = [0 \quad 1]$ 。

由于 $\text{rank}[C \quad CA_i(l_{k-1})] = 2$ ,则根据秩判据,本文系统是完全可观的。

假设系统状态在 $l_{k-1}$ 时刻的状态 $x_i(l_{k-1})$ 的估计 $\hat{x}_i(l_{k-1} | l_{k-1})$ 是已知的,误差方差阵记为

$$\begin{aligned} P_i(l_{k-1} | l_{k-1}) &= E(x_i(l_{k-1}) - \hat{x}_i(l_{k-1} | l_{k-1})) \\ &\quad (x_i(l_{k-1}) - \hat{x}_i(l_{k-1} | l_{k-1}))^T \end{aligned} \quad (11)$$

根据  $\hat{x}_i(l_{k-1}|l_{k-1})$  和状态更新方程式(9),得到对当前时刻  $l_k$  的状态  $x_i(l_k)$  的初步估计:

$$x_i(l_k) = A_i(l_{k-1})\hat{x}_i(l_{k-1}|l_{k-1}) + Bu_i(l_{k-1}) + w_i(l_k) \quad (12)$$

本文可知  $w_i(l_k)$  为正态分布,则对于  $x_i(l_k)$  的最小方差估计有

$$\hat{x}_i(l_k|l_{k-1}) = E[A_i(l_{k-1})\hat{x}_i(l_{k-1}|l_{k-1}) + Bu_i(l_{k-1}) + w_i(l_k)] = A_i(l_{k-1})\hat{x}_i(l_{k-1}|l_{k-1}) + Bu_i(l_{k-1}) \quad (13)$$

现在需要计算此一估计的验前误差方差阵,简记估计误差为

$$\begin{aligned} \tilde{x}_i(l_k|l_{k-1}) &= x_i(l_k) - \hat{x}_i(l_k|l_{k-1}) = \\ &A_i(l_{k-1})[x_i(l_{k-1}) - \hat{x}_i(l_{k-1}|l_{k-1})] + w_i(l_k) = \\ &A_i(l_{k-1})\tilde{x}_i(l_{k-1}|l_{k-2}) + w_i(l_k) \end{aligned} \quad (14)$$

因此,验前误差方差阵为

$$\begin{aligned} P_i(l_k|l_{k-1}) &= E\tilde{x}_i(l_k|l_{k-1})\tilde{x}_i^T(l_k|l_{k-1}) = E[A_i(l_{k-1}) \\ &\tilde{x}_i(l_{k-1}|l_{k-2}) + w_i(l_k)][A_i(l_{k-1})\tilde{x}_i(l_{k-1}|l_{k-2}) + \\ &w_i(l_k)]^T = A_i(l_{k-1})P_i(l_{k-1}|l_{k-1})A_i^T(l_{k-1}) + Q \end{aligned} \quad (15)$$

将式(10) $\hat{\theta}_i(l_k)$  视做对状态  $x_i(l_k)$  的另一个估计,根据卡尔曼滤波方程可得对  $x_i(l_k)$  的最优线性估计:

$$\hat{x}_i(l_k|l_k) = \hat{x}_i(l_k|l_{k-1}) + K_i(l_k)[\hat{\theta}_i(l_k) - c\hat{x}_i(l_k|l_{k-1})] \quad (16)$$

根据式(14)可得到类似估计误差为

$$e_i(l_k|l_k) = x_i(l_k) - \hat{x}_i(l_k|l_k) \quad (17)$$

验后误差方差阵为

$$\begin{aligned} P_i(l_k|l_k) &= Ee_i(l_k|l_k)e_i^T(l_k|l_k) = \\ [I - K_i(l_k)]P_i(l_{k-1}|l_{k-1})[I - K_i(l_k)]^T + K_i(l_k)RK_i^T(l_k) = \\ [I - K_i(l_k)c]P_i(l_k|l_{k-1}) \end{aligned} \quad (18)$$

则对于式(16)卡尔曼增益  $K_i(l_k)$  的求解问题,可表达如下:

$$K_i(l_k) = \arg \min_{K_i(l_k)} Tr P_i(l_k|l_k) \quad (19)$$

根据极小值原理,求解式(19),则卡尔曼增益为

$$K_i(l_k) = P_i(l_k|l_{k-1})c^T[R + cP_i(l_k|l_{k-1})c^T]^{-1} \quad (20)$$

至此,本文完全获得了基于卡尔曼滤波的状态追踪算法。由于本文卡尔曼滤波过程涉及  $A_i(l_{k-1})$ ,该状态转移矩阵是在线实时计算的,所以并不能离线再通过在线查表来进行简化运算,对于每个节点  $i$  运行卡尔曼滤波迭代过程的计算复杂度主要依赖于:  $A_i(l_{k-1})P_i(l_k|l_k)A_i^T(l_{k-1})$ ,  $K_i(l_k)cP_i(l_k|l_{k-1})$  和  $K_i(l_k) = P_i(l_k|l_{k-1})c^T[R + cP_i(l_k|l_{k-1})c^T]^{-1}$ 。由于本文状态都是二维列向量,所以  $A_i(l_{k-1})P_i(l_k|l_k)A_i^T(l_{k-1})$  和  $K_i(l_k)cP_i(l_k|l_{k-1})$  的计算复杂度均为  $O(1)$ ,且由于  $R$  为标量,则增益  $K_i(l_k)$  中的求逆运算计算复杂度为  $O(1)$ 。因此,本文即使在线计算卡尔曼滤波迭代过程对于节点的计算能力也并没有特殊需求。

### 3 时钟偏移和时钟偏斜同步

在 ATS<sup>[13]</sup> 和 WMTS<sup>[14,15]</sup> 中,由于无法获取硬件时钟偏斜的真实值,在同步过程中采用时钟的相对模型,算法的时钟偏斜和时钟偏差的补偿都能收敛,但是在这过程中需要时钟偏斜需要经过一定的迭代步  $n$  才能实现  $\lim_{k \rightarrow \infty} \alpha_i(k-1)\beta_i(k) = \beta_{com}$ 。在第2章已经获得了硬件时钟偏斜的估计值,因此只要网络中各节点预先协商好一个公共的偏斜斜率  $\beta_{com}$ ,便能够在有限时间内达到  $\lim_{k \rightarrow \infty} \alpha_i(k-1)\beta_i(k) = \beta_{com}$ ,当掌握对底层硬件足够多的先验知识后,典型的有  $n=1$ 。

将式(7)重新表达为

$$\begin{aligned} \theta_i(l_k) &= \theta_i(l_{k-1}) + \tau_0 + [\alpha_i(l_{k-1})\beta_i(l_{k-1}) - 1]\tau_0 + \\ &\alpha_i(l_{k-1})w_{i,\beta}(l_k)\tau_0 + u_i(l_{k-1}) \end{aligned} \quad (21)$$

为了满足逻辑时钟计时需求,即式(13)是按周期进行累积的,而不应是一个常值,当  $\alpha_i(k-1) = \frac{1}{\hat{\beta}_i(k-1|k-1)}$  时,式(13)的估计时钟偏移递推关系为

$$\hat{\theta}_i(l_k) = \hat{\theta}_i(l_{k-1}) + \tau_0 + u_i(l_{k-1}) = \Delta k\tau_0 + \theta_i^{l_0} + \sum_{m=l_0}^{l_k-1} u_i(m) \quad (22)$$

对于式(22),可看出在每一个同步周期中已消除了由于各节点逻辑时钟偏斜的差异,减小在同步周期由  $l_{k-1}$  到  $l_k$  运行过程中积累更大的逻辑时钟偏移差值,此时本文只要针对逻辑时钟偏移设计补偿量,便可在有限时间内实现逻辑时钟同步。

本文考虑静态无线传感器网络,网络中的节点不具有随机移动性,但是该网络的通信拓扑可以是动态变化的。考虑一个由  $N$  个节点组成的网络,将每一时刻的动态无线传感器网络构建成一个无向图  $G=(V,E,A)$ ,其中  $V=\{v_1, v_2, \dots, v_N\}$  是传感器节点的集合,  $E \subseteq v_i \times v_j$  为所有时刻能够通信的边的集合,  $A=[a_{ij}]$  为图  $G$  的邻接矩阵,若  $(v_i, v_j) \in E$ ,则对应的有  $a_{ij} > 0$ ,否则  $a_{ij} = 0$ 。节点  $i \in V$  的邻居节点的集合表示为  $N_i = \{v_j \in V: (v_i, v_j) \in E\}$ ,  $|N_i|$  表示集合  $N_i$  中的节点个数。

**定理** 假设由  $N$  个无线传感器节点组成的一个无向连通网络  $G$ ,采用如下的分布式控制方案:

$$\begin{aligned} u_i(l_{k-1}) &= \varepsilon \gamma_i(l_{k-1})[(1-w_i)(\hat{\theta}_{\max}(l_{k-1}|l_{k-1}) - \hat{\theta}_i(l_{k-1}|l_{k-1})) + \\ &w_i \sum_{\substack{j \in N_i \\ j \neq \max}} (\hat{\theta}_j(l_{k-1}|l_{k-1}) - \hat{\theta}_i(l_{k-1}|l_{k-1}))] \end{aligned} \quad (23)$$

其中:  $\varepsilon \in (0, \frac{1}{d_{\max}})$ ,  $d_{\max} = \max l_{ii}$  表示图  $G$  的最大出度,  $l_{ii} = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^N a_{im}$ ;  $w_i$  为一个很小的权重系数;在节点  $i$  的邻居节点和节点  $i$  组成的子系统中最大的状态值为  $\hat{\theta}_{\max}(k-1|k-1) = \max_{j \in N_i} \{\hat{\theta}_j(k-1|k-1)\}$ ;筛选系数  $\gamma_i$  的取值按照如下规则:

$$\gamma_i(l_{k-1}) = \begin{cases} 1 & \hat{\theta}_i(l_{k-1}|l_{k-1}) \leq \hat{\theta}_{\max}(l_{k-1}|l_{k-1}) \\ 0 & \hat{\theta}_i(l_{k-1}|l_{k-1}) > \hat{\theta}_{\max}(l_{k-1}|l_{k-1}) \end{cases}$$

则图  $G$  的所有节点取得全局最大一致性,算法收敛。

**证明** 由于通信链路存在有限的光谱、时变的信道增益和信道干扰等因素,无线网络是不可靠的通信网络。数据包在基于无线网络传输时,由于冲突和传输错误而导致数据包丢失,所以每一时刻通信拓扑是变化的,定义  $l_{k-1}$  时刻的 Laplacian 矩阵为<sup>[22]</sup>

$$L_{l_{k-1}} = D_{l_{k-1}} - A_{l_{k-1}} \quad (24)$$

其中:  $A_{l_{k-1}}$  为  $l_{k-1}$  时刻对应的通信拓扑邻接矩阵,取值规则如下:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1-w_i & (v_i, v_j) \in E \text{ 且与节点 } \max \text{ 相连} \\ w_i & (v_i, v_j) \in E \text{ 但不与节点 } \max \text{ 相连} \\ 0 & (v_i, v_j) \notin E \end{cases}$$

$$D_{l_{k-1}} = \text{diag}\{[(1-w_i) + (|N_i|-1)w_i], [(1-w_i) + (|N_2|-1)w_i], \dots, [(1-w_i) + (|N_N|-1)w_i]\}$$

对于网络  $G$  中的每个节点均采用式(23)控制方案,则全网络的节点时钟偏移补偿量可表示为

$$u(l_{k-1}) = -\hat{L}_{l_{k-1}}\hat{x}(l_{k-1}|l_{k-1}) \quad (25)$$

其中:  $u(l_{k-1}) = [u_1(l_{k-1}), u_2(l_{k-1}), \dots, u_N(l_{k-1})]^T$ ;  $\hat{L}_{l_{k-1}} = \gamma(l_{k-1})L_{l_{k-1}}$ ;  $\gamma(l_{k-1}) = \text{diag}\{\gamma_1(l_{k-1}), \gamma_2(l_{k-1}), \dots, \gamma_N(l_{k-1})\}$

$(l_{k-1})\}$ 。

定义全网节点间逻辑  $l_k$  时刻时钟读数的全局平均时钟同步误差为<sup>[16]</sup>

$$V(l_k) = \|\mathbf{e}\hat{\theta}(l_k)\|^2 \quad (26)$$

其中:  $\|\cdot\|$  为向量的 2-范数;  $\mathbf{e} = \mathbf{I} - \frac{1}{n} \mathbf{1} \cdot \mathbf{1}^T \in \mathbb{R}^{N \times N}$ ,  $\mathbf{1} = (1, 1, \dots, 1)^T$ ;  $\hat{\theta}(l_k) = [\hat{\theta}_1(l_k), \hat{\theta}_2(l_k), \dots, \hat{\theta}_N(l_k)]^T$ ;  $\mathbf{0} = (0, 0, \dots, 0)^T$ ;  $\mathbf{I}$  是一个合适维度的单位矩阵, 并且对于  $\mathbf{e}$  有  $\mathbf{e}^T = \mathbf{e}$ ,  $\mathbf{e}^T \mathbf{e} = \mathbf{e}$  和  $\mathbf{e} \mathbf{1} = \mathbf{0}$ 。

由于  $\hat{\theta}(l_k)$  是一个受噪声  $w_{i,\beta}(l_k)$  和  $v_i(l_k)$  影响的值, 为了方便讨论, 本文讨论平均意义下的  $EV(l_k)$  的收敛特性, 则相邻两同步周期期间的同步误差的差值为

$$\begin{aligned} \delta V(l_k) &= EV(l_k) - EV(l_{k-1}) = \\ & 2\hat{\theta}(l_{k-1}|l_{k-1})\mathbf{e}\mathbf{b} - 2\mathbf{e}\hat{\theta}^T(l_{k-1}|l_{k-1})\mathbf{e}\hat{\mathbf{L}}_{l_{k-1}}\hat{\theta}(l_{k-1}|l_{k-1}) + \\ & \mathbf{b}^T\mathbf{e}\mathbf{b} - 2\mathbf{e}\mathbf{b}^T\mathbf{e}\hat{\mathbf{L}}_{l_{k-1}}\hat{\theta}(l_{k-1}|l_{k-1}) + \mathbf{e}^2\hat{\theta}^T(l_{k-1}|l_{k-1})\hat{\mathbf{L}}_{l_{k-1}}^T\mathbf{e}\hat{\mathbf{L}}_{l_{k-1}}\hat{\theta}(l_{k-1}|l_{k-1}) \end{aligned} \quad (27)$$

由  $\mathbf{P}_e = \mathbf{I} - \mathbf{e}\mathbf{L}_{l_{k-1}}$  为正定矩阵<sup>[22]</sup> 和  $\mathbf{e}$  的相关性质可得

$$\begin{aligned} \delta V(l_k) &= -2\mathbf{e}\hat{\theta}^T(l_{k-1}|l_{k-1})\mathbf{e}\hat{\mathbf{L}}_{l_{k-1}}\hat{\theta}(l_{k-1}|l_{k-1}) + \\ & \mathbf{e}^2\hat{\theta}^T(l_{k-1}|l_{k-1})\hat{\mathbf{L}}_{l_{k-1}}^T\mathbf{e}\hat{\mathbf{L}}_{l_{k-1}}\hat{\theta}(l_{k-1}|l_{k-1}) < \\ & -\mathbf{e}\hat{\theta}^T(l_{k-1}|l_{k-1})\hat{\mathbf{L}}_{l_{k-1}}^T\mathbf{e}\hat{\mathbf{L}}_{l_{k-1}}\hat{\theta}(l_{k-1}|l_{k-1}) < 0 \end{aligned} \quad (28)$$

则全网节点间的时钟偏移差值是不断减小的, 因此在控制方案式(23)下, 全网节点达到时钟同步。通过分析控制方案式(23)可知, 随着同步过程的进行, 以各节点为中心的子系统的局部最大状态会不断更新, 并且至少存在一个全局时钟偏移最大的节点。令  $E_{\max}(l_k)$  表示  $l_k$  时刻已和全局时钟偏移最大的节点完成同步的节点集合, 显然  $E_{\max}(l_0) \neq \emptyset$ 。定义函数  $\text{Cnt}(l_k)$  为  $l_k$  时刻集合  $E_{\max}(l_k)$  中节点的个数, 对于节点  $i \in E_{\max}(l_k)$ , 在采用控制方案(23)后, 有  $u_i(l_{k-1}) = 0$ , 该节点保持其自身时钟不变, 这意味着  $\text{Cnt}(l_k)$  是非减的。

综上所述, 节点间的时钟偏移差值在不断减小, 并且  $\text{Cnt}(l_k)$  是非减的, 则图  $G$  的所有节点收敛到全局最大时钟偏移值, 证毕。

至此, 本文已经完全设计了基于卡尔曼滤波的最大一致性时钟同步算法(KF-MTS), 如算法 1 所示。

#### 算法 1 基于参数追踪的一致性时钟同步算法 KF-MTS

1 逻辑时钟进程启动, 初始化参数: 初始化时钟参数估计值  $\hat{x}_i(l_0|l_0)$ , 误差协方差阵  $\mathbf{P}_{N[i]}(l_0|l_0)$ , 逻辑偏斜校正系数  $\alpha_i(l_0) = 1$  和初始补偿量  $u_i(l_0|l_0) = 0$ 。

2 for  $k = 1, 2, \dots$ , do

  预测步:

  计算  $\hat{x}_i(l_k|l_{k-1}) = \mathbf{A}_i(l_{k-1})\hat{x}_i(l_{k-1}|l_{k-1}) + \mathbf{B}u_i(l_{k-1})$ ,  $\mathbf{P}_i(l_k|l_{k-1}) = \mathbf{A}_i(l_{k-1})\mathbf{P}_i(l_{k-1}|l_{k-1})\mathbf{A}_i^T(l_{k-1}) + \mathbf{Q}$  和  $\mathbf{K}_i(k) = \mathbf{P}_i(l_k|l_{k-1})\mathbf{c}^T[\mathbf{R} + \mathbf{c}\mathbf{P}_i(l_k|l_{k-1})\mathbf{c}^T]^{-1}$ ;

  更新步:

  计算  $\hat{x}_i(l_k|l_k) = \hat{x}_i(l_k|l_{k-1}) + \mathbf{K}_i(l_k)[\hat{\theta}_i(l_k) - \mathbf{c}\hat{x}_i(l_k|l_{k-1})]$  和  $\mathbf{P}_i(l_k|l_k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_i(l_k)\mathbf{c}]\mathbf{P}_i(l_k|l_{k-1})$ ;

  广播  $\hat{x}_i(l_k|l_k)$  给邻居节点  $j$ ;

  计算  $\alpha_i(l_k) = \frac{1}{\hat{\beta}_i(l_k|l_k)}$  和  $u_i(l_k)$ ;

6 end for

## 4 仿真分析

本章将对本文提出的基于本地逻辑时钟模型进行时钟参

数追踪的有效性以及对提出的时钟同步算法作相关对比仿真验证。考虑到仿真软件的经济性和友好性, 选择已经广泛使用并得到高度认可的 OMNeT++ 4.6 软件作为建模及仿真平台。为弥补 OMNeT++ 矩阵相关计算缺陷, 本文将 OMNeT++ 的数据传递给 MATLAB 软件, 来辅助进行计算方面的工作。本章接下来所有的实验均在基于 OMNeT++ 和 MATLAB 的联合仿真平台上进行。本文设置的仿真参数, 如表 1 所示, 初始时钟偏斜和偏移在给定范围内随机选取, 其余未列出参数将在后续进行说明。

表 1 参数初始化列表

参数名	参数符号	参数值
同步周期	$\tau_0$	0.1
初始时钟偏斜	$\beta_0^i$	[0.99995 ~ 1.00005]
初始时钟偏移	$\theta_0^i$	[0 ~ 50]
初始估计时钟参数	$\hat{x}_i(l_0 l_0)$	[1; 0]
初始误差协方差矩阵	$\mathbf{P}_{N[i]}(l_0 l_0)$	100
观测噪声均值	$\mu$	$1.5 \times 10^{-5}$
观测噪声方差	$\sigma_v^2$	$5 \times 10^{-6}$
偏斜噪声	$\sigma_{\beta_i}^2$	$2.7 \times 10^{-15}$
控制权重	$w_i$	0.001

本文考虑如图 1 所示网络拓扑结构, 由 100 个节点组成, 其中节点 1 具有初始最大时钟读数, 这就意味着在随后的同步过程中, 节点 1 保持自身时钟读数不变, 将节点 1 称之为初始参考节点, 即初始情况下有  $\text{Cnt}(l_0) = 1$ 。本文接下来所做的实验均基于如图 1 所示拓扑, 并且在其他对比算法中也保持  $\text{Cnt}(l_0) = 1$ 。

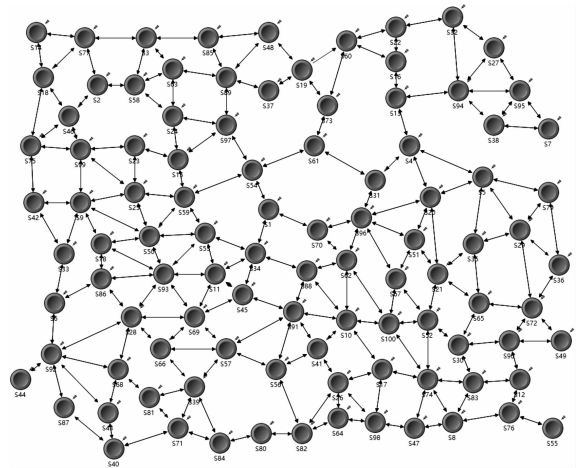


图 1 100 节点网络拓扑结构

由于本文的时钟同步算法依赖于对底层硬件时钟参数的准确估计, 时钟参数追踪的精确度本文采用同步均方根误差的平均值(root average mean squared error, RAMSE)来进行衡量:

$$\text{RAMSE}(\zeta(l_k)) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{\zeta}_i(l_k) - \zeta_i(l_k))^2} \quad (29)$$

其中:  $\hat{\zeta} \in \{\hat{\beta}, \hat{\theta}\}$ ,  $\zeta \in \{\beta, \theta\}$ ,  $N$  为图  $G$  中节点个数;  $\hat{\zeta}_i(l_k) - \zeta_i(l_k)$  反映了估计值与真值之间的偏差, 即估计误差。

图 2 绘出了全网节点间的 RAMSE 值的收敛情况, 在第 1 步的时候, 立即进行卡尔曼滤波, 随着迭代的进行, 时钟偏移和时钟偏斜的 RAMSE 逐渐下降, 分别在第 12 步和第 30 步左右达到稳态。为了给本文的滤波性能提供一个基准, 图 2 中用点 \* 分别绘出了时钟偏斜和时钟偏移的克拉美罗下界(Cramer Rao-Lower bound, CRLB)。从图 2 中可明显地看到对于时钟偏斜的 RAMSE 能够基本和 CRLB 重合, 而对于时钟偏移虽然一开始 RAMSE 略高于 CRLB 下界, 但在随后的第 10 步, RAMSE



基本和 CRLB 重合,说明在本文的卡尔曼滤波能够较理想地获得底层硬件时钟参数。

硬件时钟参数的获取仅作为本文同步算法的基础,为了衡量时钟同步性能,本文考虑时钟同步误差的度量主要用式(26)来评价<sup>[16,23]</sup>, $V(l_k)$ 的值越接近0,则表明时钟同步误差越小。当 $V(l_k)$ 达到稳定后,即保持在一定范围内波动,此时迭代步 $l_k$ 反映了时钟同步的速度。图3反映了本文 KF-MTS 和 WMTS 算法全局平均时钟同步误差的对比情况,在每一个同步周期中间各节点逻辑时钟计时 100 次,即 $\Delta = 100$ ,共运行 40 次同步过程,其中在第 1~99 步期间由于各节点刚初始化且未运行同步算法,为了体现本文的算法的性能,各节点初始时钟偏移最大差值为 50,导致在第 1~99 步期间全局平均时钟同步误差增长到一个很大的值。随着后续同步算法 KF-MTS 的运行,节点间的全局平均时钟同步误差逐渐降低,在第 19 步的时候达到稳定,并保持在 $10^{-10}$ 附近波动。对于 WMTS 算法,从图3中可以看到,全局平均同步误差下降速度明显低于本文算法,最终在第 31 步左右稳定在 $10^{-9}$ 附近,较本文算法高出一个量级。

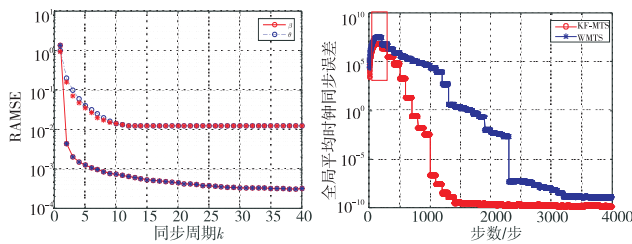


图2 100节点网络拓扑下的 RMSE

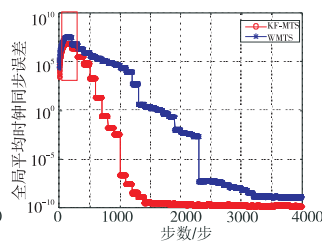


图3 全局平均时钟同步误差

图4反映了每个同步周期过程中时钟读数的变化情况,即节点间时钟读数的收敛趋势,每一次同步过程均会有节点 $i \in E_{\max}(l_k)$ 的邻居节点达到 $l_k$ 时刻的最大时钟读数,即 $\text{Cnt}(l_k) > \text{Cnt}(l_{k-1})$ ,最终在第 19 步的时候时钟读数基本达到一致,且收敛到最大,这同图3中 KF-MTS 在第 19 步平均同步误差达到稳定也是吻合的。

将 1 bit 数据传输 100 m 至少需要消耗 3 J 的能量,相当于执行 3 百万条计算指令。因此,一个成功合理的时钟同步策略应该尽可能地减少时钟信息交换数量,与此同时维持低的时钟同步误差。定义收敛后的全局平均时钟同步误差收敛均值为<sup>[17]</sup>

$$\bar{\theta}_i = \frac{1}{m-l+1} \sum_{k=l}^m \bar{\theta}(l_k) \quad (30)$$

其中: $m$ 表示每一次实验同步了 $m$ 次; $l$ 表示在该轮同步周期中 $\bar{\theta}(l_k)$ 在第 $l$ 步后达到一定范围内波动,并此后一直保持在该范围内波动; $M$ 表示经过 $M$ 次实验。为了尽可能体现同步周期对收敛均值的影响,排除随机噪声的影响, $M$ 应取较大的数。

图5反映了在不同同步周期下全局平均时钟同步误差收敛均值变化情况,实验次数 $M = 100$ 。当 $\Delta$ 从 200 过渡到 250 时,全局平均时钟同步误差收敛均值曲线呈下降趋势,这主要是由于全局平均时钟同步误差收敛均值是受同步周期和初始状态参数的综合影响,源于本文时钟偏斜在给定范围内随机取值,显然该过程具有一定的随机性质,当各节点间拥有更为相近的初始时钟偏斜,在启动同步算法后,虽然由于噪声的影响仍然会带来一定程度的时钟偏斜偏差的存在,但是会减缓时钟偏移的变化速率,此时虽然同步周期过大,却可能拥有更低的同步误差收敛均值。但是,整体上全局平均时钟同步误差收敛均值与同步周期成正比,即同步周期的延长会降低时钟同步算

法的性能。需要注意到,过小的同步周期对于减小同步误差可能效果并不明显,但却会消耗节点过多的资源,而过大的同步周期却可能导致算法达不到预期同步误差需求,因此,需要合理的选择同步周期。图5可作为同步周期选择指导,例如当全局平均时钟同步误差需要达到 $10^{-10}$ 量级,则在能耗和同步周期的权衡下应选择 $\Delta = 100$ 。

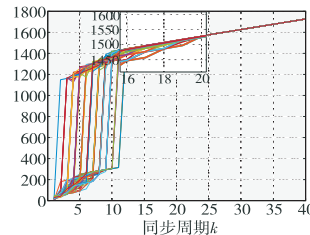


图4 逻辑时钟读数

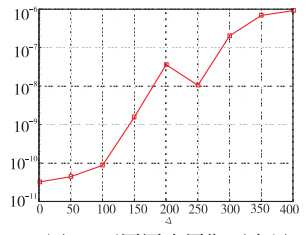


图5 不同同步周期下全局平均时钟同步误差收敛均值

## 5 结束语

本文根据时钟同步的非线性描述和晶振规律的演化,建立了时钟同步状态空间模型,提出了基于卡尔曼滤波的分布式最大一致性时钟同步算法,该算法估计部分的设计采用卡尔曼滤波算法,通过极小值存在的必要条件,并应用矩阵微分运算法则,得到分布式最优卡尔曼滤波增益。在获得底层硬件时钟参数的基础上,本文设计采用利于分布式扩展的最大一致性算法,提高时钟同步的精度,加快时钟同步的收敛速度,在理论上给出了算法的收敛证明。本文通过仿真进一步验证了本文相关理论的正确性,降低了无线传感网络中全局平均时钟同步误差,且该方法更加可靠、稳定。

本文对基于卡尔曼滤波的分布式最大一致性时钟同步算法进行了大量仿真实验,但是在通过网络交换数据包时,本文简单的假设邻居通信拓扑是变化的一类情况,未能考虑极限情况下非完全联通网络下算法的鲁棒性能,这也是本文后续研究的焦点。显然,这必将更具有理论研究和实际运用价值。

## 参考文献:

- [1] Farooqi A H, Khan F A. Intrusion detection systems for wireless sensor networks: a survey [J]. *International Journal of Ad hoc & Ubiquitous Computing*, 2009, 56(2): 234-241.
- [2] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey [J]. *Computer Networks the International Journal of Computer & Telecommunications Networking*, 2008, 52(12): 2292-2330.
- [3] Liao Chenda, Barooah P. DiSync: accurate distributed clock synchronization in mobile Ad hoc networks from noisy difference measurements [C]//Proc of ACC. Washington DC: IEEE Press, 2013: 3332-3337.
- [4] 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.
- [5] 汪付强, 曾鹏, 于海斌, 等. 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.
- [6] Sichitiu M L, Veerarittiphan C. Simple, accurate time synchronization for wireless sensor networks [C]//Proc of Wireless Communications & Networking. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2003: 1266-1273.
- [7] 陶志勇, 胡明. 基于等级层次结构的 TPSN 算法改进 [J]. *传感技术学报*, 2012, 25(5): 691-695.
- [8] 张春梅, 白凤山, 王平, 等. 一种改进的 TPSN 时间同步算法的实现 [J]. *内蒙古大学学报: 自然科学版*, 2013, 44(3): 316-319.

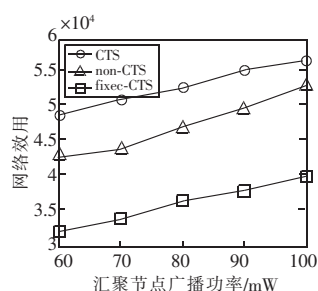


图7 汇聚节点广播功率与网络效用的关系

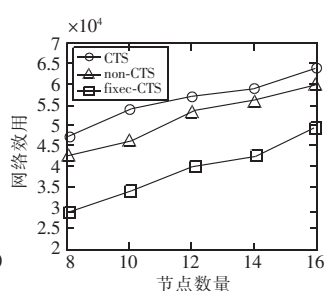


图8 节点数量与网络效用的关系

## 6 结束语

本文针对无线充电传感器网络,提出了一种基于基于SWIPT的协作传输协议(CTS),利用无线信息和能量的协作传输来提高无线能量传输的效率。并为CTS设计了一个资源分配策略的优化问题,进而提出迭代式的RAPOA算法来求解问题。仿真实验表明,CTS提高了无线充电传感器网络的能量传输效率。

## 参考文献:

- [1] Lin K, Yu J, Hsu J, *et al.* Helimote: Enabling long-lived sensor networks through solar energy harvesting [C]//Proc of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press, 2005: 309.
- [2] Yang Shusen, Yang Xinyu, McCann J A, *et al.* Distributed networking in autonomic solar powered wireless sensor networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31 (12): 750-761.
- [3] Tong Bin, Li Zi, Wang Guiling, *et al.* How wireless power charging technology affects sensor network deployment and routing [C]//Proc of the 30th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems. 2010: 438-447.
- [4] Doost R, Chowdhury K R, Felice M D. Routing and link layer protocol design for sensor networks with wireless energy transfer [C]//Proc of IEEE Global Telecommunications Conference. 2010: 1-5.
- [5] Ajmal T, Jazani D, Allen B. Design of a compact RF energy harvester for wireless sensor networks [C]//Proc of IET Conference on Wireless Sensor Systems. 2012: 1-5.
- [6] Guo Songtao, Wang Cong, Yang Yuanyuan. Joint mobile data gathering and energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks [J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2014, 13 (12): 2836-2852.
- [7] 徐新黎, 皇甫晓洁, 王万良, 等. 基于无线充电的 Sink 轨迹固定 WSN 路由算法 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37 (3): 570-578.
- [8] Peng Yang, Li Zi, Zhang Wensheng, *et al.* Prolonging sensor network lifetime through wireless charging [C]//Proc of the 31st IEEE Real-Time Systems Symposium. 2010: 129-139.
- [9] Xie Liguang, Shi Yi, Hou Y T, *et al.* Making sensor networks immortal: an energy-renewal approach with wireless power transfer [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2012, 20 (6): 1748-1761.
- [10] 戴东海, 冯辉, 杨涛, 等. 无线充电 WSN 中低维护频率的路由与能量补充策略 [J]. *传感技术学报*, 2014, 27 (10): 1394-1400.
- [11] Zhou Xun, Zhang Rui, Ho C K. Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff [J]. *IEEE Trans on Communications*, 2013, 61 (11): 4754-4767.
- [12] Guo Songtao, Wang Fei, Yang Yuanyuan, *et al.* Energy-efficient cooperative transmission for simultaneous wireless information and power transfer in clustered wireless sensor networks [J]. *IEEE Trans on Communications*, 2015, 63 (11): 4405-4417.
- [13] Karp B, Kung H T. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks [C]//Proc of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. 2000: 243-254.
- [14] Kansal A, Hsu J, Zahedi S, *et al.* Power management in energy harvesting sensor networks [J]. *ACM Trans on Embedded Computing Systems*, 2007, 6 (4): Article No. 32.
- [15] Boyd S, Vandenberg L. Convex optimization [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [16] Pinho A C, Figueiredo D R, Franca F M G. A robust gradient clock synchronization algorithm for wireless sensor networks [C]//Proc of the 4th International Conference on Communication Systems and Networks. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2012: 1-10.
- [17] Wang Ting, Cai Chunyang, Guo Di, *et al.* Clock synchronization in wireless sensor networks: a new model and analysis approach based on networked control perspective [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 2014 (3): 1-19.
- [18] 曾培, 陈伟. 基于控制角度的无线传感器网络时钟同步优化算法 [J]. *计算机应用*, 2015, 35 (10): 2852-2857.
- [19] Luo Bin, Wu Y C. Distributed clock parameters tracking in wireless sensor network [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2013, 12 (12): 6464-6475.
- [20] Hamilton B R, Ma Xiaoli, Zhao Qi, *et al.* ACES: adaptive clock estimation and synchronization using Kalman filtering. [C]//Proc of the 14th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2008: 152-162.
- [21] Maggs M K, O'Keefe S G, Thiel D V. Consensus clock synchronization for wireless sensor networks [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12 (6): 2269-2277.
- [22] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2004, 49 (9): 1520-1533.
- [23] 史昕, 赵祥模, 惠飞, 等. 基于分量解耦融合的无线传感网时钟同步算法 [J]. *计算机应用*, 2014, 34 (3): 623-627.

(上接第 1483 页)

- [9] Werner-Allen G, Tewari G, Patel A, *et al.* Firefly-inspired sensor network synchronicity with realistic radio effects [C]//Proc of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press, 2005: 142-153.
- [10] Solis R, Borkar V S, Kumar P R. A new distributed time synchronization protocol for multihop wireless networks [C]//Proc of the 45th IEEE Conference on Decision and Control. 2006: 2734-2739.
- [11] Hong Y W, Scaglione A. A scalable synchronization protocol for large scale sensor networks and its applications [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23 (5): 1085-1099.
- [12] Hu A S, Servetto S D. On the scalability of cooperative time synchronization in pulse-connected networks [J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 2006, 52 (6): 2725-2748.
- [13] Schenato L, Gamba G. A distributed consensus protocol for clock synchronization in wireless sensor network [C]//Proc of the 45th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 2289-2294.
- [14] 何建平. 基于一致性的无线传感器网络时钟同步算法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [15] 李灏. 基于一致性时钟同步协议设计及实验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [16] Pinho A C, Figueiredo D R, Franca F M G. A robust gradient clock