

# 一种温度自适应无线传感网络时间同步方法\*

金梦, 陈晓江, 房鼎益, 汤战勇, 刘晨, 徐丹, 王薇

(西北大学 信息科学与技术学院, 陕西 西安 710127)

通讯作者: 陈晓江, E-mail: xjchen@nwu.edu.cn, http://219.245.18.73/cxj.html

**摘要:** 无线传感器网络节点中的廉价晶振极易受到温度、电压、湿度等工作环境因素的影响。节点晶振的这一特性,为室外大规模无线传感器网络时间同步技术带来了两方面的挑战:(1) 过高的通信开销;(2) 精度与能耗之间的不平衡。针对以上问题,提出了一种基于温度感知的、自适应的无线传感器网络时间同步算法。该算法能够依赖本地温度信息对节点时间频偏进行估计及补偿,在保证算法同步精度的同时,降低了网络通信开销。除此之外,提出一种动态同步周期调节机制,使得算法能够根据当前环境温度变化情况对节点同步周期进行动态调节,从而达到了能耗与精度之间的平衡。大量仿真实验结果表明:所提出的时间同步算法可将通信能耗降低至传统同步算法的10%;且在环境温度不断变化的情况下,80%的频偏估计值其误差小于0.5ppm。故,所提出的时间同步方法能够有效地适用于室外环境下部署的大规模无线传感器网络。

**关键词:** 时间同步;频偏估计;无线传感器网络;环境自适应;温度敏感度因子

**中图法分类号:** TP393

中文引用格式: 金梦,陈晓江,房鼎益,汤战勇,刘晨,徐丹,王薇.一种温度自适应无线传感网络时间同步方法.软件学报,2015,26(10):2667-2683. http://www.jos.org.cn/1000-9825/4792.htm

英文引用格式: Jin M, Chen XJ, Fang DY, Tang ZY, Liu C, Xu D, Wang W. Temperature-Adaptive time synchronization for wireless sensor networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2015,26(10):2667-2683 (in Chinese). http://www.jos.org.cn/1000-9825/4792.htm

## Temperature-Adaptive Time Synchronization for Wireless Sensor Networks

JIN Meng, CHEN Xiao-Jiang, FANG Ding-Yi, TANG Zhan-Yong, LIU Chen, XU Dan, WANG Wei

(School of Information and Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China)

**Abstract:** The low-cost crystal oscillators in wireless sensor networks are prone to be affected by their working conditions such as temperature, voltage, and humidity. Such problem brings two key challenges for time synchronization in wireless sensor networks (WSNs): Excessive communication overhead and the trade-off between accuracy and cost. This paper introduces a novel environment-adaptive time synchronization approach that enables nodes to estimate their clock skew by exploiting temperature information. The approach can substantially reduce communication overhead since clock skew estimation mostly relies on local information. In addition, this work proposes an environmental-adaptive interval adjustment scheme for duty-cycled clock calibration, which provides a convenient trade-off between the timing accuracy and the energy efficiency.

**Key words:** time synchronization; skew estimation; wireless sensor network; environment-adaptive; temperature sensitivity factor

具有低能耗、低功率及微型化等特点的节点组成的无线传感器网络(wireless sensor network,简称 WSN)<sup>[1]</sup>是当前的研究热点,且在环境监测、智能家居、智能交通以及医疗监控系统等应用场合中显示出巨大的应用前景<sup>[2-4]</sup>。其中,大部分无线传感器网络应用技术依赖于全网节点的时间同步,如数据融合技术、休眠调度技术<sup>[5,6]</sup>、

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61170218, 61272461, 61373177); 国家科技支撑计划(2013BAK01B02); 教育部重点支持项目(2111181)

收稿时间: 2014-08-12; 修改时间: 2014-10-09; 定稿时间: 2014-11-17

基于 TOA 的定位技术以及目标追踪等<sup>[7,8]</sup>。然而,由于节点工作环境(如工作电压、温度、湿度以及震动等)的不稳定、节点晶振老化以及节点制造工艺差别等多种因素的影响,节点晶振的实际振荡频率与其标称频率之间存在一定差别。这一现象使得全网各个节点的本地时间存在差异,这种差异被称作时间相偏(offset)。若不及时对时钟相偏进行补偿,任由其不断累积增长,会造成网络性能的急剧下降,并且最终危及到网络的正常运行。

最近的研究成果<sup>[9-11]</sup>表明,传感器节点的廉价设计使得其晶振极易受到所处环境温度的影响。并且,无线传感器网络通常部署于室外环境中,温度敏感的特性使得节点晶振频率会随着环境温度的动态变化变得极不稳定。这为室外环境下大规模传感器网络时间同步带来了两个严重问题:(1) 过高的通信开销;(2) 精度与能耗之间的不平衡。

- 通信开销过高问题

室外环境下节点晶振的不稳定性迫使节点必须频繁地进行时钟相偏的估计以及补偿,以保证较高的时间同步精度。然而,当今大多数时间同步算法的相偏估计过程主要依赖于节点间频繁的时间戳交换,如 RBS<sup>[12]</sup>,TPSN<sup>[13]</sup>,FTSP<sup>[14]</sup>等。Pottie 等人<sup>[15]</sup>指出:当传输距离大于 100m 时,传感器节点每发送 1bit 数据的能耗相当于执行 300 万条指令。因此,这种依赖于时间戳交换的时间同步方法势必会造成节点能量的迅速流失;并且随着网络规模的不断增大,时间戳交换数量将会呈指数方式增长。因此,该方法最终会缩短网络生命周期。

- 精度与能耗之间的不平衡

现有的时间同步算法通常使用固定同步周期来对节点频偏及相偏进行更新。虽然这种固定周期的同步方式能够满足大多数网络应用的同步精度需求,但却无法使得能量被高效利用:首先,由于传感器节点通常被部署在室外环境中,室外温度的动态变化使得节点频偏在不同时间段内呈现出不同的变化模式,而不同频偏变化模式下所需要的频偏估计频率不同;其次,在无线传感器中通常存在多个应用,如节点休眠调度、目标追踪等,这些应用对时间同步的精度要求也各不相同。因此,为了高效地满足不同环境、不同应用下节点的时间同步需求,采用自适应的、动态变化的同步周期是一个很好的选择。

为了解决通信开销过高的问题,Yang 等人<sup>[9]</sup>提出了利用温度信息进行传感器网络时间同步的方法 EACS。这种同步方法在节点部署之前,通过大量实验为每个节点获得“温度-频偏”映射表。在同步过程中,该方法完全依赖于映射表进行同步,无需时间戳交换过程,因此有效地降低了通信开销。然而,这种方法存在以下两方面问题:

- (1) 无线传感器网络通常由成百上千个节点组成,在部署前为每个节点获得“温度-频偏”映射表格,会耗费大量人力物力。因此,该方法仅适用于小规模传感器网络;
- (2) 该方法假设“温度-频偏”映射关系不会随着时间变化,在同步过程中完全依赖于部署前获得的映射表进行同步。然而这种假设并不成立,因此,该方法会带来较高的同步误差。

针对以上问题,本文提出一种基于温度感知的、自适应的无线传感器网络时间同步算法。该算法能够对频偏与温度之间的关系进行动态估计及更新,并依赖该关系以及本地温度信息进行时钟频偏的估计及补偿,从而在很大程度上降低了通信开销。除此之外,本文还提出了一种动态同步周期调节机制。该机制能够根据当前温度变化情况对时间同步周期进行调节,因此使得节点能够在满足特定同步精度的前提下,尽可能地减少能量消耗,从而达到能耗和精度的平衡。本文工作的主要贡献体现在以下几个方面:

- (1) 根据频偏与温度之间的关系,本文提出了“温度敏感度因子(temperature sensitivity factor,简称 TSF)”,并对其进行周期性的估计。与 Yang 等人提出的“温度-频偏”映射表相比,TSF 能够更准确地描述温度频偏关系的动态变化,从而提高了时间同步精度。除此之外,TSF 的提出,使得频偏估计不再依赖于先验知识,因此避免了部署前的大量实验;
- (2) 基于 TSF,本文提出了一种能量有效的分步时间同步算法 TSFB(TSF based synchronization approach)。TSFB 在进行频偏估计以及补偿的过程中仅仅依赖于 TSF 以及当前温度信息,几乎不需要进行时间戳的交换。因此显著降低了通信开销。除此之外,由于 TSFB 算法对节点之间的相互通信依赖较低,因此能够适应野外恶劣环境造成的节点通信失效的情况,有较高的鲁棒性;
- (3) 本文提出了一种动态周期调节机制,该机制能够根据当前同步误差累积情况以及温度变化情况动态

调节 TSF 估计周期,使得同步能耗与同步精度相平衡.除此之外,该机制能够根据应用需求对不同节点的同步精度进行设置,使得 TSFB 方法适用于不同的应用需求.实验结果表明:在平均同步周期相同的情况下,适用动态周期的 TSFB 方法与适用固定周期的 TSFB 方法相比,同步误差降低了 10%.

本文进行了大量的仿真实验,其结果表明:TSFB 方法可将通信能耗降低至传统基于时戳交换的同步算法的 10%;且在环境温度不断变化的情况下,80%的频偏估计值其误差小于 0.5ppm.而 EACS 算法则有将近 20%的频偏估计值的误差大于 2.5ppm.

## 1 相关工作

无线传感器网络时间同步研究大致经历了 3 个阶段.早期提出的同步算法致力于提高同步精度.它们主要依赖于节点间的时间戳交换来获得时钟频偏时钟相偏等信息,并通过分析节点的通信传输延迟提高时间戳标记的准确度,减少了延迟不确定性对时间同步精度的不利影响,并在此基础上构造如生成树等集中式、平面型路由结构来向节点发送包含网络参考时间的同步消息,从而实现全网同步.比较著名的基于时戳交换的时间同步算法包括:

- 1) 采用接收者-接受者同步模式的 RBS(reference broadcast synchronization)<sup>[12]</sup>算法,该算法利用无线信号的广播特性消除了发送端延迟为同步精度带来的影响;
- 2) 改良自 NTP 协议的 TPSN(timing-sync protocol for sensor networks)<sup>[13]</sup>算法,该算法采用双向时戳交换机制,消除了时戳的传输延迟,同时采用 MAC 层时戳标志机制消除了其余网络延迟带来的影响;
- 3) 基于洪范路由的 FTSP(the flooding time synchronization protocol)<sup>[14]</sup>算法,该方法采用多时戳机制来防止中断处理过程中的抖动给同步精度带来的影响.

然而以上提出的时间同步算法主要是从降低同步过程中时间戳的传输延迟的角度来提升同步精度,它们并没有对造成时间同步的主要原因——时钟频偏进行深入的研究.

为了更有效地提升同步精度,研究人员开始研究节点时钟频偏的变化规律.起初,许多同步方法<sup>[16,17]</sup>用恒定频偏模型(constant-skew model)来描述时钟频偏,并利用线性回归分析对节点时钟频偏进行估计;随后,考虑到节点时钟频偏的不可预测性以及其变化范围的局限性,更多的算法<sup>[18,19]</sup>采用限定频偏模型(bounded-skew model)来描述时钟频偏.然而,由于该模型过高地估计了时钟频偏的不稳定性,因此导致了其过高的算法复杂度以及能耗.为了解决这一问题,Hamilton<sup>[20]</sup>,Liu<sup>[21]</sup>以及 Yang<sup>[9]</sup>等人通过对时钟频偏的变化规律进行分析,提出了用“双模型”来描述时钟频偏的思想,即,认为时钟频偏会由于环境以及老化等因素在恒定频偏模型以及匀速模型(constant-rate skew model)之间发生变化,并利用卡尔曼滤波来对这种变化进行追踪,最终实现对时钟频偏的高精度估计.

以上提出的时间同步算法均采用基于时戳交换的频偏估计机制,然而与传统的网络不同,无线传感器网络为能源有限型网络,频繁的时戳交换会导致过高的通信开销,最终影响网络生命周期.为了解决这一问题,研究者在同步过程中引入外部辅助信息来减少甚至消除时戳交换带来的通信开销.外部信息的形式分为两种:(1) 周期性外部信号;(2) 环境信息.对于利用周期性外部信号的同步方法,它们将该外部信号看作参考量,并通过对该信号进行采集来获取频率信息,依赖该频率信息进行时钟频偏的估计以及补偿,其中,具有代表性的信号有交流电信号<sup>[22]</sup>、FM 广播信号<sup>[23]</sup>、WIFI 信号<sup>[24]</sup>以及日光灯信号<sup>[25]</sup>等.然而,传感器网络大多部署在以上信号无法覆盖的野外环境,因此,Schmid<sup>[10]</sup>,Yang<sup>[9]</sup>以及 Castillo-Secilla<sup>[11]</sup>等人提出了适用于野外恶劣环境的传感器网络同步方法——基于环境感知的时间同步方法.该类方法主要利用传感器节点晶振频率极易受到工作环境温度影响的特点,在节点部署前或同步过程中对节点频偏与其所处环境温度的相关性进行分析,并将相关关系以表格的方式存储在节点内,在同步过程中,依赖该表格以及当前温度信息进行频偏估计.由于这两种方法主要依赖于本地信息对频偏进行估计以及补偿,很大程度上降低了通信开销.然而,这类方法过分依赖于先验知识,在网络部署之前需要通过大量实验为每个节点获取“温度-频偏”映射表,因此限制了网络规模.同时,完全依赖于先验知识会导致过高的同步误差.

综上所述,无线传感器网络时间同步技术研究已经受到广泛的关注,并取得了一定成果.但目前,已有的同步方法仍然无法解决大规模野外环境下无线传感器网络的两个关键问题:(1) 过高的通信开销;(2) 精度与能耗之间的不平衡.

## 2 时钟偏移与时钟同步模型

### 2.1 相偏与频偏

相偏与频偏是描述两个节点时钟不同步程度的两个重要参数,相偏和频偏越大,表示两个节点不同步程度越严重.

- 相偏:将节点在真实时间  $t$  时刻的本地时间记作  $C_A(t)$ .由于环境、节点老化以及制作工艺等因素的影响,节点  $A$  的本地时间  $C_A(t)$  与真实时间  $t$  不同.这里记节点  $A$  在真实时间  $t$  的时间相偏为  $\theta_A(t)$ ,则有:

$$\theta_A(t) = C_A(t) - t \tag{1}$$

- 频偏:节点频偏是节点相偏的变化速率,主要反映了节点频率与标称频率的差别.节点频偏是导致节点间时间不同步的本质原因.将节点  $A$  在真实时间  $t$  的时间频偏记作  $\alpha_A(t)$ ,则有:

$$\alpha_A(t) = \frac{\theta_A(t + \tau) - \theta_A(t)}{\tau} \tag{2}$$

其中,  $\tau$  为采样间隔.

### 2.2 基于时戳交换的频偏估计方法

在传统时间同步方法中,节点的时间频偏可以通过与参考节点进行时间戳交换来获得,这里将参考节点的时间看作标准时间.假设需要获得节点  $A$  相对于节点  $B$  (参考节点) 的时间频偏,因此需要由节点  $A$  周期性地向节点  $B$  发送时间戳,如图 1 所示,节点  $A$  在时间  $C_A(t_0)$  和  $C_A(t_1)$  分别向节点  $B$  发送两个时间戳,时间戳中包含了节点  $A$  发送该时间戳的时间.

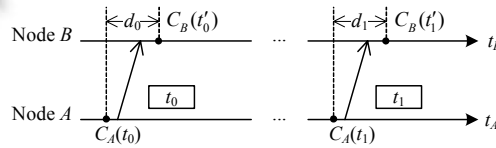


Fig.1 Timestamps exchange  
图 1 节点之间时戳交换示意图

节点  $B$  分别在时间  $C_B(t'_0)$  和  $C_B(t'_1)$  收到了来自节点  $A$  的时间戳,因此,节点  $B$  可获得以下两条信息:

- 1) 在  $t_1 - t_0$  时间段内,节点  $A$  测量到的时间间隔为  $C_A(t_1) - C_A(t_0)$ ;
- 2) 在  $t'_1 - t'_0$  时间段内,节点  $B$  测量到的时间间隔为  $C_B(t'_1) - C_B(t'_0)$ .

这里,将节点  $B$  看作标准时间,则可获得节点  $A$  相对于节点  $B$  在  $t_0$  及  $t_1$  时刻的相偏分别为

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_{A,B}(t_0) &= C_A(t_0) - C_B(t'_0) \\ \hat{\theta}_{A,B}(t_1) &= C_A(t_1) - C_B(t'_1) \end{aligned} \tag{3}$$

$$\hat{\alpha}_{A,B}(t_1) = \frac{\theta_{A,B}(t_1) - \theta_{A,B}(t_0)}{C_B(t'_1) - C_B(t'_0)} = \frac{(C_A(t_1) - C_A(t_0)) - (C_B(t'_1) - C_B(t'_0))}{C_B(t'_1) - C_B(t'_0)} \tag{4}$$

采用这种方法获得的时间相偏包含了传输延迟带来的误差,如图 1 所示的  $d_0$  和  $d_1$ .这里,将传输延迟误差记作  $d$ ,且将  $d$  看作是高斯噪声:

$$d \sim N(\mu_d, \sigma_d^2),$$

其中,  $\mu_d$  以及  $2\sigma_d^2$  是由硬件或软件性能决定的,可通过实验获得.

### 2.3 温度敏感度因子TSF

在节点制作工艺以及节点老化等因素的影响下,节点晶振的实际输出频率与其标称频率存在差异.除此之外,根据文献[9-11],节点晶振输出频率会随着其所处环境温度的变化而变化,该变化规律主要表现为一个二次函数(如公式(5)及图 2 所示).晶振的这一特性导致了其输出频率的不稳定性,给节点时钟同步带来了严峻挑战.

$$f(t)=f_0(1-k(T(t)-T_0)^2) \tag{5}$$

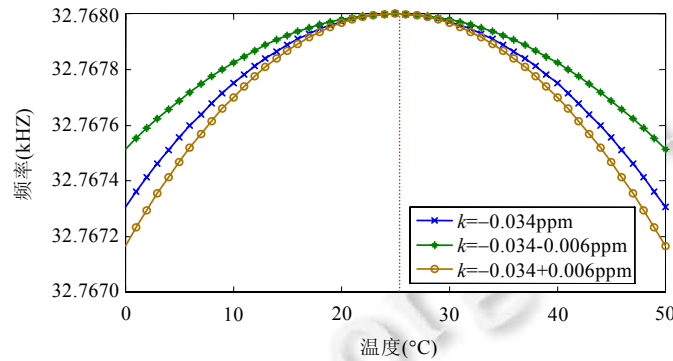


Fig.2 Clock skew v.s. temperature

图 2 温度-频率变化趋势示意图

公式(5)中: $f(t)$ 代表当前节点输出频率; $f_0$ 代表标称频率; $k$ 代表温度系数,即,频偏对温度的敏感度,反映了节点晶振当前的稳定程度<sup>[26,27]</sup>,在通常情况下, $k=-0.034\pm 0.006\text{ppm}/^\circ\text{C}$ ; $T(t)$ 代表当前温度.频率随温度的变化趋势如图 2 所示.根据第 2.1 节,节点频偏主要是由其晶振频率的漂移造成的,因此节点频偏 $\alpha(t)$ 还可表示为与标准频率 $f_0$ 以及节点当前频率 $f(t)$ 相关的函数:

$$\alpha(t) = \frac{f_0}{f(t)} - 1 \tag{6}$$

根据公式(5)、公式(6)可以看出,节点频偏值对温度的变化十分敏感.比如:当温度从 25°C 下降至 15°C 时,相应的频偏变化为 4ppm(即,每秒 4μs).所以节点在对频偏进行估计时,为了达到提高估计精度同时降低能耗的目的,同步算法需要将温度对频偏的影响考虑在内.

理想状态下,节点的当前频偏可以通过对节点当前所处温度的测量,并将测量结果带入公式(5)、公式(6)获得.然而实际情况并非如此,下面将对此进行详细说明.

在实际情况下,节点晶振稳定性差的特性导致其同样易受到除温度外其余环境因素的影响,如电压、湿度、震动等.根据文献[28-30],节点当前电压越低,其晶振稳定性越差.且在无线传感器网络中,节点通常由电池供电,因此节点电压值会随时间不断降低,从而节点稳定性也会随之不断变化.因此,为了更准确地描述节点时钟频偏与温度的关系,公式(5)中温度系数 $k$ 应表示为一个动态变量 $k(t)$ ,如公式(7)所示.而对于湿度、震动等其他影响因素,由于其相较于温度对节点频偏产生的影响很小,因此在本文中,我们将其影响看作系统噪声.

$$k(t)=k+\varpi_k(t) \tag{7}$$

公式(7)中, $\varpi_k(t)$ 表示 $t$ 时刻的温度系数与公式(5)中的标准温度系数 $k$ 之差;且由于电压等因素对 $k(t)$ 的影响具有持续性,因此, $\varpi_k(t)$ 满足:

$$\varpi \sim N(\mu_\varpi, \sigma_\varpi^2).$$

因此可以得到以下结论:

**定理 1.** 根据公式(5)得到的当前频率估计值 $\hat{f}(t)$ 并非节点当前真实输出频率 $f(t)$ 的无偏估计,且估计误差为 $f_0 \cdot \mu_k \cdot (T(t)-T_0)^2$ .

证明:根据公式(7),公式(5)中的标准温度系数 $k$ 可看作:

$$k=k(t)-\sigma_k(t).$$

因此可以得到  $t$  时刻频率估计值  $\hat{f}(t)$  的期望为

$$\begin{aligned} E[\tilde{f}(t)] &= E[\hat{f}(t) - f(t)] \\ &= E[f_0(1 - k(T(t) - T_0)^2) - f_0(1 - k(t) \cdot (T(t) - T_0)^2)] \\ &= E[f_0(1 - (k(t) - \sigma_k(t)) \cdot (T(t) - T_0)^2) - f_0(1 - k(t) \cdot (T(t) - T_0)^2)] \\ &= f_0 \cdot E[(k(t) - \sigma_k(t)) \cdot (T(t) - T_0)^2 - k(t) \cdot (T(t) - T_0)^2] \\ &= f_0 \cdot \mu_k \cdot (T(t) - T_0)^2 \neq 0. \end{aligned}$$

因此根据公式(5)得到的当前频率估计值  $\hat{f}(t)$  并非节点当前真实输出频率  $f(t)$  的无偏估计。 □

讨论:根据实验可得,  $\mu_k$  通常为  $10^{-9}$  KHz/ $^{\circ}$ C. 假设节点周围环境变化范围为  $-10^{\circ}$ C $\sim$  $40^{\circ}$ C, 因此可得  $T(t) - T_0$  的均值为 15. 节点标称频率为  $f_0 = 32.768$  KHz. 因此, 根据公式(5)获得的频率估计误差数量级为  $10^{-6}$ .

根据定理 1, 由于电压对节点晶振稳定性的影响, 将温度系数看作常量会带来较高的同步误差. 因此, 应将温度系数看作与时间相关的变量  $k(t)$ . 根据文献[29], 节点电压的变化速度较慢, 因此只要在同步过程中周期性地对  $k(t)$  进行估计及更新, 即可很大程度上降低电压对晶振稳定性带来的影响. 然而温度-频偏关系系数的在线估计复杂度过高, 且需要大量的通信开销来获得大量频偏值, 这违背了传感器节点计算资源及能耗有限的特性.

考虑到以上问题, 我们引入了温度敏感因子  $TSF(t)$  (temperature-skew sensitivity factor) 来描述温度与频率之间的动态关系, 并对  $TSF(t)$  进行周期性更新.  $TSF(t)$  将温度与频率之间的关系看作是一个关于时间  $t$  的函数, 它描述了当前环境下节点晶振频率对环境温度的敏感程度,  $TSF(t)$  越大, 表示当前节点频率对温度变化越敏感.

$$TSF(t) = \frac{f(t) - f(t - \tau)}{T(t) - T(t - \tau)} \quad (8)$$

$TSF(t)$  的引入, 使得节点时间同步过程可以仅仅依赖于本地信息, 降低了通信开销; 并且  $TSF(t)$  的估计复杂度远低于温度系数, 能够适用于计算能力有限的无线传感器网络.

### 3 基于 TSF 估计的时间同步方法

本节具体介绍基于 TSF 估计的时间同步算法的基本思想及其具体实现方式.

#### 3.1 时间同步方法

节点间的时间不同步主要表现在节点之间存在时间相偏  $\theta(t)$ , 而根据第 1.1 节关于相偏与频偏的分析可知, 节点之间存在相偏的根本原因是节点之间频偏的不断累积, 即:

$$\theta(t_i + t) = \theta(t_i) + \int_{t_i}^{t_i+t} \alpha(t) dt.$$

理论上, 如果节点的相偏估计及补偿频率足够高, 则可以保持较高的同步精度, 如图 3 中第 1 种方法所示. 然而, 这种高同步精度是以极大的通信开销为代价的. 如果能够对节点每一时刻的频偏进行准确的估计, 便可以根据该频偏值获得相偏, 因而能够延长“再同步”周期(即, 包交换周期), 从而降低了通信开销. 因此, 节点需要周期性地对频偏进行估计及补偿以抑制相偏增长, 如图 3 中的 FTSP 算法所示.

在传统的同步算法中, 如 FTSP<sup>[14]</sup> 算法, 频偏的变化在短时间段内认为是可以忽略的, 因此从降低能耗的角度出发, 只要周期性地对频偏进行估计及更新, 就可以保证节点在“休眠”阶段(即, 两次频偏估计之间的间隔)无需进行时间戳交换, 仍可以依赖上一周期频偏估计值进行相偏更新以及本地时间补偿, 如图 3 所示, 箭头表示数据包交换过程. 因此可以看出: 与不进行频偏估计, 仅进行基于时戳交换的相偏估计的算法相比, FTSP 很大程度上降低了通信开销. TCTS<sup>[10]</sup> 算法对 FTSP 进行了改进, 该算法考虑到了温度对频偏的影响, 利用一个“温度-频偏”表格对频偏进行估计. 如图 3 所示, 由于在同步的初始阶段, 表格为空, 因此 TCTS 算法在此阶段与 FTSP 基本相同, 周期性地对频偏进行估计, 只是在估计的过程中将频偏值与相应的温度值记录在一个“温度-频偏”表格内. 当表格建立到一定规模, 节点能够在表格中找到与当前温度相匹配的入口时, 便进入同步阶段. 在该阶段, 仅根据当前温度与“温度-频偏”表格来进行频偏估计. 然而, 当再次出现当前温度无法在表格中查找到的

情况时,节点会再次返回表格建立阶段进行基于包交换的频偏估计以及频偏记录过程.TCTS 算法比 FTSP 算法通信开销低,然而却仍存在一个问题:与 EACS 方法相同,该方法假设“温度-频偏”映射关系不会随着时间发生变化,在同步过程中完全依赖于部署前获得的映射表进行同步.然而这种假设并不成立,因此该方法同样会带来较高的同步误差.

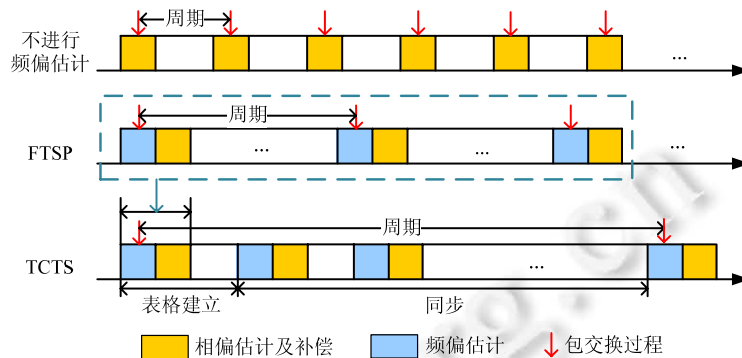


Fig.3 Design principle of FTSP and TCTS  
图3 FTSP 算法以及 TCTS 算法同步周期示意图

本文提出的算法是一种基于 TSF 的时间同步(temperature sensitivity factor based,简称 TSFB)算法.该方法的周期关系如图 4 所示.

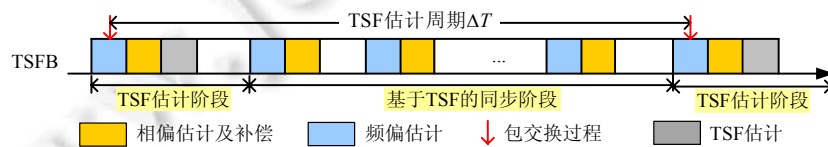


Fig.4 Design principle of TSFB  
图4 TSFB 算法同步周期示意图

TSFB 方法可分为两个阶段:(1) TSF 估计阶段;(2) 基于 TSF 的同步阶段.在 TSF 估计阶段,节点首先通过包交换的方法对温度敏感因子 TSF 进行估计,获得 TSF 值之后,进入同步阶段;同步阶段根据当前 TSF 值以及节点当前所处环境温度,通过公式(5)、公式(6)对频偏进行估计,不需要依赖包交换.然而由第 1.3 节可知,频率对温度的敏感程度 TSF 会随着环境动态变化.因此,在经过 $\Delta T$  时长的同步过程后,节点将再次回到 TSF 估计过程,对当前 TSF 值进行更新,以便适应新的环境.

TSFB 算法能够依赖 TSF 敏感度因子对时间频偏进行估计,相对于 FTSP 算法,很大程度上降低了通信开销(如图 4 所示,包交换过程仅在进行了 TSF 估计时才会进行);并且与 TCTS 算法不同,TSFB 算法认为节点频偏与当前环境温度之间的关系是不断变化的,并通过对 TSF 值的不断更新来适应这种动态变化,因此提高了同步精度.

### 3.2 TSF估计

TSF 估计阶段的主要任务为:通过待同步节点与其对应的参考节点之间进行的数据包交换,来获得节点当前相偏以及频偏;并以此为基础,根据节点当前所处的环境温度变化情况以及节点自身相应的频率变化情况对节点当前温度敏感度因子 TSF 进行估计.为描述方便,下面我们称待同步节点为节点 A,其对应的参考节点为节点 B.

由于在进行同步的初始时刻,节点 A 并不知道其当前敏感度因子  $TSF(t)$ ,因此这一阶段中的频偏估计主要依赖于节点 A 与参考节点 B 之间的数据包交换.该频偏估计过程与 FTSP<sup>[14]</sup>算法中的频偏估计过程相同,只是在频偏估计的过程中需要同时记录温度,这里不再赘述.



根据本周期 TSF 估计阶段获得的节点频率  $f[i]$  (这里, 节点频率的获取可以通过节点频偏以及公式(6)获得)、上一周期 TSF 估计阶段获得的节点频偏  $f[i-1]$  以及本周期获得的温度值  $T[i]$ 、上一周期获得的温度值  $T[i-1]$ , 获得当前节点的温度敏感因子  $TSF[i]$ :

$$TSF[i] = \frac{f[i] - f[i-1]}{T[i] - T[i-1]} \quad (9)$$

假设在下次 TSF 估计阶段之前的  $\Delta T$  时间段 (即, 基于 TSF 的时间同步阶段) 内节点的 TSF 不会发生变化, 节点将转入同步阶段. 在该阶段, 节点主要依赖 TSF 估计阶段得到的 TSF 值来进行频偏估计以及本地时间补偿, 不需要任何包交换过程.

### 3.3 基于 TSF 的时间同步

基于 TSF 的同步阶段的主要任务为: 根据 TSF 估计阶段获得的温度敏感因子 TSF 以及温度传感器获得的节点当前温度值进行频偏估计. 该阶段无需依赖于节点之间的包交换.

在该阶段, 节点周期性地对其当前所处环境温度进行采样 (这里的周期指的是同步阶段内部的温度采样周期, 与 TSF 估计周期不同), 这里, 将第  $j$  个采样周期获得的温度值记为  $T[j]$ . 采样过后, 节点根据当前环境温度值  $T[j]$  以及当前温度敏感因子 TSF 对当前频偏进行估计. 因此, 节点  $A$  在第  $i$  个同步周期的第  $j$  个采样周期的频率  $f[j]$  以及频偏  $\alpha_A[j]$  可更新为

$$\hat{f}[j] = f[i] + TSF[i] \cdot (T[j] - T[i]) \quad (10)$$

$$\hat{\alpha}[j] = \frac{f_0}{\hat{f}[j]} - 1 \quad (11)$$

接下来, 对节点依赖公式(10)进行频率估计带来的误差进行分析. 节点在 TSF 估计阶段获得的频率值是对多次数据包交换的结果采用最小均方差方法获得的, 是对节点当前频率的无偏估计<sup>[14]</sup>, 因此假设公式(9)中的  $f[j]$  以及  $f[j-1]$  为第  $i$  个以及第  $i-1$  个 TSF 估计阶段的节点当前频率真实值, 因此可得以下结论.

**定理 2.** 公式(10)获得的当前频率估计值  $\hat{f}[j]$  的估计误差为  $f_0 \cdot k \cdot \delta T^2$ .

证明: 为计算方便, 在证明过程中假设  $T[i] - T[i-1] = T[j] - T[i] = \delta T$ , 因此, 公式(10)中的频率估计值可以表示为

$$\hat{f}[j] = f[i] + \frac{f[i] - f[i-1]}{T[i] - T[i-1]} \cdot (T[j] - T[i]) = f[i] + \frac{f[i] - f[i-1]}{\delta T} \cdot \delta T \quad (12)$$

因此, 根据公式(12),  $\hat{f}[j]$  估计误差的期望值为

$$E[\tilde{f}[j]] = E[\hat{f}[j] - f[j]] = E\left[f[i] + \frac{f[i] - f[i-1]}{\delta T} \cdot \delta T - f[j]\right] \quad (13)$$

根据公式(5)对公式(13)中的  $f[i]$  以及  $f[i-1]$  进行替换, 得到:

$$\begin{aligned} E[\tilde{f}[j]] &= E[2f_0(1 - k(T[i] - T_0)^2) - f_0(1 - k(T[i] + \delta T - T_0)^2) - f_0(1 - k(T[i] - \delta T - T_0)^2)] \\ &= E[f_0 \cdot k \cdot (2(T[i] - T_0)^2 - (T[i] + \delta T - T_0)^2 - (T[i] - \delta T - T_0)^2)] \\ &= f_0 \cdot k \cdot \delta T^2. \end{aligned}$$

证毕. □

讨论: 由于节点的温度采样速率很快, 且 TSF 估计周期通常小于 18min (第 5.3 节实验获得), 因此可以认为, 通常情况下有  $\delta T < 0.5^\circ\text{C}$ . 根据第 2.3 节, 节点晶振温度系数为  $k = (3.39 \pm 1.0) \cdot 10^{-8}$ , 节点标称频率  $f_0 = 32.768\text{KHz}$ , 因此, 频率估计误差数量级为  $10^{-8}$ . 然而根据定理 1, 通过公式(5)得到的频率误差数量级为  $10^{-6}$ , 因此, 通过公式(10)对节点频率进行估计能够很大程度上降低估计误差.

在对节点频偏进行更新之后, 同样需要对其相偏进行估计以及更新. 我们假设采样间隔内节点的频偏不会发生变化, 因此, 节点  $A$  在第  $j$  个采样周期的相偏  $\theta[j]$  可以根据上一次相偏估计结果  $\hat{\alpha}[j-1]$  以及采样周期  $\Delta t$  获得:

$$\hat{\theta}[j] = \hat{\theta}[j-1] + \Delta t \cdot \hat{\alpha}[j-1] \quad (14)$$

在对时间相偏进行更新之后, 根据  $\hat{\theta}[j]$  的值决定是否对时钟进行补偿. 这里引入阈值  $\theta_{th}$ , 且  $\theta_{th}$  的值通常设



置为节点时钟周期长度.当 $\hat{\theta}[j]$ 值超过这个阈值时,认为节点频偏超过应用可承受范围,需要进行时钟补偿,补偿方法为

$$C[j]=C[i-1]+\theta[j].$$

接下来,对节点依赖公式(14)进行相偏估计带来的误差进行分析.

**定理 3.** 节点在同步阶段的相偏累计估计误差为

$$\delta_{\theta[N]} = \delta_{\theta_0} + \Delta t \cdot \sum_{j=1}^N \delta_{\alpha[j]} \quad (15)$$

其误差方差为

$$\sigma_{\theta[N]}^2 = \sigma_{\theta_0}^2 + \Delta t^2 \cdot \sum_{j=1}^N \sigma_{\alpha[j]}^2 \quad (16)$$

其中, $N$ 为同步阶段内的频偏估计次数(即,温度采样次数), $\delta_{\theta_0}$ 以及 $\sigma_{\theta_0}^2$ 分别为TSF估计阶段通过包交换获得相偏的估计误差以及误差方差.

证明:节点在第 $N$ 个温度采样时刻的真实相偏为

$$\theta[N] = \theta_0 + \Delta t \cdot \sum_{j=1}^N \alpha[j].$$

而根据公式(14),节点在第 $N$ 个温度采样时刻的相偏估计值可表示为

$$\hat{\theta}[N] = \hat{\theta}_0 + \Delta t \sum_{j=1}^N \hat{\alpha}_A[j-1].$$

因此,节点在第 $N$ 个温度采样时刻的相偏估计误差值为

$$\delta_{\theta[N]} = \hat{\theta}[N] - \theta[N] = \left( \hat{\theta}_0 + \Delta t \sum_{j=1}^N \hat{\alpha}_A[j-1] \right) - \left( \theta_0 + \Delta t \cdot \sum_{j=1}^N \alpha[j] \right) = \delta_{\theta_0} + \Delta t \cdot \sum_{j=1}^N \delta_{\alpha[j]}.$$

于是,其误差方差为

$$\sigma_{\theta[N]}^2 = \sigma_{\theta_0}^2 + \Delta t^2 \cdot \sum_{j=1}^N \sigma_{\alpha[j]}^2.$$

证毕.  $\square$

讨论:从定理3可以看出,节点在同步阶段的累计误差主要受到该阶段内频偏估计间隔 $\Delta t$ 、频偏估计次数 $N$ 以及频偏估计误差 $\delta_{\alpha[j]}$ 的影响.由于同步阶段内的频偏估计不需要依赖数据包的交换,因此缩短 $\Delta t$ 不会造成能耗的上升.因此, $\Delta t$ 对同步误差带来的影响可以通过简单地缩短频偏估计间隔来降低.在 $\Delta t$ 确定的情况下,频偏估计次数 $N$ 主要取决于同步阶段时长 $\Delta T$ (如第3节所述):

$$N = \left\lfloor \frac{\Delta T}{\Delta t} \right\rfloor.$$

因此, $N$ 带来的影响实质上是 $\Delta T$ 对同步误差带来的影响.关于频偏估计误差 $\delta_{\alpha[j]}$ ,根据公式(11)、公式(12)以及定理2可知,频偏估计误差 $\delta_{\alpha[j]}$ 与频偏估计间隔内的温度变化 $\delta T$ 正相关.因此,节点在同步阶段的累计误差 $\delta_{\theta[N]}$ 主要受到以下两个因素的影响:

- 同步阶段时长,即TSF估计周期 $\Delta T$ ;
- 频偏估计间隔内的温度变化 $\delta T$ .

下面通过仿真实验结果来验证以上结论,如图5、图6所示.

图5描述了当TSF估计间隔 $\Delta T$ 分别为1 500,1 800,2 000,2 300以及2 500时的相偏估计误差值.温度变化曲线如后文图9所示.很明显地,当 $\Delta T$ 延长时,频偏估计误差平均值会不断上升.这是由于:(1)TSF估计周期的延长会导致相偏估计误差无法及时被补偿,因此导致误差不断累积并偏离其真实值;(2)TSF估计周期的延长会导致在间隔内的温度变化值 $\delta T$ 升高, $\delta T$ 的升高会导致频偏误差升高,从而间接导致相偏误差的累积.为了反映在恶劣环境下TSFB算法的频偏估计误差情况,整个仿真过程基本处于“温度变化”状态,因此,图5中所示的相偏

估计误差要高于真实环境下的误差.

图 6 描述了频偏估计误差随温度变化的情况.曲线“—”描述了温度变化趋势,三角曲线“—▼—”描述了频偏估计误差变化情况.很明显:当温度变化平缓时,频偏估计误差值相对较低;反之,当温度处于上升阶段(如图所示 3000s~ 9000s)时,频偏估计误差值开始迅速上升.这是因为,当节点所处环境温度发生明显变化时,节点的频率估计误差升高,从而导致了频偏估计误差的升高.

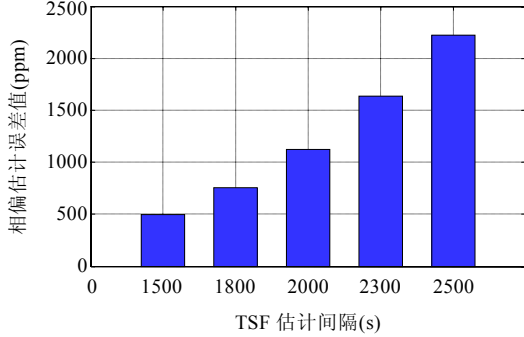


Fig.5 Offset estimation error v.s. TSF estimation interval

图 5 相偏估计误差随 TSF 估计间隔变化示意图

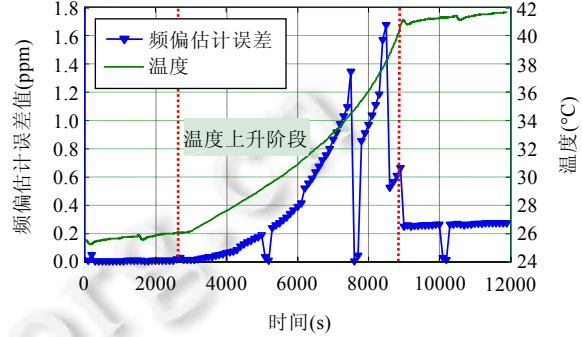


Fig.6 Skew estimation error v.s. temperature

图 6 频偏估计误差随温度变化示意图

### 3.4 TSF估计周期调节

根据第 3.3 节,时间同步误差主要受两个因素影响:TSF 估计周期 $\Delta T$  以及频偏估计间隔内的温度变化 $\delta T$ .缩短 TSF 估计间隔 $\Delta T$  可以很明显地达到降低同步误差的目的,然而根据第 3.1 节,TSF 的估计过程需要进行数据包交换,盲目地缩短 TSF 估计周期会增加数据包交换频率,从而增加通信开销.为了解决这一矛盾,TSFB 算法采用一种动态周期调节机制,该机制能够根据当前同步误差以及温度变化情况动态地调节 TSF 估计周期,使得节点能够在满足特定同步精度的前提下,尽可能地减少能量消耗,从而达到能耗与精度的平衡.

本文引入误差控制因子 $\mu$ 来限制在 $\Delta T$  时间段内误差的累积,引入温度调节因子 $\lambda$ 来调节不同温度变化情况下的 $\Delta T$ .同时,用 $e[i]$ 来表示在进行第 $i$ 个 TSF 估计时周期的误差累积状况(在 TSFB 中,误差累积看作根据公式(14)得到的相偏与根据 TSF 周期根据包交换获得的相偏之差),用当前温度变化速率 $DT[i]$ 来描述温度稳定情况; $d$ 表示同步阶段的标准时长.那么从当前时刻到下一次 TSF 估计阶段的间隔 $\Delta T[i+1]$ 可更新为

$$\Delta T[i+1]=\min(d_1,d_2) \quad (17)$$

$$d_1 = d \cdot \frac{\mu}{e[i+1]} \quad (18)$$

$$d_2 = d \cdot \frac{\lambda}{DT[i]} \quad (19)$$

$$DT[i] = \frac{T[i+1] - T[i]}{\Delta T[i]} \quad (20)$$

从公式(17)~公式(19)可以看出:当误差开始累积或温度突然变化时,TSF 估计间隔 $\Delta T$  会缩短,从而达到降低相偏估计误差的目的;反之,当误差很小,或温度变化缓慢时, $\Delta T$  会随之延长以达到降低能耗的目的.公式(20)为温度变化速率 $DT[i]$ 的度量方式,即,用上一同步阶段内温度的平均变化率来描述当前温度变化情况.在实际应用中,TSFB 主要根据 $d_1$ 对 $\Delta T$  进行调节来平衡能耗和误差值.然而当温度发生明显变化时,根据公式(17),温度将成为影响频偏估计精度的主要因素,此时,TSFB 会根据温度变化情况来调节 $\Delta T$  以适应变化,如公式(19)所示.

在无线传感器中通常存在多个应用,如数据融合、休眠调度、目标追踪等,这些应用对时间同步的精度要求各不相同,因此在设计同步算法时,需要同时考虑不同应用对同步精度的需求.TSFB 可以通过对误差控制因子 $\mu$ 以及温度协调因子 $\lambda$ 高效地满足其对同步精度的需求.对于对同步精度要求较低的应用,如数据融合技术,

节点可以适当升高 $\mu$ 以及 $\lambda$ 的值,以达到降低能耗的目的;而对于对同步精度要求较高的应用,如基于 TOA 的定位技术,节点可以适当降低 $\mu$ 以及 $\lambda$ 的值来保证定位准确性.关于参数 $d, \mu$ 以及 $\lambda$ 的取值将在第 5.3 节进行讨论.

然而,这种周期调节方式仍然存在一个问题.如图 7 中虚线框区域所示,当温度突然发生变化时(对应后文图 9),当前同步阶段的频偏估计值(点线所示)严重偏离真实值(实线所示).这是由于 TSFB 在进行 TSF 估计间隔 $\Delta T$ 的更新时,是以上一周期的误差累积及温度变化情况为依据的,从而导致在 TSF 估计间隔 $\Delta T$ 内的温度变化值 $\delta T$ 过高,因此带来了较大的频偏估计误差(根据定理 2).

针对上述问题,本文提出一种“应急机制”,即:当节点在温度平缓的同步阶段一旦检测到温度发生突发性的明显变化时,无论当前 $\Delta T$ 是否均应转入 TSF 估计阶段,节点都应及时对 TSF 值进行估计及更新,以应对温度的突然变化.图 8 所示为增加“应急机制”之后节点的频偏估计情况,可以看出:由于在第 3 500s 时对 TSF 的及时更新,使得虚线框所示区域内的频偏估计误差升高现象得到明显的改善.需要注意的是:这种“应急机制”仅针对温度上升的初期所遇到的第 1 个估计周期(即图 7、图 8 中虚线框所示区域),随后的温度上升过程中不会触发该应急机制.

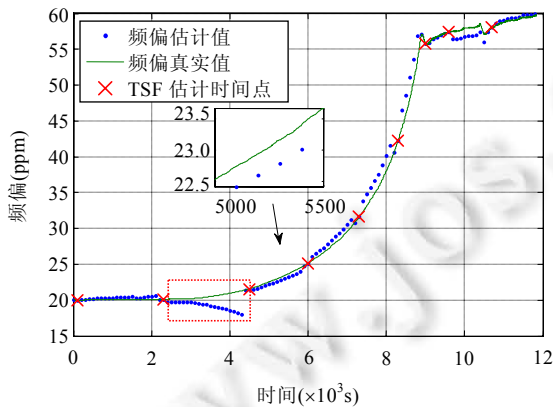


Fig.7 Skew estimation without emergency mechanism

图 7 无“应急机制”频偏估计效果图

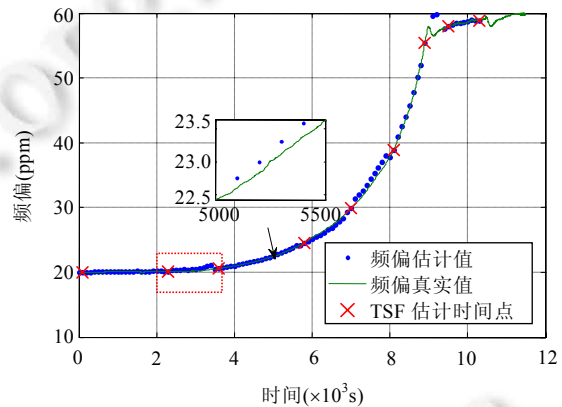


Fig.8 Skew estimation with emergency mechanism

图 8 有“应急机制”频偏估计效果图

#### 4 实验结果与分析

我们通过大量的仿真实验验证了 TSFB 算法的时间同步性能,并主要从 3 个方面描述 TSFB 算法的性能特征:(1) 时间同步精度;(2) 通信开销(即包交换次数);(3) 鲁棒性.参与对比实验的时间同步方法包括:(1) FTSP 算法<sup>[14]</sup>;(2) EACS 算法<sup>[9]</sup>;(3) TCTS 算法<sup>[10]</sup>.

##### 4.1 实验初始化

- 温度模拟

我们首先模拟出一条温度变化轨迹,如图 9 所示;且为了证明本方法在温度变化情况下的同步性能,该轨迹主要在两种温度状况之间交替:温度平缓以及温度上升状态.温度变化范围为 25°C~43°C.需要说明的是:为了反映各种算法在恶劣环境下 TSFB 算法的频偏估计误差情况,仿真实验中模拟的温度变化轨迹基本处于“温度迅速上升”状态.因此,第 4.2 节中所有算法的同步误差要高于正常环境下的误差值.

- 节点真实频率模拟

首先对节点在真实环境下的温度系数  $k(t)$  进行模拟.根据第 2.3 节,温度系数  $k(t)$  主要与节点当前电压值相关.而节点电压值会随时间不断降低,因此,真实环境下的节点温度系数  $k(t)$  会随着时间不断升高.本文仿真实验假设在实验过程中节点电压随时间线性变化<sup>[29]</sup>,因此,这里将节点温度系数看作参数为  $k_H$  与  $k_L$  的均匀分布,即:

$$K \sim U(k_H, k_L).$$

其中,根据文献[29]的实验结果,节点电压在 12 000s 内大约下降 0.2V,因此,本实验设定:

$$k_H = -0.027 \text{ ppm}/^\circ\text{C}, k_L = -0.028 \text{ ppm}/^\circ\text{C}^{[29]}.$$

在对节点真实频率进行模拟时,还需考虑湿度、震动等其他影响因素.然而相较于温度,其对节点频偏产生的影响很小,因此在本文中,我们将其影响看作均值为 0 的高斯噪声  $h \sim N(0, \sigma_h^2)$ , 其中,  $\sigma_h = 8 \times 10^{-5} \text{ KHz}^{[26]}$ . 因此,仿真实验中,节点真实频率为

$$f(t) = f_0(1 - k(t) \cdot (T(t) - T_0)^2) + h(t) \quad (21)$$

其中,  $f_0 = 32.768 \text{ KHz}$ ,  $T_0 = 25$ .

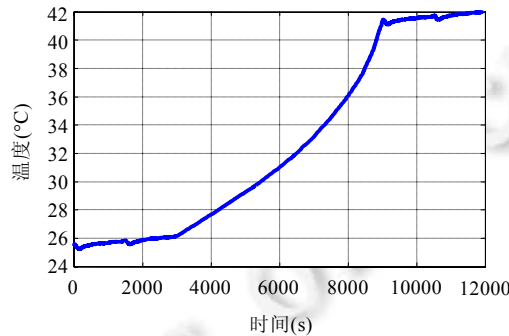


Fig.9 Simulated temperature trace

图 9 温度模拟图

- 同步周期配置

根据文献[9,10,14],本文仿真实验的周期配置见表 1.

Table 1

表 1

同步算法	数据包交换周期(s)	频偏估计周期(s)
FTSP	150	150
EACS	1 500	1
TCTS	700	1

对于 TSFB 算法,其数据包交换周期是动态变化的,若无特殊说明,本文实验部分对 TSFB 算法同步周期相关参数的设定可见表 2.

Table 2

表 2

标准周期长度 $d$	精度控制因子 $\mu$	温度协调因子	频偏估计周期
2 000s	300 $\mu$ s	1.0 $^\circ\text{C}$	1s

数据包交换周期根据公式(17)~公式(20)计算得到.

- 误差计算方法

算法同步精度性能主要通过算法的频偏估计误差以及同步误差体现,其中,频偏估计误差定义为节点真实频偏  $skew_{\text{TRUE}}$  与根据 TSFB 算法估计的频偏  $skew_{\text{EST}}$  之差,即:

$$skew_{\text{ERROR}} = skew_{\text{TRUE}} - skew_{\text{EST}} \quad (22)$$

$skew_{\text{TRUE}}$  可通过公式(21)与公式(11)获得,  $skew_{\text{EST}}$  则通过公式(9)~公式(11)获得.同步误差定义为真实相偏  $offset_{\text{TRUE}}$  与节点估计相偏  $offset_{\text{EST}}$  之差,即:

$$offset_{\text{ERROR}} = offset_{\text{TRUE}} - offset_{\text{EST}} \quad (23)$$

$$offset_{\text{TRUE}} = skew_{\text{TRUE}} \cdot \Delta t \quad (24)$$

$offset_{EST}$  可通过公式(14)获得.

### 4.2 TSFB算法同步精度性能分析

相比于其他基于环境感知的同步算法,TSFB 算法的一个明显改进是:其认为温度与频偏的关系是动态变化的,因此采用了动态估计而非依赖于先验知识的方法来获得温度与频偏关系,从而能够提高算法同步精度.本文通过对 4 种算法:1) EACS 算法<sup>[9]</sup>,2) TCTS 算法<sup>[10]</sup>,3) 固定周期 TSFB 算法,4) 动态周期 TSFB 算法的频偏估计精度进行比较,证明了 TSFB 算法的优势.

图 10 描述了不同包交换间隔下,TCTS 算法、固定周期 TSFB 算法以及动态周期 TSFB 算法的频偏估计误差情况.我们首先对动态周期的 TSFB 算法进行仿真,为了验证不同周期下的算法性能,在实验初始时,取标准 TSF 估计周期长度  $d$ (见第 3.4 节的公式(18)、公式(19))分别为 1 500s,1 800s,2 000s,2 300s 以及 2 500s.实验结束后,得到平均包交换间隔分别为 1 050s,1 190s,1 380s,1 450s 以及 1 950s.然后,根据得到的平均包交换间隔来设置 TCTS 算法的再同步周期以及固定周期 TSFB 算法的 TSF 估计周期,并重复实验.实验结果如图 10 所示.我们给出了不同包交换周期下各种算法频偏周期的平均值以及最大值.通过对 TCTS 算法以及 TSFB 算法性能的比较可以看出:比起 TCTS 算法,固定周期 TSFB 算法的频偏估计误差降低了 10%,而动态周期 TSFB 算法的频偏估计误差降低了 20%.这是由于 TSFB 算法能够对温度与频偏之间的敏感程度 TSF 进行动态估计,从而能够有效避免由于环境带来的当前“温度-频偏”对应关系与先验知识不符所带来的频偏估计误差,因此提高了同步精度.通过对固定周期以及动态周期 TSFB 算法的比较可以看出:当包交换间隔相同时,相比动态周期 TSFB,固定周期 TSFB 会增加 10%的同步误差.这是由于,动态周期调节机制使得同步算法能够更好地适应温度等环境的变化,从而达到能耗和精度的平衡.

从图 10 中我们还可以发现:当数据包交换间隔较短时(比如小于 1 200s),动态周期调节机制的引入对同步精度的提升并不明显.这是由于,当算法的包交换频率较高时, $\Delta T$  时间段内的温度上升值  $\delta T$  很低,因此无论是否采用动态周期调节机制,都不会导致频偏估计误差的升高.因此在包交换频繁的情况下,使用动态周期意义不大.最后,为了将频偏估计误差控制在 0.8ppm 以下,我们设置标准 TSF 估计周期长度  $d=2000s$ .

图 11 反映的是 3 种算法在平均数据包交换周期为 1 880s 的情况下,频偏估计误差 CDF 的累积情况.

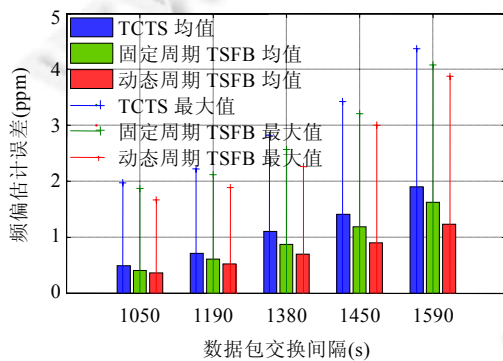


Fig.10 Synchronization error comparison of different schemes

图 10 不同包交换间隔下频偏估计误差对比图

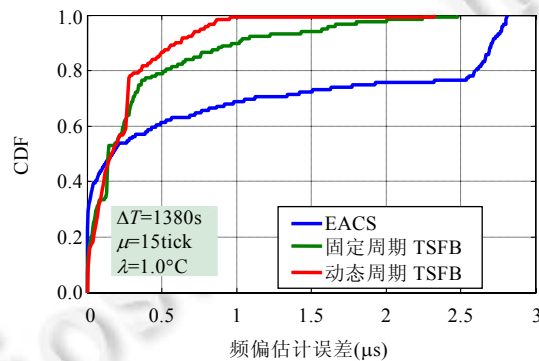


Fig.11 CDF of synchronization error

图 11 同步误差 CDF 累积图

从图 11 中可以明显得出:

- 1) 在环境温度不断变化的情况下,80%的频偏估计值的误差小于 0.5ppm;而 EACS 算法则有将近 20%的频偏估计值的误差大于 2.5ppm;
- 2) 在误差较低的区域,EACS 算法的性能优于 TSFB 算法.这是由于在某些情况下,温度与频偏之间的关系符合先验知识(即,EACS 的“温度-频偏”表格);且由于表格的获得基于卡尔曼滤波去噪,因此在该情



况下的 EACS 算法频偏估计误差相对较低.而由于 EACS 无法捕捉温度与频偏关系的变化,因此会带来将近 20%的高误差;

- 3) 由于动态周期调节机制主要针对于改善由于温度变化引起的固定周期 TSFB 算法误差较大的部分,因此可以看出,对于误差大于 1ppm 的频偏改善得较为明显.这是由于,在温度变化缓慢的情况下,TSFB 算法对 TSF 估计周期长度不敏感,即使在 TSF 估计周期 $\Delta T$ 延长的情况下也不会造成 $\delta T$ 的明显变化.因此在该情况下,动态周期调节机制对算法性能的改善不够明显.

#### 4.3 TSFB算法通信能耗性能分析

由于在仿真过程中无法对节点的能耗进行模拟,且由于在同步时的主要能耗是通信能耗,因此这里用包交换的次数作为评价标准来代替节点的能耗,以此说明 TSFB 在能耗方面的优势.

我们取误差控制因子 $\mu=5,10,12,25,30$  个时钟周期(每个时钟周期为  $30.515\mu\text{s}$ ),取温度协调因子 $\lambda=0.6,0.8,1.0,1.2,1.4^\circ\text{C}$  分别进行实验,实验温度变化同样如图 9 所示.实验过程中统计包交换次数以及平均包交换间隔,统计结果如图 12、图 13 所示.

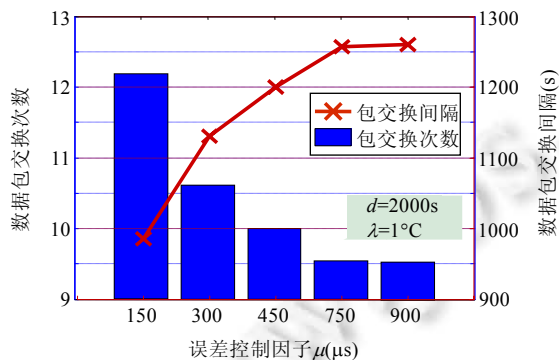


Fig.12 Communication cost v.s. error controlling factor

图 12 不同误差控制因子下的包交换次数

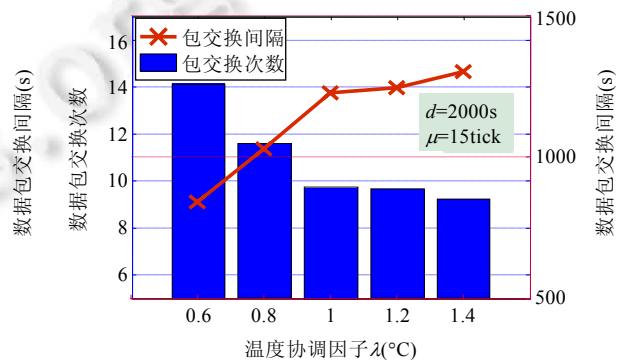


Fig.13 Communication cost v.s. regulatory factor

图 13 不同温度协调因子下包交换次数

很明显地,包交换次数会随着误差控制因子 $\mu$ 以及温度协调因子 $\lambda$ 的增大而减少,原因已在第 2.3 节加以说明.因此,针对不同的应用,可以通过对误差控制因子 $\mu$ 以及温度协调因子 $\lambda$ 高效地满足其对同步精度的需求.除此之外,我们还观察到:随着 $\mu$ 以及 $\lambda$ 的增大,数据包交换间隔变化趋于平缓.这是由于,当误差控制因子 $\mu$ 取值很大时,温度协调因子会根据当前温度值控制 TSF 估计周期 $\Delta T$ 的增长,以保证同步精度;反之亦然.

对于误差控制因子 $\mu$ ,当参数 $\mu$ 从  $150\mu\text{s}$  变化到  $300\mu\text{s}$  时,时间戳的交换次数明显减少.同时,平均 TSF 估计间隔明显增大;而在参数 $\mu$ 变化到  $300\mu\text{s}$  之后,这两项参数的变化趋于平缓.因此,本方法在精度控制参数 $\mu=300\mu\text{s}$  时的性能最佳.同样地,对于温度协调因子 $\lambda$ ,当参数 $\lambda$ 从  $0.8^\circ\text{C}$  变化到  $1.0^\circ\text{C}$  时,时间戳的交换次数明显减少.同时,平均 TSF 估计间隔明显增大;而在参数 $\lambda$ 变化到  $1.0^\circ\text{C}$  之后,这两项参数的变化趋于平缓.因此,本方法在精度控制参数 $\lambda=1.0^\circ\text{C}$  时的性能最佳.

从图 12、图 13 还可以看出:即使在误差控制因子 $\mu$ 以及温度协调因子 $\lambda$ 取值均非常低( $\mu=150\mu\text{s},\lambda=0.6^\circ\text{C}$ )的情况下,仍能够保证数据包交换周期大于 900s.这相比于 FTSP 算法的 150s,极大地降低了通信能耗,因此证明了 TSFB 算法能够在保证精度的前提下降低能耗,十分适用于能量有限的无线传感器网络.

#### 4.4 TSFB算法鲁棒性

比起基于时间戳交换的时间同步算法 FTSP,TSFB 算法的另一个明显优势为:在待同步节点通信失效的情况下,TSFB 算法仍然能够维持较高的同步精度;而此时,FTSP 算法则无法进行时间同步.

与传统网络不同,无线传感器网络通常部署在室外环境中.因网络环境影响以及节点本身的变化,网络拓扑

结构将发生动态变化,从而影响了节点之间的正常通信.除此之外,现场环境(如暴风雪等恶劣天气条件)也会随时会影响无线链路的通信质量.因此,在通信失效的情况下,同步算法的鲁棒性十分重要.下面通过仿真实验对 TSFB 算法以及 FTSP 算法在通信失效情况下的算法性能进行对比,以证明 TSFB 算法鲁棒性强的特点.

实验模拟了从 1 000s 处开始,节点通信失效的情景.如图 14 所示,从 1 000s 开始,FTSP 算法的同步误差开始上升.这是由于在无法进行时间戳交换的情况下,FTSP 算法将会停止时钟频偏的估计和更新,时钟的补偿只能依赖最近一次的频偏估计结果进行.且如图 14 所示,节点环境温度值从 3 000s 开始不断上升,这使得节点的频偏不断发生变化.而此时,由于无法进行时戳交换,FTSP 算法无法对频偏估计值进行更新,导致同步误差上升速度加快,最终带来了巨大的误差累积.然而对于 TSFB 算法,在通信失效的情况下,即使温度不断发生变化(如图 14 所示),仍然能够保持相对较低的同步误差.如图 14 所示,通信失效情况下的 TSFB 算法与正常通信情况下的 TSFB 算法相比,在 12 000 时长内的最终同步误差累积结果仅相差 1s.这是因为通信失效仅导致 TSF 值无法正常更新,而节点依然可以根据最近一次 TSF 估计结果以及传感器节点采集到的温度信息来对频偏进行更新.因此证明:在节点通信失效以及环境温度不断变化的条件下,TSFB 算法依然能够保证较低的同步精度.

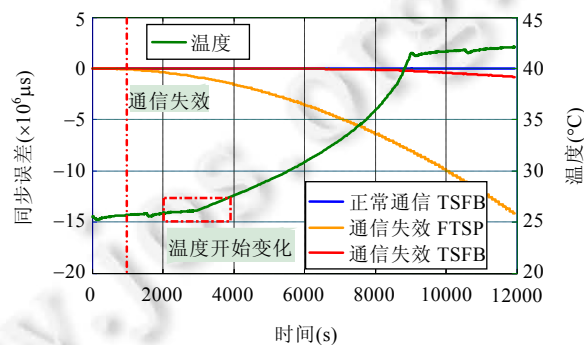


Fig.14 Illustration of what happens if timestamp exchange is stopped

图 14 通信装置失效情况下 TSFB 算法与 FTSP 算法性能对比

## 5 总结与展望

在资源受限的无线传感器网络中,传感器节点的廉价晶振易受到温度干扰的特性,为室外环境下大规模传感器网络时间同步带来了两个严重问题:(1) 过高的通信开销;(2) 精度与能耗之间的不平衡.本文提出了一种基于温度感知的自适应时间同步算法 TSFB,该协议分别利用基于 TSF 的频偏估计机制和动态同步周期调节机制解决了上述两个问题.而且大量的仿真实验结果表明:TSFB 同步算法具有高精度、低能耗以及高鲁棒性等特点,尤其适用于大规模野外部署的传感器网络.

下一步的研究工作包括:(1) 分析温度测量误差以及网络规模对 TSFB 算法稳定性产生的影响,并结合对电压、湿度以及震动等其他影响因子的分析确定 TSFB 算法的误差范围,在此基础上,更好地实现按需同步这一思想;(2) 实现同步误差的在线估计以及补偿,进一步提高算法的同步精度.同时,延长再同步周期,降低算法能耗.

## References:

- [1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 2002,38(4): 393–422. [doi: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4]
- [2] Cerpa A, Elson J, Estrin D, Girod L, Hamilton M, Zhao J. Habitat monitoring: Application driver for wireless communications technology. In: Cruz R, Varghese G, eds. *Proc. of the ACM SIGCOMM Computer Communication Review—Workshop on Data Communication in Latin America and the Caribbean 2001*. New York: ACM Press, 2001. 20–41. [doi: 10.1145/ 844193.844196]



- [3] Virone G, Wood A, Selavo L, Cao Q, Fang L, Doan T, He Z, Stankovic J. An advanced wireless sensor network for health monitoring. In: Yongmin K, ed. Proc. of the Transdisciplinary Conf. on Distributed Diagnosis and Home Healthcare 2006. Arlington: IEEE Press, 2006. 2–4.
- [4] Natarajan A, de Silva B, Yap KK, Motani M. Link layer behavior of body area networks at 2.4 Ghz. In: Shin KG, Zhang YG, eds. Proc. of the Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Beijing: ACM Press, 2009. 241–252. [doi: 10.1145/1614320.1614347]
- [5] Ye W, Heidemann J, Estrin D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *Networking*, 2004,12(3):493–506. [doi: 10.1109/TNET.2004.828953]
- [6] Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In: Proc. of the 21st Int'l Conf. on Computer Communications. New York: IEEE Press, 2002. 1567–1576. [doi: 10.1109/INFCOM.2002.1019408]
- [7] Girod L, Estrin D. Robust range estimation using acoustic and multimodal sensing. In: Proc. of the 9th Conf. on Intelligent Robots and Systems. Hawaii: IEEE Press, 2001. 1312–1320. [doi: 10.1109/IROS.2001.977164]
- [8] Jie X, Karthikeyan S, Kyle J. ToneTrack: Leveraging frequency-agile radios for time-based indoor wireless localization. In: Serge F, Giovanni P, eds. Proc. of the Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Paris: ACM Press, 2015. 537–549. [doi: 10.1145/2789168.2790125]
- [9] Yang Z, Cai L, Liu Y, Pan JP. Environment-Aware clock skew estimation and synchronization for wireless sensor networks. In: Greenberg A, Sohrawy K, eds. Proc. of the Int'l Conf. on Computer Communications. Orlando: IEEE Press, 2012. 1017–1025. [doi: 10.1109/INFCOM.2012.6195457]
- [10] Schmid T, Charbiwala Z, Shea R, Srivastava MB. Temperature compensated time synchronization. *Embedded Systems Letters*, 2009,1(2):37–41. [doi: 10.1109/LES.2009.2028103]
- [11] Castillo-Secilla JM, Palomares JM, Olivares J. Temperature-Compensated clock skew adjustment. *Sensors*, 2013,13(8):10981–11006. [doi: 10.3390/s130810981]
- [12] Elson J, Girod L, Estrin D. Fine-Grained network time synchronization using reference broadcasts. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 2002,36(SI):147–163. [doi: 10.1145/844128.844143]
- [13] Ganerwal S, Kumar R, Srivastava MB. Timing-Sync protocol for sensor networks. In: Akyildiz I, Estrin D, eds. Proc. of the Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems 2003. Los Angeles: ACM Press, 2003. 138–149. [doi: 10.1145/958491.958508]
- [14] Maróti M, Kusy B, Simon G, Ledeczi A. The flooding time synchronization protocol. In: Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press, 2004. 39–49. [doi: 10.1145/1031495.1031501]
- [15] Pottie GJ, Kaiser WJ. Wireless integrated network sensors. *Communications of the ACM*, 2000,43(5):51–58. [doi: 10.1145/332833.332838]
- [16] Romer K, Blum P, Meier L. Time synchronization and calibration in wireless sensor networks. In: *Handbook of Sensor Networks: Algorithms and Architectures*. 2005,49:199. [doi: 10.1002/047174414X.ch7]
- [17] Veitch D, Babu S, Pásztor A. Robust synchronization of software clocks across the internet. In: Yavatkar R, Feng WC, eds. Proc. of the Special Interest Group on Data Communication. Portland: ACM Press, 2004. 219–232. [doi: 10.1145/1028788.1028817]
- [18] Lenzen C, Sommer P, Wattenhofer R. Optimal clock synchronization in networks. In: Culler D, ed. Proc. of the Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. Berkeley: ACM Press, 2009. 225–238. [doi: 10.1145/1644038.1644061]
- [19] Romer K. Time synchronization in ad hoc networks. In: Vaidya NH, ed. Proc. of the Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. Long Beach: ACM Press, 2001. 173–182. [doi: 10.1145/501436.501440]
- [20] Hamilton BR, Ma X, Zhao Q, Xu J. ACES: Adaptive clock estimation and synchronization using Kalman filtering. In: Garcia-Luna-Aceves JJ, ed. Proc. of the Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. San Francisco: ACM Press, 2008. 152–162. [doi: 10.1145/1409944.1409963]
- [21] Liu Q, Liu X, Zhou JL, Zhou G, Jin G, Sun Q, Xi M. Adasynch: A general adaptive clock synchronization scheme based on Kalman filter for WSNs. *Wireless Personal Communications*, 2012,63(1):217–239. [doi: 10.1007/s11277-010-0116-3]
- [22] Rowe A, Gupta V, Rajkumar RR. Low-Power clock synchronization using electromagnetic energy radiating from AC power lines. In: Culler D, ed. Proc. of the Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. Berkeley: ACM Press, 2009. 211–224. [doi: 10.1145/1644038.1644060]

- [23] Li L, Xing G, Sun L, Huangfu W, Zhou RG, Zhu HS. Exploiting FM radio data system for adaptive clock calibration in sensor networks. In: Agrawala A, ed. Proc. of the Int'l Conf. on Mobile Systems, Applications, and Services. Washington: ACM Press, 2011. 169–182. [doi: 10.1145/1999995.2000012]
- [24] Hao T, Zhou R, Xing G, Mutka M, Chen JM. Wizsync: Exploiting Wi-Fi infrastructure for clock synchronization in wireless sensor networks. In: Brandt S, ed. Proc. of the Real-Time Systems Symp. Vienna: IEEE Press, 2011. 149–158. [doi: 10.1109/RTSS.2011.21]
- [25] Li ZJ, Chen WW, Li C, Li M, Li XY, Liu YH. Flight: Clock calibration using fluorescent lighting. In: Akan OB, Ekici E, eds. Proc. of the Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Istanbul: ACM Press, 2012. 329–340. [doi: 10.1145/2348543.2348584]
- [26] Jin M, Fang DY, Chen XJ, Yang Z, Liu C, Xu D, Yin XY. Environment-Adaptive clock calibration for wireless sensor networks. In: Wu J, ed. Proc. of the ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. Philadelphia: ACM Press, 2014. 425–426. [doi: 10.1145/2632951.2635936]
- [27] Yang Z, He L, Cai L, Pan JP. Temperature-Assisted clock synchronization and self-calibration for sensor networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2014,13(6):3419–3429. [doi: 10.1109/TWC.2014.051414.130270]
- [28] Jin M, Fang DY, Chen XJ, Yang Z, Liu C, Yin XY. VATS: Voltage-Aware time synchronization for wireless sensor networks. Int'l Journal of Distributed Sensor Networks, 2014. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/285265> [doi: 10.1155/2014/285265]
- [29] Li ZJ, Chen WW, Li M, Lei JS. Incorporating energy heterogeneity into sensor network time synchronization. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2014,99:1–11. [doi: 10.1109/TPDS.2014.2307890]
- [30] Zhong Z, Chen P, He T. On-Demand time synchronization with predictable accuracy. In: Huang B, ed. Proc. of the Int'l Conf. on Computer Communications. Shanghai: IEEE Press, 2011. 2480–2488. [doi: 10.1109/INFCOM.2011.5935071]



金梦(1990—),女,陕西西安人,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络时间同步技术。



刘晨(1986—),女,博士生,助理工程师,CCF 学生会员,主要研究领域为无线传感器网络定位及路由。



陈晓江(1973—),男,博士,教授,CCF 会员,主要研究领域为无线网络与物联网,移动计算,软件安全。



徐丹(1988—),女,助理工程师,主要研究领域为无线传感器网络路由。



房鼎益(1959—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为移动计算,分布式系统,网络与信息安全,无线传感器网络。



王薇(1977—),女,讲师,主要研究领域为移动计算,分布式系统,网络与信息安全,无线传感器网络。



汤战勇(1979—),男,博士,讲师,CCF 会员,主要研究领域为无线传感器网络,网络安全。