

# 物联网感知层低能耗时间同步方法研究

陈珍萍, 黄友锐, 唐超礼, 曲立国

(安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽淮南 232001)

**摘 要:** 针对物联网感知层对时间同步的需求及节点能量有限的特点, 提出一种低能耗时间同步 (Low Energy Consumption Time Synchronization, LECTS) 的方法, 从同步消息量、同步周期和占空比角度研究同步能耗的降低. 对网络进行父子群的划分, 为每个群选择 PS (Pairwise Synchronization) 节点, 群内节点持续同步, 群间节点按需同步; 父节点和 PS 节点间以同步周期和占空比双向交换  $N$  次同步消息, 群内其他节点侦听同步消息, 基于参数抵消的联合极大似然法估计子节点与父节点间的相位偏移和频率偏移, 将群内子节点同步到父节点; 在给定同步精度下, 汇聚节点定期评估网络同步误差, 由时间同步控制器调整网络同步周期和占空比. 仿真结果表明 LECTS 算法在保证同步精度的同时, 降低了同步能耗、提高了网络的生存周期.

**关键词:** 物联网; 时间同步; 同步能耗; 同步控制器

**中图分类号:** TP393.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2016)01-0193-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.01.028

## Research on Low Energy Consumption Time Synchronization Method for Internet of Things' Perception Layer

CHEN Zhen-ping, HUANG You-rui, TANG Chao-li, QU Li-guo

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

**Abstract:** In view of the energy limits and synchronization requirements of sensor nodes of Internet of Things (IoTs), a low-energy-consumption time synchronization algorithm LECTS is proposed, and the energy consumption's reduction is performed from average synchronization message amount, synchronization period and duty cycle aspects. The network is divided into several parent-child groups and for each group one or more PS nodes are chosen. The intra-group nodes are synchronized continuously and the out-group nodes are synchronized on-demand. In each parent-child group, the parent node and PS nodes exchange synchronous message  $N$  times given synchronization period and duty cycle, and other intra-group nodes passively overhear those messages. The clock skew and offset respected to the parent node are estimated jointly based on the maximum likelihood estimation, and thus the intra-group nodes are all synchronized to the parent node. With the given synchronization precision, the network synchronization error is periodically evaluated by the sink node. Synchronization period and duty cycle are adjusted by synchronization controller according to the synchronization precision error. Simulation results show that LECTS method can guarantee synchronization precision and reduce energy consumption effectively, thus it can improve the network's lifetime.

**Key words:** internet of things; time synchronization; synchronization energy consumption; synchronization controller

## 1 引言

物联网是信息技术领域的一次重大变革<sup>[1,2]</sup>, 在多个学科领域受到广泛关注, 其基本特征是信息的全面感知、可靠传送和智能处理, 其核心是物与物以及人与物之间的信息交互, 信息感知为物联网应用提供了信息来源, 是物联网应用的基础. 文献[1]从技术层面说

明了物联网系统架构, 将实现智能感知功能的网络称为物联网的底层网络, 也即物联网的感知层网络. 为实现物联网的智能感知, 感知层节点间需要协同与协作、对感知数据进行数据融合<sup>[3,4]</sup>, 这要求网络节点间保持时间同步; 时分多址 TDMA (Time Division Multiple Access) 技术按时间间隙划分地址, 实现多个节点对共享信道的访问, 但要求参与通信的节点实现时间同步; 物

联网中的一些支撑技术,如测距、定位等,将感知数据与位置信息关联以提高数据表示的完整性,这也要求节点间保持时间同步. 时间同步是物联网感知层的一个支撑技术,不仅为物联网提供时间服务,也是物联网获得空间信息的基础.

为实现智能感知这一功能<sup>[5]</sup>,物联网感知层包含有各种无线传感器和有线传感器. 其中有线传感器可使用传统有线网络的时间同步方法,本文主要研究基于无线传感器网络的物联网感知层时间同步方法.

现有面向无线传感器网络的时间同步算法,如参考广播同步算法 RBS (Reference Broadcast Synchronization)、传感器网络时间同步协议 TPSN (Timing-sync Protocol for Sensor Networks)、洪泛时间同步协议 FTSP (Flooding Time Synchronization Protocol)、延时测量同步算法 DMTS (Delay Measurement Time Synchronization) 等,着重研究如何尽可能地提高时间同步精度<sup>[6]</sup>,但并未考虑到能耗和精度间的折中. 针对水下应用环境的特殊性,文献[7]研究了水下无线传感器网络的时间同步的关键技术,综述了现有时间同步的研究现状. 文献[8,9]提出了一种基于成对广播同步(Pairwise Broadcast Synchronization, PBS)的时间同步机制,从减少同步消息量这一角度降低了同步能耗. 文献[10]通过基于簇结构的主动和被动结合的双向同步算法,降低了同步消息量. 文献[11]基于簇状结构提出了一种精度可调的时间同步算法,实时测量簇内同步误差,在同步精度满足时增加同步周期以降低同步事件的发生概率来节约节点能量,但该文献实现的仅仅是簇内节点的时间同步. 文献[12]提出一种低能耗的多跳自适应时间同步(Multi-hop Adaptive Time Synchronization, MATS)算法,自适应选择同步模式、确定最优同步消息交换次数和同步周期,通过同步模式切换、减小消息交换次数和增加同步周期,降低了同步能耗.

占空比(Duty Cycle, DC)技术是降低节点能量消耗的一个有效和常用的手段<sup>[13-15]</sup>,节点 DC 越小,能量有效性越高. 由文献[9],无线节点约 17% 的能量消耗在时间同步上,若将占空比机制引入时间同步中,则能提高时间同步的能量有效性,对于持续时间同步更是如此. 文献[15]将占空比引入到时间同步中,且针对于特定硬件平台研究了同步周期与占空比之间的关系,节约了节点能量,但该算法并未考虑多节点网络的时间同步,且没有考虑占空比对同步精度的影响.

基于上述分析,本文研究从如下几个方面减小同步能耗:(1)感知层中大部分节点以侦听方式获取同步消息;(2)通信范围内子节点与父节点持续保持同步,在数据传输等特定事件发生时,事件源节点与汇聚节点按需远程同步;(3)节点以一定的 DC 周期性关闭射

频模块;(4)汇聚节点定期评估网络同步误差进而调整同步周期和 DC,在满足同步精度时尽可能增大同步周期、降低 DC 以降低同步能耗.

## 2 LECTS 同步方案

图 1 给出了物联网感知层的一种拓扑结构,其中汇聚节点可通过 GPS 接收器或有线网络获取标准时间 UTC,为整个网络提供时间基准,PS 节点与父节点(包括汇聚节点)双向交换同步消息,侦听节点单向侦听同步消息.

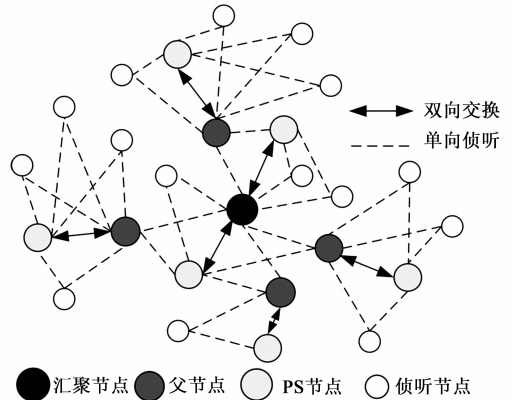


图1 物联网感知层拓扑图

LECTS 算法分成群划分及 PS 节点选择、群内持续同步和群间按需同步三个阶段.

在第一阶段,首先基于节点间的通信情况,本着群最少原则,从汇聚节点开始将网络分成若干个父子群;其次在文献[8]基础上,为每个群选择合适的 PS 节点;最后为保证网络节点能量消耗的均衡性,不定期进行群划分和 PS 节点选择.

第二阶段的群内持续同步框图如图 2,其中  $E_{\max}$  为同步误差要求值,代表网络同步精度,根据具体应用可为  $\mu\text{s}$ 、 $\text{ms}$  或  $\text{s}$  级,如节点定位需要  $0.5 \sim 7\text{ms}$  的同步精度<sup>[16]</sup>.

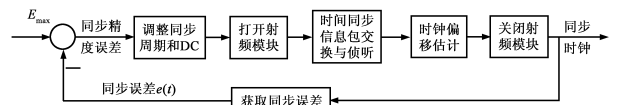


图2 群内节点持续同步框图

群内节点持续同步过程为:(1)父节点与 PS 节点以同步周期  $T$  和 DC 双向交换  $N$  次时间同步消息,群中其它侦听节点侦听  $2N$  次时间同步消息;(2)父节点和侦听节点基于参数抵消的联合极大似然法估计所有子节点与父节点间的相位和频率偏移,将子节点同步到父节点;(3)群内所有节点按 DC 关闭射频模块;唤醒时间到时,打开射频模块,重复步骤(1)~(3)进行下一次时间同步;(4)汇聚节点定期地获取网络同步误差,由时间同步控制器调整同步周期和 DC,在同步精度满足

要求的情况下提高同步周期、降低 DC,降低同步能耗。

第三阶段事件触发的按需同步过程为:(1)在数据传输等事件发生时,事件源节点借助于父子群中的父节点建立起与汇聚节点的一条通信路径,并往上级父节点发送频率偏移、相位偏移和事件发生时源节点本地时间;(2)上级父节点接收到参数后估计源节点与自身上级父节点间的频率偏移、相位偏移,并将估计值和事件发生时源节点本地时间打包发送给上级父节点直至发送到汇聚节点;(3)汇聚节点接收数据包提取相位偏移、频率偏移和事件发生时源节点本地时间,将事件发生时源节点本地时间调整到自身本地时间,实现事件发生时源节点与汇聚节点的按需同步。

### 3 群内节点持续同步

#### 3.1 节点时钟模型

选用一阶线性关系来表示网络中节点的时钟模型。分别记父节点为  $S_i$ 、PS 节点为  $S_j$ 、侦听节点为  $S_m$ ,  $S_i$ 、 $S_j$  和  $S_m$  的本地时间分别为  $T_i(t) = \omega_i t + \varphi_i$ 、 $T_j(t) = \omega_j t + \varphi_j$  和  $T_m(t) = \omega_m t + \varphi_m$ ,其中  $t$  为标准时间, $\omega_i$  及  $\varphi_i$ 、 $\omega_j$  及  $\varphi_j$  和  $\omega_m$  及  $\varphi_m$  分别为  $S_i$ 、 $S_j$  和  $S_m$  的相对时钟频率和初始相位。给定晶体振荡器的频率漂移  $\rho$ ,节点的相对时钟频率满足  $1 - \rho \leq \omega \leq 1 + \rho$ 。节点  $S_j$  与  $S_i$  间的相对偏移为  $\omega_{ij} = \omega_j / \omega_i$  和  $\varphi_{ij} = \varphi_j - \omega_j \varphi_i / \omega_i$ ,节点  $S_m$  与  $S_i$  间的相对偏移为  $\omega_{im} = \omega_m / \omega_i$  和  $\varphi_{im} = \varphi_m - \omega_m \varphi_i / \omega_i$ 。

#### 3.2 同步消息交换和时间戳标记

本文采用同步消息双向交换和单向侦听结合的方式实现网络节点本地时间  $T(t)$  的传输。群内节点持续同步模型见图 3,时间同步由父节点周期性发起。

图 3 中,第  $k$  次同步消息交换时, $S_i$  往  $S_j$  发送第  $k$  个同步请求消息 syn,syn 中包含发送时间戳  $T_{1,k}$ ;  $S_j$  和  $S_m$  分别在本地  $T_{2,k}$  和  $T_{5,k}$  时刻接收到 syn; $S_j$  在  $T_{3,k}$  发送第  $k$  个同步应答消息 ack,ack 中携带时间戳  $T_{2,k}$  和  $T_{3,k}$ ;  $S_i$  在  $T_{4,k}$  时刻接收到 ack,获取  $T_{2,k}$ 、 $T_{3,k}$  并保存, $S_m$  在  $T_{6,k}$  时刻接收到 ack,获取  $T_{3,k}$  并保存。

$N$  次同步消息交换后, $S_i$  保存有  $N$  组数据  $\{T_{1,k},$

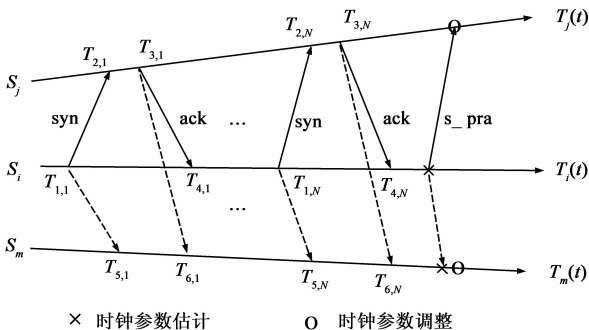


图3 群内节点持续同步模型

$T_{2,k}, T_{3,k}, T_{4,k}\}_{k=1}^N$ ,估计  $S_j$  与自身之间的时钟参数  $\hat{\omega}_{ij}$  和  $\hat{\varphi}_{ij}$ ,并往  $S_j$  发送同步参数消息 s\_pra,包含有  $\hat{\omega}_{ij}$  和  $\hat{\varphi}_{ij}$ .  $S_j$  接收到 s\_pra 并获取时钟参数  $\hat{\omega}_{ij}$  和  $\hat{\varphi}_{ij}$ ,进而调整频偏和相偏;在侦听  $2N + 1$  次消息后, $S_m$  保存有  $\{T_{1,k}, T_{3,k}, T_{5,k}, T_{6,k}\}_{k=1}^N$ , $\hat{\omega}_{ij}$  和  $\hat{\varphi}_{ij}$  参数,估计与  $S_i$  间的时钟参数  $\hat{\omega}_{im}$ 、 $\hat{\varphi}_{im}$  并调整频偏和相偏。

#### 3.3 时钟参数估计

在假定传输延迟服从高斯分布时,节点  $S_i$  和  $S_m$  根据保存的时间数据,采用参数抵消的极大似然估计法估计节点间的频率偏移  $\omega_{ij}$ 、 $\omega_{im}$  和相位偏移  $\varphi_{ij}$ 、 $\varphi_{im}$ ,并调整节点本地时间。

##### 3.3.1 $\omega_{ij}$ 和 $\varphi_{ij}$ 的估计

在  $S_j$  与  $S_i$  的第  $k$  次同步消息交换时,有:

$$T_{2,k} = \omega_{ij}(T_{1,k} + d + X_k^{ij}) + \varphi_{ij} \quad (1)$$

$$T_{3,k} = \omega_{ij}(T_{4,k} - d - X_k^{ji}) + \varphi_{ij} \quad (2)$$

其中, $d$  为  $S_i$  和  $S_j$  间传输延迟的固定部分, $X_k^{ij}$  和  $X_k^{ji}$  分别为  $S_i$  到  $S_j$  和  $S_j$  到  $S_i$  延迟中的随机部分。由文献[17],假设  $X_k^{ij}$ 、 $X_k^{ji}$  服从均值为零、方差为  $\sigma^2$  的高斯分布,即  $X_k^{ij} \sim N(0, \sigma^2)$ 。

为降低时钟偏移估计算法复杂度,借鉴文献[8],固定下标偏移量  $s$  为  $N/2$ ,在式(1)、(2)中用第  $k+s$  组数据减去第  $k$  组数据,抵消待估参数  $d$  和  $\varphi_{ij}$ ,其中  $1 \leq k \leq N/2$ ,得到式(1)和(2)的简化形式:

$$T_{2,k+s} - T_{2,k} = \omega_{ij}(T_{1,k+s} - T_{1,k} + X_{k+s}^{ij} - X_k^{ij}) \quad (3)$$

$$T_{3,k+s} - T_{3,k} = \omega_{ij}(T_{4,k+s} - T_{4,k} - X_{k+s}^{ji} + X_k^{ji}) \quad (4)$$

整理(3)、(4)得到:

$$X_{k+s}^{ij} - X_k^{ij} = (T_{2,k+s} - T_{2,k}) / \omega_{ij} - (T_{1,k+s} - T_{1,k}) \quad (5)$$

$$X_{k+s}^{ji} - X_k^{ji} = -(T_{3,k+s} - T_{3,k}) / \omega_{ij} + (T_{4,k+s} - T_{4,k}) \quad (6)$$

式中, $X_{k+s}^{ij} - X_k^{ij}$  和  $X_{k+s}^{ji} - X_k^{ji}$  服从均值为 0、方差为  $2\sigma^2$  的高斯分布,分别记  $T_{1,k+s} - T_{1,k}$ 、 $T_{2,k+s} - T_{2,k}$ 、 $T_{3,k+s} - T_{3,k}$  和  $T_{4,k+s} - T_{4,k}$  为  $y_{1,k}$ 、 $y_{2,k}$ 、 $y_{3,k}$  和  $y_{4,k}$ ,基于  $\{y_{1,k}, y_{2,k}, y_{3,k}, y_{4,k}\}_{k=1}^{N/2}$  的联合概率密度函数为:

$$L(\sigma, \omega_{ij}) = (4\pi\sigma^2)^{N/2} \exp \sum_{k=1}^{N/2} \left( \frac{y_2(k)}{\omega_{ij}} - y_1(k) \right)^2 / (-4\sigma^2) \\ \cdot \exp \sum_{k=1}^{N/2} \left( \frac{y_3(k)}{\omega_{ij}} - y_4(k) \right)^2 / (-4\sigma^2)$$

令  $\partial \ln L(\sigma, \omega_{ij}) / \partial \omega_{ij} = 0$ ,得到  $\omega_{ij}$  的极大似然估计:

$$\hat{\omega}_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{N/2} (y_{2,k}^2 + y_{3,k}^2)}{\sum_{k=1}^{N/2} (y_{1,k} y_{2,k} + y_{3,k} y_{4,k})}$$

将  $\hat{\omega}_{ij}$  带入(1)、(2)整理得到:

$$X_k^{ij} = T_{2,k} / \hat{\omega}_{ij} - T_{1,k} - d - \varphi_{ij} / \hat{\omega}_{ij} \quad (7)$$

$$X_k^{ji} = -T_{3,k} / \hat{\omega}_{ij} + T_{4,k} - d + \varphi_{ij} / \hat{\omega}_{ij} \quad (8)$$

基于  $\{T_{1,k}, T_{2,k}, T_{3,k}, T_{4,k}\}_{k=1}^N$  的联合概率密度函数为:

$$L(d, \varphi'_{ij}) = (2\pi\sigma^2)^{N/2} \exp \sum_{k=1}^N \left( \frac{T_{2,k}}{\hat{\omega}_{ij}} - T_{1,k} - d - \varphi'_{ij} \right)^2 / (-2\sigma^2) \cdot \exp \sum_{k=1}^N \left( -\frac{T_{3,k}}{\hat{\omega}_{ij}} + T_{4,k} - d + \varphi'_{ij} \right)^2 / (-2\sigma^2)$$

其中  $\varphi'_{ij} = \varphi_{ij} / \hat{\omega}_{ij}$ . 令  $\partial \ln L(d, \varphi'_{ij}) / \partial \varphi'_{ij} = 0$ , 得  $\varphi'_{ij}$  的极大似然估计:

$$\hat{\varphi}'_{ij} = \sum_{k=1}^N \left[ \frac{(T_{2,k} + T_{3,k}) / \hat{\omega}_{ij} - (T_{1,k} + T_{4,k})}{2N} \right] \quad (9)$$

则  $\varphi_{ij}$  的估计值为  $\hat{\varphi}_{ij} = \hat{\varphi}'_{ij} \hat{\omega}_{ij}$ .

$S_i$  在估计完  $\hat{\omega}_{ij}$  和  $\hat{\varphi}_{ij}$  后, 往  $S_j$  发送同步参数消息  $s\_pra$ , 包括有  $S_j$  的 ID 号和  $\hat{\omega}_{ij}$  和  $\hat{\varphi}_{ij}$ .  $S_j$  接收  $s\_pra$ , 获取  $\hat{\omega}_{ij}$  和  $\hat{\varphi}_{ij}$ , 且按照  $\omega_{ij} = \omega_{ij} / \hat{\omega}_{ij}$  和  $\varphi_{ij} = \varphi_{ij} - \hat{\varphi}_{ij}$  对频偏  $\omega_{ij}$  和相偏  $\varphi_{ij}$  进行调整.

### 3.3.2 $\omega_{im}$ 和 $\varphi_{im}$ 的估计

侦听节点  $S_m$  在第  $k$  次同步消息侦听时有:

$$T_{5,k} = \omega_{im} (T_{1,k} + d + X_k^{im}) + \varphi_{im} \quad (10)$$

$$T_{6,k} = \omega_{im} ((T_{3,k} - \varphi_{ij}) / \omega_{ij} + d + X_k^{jm}) + \varphi_{im} \quad (11)$$

其中,  $d$  为传输延迟中的固定部分,  $X_k^{im}, X_k^{jm}$  为传输延迟中的随机部分且假定服从高斯分布<sup>[17]</sup>, 即  $X_k^{im}, X_k^{jm} \sim N(0, \sigma^2)$ . 将式(11)中的  $(T_{3,k} - \varphi_{ij}) / \omega_{ij}$  记为  $T'_{3,k}$ , 沿用  $\hat{\omega}_{ij}$  和  $\hat{\varphi}_{ij}$  的估计方法, 可得  $\omega_{im}$  和  $\varphi_{im}$  估计值为:

$$\hat{\omega}_{im} = \frac{\sum_{k=1}^{N/2} (y_{5,k}^2 + y_{6,k}^2)}{\sum_{k=1}^{N/2} (y_{5,k} y_{1,k} + y_{6,k} y'_{3,k})} \quad (12)$$

$$\hat{\varphi}_{im} = \sum_{k=1}^N \left[ \frac{(T_{5,k} - \hat{\omega}_{im} T_{1,k}) + (T_{6,k} - \hat{\omega}_{im} T'_{3,k}) - 2d\hat{\omega}_{im}}{2N} \right] \quad (13)$$

有  $y_{1,k} \triangleq T_{1,k+s} - T_{1,k}, y'_{3,k} \triangleq T'_{3,k+s} - T'_{3,k}, y_{5,k} \triangleq T_{5,k+s} - T_{5,k}$  和  $y_{6,k} \triangleq T_{6,k+s} - T_{6,k}$ .

节点  $S_m$  按照  $\omega_{im} = \omega_{im} / \hat{\omega}_{im}$  和  $\varphi_{im} = \varphi_{im} - \hat{\varphi}_{im}$  对频偏  $\omega_{im}$  和相偏  $\varphi_{im}$  进行调整.

### 3.4 时间同步参数调整

本文根据网络同步误差和同步精度  $E_{max}$  调整同步周期  $T$  和 DC. 在同步精度满足情况下, 增大同步周期  $T$ , 减小 DC, 降低同步能耗. 考虑到物联网感知层节点计算能力、存储能力有限<sup>[5]</sup>, 与文献[11]采用自适应算法不同的是: 本文采用一种易于实现的方法在调整同步周期的同时调整 DC.

介于个别节点电压过低对同步误差的影响, 采用去极值平均法定义群  $i$  的同步误差  $e_i(t)$ :

$$e_{ik}(t) = T_i(t) - T_k(t) = (\omega_i - \omega_k)t + \varphi_i - \varphi_k \quad (14)$$

$$e_i(t) = \frac{\sum_k e_{ik}(t) - \max e_{ik}(t) - \min e_{ik}(t)}{N_i} \quad (15)$$

其中  $e_{ik}(t)$  为子节点  $S_k$  相对于父节点  $S_i$  的同步误差,  $N_i$  为群  $i$  子节点个数, 包括 PS 节点  $S_j$  和侦听节点  $S_m$ . 为均衡网络能耗, 记网络同步误差为所有群同步误差均值, 即:

$$e(t) = \sum_i e_i(t) / G_{num} \quad (16)$$

其中  $e_i(t)$  为第  $i$  个群的同步误差,  $G_{num}$  为网络群个数.

汇聚节点定期评估网络同步误差, 具体评估过程为:

(1) 在需要评估同步误差时, 由汇聚节点开始的所有父节点往同步参数消息  $s\_pra$  中增加一标志位, 以表示需要获取群同步误差.

(2) 所有子节点  $S_m$  从  $s\_pra$  中获取该标志位, 按照式(12)、(13)估计完  $\omega_{im}$  和  $\varphi_{im}$  后, 往父节点发送同步参数应答消息  $e\_ack$ , 包含父节点  $S_i$  的 ID、 $\omega_{im}$  和  $\varphi_{im}$ .

(3) 父节点接收所有子节点  $S_m$  的同步参数应答消息  $e\_ack$ , 获取子节点的  $\omega_{ik}$  和  $\varphi_{ik}$  (包括 PS 节点和侦听节点), 按照式(15)计算出群同步误差  $e_i(t)$ , 并发送给自身父节点, 直至发送至汇聚节点.

(4) 汇聚节点接收所有群的群同步误差, 按照式(16)计算网络同步误差, 并按照下式调整同步周期  $T$  和占空比 DC.

$$\begin{cases} T = \frac{E_{max}}{e(t)} T, DC = \frac{e(t)}{E_{max}} DC, \text{若 } e(t) \geq 1.05 E_{max} \\ T = T, DC = DC, \text{若 } 0.95 E_{max} \leq e(t) < 1.05 E_{max} \\ T = \frac{E_{max}}{e(t)} T, DC = \frac{e(t)}{E_{max}} DC, \text{其它} \end{cases} \quad (17)$$

## 4 事件触发的按需同步

节点在特定事件发生, 如需要将采集的数据传输给汇聚节点时, 事件源节点需要同步到汇聚节点. 为降低通信能耗, 本文采用按需同步方式在特定事件发生时实现事件源节点与汇聚节点的远程同步. 为表述方便起见, 设源节点  $S_1$  需同步到汇聚节点  $S_h, h \geq 2$  为  $S_1$  到  $S_h$  的跳数, 传输路径  $S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow \dots \rightarrow S_h, \varphi_i$  和  $\omega_i$  为节点  $S_i$  相对于父节点  $S_{i-1}$  的相偏和频偏 ( $1 \leq i < h$ ), 则该路径上相邻两节点的时间关系为:

$$T_{i+1}(t) = \omega_i T_i(t) + \varphi_i \quad (1 \leq i \leq h-1)$$

通过迭代, 得到  $S_1$  与  $S_i (1 < i \leq h)$  间的相位偏移和频率偏移分别为  $\varphi_{i,1} = \sum_{l=1}^{i-2} (\prod_{k=l+1}^{i-1} \omega_k) \varphi_l + \varphi_{i-1}$  和  $\omega_{i,1} = \prod_{k=1}^{i-1} \omega_k$ . 对  $\varphi_{i,1}$  和  $\omega_{i,1}$  简化得到:

$$\omega_{i,1} = \omega_i \omega_{i-1,1} \quad (18)$$

$$\varphi_{i,1} = \omega_i \varphi_{i-1,1} + \varphi_i \quad (19)$$

中间节点  $S_i$  按照接收-估计-发送模式进行时间同

步参数的转发:在收到下级子节点  $S_{i-1}$  发送的  $\omega_{i-1,1}$  和  $\varphi_{i-1,1}$  后,结合自身  $\omega_i$  和  $\varphi_i$  按照式(18)、(19)估计出  $\omega_{i,1}$  和  $\varphi_{i,1}$  并将估计值发送给上级父节点  $S_{i+1}$ ,直至数据包传送到汇聚节点. 汇聚节点从数据包中提取  $\omega_{h-1,1}$  和  $\varphi_{h-1,1}$ ,实现  $S_1$  到  $S_h$  的按需同步.

## 5 仿真结果与分析

结合 OMNet++ 和 Matlab 平台来进行算法仿真. 首先在 OMNet++ 平台上搭建网络的拓扑结构,设置节点参数;其次在 OMNet++ 仿真平台上运行时间同步算法,记录同步周期、占空比、同步误差指标参数,每个参数取值为运行 1000 次的平均值;再次将 OMNet++ 记录的参数以文本形式输出;最后在 Matlab 仿真平台上将参数导入并进行分析,绘制图形和表格.

在 OMNet++ 仿真平台的  $100 \times 100\text{m}^2$  范围内均匀布置  $M$  个节点,节点通信距离为 40m,本着群最少原则进行父子群的划分,参照文献[8]的方法为每个群选择 PS 节点. 节点参数设置为:汇聚节点时钟频率为 1、初始相位为 0,其它节点初始频偏和相偏在 0.99 ~ 1.01 和  $-1 \sim 1\text{s}$  内随机选择,所有群的初始 DC 为 1%、初始

同步周期  $T$  为 10s.

### 5.1 单位时间平均通信量

定义单位时间平均通信量为:一个周期内网络平均同步消息次数与平均同步周期的比值. 单位时间平均通信量是衡量网络平均同步能耗的一个重要指标,与网络节点个数  $M$ 、同步消息交换次数  $N$ 、同步方式、同步周期  $T$  等相关,其值越小同步能耗越低、网络生存周期越长.

在  $M = 10$ 、 $N = 10$ 、同步精度  $E_{\max} = 100\mu\text{s}$  时,网络节点位置分布、通信拓扑图和同步误差曲线如图 4 所示. 图 4(a)为节点初始位置分布图;图 4(b)是经过群划分和 PS 节点选择之后的通信拓扑图,其中 1 号节点为汇聚节点,2 号和 3 号节点为 PS 节点,故一个周期内网络平均同步消息为  $2 \times 2N/M = 4$  次,节约了 60% 的通信量;由图 4(c)可以看出同步误差满足同步精度要求,且同步误差随之同步次数的增多而逐渐趋于同步精度要求值. 在图 4(b)通信拓扑下比较分析 LECTS 算法、文献[11]和文献[12]的平均同步周期、单位时间平均通信量指标,绘制得到表 1.

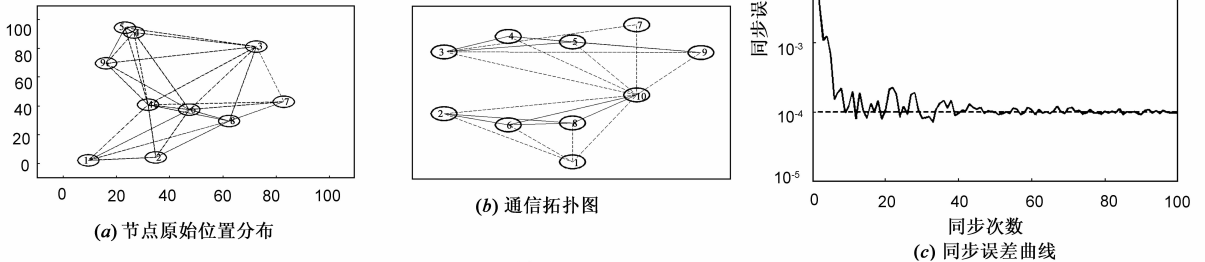


图4 通信拓扑图和同步误差曲线

表 1 不同算法的同步参数比较 ( $E_{\max} = 100\mu\text{s}$ )

算法	平均同步周期(s)	平均消息量(次)	单位时间平均通信量(次/s)
LECTS	36.46	4.00	0.110
文献[11]	12	0.71	0.059
MATS	16.09	12.00	0.746

如表 1 所示,在给定  $100\mu\text{s}$  同步精度要求下,LECTS 算法平均同步周期为 36.46s;文献[11]在  $100\mu\text{s}$  同步精度要求下的同步周期为 12s;在文献[12] MATS 算法给定的参数下、同步精度为  $100\mu\text{s}$  和 99.9% 的置信度的平均同步周期为 16.09s. 故从同步周期角度来看,本文 LECTS 算法优于文献[11,12]. LECTS 算法的平均同步消息为 4,故单位时间平均通信量为  $4/36.46 = 0.110$  (次/s);文献[11]中,假设每同步 10 次评估一次簇内最大和最小频偏,一个周期内网络平均同步消息为 0.7096 次,单位时

间内平均通信量为  $0.7096/12 = 0.059$  (次/s);文献[12]一个周期内网络平均同步消息为  $2 \times N$  ( $N$  取 6) 次,故单位时间内同步通信量为  $2 \times 6/16.09 = 0.746$  (次/s);从单位时间内同步通信量来看,LECTS 优于文献[12]不及文献[11]. 文献[11]的同步通信量小是因为该文仅在节点间交换同步消息 4 次,在假设传输延迟固定时仅估计节点间的相位偏移,并未估计节点的频率偏移,且文献[11]并未将占空比机制引入到时间同步中.

### 5.2 网络规模对同步精度和同步能耗的影响

无线传感器网络为一多跳网络,同步算法的性能会受到网络规模的影响. 网络规模越大,即网络节点个数  $M$  越大,由汇聚节点开始的同步误差逐层累积效应越明显. 为说明网络规模对 LECTS 算法性能的影响,现给出不同  $M$  值下的同步误差曲线如图 5 所示,不同  $M$

值下单位时间平均通信量如表 2 所示. 为保证网络具有相同的节点覆盖率, 增加  $M$  的同时按比例增大网络面积, 且仅记录网络连通时的参数值. 设定参数  $N = 10$ 、同步精度  $E_{\max} = 1\text{ms}$ .

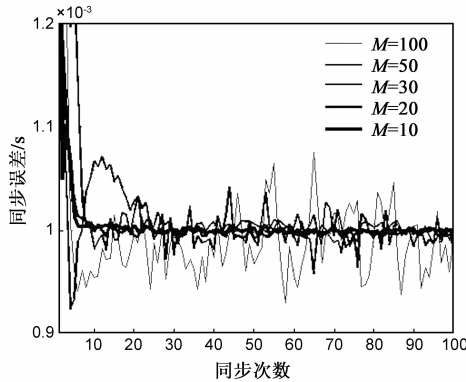


图5 不同 $M$ 值下的同步误差曲线

表 2 不同  $M$  值下的单位时间平均通信量 ( $E_{\max} = 1\text{ms}$ )

$M$	平均同步周期(s)	平均消息量(次)	单位时间平均通信量(次/s)
10	75.77	5.80	0.076
20	52.45	7.00	0.133
30	36.35	7.87	0.216
50	19.94	7.20	0.361
100	10.96	6.72	0.611

结合图 5 和表 2, 可知: LECTS 算法能较好地抑制网络规模对同步误差的影响, 当  $M$  在 10 ~ 100 间取值时, 同步误差均能满足同步精度要求, 但随着  $M$  增加, 同步误差曲线在稳态值附近的波动幅度也随之增大, 但其幅度均不超过 5%; 随着网络规模的增加, 平均同步周期减小, 通信频率增加, 单位时间平均通信量增加,  $M = 100$  时的通信频率和单位时间平均通信量为  $M = 10$  时的 6.92 倍和 8.03 倍.

### 5.3 同步周期和占空比的调整

现给出由同步精度误差调整同步周期和占空比的闭环控制效果, 并与文献[15]的占空比指标进行比较. 同步精度要求初值设置为  $1\text{ms}$ ,  $M = 10$ ,  $N = 10$ , 运行 100 个同步周期 (3346.8s) 后, 精度突变为  $0.1\text{ms}$ , 以新的同步精度再运行 100 个同步周期, 总同步时间为 22513.5s, 每同步 10 次评估网络同步误差. 在同步精度要求值  $E_{\max}$  发生变化时, 同步误差、同步周期曲线和占空比曲线见图 6 (a)、(b) 和 (c).

由图 6 可以得出如下结论: (1) 在  $E_{\max}$  发生变化时, 同步误差能跟踪上  $E_{\max}$  的变化, 并最终稳定在  $E_{\max}$  附近; (2) 定义误差带为  $0.95E_{\max} \sim 1.05E_{\max}$ , 当同步误差大于  $1.05E_{\max}$  时, 同步周期减小、占空比增加, 以单位时间平均通信量增加为代价减小同步误差, 当同步误差

小于  $0.95E_{\max}$  时, 同步周期增加、占空比减小, 单位时间平均通信量减小, 若同步误差曲线位于误差带内, 同步周期和占空比维持不变, 单位时间平均通信量不变; (3) LECTS 算法的平均同步周期为 112.57s, 平均占空比为 0.85%, 文献[15]在同步周期为 1s 和 60s 时的占空比分别为 0.46% 和 0.017%. 本文 LECTS 算法的平均占空比大于文献[15], 其原因是 LECTS 算法的同步消息次数  $N = 10$ , 而文献[15]仅需要在节点间单向传递 1 次同步消息, 即  $N = 0.5$ .

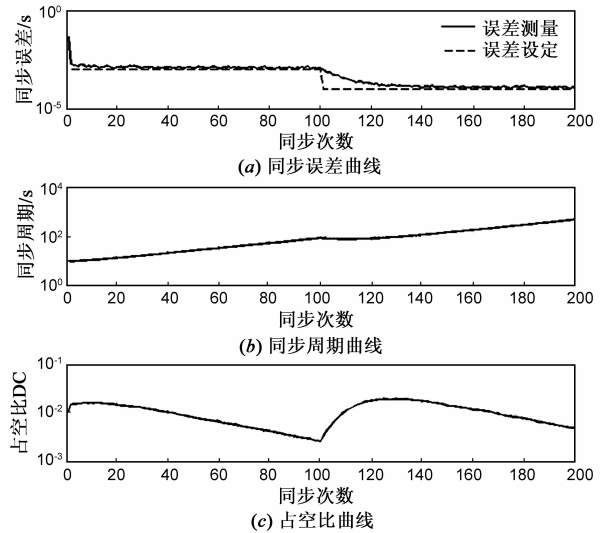


图6  $E_{\max}$  变化时误差、周期和占空比曲线

## 6 结论

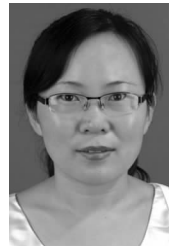
针对物联网感知层对时间同步的需求, 本文研究了一种低能耗时间同步方法 LECTS. LECTS 有如下特点: (1) 通过消息侦听和群间按需同步方式, 降低网络中传输的同步消息量, 在  $N = 10$ 、 $M = 10$ 、 $E_{\max} = 100\mu\text{s}$  时, LECTS 算法的单位时间平均通信量分别为文献[11]和文献[12] MATS 的 2 倍和 0.147 倍, 但文献[11]和文献[12]均未考虑以一定的 DC 周期性关闭射频模块; (2) 定期评估网络同步误差, 调整同步周期和占空比, 在同步精度满足的情况下降低同步能耗, 同步精度  $E_{\max} = 100\mu\text{s}$  时的平均占空比为 0.97%, 平均同步周期为 36.46s; (3) 通过同步周期和占空比的闭环调整降低了由网络规模造成的同步误差累积效应. LECTS 从同步消息量、同步周期和占空比三个方面降低同步能耗的方法是有效的, 可提高物联网感知层节点生存周期.

### 参考文献

- [1] 钱志鸿, 王义君. 物联网技术与应用研究[J]. 电子学报, 2012, 40(5): 1023 - 1029.  
Qian Zhi-hong, Wang Yi-jun. IoT technology and appli-

- cation[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(5): 1023 - 1029. (in Chinese)
- [2] 宁焕生, 徐群玉. 全球物联网发展及中国物联网建设若干思考[J]. 电子学报, 2010, 38(11): 2590 - 2599.  
Ning Huan-sheng, Xu Qun-yu. Research on global Internet of things' developments and its construction in China[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(11): 2590 - 2599. (in Chinese)
- [3] 徐晓斌, 张光卫, 等. 一种误差可控传输均衡的 WSN 数据融合算法[J]. 电子学报, 2014, 42(6): 1205 - 1209.  
Xu Xiao-bin, Zhang Guang-wei, et al. Precision configurable data aggregation algorithm in WSNs[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(6): 1205 - 1209. (in Chinese)
- [4] 黄辰, 李可维, 等. 无线物联网中基于网络编码的能量受限数据传输机制[J]. 电子学报, 2013, 41(1): 144 - 147.  
Huang Chen, Li Ke-wei, et al. Network coding based energy constrained data transmission mechanism in wireless internet of things[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(1): 144 - 147. (in Chinese)
- [5] 马骏, 郭渊博, 等. 物联网感知层基于资源分层的多用户访问控制方案[J]. 电子学报, 2014, 42(1): 28 - 35.  
Ma Jun, Guo Yuan-bo, et al. Multi-user access control scheme based on resources hierarchies for perceptual layer of IoT[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(1): 28 - 35. (in Chinese)
- [6] Zhong Z, Chen P, He T. On-demand time synchronization with predictable accuracy [A]. Proceedings of INFOCOM [C]. USA: IEEE, 2011. 2480 - 2488.
- [7] 洪锋, 张玉亮, 等. 水下传感器网络时间同步技术综述[J]. 电子学报, 2013, 41(5): 960 - 965.  
Hong Feng, Zhang Yu-liang, et al. Review on time Synchronization techniques in under water acoustic sensor network[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(5): 960 - 965. (in Chinese)
- [8] Cao X, Yang F, et al. Joint estimation of clock skew and offset in pairwise broadcast synchronization mechanism [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(6): 2508 - 2521.
- [9] E Serpedin, Q M Chaudhari. Synchronization in Wireless Sensor Networks (China Edition) [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [10] 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, Yu Hai-bin. Low overhead two-way time synchronization algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(6): 1357 - 1363. (in Chinese)
- [11] Li L, Yong-pan L, et al. Lightweight precision adaptive timesynchronization in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Communication, 2010, 93(9): 2299 - 2308.
- [12] 王越, 万洪. 一种节能的无线传感器网络多跳自适应时间同步算法[J]. 传感技术学报, 2013, 26(11): 1557 - 1563.  
Wang Yue, Wan Hong. One of energy efficient wireless networks multi-hop adaptive time synchronization algorithm [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(11): 1557 - 1563. (in Chinese)
- [13] 陈良银, 王金磊, 张靖宇, 等. 低占空比 WSN 中一种节点休眠调度算法[J]. 软件学报, 2014, 25(3): 631 - 641.  
Chen Liang-yin, Wang Jin-lei, Zhang Jing-yu, et al. Scheduling scheme algorithm in low-duty-cycle WSN [J]. Journal of Software, 2014, 25(3): 631 - 641. (in Chinese)
- [14] Pak W, Bahk S. Centralized route recovery based on multi-hop wakeup time estimation for wireless sensor networks with ultra low duty cycles [J]. Computer Communications, 2012, 35(11): 1355 - 1367.
- [15] Kosanovic M R, Stojcev M K. Reliable power aware time synchronization protocol [J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(1): 303 - 315.
- [16] Simon G, Maróti M, Lédeczi Á, et al. Sensor network-based countersniper system [A]. Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems [C]. USA: ACM, 2004. 1 - 12.
- [17] 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.

### 作者简介



陈珍萍 女, 1981 年 6 月出生, 安徽南陵人. 2002 年毕业于安徽理工大学自动化系, 现为安徽理工大学博士研究生, 从事网络控制系统和时间同步方面的有关研究.

E-mail: zhchen10@163.com



黄友锐 (通信作者) 男, 1971 年 6 月出生, 安徽长丰人, 教授、博士生导师. 主要从事智能控制、矿山物联网、复杂网络等方面的研究工作.

E-mail: hyr628@163.com