

一种能量均衡的低开销 WSN 时间同步算法

魏炬熠, 张建军, 魏振春

(合肥工业大学 计算机与信息学院, 合肥 230009)

摘 要: 现有的时间同步算法大多采用消息交换来实现较高的同步精度, 存在节点通信开销过大、能耗不均等问题。为此, 提出一种能量均衡的低开销时间同步算法。该算法基于簇状层次型网络拓扑, 簇头间采用双向消息交换机制完成到 Sink 节点的同步, 并利用最大似然估计补偿节点时钟频偏和相偏, 提高簇间同步精度, 降低同步过程频次。簇成员节点采用双向消息交换机制和参考广播机制相结合的方式与簇头同步, 考虑节点广播特性及剩余能量参数, 在降低节点开销的同时均衡各节点能耗。仿真结果表明, 该算法在保证一定精度的同时, 可降低网络通信开销、均衡节点能耗与长整个网络寿命。

关键词: 无线传感器网络; 时间同步; 能量均衡; 低开销; 双向消息交换; 参考广播

中文引用格式: 魏炬熠, 张建军, 魏振春. 一种能量均衡的低开销 WSN 时间同步算法[J]. 计算机工程, 2016, 42(12): 5-10, 15.

英文引用格式: Wei Juyi, Zhang Jianjun, Wei Zhenchun. An Energy-balanced and Low-overhead WSN Time Synchronization Algorithm [J]. Computer Engineering, 2016, 42(12): 5-10, 15.

An Energy-balanced and Low-overhead WSN Time Synchronization Algorithm

WEI Juyi, ZHANG Jianjun, WEI Zhenchun

(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

[Abstract] Aiming at the problem of high overhead and unbalanced energy consumption caused by exchanging majority of messages for higher accuracy in typical algorithms, an energy-balanced and low-overhead time synchronization algorithm for wireless sensor networks is proposed. Based on a hierarchical topology, cluster heads accomplish the process by pair-wise message exchange mechanism with the Sink node, and adopt maximum likelihood estimation for the clock offset and skew correction, thus improving precision and decreasing the times of the synchronization process. Considering broadcasting properties and remaining energy, cluster members synchronizes to their cluster head by adopting pair-wise packet exchange and reference broadcast mechanism, thus reducing numbers of transmission packets and balancing the energy in the network. Simulation results show that the proposed algorithm relatively has less packet cost, balances the energy consumption and extends the network lifetime, while guaranteeing the precision.

[Key words] Wireless Sensor Network (WSN); time synchronization; energy balance; low-overhead; pair-wise message exchange; reference broadcast

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.12.002

0 概述

无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 是由分布在物理空间上的大量具有信息采集、处理和无线通信能力的微型传感器节点形成的多跳自组织网络^[1-2]。时间同步是无线传感器网络的重要支撑技术之一, 无论是自身协议的运行, 还是诸如数据融合、协同休眠、节点定位等应用都需要网

络中各节点的时间保持同步^[3-4]。

近年来, 研究者提出了多种 WSN 时间同步算法, 主要分 3 类: 1) 参考广播同步机制, 如 RBS 算法^[5], 采用“第三方”节点广播信息, 消除了发送端信息延迟的影响, 该算法节点较多时接收端通信开销较大; 2) 双向消息交换机制, 如 TPSN 算法^[6], 采用层次型网络结构, 下层节点与上层节点进行双向消息交换并校正本地时钟偏差, 但未补偿时钟频

基金项目: 国家自然科学基金 (61370088, 61502142); 国家国际科技合作专项 (2014DFB10060)。

作者简介: 魏炬熠 (1988—), 男, 硕士研究生, 主研方向为无线传感器网络; 张建军, 教授、博士; 魏振春, 副教授、博士。

收稿日期: 2016-01-19 **修回日期:** 2016-02-22 **E-mail:** 419673441@qq.com

偏,需频繁进行同步过程;3)单向消息机制,如 FTSP 算法^[7],采用时间戳消除了传播延迟以外的其他不确定性因素,虽通信开销较小,但同步精度偏低。

现有的时间同步算法,或偏向于提高同步精度^[8-9],或偏向于能量有效^[10-11],或偏向于提高重同步周期^[12]。本文综合分析上述因素,在现有同步机制的基础上,提出一种能量均衡的低开销 WSN 时间同步算法(EBLTS)。

1 模型建立

1.1 网络模型

定义静态多跳的分簇网络模型,如图 1 所示,在矩形的监测区域内,随机布撒 n 个传感器节点,性质如下:

1) Sink 为根节点,不受能量限制并搭载 GPS 接收模块为整个网络提供标准时间,而其他传感器节点为相同电池驱动。

2)由 LEACH 路由算法^[13]将节点划分为不同的簇,每个簇由一个簇头节点及若干簇成员节点组成,簇头节点管理簇内成员节点的时间、位置等信息,簇成员节点只与本簇头节点通信。

3)所有消息的时间戳均在 MAC 层标记。

4)同步过程中节点时钟漂移和网络连通性皆不变。

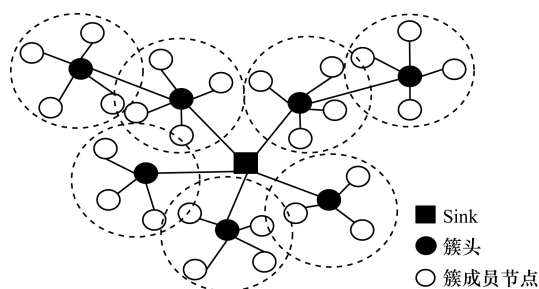


图 1 多跳分簇网络模型

1.2 时间模型

WSN 中的每个节点都有一个本地时钟,在理想情况下,一个节点的本地时钟 $C(t) = t$, t 为理想时间。但由于受到制作工艺的限制、温度变化和晶体老化等影响带来频率的漂移,使得本地时钟偏离理想时钟。对于一个典型的频偏值约为 40 ppm ($\mu\text{s}/\text{min}$) 的石英晶体振荡器节点,1 s 将近会产生 40 μs (或 0.144 s/h) 的时间偏差^[14]。一般传感器节点 i 的时钟模型定义为:

$$C_i(t) = \theta + f \cdot t \quad (1)$$

其中, θ , f 分别为时钟相偏和时钟频偏。通过式(1)可得节点 A 和节点 B 之间时钟关系:

$$C_B(t) = \theta^{AB} + f^{AB} \cdot C_A(t) \quad (2)$$

其中, θ^{AB} , f^{AB} 分别为节点 A , B 之间的相对时钟相偏、频偏。时间同步的任务为估算出 θ^{AB} 和 f^{AB} 的值,进而使得节点 B 可以通过时钟的相偏、频偏调整本地时钟。对于 L 个节点的网络,如果有 $C_i(t) = C_j(t)$ ($i, j = 1, 2, \dots, L$), 则称 $C_i(t)$ 与 $C_j(t)$ 在 t 时刻是同步的。但因为频率漂移的影响,使得校准相偏后的 2 个节点时钟,经过一段时间后将再次出现不同步现象,并且随着时间的推移,两时钟之间的相位偏差会越来越大,故时间同步算法需周期性交换消息进而更新时间信息来保持一定精度的同步,并且需同时补偿时钟频偏、相偏方可在提高同步精度的同时降低同步周期次数。

2 EBLTS 算法描述

EBLTS 算法由 3 个部分组成:1)建立以 Sink 为根节点的簇状层次结构;2)簇间同步阶段,完成簇头节点与 Sink 节点的时间同步;3)簇内成员同步阶段,通过每个簇头节点完成与其簇内所有成员节点的时间同步。

2.1 簇状层次结构的建立

在 WSN 多跳同步中,距离 Sink 节点的跳距越大,节点的同步累积误差也越大,通过簇状网络拓扑可减少同步过程中平均跳数,降低了累积同步误差。采用 LEACH 算法,通过簇头循环竞选机制,每个节点等概率成为当轮的簇头,从而使网络中所有节点均衡地消耗能量。

网络划分成簇后,建立 Sink 节点与簇头节点间的层次结构,步骤如下:

步骤 1 选择 Sink 节点为根节点并赋予层次级别号(用 level 表示,简称层级)为 0。

步骤 2 根节点广播包含该节点 ID 和 level 的层次发现消息。

步骤 3 每个收到层次发现消息的簇头节点将自己的 level 定义为消息包中层级号加 1,并广播包含自身 level 与 ID 的新层次发现消息。为避免网络泛洪,簇头节点在确定自己层次级别之后就忽视后来的层次发现消息。

步骤 4 重复步骤 3,直至所有簇头节点均完成层级的定义。

2.2 簇间同步

簇状层次结构建立之后,进入簇头节点与 Sink 节点的逐级同步阶段,该过程只有簇头参加,非簇头节点不参与其中。由 Sink 节点广播 syn_start 启动分组,接收到该分组的 1 级簇头同步到 Sink 节点,2 级簇头节点收到 1 级簇头的 syn_end 分组消息后开始与 1 级簇头节点的同步,以此类推,最后实现所有簇头节点与 Sink 节点的同步。

讨论相邻两层中下层簇头节点 A 实现同上层簇头节点 B 的单跳同步过程, 其双向消息交换机制如图 2 所示, 并拓展至整个簇头间的同步。

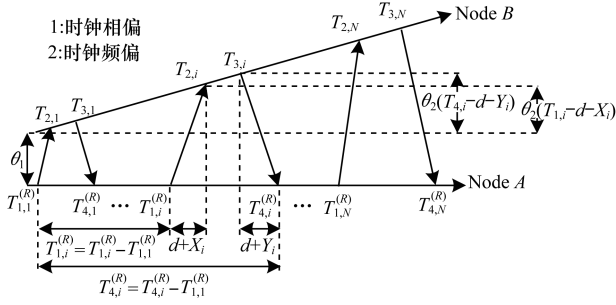


图 2 双向信息交换机制

具体步骤如下：

步骤 1 同步请求与回复。节点 A 在 $T_{1,1}^{(R)}$ 时刻发送同步请求 syn_req 分组, 该分组包含该节点 level , ID 和同步序列号 (所有簇头节点初始化为 0, Sink 节点每进行一轮序列号加 1 和 $T_{1,1}^{(R)}$); 节点 B 在 $T_{2,i}$ 时刻接收到该请求分组, 判断请求节点 level 为本层 level 值减 1 且本同步序列号值为此次同步轮次, 则在 $T_{3,i}$ 时刻回复应答 syn_res 分组, 该分组包含 $T_{1,i}^{(R)}$, $T_{2,i}$ 及时戳 $T_{3,i}$; 节点 A 记录收到节点 B 的 syn_res 应答消息时刻为 $T_{4,i}^{(R)}$, 其中 i 表示节点间时钟同步过程中的轮序号。

步骤 2 同步数据保存。为保证节点间时间的精确同步, 节点 A 与节点 B 进行了 N 次分组的双向交换, 并且获得 N 组时戳数据 $\{T_{1,i}^{(R)}, T_{2,i}, T_{3,i}, T_{4,i}^{(R)}\}$, $i = 1, 2, \dots, N$ 。

步骤 3 相偏、频偏校正。簇头节点 A 根据步骤 2 保存的 N 组时戳信息, 为便于计算, 根据式 (2) 中时钟模型及图 2, 假设以 $T_{1,1}^{(R)}$ 为时间基准点, 则可定义 $T_{1,i} \triangleq T_{1,i}^{(R)} - T_{1,1}^{(R)}$, $T_{4,i} = T_{4,i}^{(R)} - T_{1,1}^{(R)}$, $\theta_1 \triangleq \theta_1^{(R)} + T_{1,1}^{(R)}$, 其中, d 与 X_i, Y_i 分别代表 syn_req 分组和 syn_res 分组传递过程中的固定部分 (如电磁波空中传播时间) 与随机部分; θ_1^R 表示绝对时钟相偏, θ_1 表示在 $T_{1,1}^{(R)}$ 时刻相对时钟相偏, 则可得式 (3):

$$\begin{aligned} T_{2,i} &= T_{1,i}^{(R)} + d + X_i + \theta_2 (T_{1,i}^{(R)} - T_{1,1}^{(R)} + d + X_i) + \theta_1^R \\ T_{2,i} &= (1 + \theta_2) (T_{1,i} + d + X_i) + \theta_1 \end{aligned} \quad (3)$$

同理, 可得式 (4):

$$\begin{aligned} T_{3,i} &= T_{4,i}^{(R)} - d - Y_i + \theta_2 (T_{4,i}^{(R)} - T_{1,1}^{(R)} - d - Y_i) + \theta_1^R \\ T_{3,i} &= (1 + \theta_2) (T_{4,i} - d - Y_i) + \theta_1 \end{aligned} \quad (4)$$

由式 (3)、式 (4) 可知, 节点之间时钟的时间差异主要是由时钟频偏和相偏决定, 并且由于时间偏差的逐步增大趋势是单调递增的。因此, 在如图 2 所示的 N 次信息交换过程中, 时戳之间偏差最大的是第 1 次与第 N 次。式 (3) 中将 $T_{2,N}$, $T_{2,1}$ 相减, 式 (4) 中将 $T_{4,N}$, $T_{4,1}$ 相减可得式 (5)、式 (6):

$$\begin{aligned} T_{2,N} - T_{2,1} &= T_{1,N} - T_{1,1} + X_N - X_1 \\ &\quad + \theta_2 (T_{1,N} - T_{1,1} + X_N - X_1) X_N - X_1 \\ &= \frac{1}{1 + \theta_2} (T_{2,N} - T_{2,1}) - (T_{1,N} - T_{1,1}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} T_{4,N} - T_{4,1} &= T_{3,N} - T_{3,1} + Y_N - Y_1 - \theta_2 (T_{4,N} \\ &\quad - T_{4,1} - (Y_N - Y_1)) \\ Y_N - Y_1 &= T_{4,N} - T_{4,1} - \frac{1}{1 + \theta_2} (T_{3,N} - T_{3,1}) \end{aligned} \quad (6)$$

基于无线信道链路的复杂性特征, 上式中 X, Y 可作为多个独立并且同分布的随机延迟的累积, 故依据中心极限定理, 大量独立且同分布的随机变量, 其和的概率密度函数将接近于高斯随机变量^[15]。现假设 X_N, X_1, Y_N, Y_1 是均值为 μ 、方差为 σ^2 的独立同分布的高斯随机变量, 经过变换、整理式 (5) 与式 (6) 可得其最大似然函数为:

$$L(\theta_2', \sigma^2) = \frac{1}{4\pi\sigma^2} e^{-\frac{1}{4\sigma^2} [D_{(2)}^2 (\theta_2' - \zeta)^2 + D_{(3)}^2 (\theta_2' - \tau)^2]} \quad (7)$$

其中, $D_k = T_{k,N} - T_{k,1}$, $k = 1, 2, 3, 4$; $\theta_2' = 1/(1 + \theta_2)$; $\zeta = D_{(2)}/D_{(1)}$, $\tau = D_{(4)}/D_{(3)}$ 。

对式 (7) 取自然对数, 并对 θ_2' 求一阶偏导数后, 并令公式右侧为 0, 可得出 θ_2' 的最大似然估计如式 (8) 所示。

$$\hat{\theta}_2' = \frac{D_{(2)}^2 \zeta + D_{(3)}^2 \tau}{D_{(2)}^2 + D_{(3)}^2} \quad (8)$$

进而得频偏 θ_2 的最大似然估计:

$$\hat{\theta}_2 = \frac{1}{\hat{\theta}_2'} - 1 = \frac{D_{(2)}^2 + D_{(3)}^2}{D_{(1)} D_{(2)} + D_{(3)} D_{(4)}} - 1 \quad (9)$$

同理, 可得相偏 θ_1 的最大似然函数为:

$$L(\theta_1, \mu, \sigma^2) = -\frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} [\sum_{i=1}^N (U_p' - d' - \theta_1 - \mu)^2 + \sum_{i=1}^N (V_p' - d' + \theta_1 - \mu)^2]} \quad (10)$$

其中, $U_p' = T_{2,p} - (1 + \hat{\theta}_2) T_{1,p}$; $V_p' = (1 + \hat{\theta}_2) T_{4,p} - T_{3,p}$; $d' = (1 + \hat{\theta}_2) d$ 。

可得 θ_1 的最大似然估计值:

$$\hat{\theta}_1 = 0.5 \left(\frac{1}{N-1} \sum_{p=2}^N U_p' - \frac{1}{N-1} \sum_{p=2}^N V_p' \right) \quad (11)$$

簇头节点 A 可根据相位偏移 $\hat{\theta}_1$ 和频率偏移 $\hat{\theta}_2$ 调整本地时钟, 完成与上一级簇头节点 B 的同步。

步骤 4 全网簇头同步。由于整个层级结构中, 每个下层节点和它的上层节点都可形成一个单跳的连通区域, 因此完成单跳同步的步骤 1 ~ 步骤 3 可以自行应用其中, 并通过式 (9)、式 (11) 进行本地时钟的校正, 实现逐级同步, 最后完成整个网络所有簇头与 Sink 节点的同步。

2.3 簇成员同步

在簇头节点完成同步后, 进入簇内同步阶段, 簇头节点通过双向消息交换机制和参考广播机制相结

合方式实现同所有簇内成员节点的同步。相对簇头节点,簇成员节点数较多,故通过该方式同步,使得所有簇成员节点通过接收两次广播同步消息即可完成与簇头节点的同步,极大地降低了网络中通信消息数。

首先是参考节点的选择,簇头节点通过成员节点表进行式(12)中自适应能量算法,计算得到节点 j 的等效能量。

$$E_j^{eq} = \frac{\varepsilon \alpha E_{j, \text{remain}}}{E_{j, \text{init}}} \quad (12)$$

其中, E_j^{eq} 为节点等效能量; ε, α 是值为 0 或 1 的通信条件参数; $E_{j, \text{remain}}$ 为节点的剩余能量; $E_{j, \text{init}}$ 为节点的初始能量。通常为了保证无线连接的连通性需要将 RSSI 的值设置为大于 -85 dBm^[16], 因此, 如果 $\text{RSSI} > -85 \text{ dBm}$ 则 $\alpha = 1$, 否则为 0。由于在同步过程中, 某个簇成员节点作为参考节点与簇头进行双向分组同步后, 其本地时钟时间精度通常要大于其他簇成员节点。所以, 为了降低时间同步的平均误差, 本轮成为参考节点的簇成员节点参数 ε 置为 0, 进而失去下次参考节点的竞选资格, 而其他可竞选节点参数 ε 置为 1。

簇头节点根据式(12), 从所有簇成员节点中选择能效最大的节点作为本次同步的参考节点。

$$d = 0.5[(T_{2,i}^{(P)} - T_{1,i}^{(H)}) + (T_{4,i}^{(H)} - T_{3,i}^{(P)})] \quad (13)$$

$$\delta = 0.5[(T_{2,i}^{(P)} - T_{1,i}^{(H)}) - (T_{4,i}^{(H)} - T_{3,i}^{(P)})] \quad (14)$$

$$T_i^P = T_{2,i}^{(P)'} - \delta \quad (15)$$

$$T_i^C = T_{2,i}^{(C)'} - (T_{2,i}^{(P)} - T_{2,i}^{(C)}) - \delta \quad (16)$$

然后进行簇头与其簇成员节点的同步, 消息传输如图 3 所示。

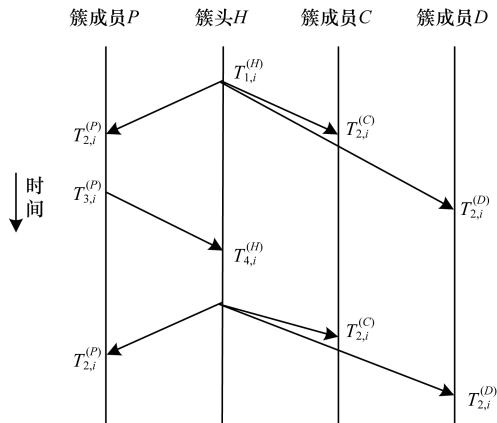


图 3 双向消息交换与参考广播机制相结合方式

具体步骤如下:

步骤 1 簇头节点 H 在 $T_{1,i}^{(H)}$ 时刻广播同步消息, 所有簇成员节点收到此消息时使用本地时钟记录该消息的接收时间, 如参考节点 P 记录该时间为

$T_{2,i}^{(P)}$, 同时簇成员节点 C 记录该时间为 $T_{2,i}^{(C)}$ 。但只有参考节点 P 返回含有接收时间 $T_{2,i}^{(P)}$ 、发送应答消息时戳 $T_{3,i}^{(P)}$ 及 ID 号的 syn_res 应答消息。

步骤 2 簇头节点 H 接收参考节点 P 的应答消息, 根据式(13)、式(14)分别得到与参考节点 P 的消息往返延迟 d 和时间偏移 δ 。随后, 簇头节点 H 再广播含 $d, \delta, T_{2,i}^{(P)}$ 的广播消息。

步骤 3 簇内所有节点, 如参考节点 P 、簇成员节点 C 接收到步骤 2 中广播消息, 记录接收时间分别为 $T_{2,i}^{(P)'}$ 、 $T_{2,i}^{(C)'}$, 分别根据式(15)、式(16)调整本地时钟, 完成与簇头节点 H 的同步。该簇内其他簇成员节点(如节点 D)收到该广播分组后, 类似簇成员节点 C 完成与簇头节点 H 的同步。另外, 所有簇成员节点重复上述过程, 获得多组数据后, 可通过线性回归完成对本地时钟漂移的补偿。

步骤 4 所有簇头重复步骤 1 ~ 步骤 3 实现本簇内所有节点的同步。另外, 上层簇头节点与其簇成员节点进行同步时, 其他簇头间或是簇头与其簇成员节点同步过程也将并行, 提高了整个同步过程的收敛速率。

当除 Sink 节点外的所有节点完成同步后, 则表示全网一轮时间同步过程结束。

3 EBLTS 算法性能分析

3.1 同步误差分析

消息传输延迟的不确定性是 WSN 中影响时间同步精度的主要因素, 两节点间消息传输延迟的关键路径主要可划分成 3 个部分: 即发送时延(包括发送时间、信道访问时间及传送时间)、传播时延和接收时延(包括接收时间及处理时间)。其中, 发送时间、访问时间与接收处理时间的不确定性对同步精度的影响最大。

EBLTS 算法的误差主要来自簇头节点间及簇头与参考节点间的双向消息交换同步误差和簇内参考广播同步误差。如簇头节点 A 与上层簇头节点及与簇内参考节点 P 双向消息交换同步误差类似 TPSN 算法, 表达式为式(17); 簇内参考节点 P 与簇成员节点 C 间误差类似 RBS, 表达式为式(18)。

$$Er_{SR} = 0.5(S^{UC} + P^{UC} + R^{UC} + RD_{T_1 \rightarrow T_4}^{A \rightarrow P}) \quad (17)$$

$$Er_{RBS} = P^{UC} + R^{UC} + RD_{T_1 \rightarrow T_4}^{P \rightarrow C} \quad (18)$$

其中, S^{UC} 表示节点间的发送延迟差; P^{UC} 表示传播时延差; R^{UC} 表示接收时延差; $RD_{T_1 \rightarrow T_4}^{A \rightarrow P}$, $RD_{T_1 \rightarrow T_4}^{P \rightarrow C}$ 表示两节点在 T_1 到 T_4 时刻间一轮同步所产生的时钟相偏。由式(17)、式(18)可知簇成员节点的同步误差

Er 应满足:

$$abs(Er_{SR} - Er_{RBS}) \leq Er \leq abs(Er_{SR} + Er_{RBS}) \quad (19)$$

簇头节点与上层簇头节点及与簇内参考节点双向消息交换时, 考虑节点间相对频偏, 减少了相对时间偏移 $RD_{T_1 \rightarrow T_4}^{A \rightarrow P}$, 故双向消息交换时误差 Er_{SR} 比 Er_{TPSN} 算法的精度要高。而由式 (19) 可知, 簇成员节点的同步误差相对于 TPSN 算法和 RBS 算法略低, 但其同步精度依旧是微秒级。

3.2 同步开销

在 WSN 中, 节点的通信开销占节点能耗的绝大部分, 故采用同步消息交换数来衡量节点的时间同步能耗。假设在单轮 WSN 时间同步过程中, 同步分组次数为 I , N 为网络中传感器节点个数。通过分簇算法得到的簇头数为 h , 那么 EBLTS 与其他同步算法每轮同步时所需的分组交换数如表 1 所示。

表 1 不同算法同步信息交换数

时间同步算法	同步消息交换量	时间复杂度
RBS	$I + N(N-1)$	$O(n^2)$
TPSN	$2I(N-1)$	$O(n)$
EBLTS	$7h$	$O(h)$

从表 1 可知, EBLTS 算法簇头间采用双向消息交换, 其分组交换数量与 TPSN 将近, 由于簇头节点数量相对较少, 并不会带来过大的数据通信量; 簇内同步时则只有簇内参考节点与簇头节点进行类 TPSN 同步, 其他簇成员节点接收该簇头广播信息完成同步, 相比 TPSN 消息交换量大大降低, 而与 RBS 相比, 避免了簇成员节点间互相交换的大量消息分组。相比其他同步算法, EBLTS 的渐近时间复杂度最小, 故能在保证有效精度的同时, 较大地减少同步通信消息数, 降低节点能耗。

4 仿真与实验结果分析

采用 Matlab 仿真工具对 EBLTS 算法进行仿真实验, 并对同步精度、能量消耗等衡量标准进行统计、分析及对比。

4.1 同步精度验证

仿真环境: 在面积 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的正方形区域内, Sink 节点在区域中心, 而其他节点随机分布, 设置无线通信距离为 30 m , 频偏为 $\mu = 1, \sigma^2 = 0.0001$ 正态分布函数随机产生, 节点间初试相位偏差为 $-50 \mu\text{s} \sim 50 \mu\text{s}$ 。将同步周期个数设为 1 个 ~ 100 个, 重复实验 50 次, 统计得到各算法中待同步节点与 Sink 节点时间源的同步误差平均值, 并绘制出同步误差曲线如图 4 所示。

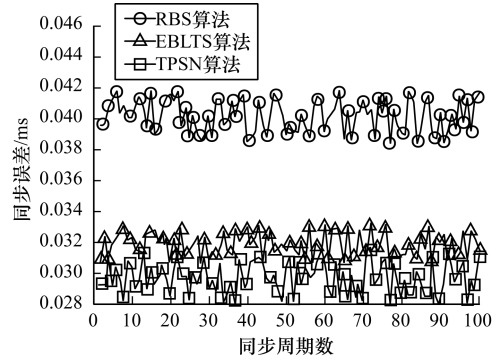


图 4 网络节点同步误差分布

由图 4 可得, TPSN, EBLTS, RBS 同步精度依次降低, 同步误差均值分别为 $28.96 \mu\text{s}$, $31.02 \mu\text{s}$, $40.68 \mu\text{s}$, EBLTS 算法精度介于其他 2 种算法之间, 并接近于 TPSN。原因是 EBLTS 算法中簇头节点进行双向消息交换的同时补偿了频偏, 提高了簇头间同步精度, 但由于簇头节点数量有限, 因此并不能带来整体网络精度提升; 簇头节点只与参考节点进行类 TPSN 算法, 其同步精度与 TPSN 持平; 簇成员节点仅是接收单向广播信息完成同步, 精度较 TPSN 低, 并且簇成员节点数占网络节点绝大部分, 故整个 EBLTS 的同步精度略低于 TPSN。此结果也验证了 3.1 节中对 EBLTS 同步精度的分析。

如图 5 所示, 随着节点数的增加, EBLTS 同步误差与 TPSN 一样稳定增长, 表现出较为良好的精度稳定性。并且与簇内同步时随机选取参考节点的算法 1 相比, EBLTS 同步精度略低。原因是本文算法考虑了待选参考节点的剩余能量, 只有部分节点能通过双向消息机制完成同步, 进而获得较高的同步精度, 而采用随机选取参考节点算法 (如算法 1) 时, 所有节点都以同等概率进行双向消息交换实现同步, 故节点平均同步精度略高。

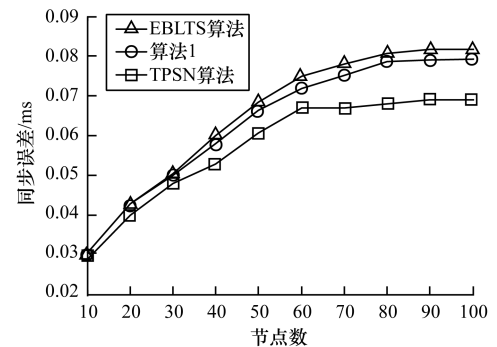


图 5 节点数量与同步误差

4.2 能量消耗实验

在 4.1 节中的仿真区域中分别随机部署 50 个、100 个、150 个、200 个、250 个、300 个节点, 每次同步

分组数 I 为 10 个, 分别统计 TPSN, RBS, EBLTS 的同步分组数及该轮次同步过程中存活节点数。

如图 6 所示, 随着节点数的增加, EBLTS 中用于同步的分组数相比其他 2 种算法较少, 原因是: 在相同的区域内, 虽然节点总数增幅较大, 但簇头的增幅相对很少, 绝大部分新进节点将成为簇成员节点。由簇内同步机制可知, 簇内成员节点除参考节点外, 其余节点都只需接收 2 个广播信息即可完成自身时间同步, 因而当节点数增加时, 消息交换数并未增加过多。此结果验证了 3.2 节中对各个算法所需同步分组数的分析, 同时结果表明, 对密集型网络, EBLTS 在降低同步能耗方面将更具优势。

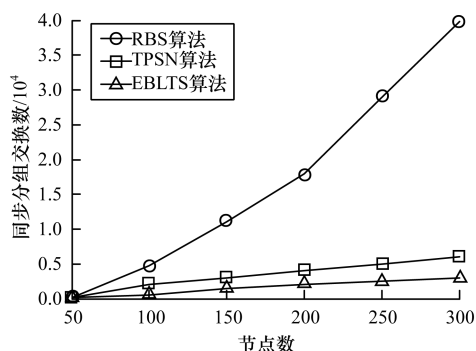


图 6 节点数量与同步交换数关系

另外, 针对 EBLTS 和在簇内同步时随机选择参考节点的算法 1 进行连续同步实验, 将轮次数设为 0 次 ~ 2 000 次, 每间隔 200 轮次进行网络中存活节点数的统计, 得到的统计结果如图 7 所示。其原因是: 在选取簇内参考节点时比较各簇成员节点剩余能量, 降低了本轮次较低能量节点成为参考节点概率, 进而避免该节点由于进行多次双向消息交换完成时间同步而过早死亡的情况, 均衡了网络各节点能量, 延长了整个网络寿命。

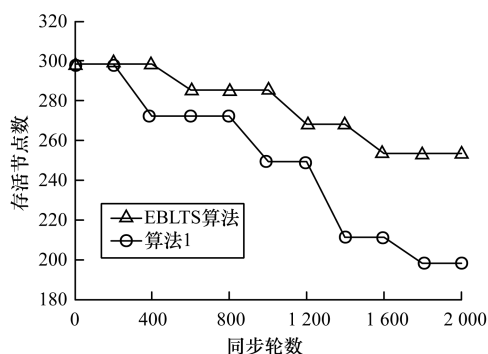


图 7 同步轮次与网络存活节点数关系

5 结束语

本文在分析传统时间同步算法的基础上, 针对

WSN 中节点能量受限的特征, 从能量均衡及低开销的方面进行考虑, 提出一种能量均衡的低开销时间同步算法。Sink 节点提供全网时间标准, 簇头在完成与 Sink 节点间的同步之后, 簇头节点去同步其所有簇成员节点, 进而完成整个网络的同步。当簇间同步时, 节点利用最大似然估计补偿时钟频偏、相偏, 在提高了同步精度的同时延长了重同步周期, 而并不增加额外通信开销; 当簇内同步时考虑节点能量及广播特性, 极大地降低了通信开销, 平衡了各节点能耗。理论性能分析和仿真验证结果表明, 本文算法与 TPSN, RBS 算法相比, 在保证一定精度的前提下, 降低了同步分组交换数, 在密集型网络中表现更为突出, 与未考虑节点能量参数的同步算法相比, 全网节点的网络寿命有了较大的提升, 满足 WSN 应用要求。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 钱志鸿, 王义君. 面向物联网的无线传感器网络综述[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(1): 215-227.
- [3] 汪付强, 曾鹏, 张晓玲, 等. 无线传感器网络时间同步综述[J]. 计算机工程, 2011, 37(22): 70-73.
- [4] Sivrikaya F, Yener B. Time Synchronization in Sensor Networks: A Survey [J]. IEEE Network, 2004, 18(4): 45-50.
- [5] Elson J, Girod L, Estrin D. Fine-grained Network Time Synchronization Using Reference Broadcasts [J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2002, 36(1): 147-163.
- [6] Ganeriwal S, Kumar R, Srivastava M B. Timing-sync Protocol for Sensor Networks [C]//Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York, USA: ACM Press, 2004: 138-149.
- [7] Mar M, Mikl K, Kusy B, et al. The Flooding Time Synchronization Protocol [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York, USA: ACM Press, 2004: 39-49.
- [8] Akhlaq M, Sheltami T R. RTSP: An Accurate and Energy-efficient Protocol for Clock Synchronization in WSNs [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2013, 62(3): 578-589.
- [9] 孙毅, 曾璐琨, 武昕, 等. 基于频偏估计的无线传感器网络时间同步算法[J]. 通信学报, 2015, 36(9): 26-33.
- [10] 王义君, 钱志鸿, 王桂琴, 等. 无线传感器网络能量有效时间同步算法研究[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(9): 2174-2179.
- [11] Kosanovic M R, Stojcev M K. RPATS—Reliable Power Aware Time Synchronization Protocol [J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(1): 303-315.

(下转第 15 页)

图 3 对本文算法和传统三维 LLSE 及三维 LM 算法中的 RMSE 进行了对比。由于奇异矩阵问题,在 p 的所有范围内,三维 LLSE 算法在 3 个算法中最差。通过观察图 3 中三维 LLSE 算法的 RMSE,可以得出如下结论,锚节点高度之间的细微差异大大降低了传统封闭解算法的性能。然而,本文算法中的 RMSE 与三维 LM 算法中的 RMSE 几乎一样。但是与三维 LM 算法不同,本文算法不需要任何迭代及初次位置估计。

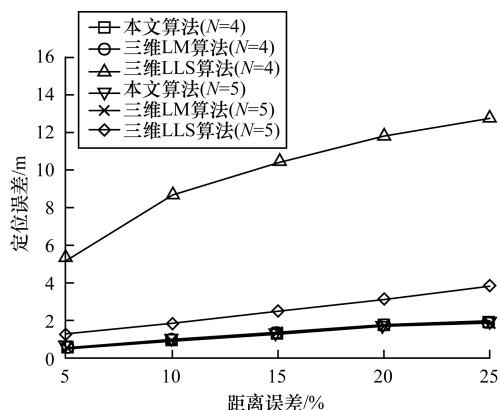


图 3 本文算法及传统三维定位算法中的 RMSE

4 结束语

本文提出一种运用海伦公式的四面体体积公式及二维 LLSE 的半三维定位算法。该算法基于距离的定位算法,运用接收信号强度指示器及封闭解进行计算,可以估计复杂性低的三维位置,尽管本文算法运用的是简单的封闭解计算,可以估计实际环境中的三维位置,但并不会出现奇异矩阵问题。

参考文献

- [1] 梅 举,陈 涤,辛 玲,等. 基于蒙特卡洛方法的移动传感网节点定位优化算法[J]. 传感技术学报, 2013, 26(5): 689-694.
- [12] 杨春明,屈玉贵. 无线传感器网络中能量高效的时间同步算法[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(5): 532-539.
- [13] Li Z, Chen W, Li M, et al. Incorporating Energy Heterogeneity Into Sensor Network Time Synchronization[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2015, 26(1): 163-173.
- [14] Handy M J, Haase M, Timmermann D. Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy with Deterministic Cluster-head Selection [C]//Proceedings of the 4th International Workshop on Mobile and Wireless Com-

- [2] Liu B C, Lin K H. Accuracy Improvement of SSSD Circular Positioning in Cellular Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(4): 1766-1774.
- [3] Zhang Y, Liu S, Jia Z. Localization Using Joint Distance and Angle Information for 3D Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(6): 809-811.
- [4] Yang Z, Liu Y. Quality of Trilateration: Confidence-based Iterative Localization[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2010, 21(5): 631-640.
- [5] 汪子嘉,于宏毅,胡赞鹏,等. 基于分簇传感网的 RSSD/TDOA 协同定位方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(6): 902-910, 916.
- [6] 张美燕,蔡文郁,周丽萍,等. 无线 Zigbee 传感网 RSSI 定位技术研究[J]. 计算机技术与发展, 2014(10): 238-240.
- [7] 虞 芬,陈 静. 基于 Voronoi 的微粒群优化的三维无线传感网络节点定位算法的研究[J]. 科技通报, 2014(11): 147-151.
- [8] 孙大洋,钱志鸿,韩梦飞,等. 无线传感器网络中多边定位的聚类分析改进算法[J]. 电子学报, 2014, 42(8): 1601-1607.
- [9] 胡中栋,谢金伟. 基于近似投影校正的无线传感器网络三维定位机制[J]. 传感技术学报, 2014(11): 1573-1577.
- [10] 刘 清,白光伟,赵 露,等. 局部四面体内点测试三维定位算法[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(12): 4078-4082.
- [11] 吴世通,陈 良,李云飞,等. 基于 RSSI 等级的蒙特卡罗定位算法应用研究[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(17): 114-119.
- [12] Yan J, Tiberius C, Janssen G, et al. Review of Range-based Positioning Algorithms[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2013, 28(8): 2-27.
- [13] 沈学利,陈 光. 一种改进的无线传感器网络 DV-Hop 定位算法[J]. 计算机工程, 2015, 41(7): 115-119.
- [14] 吴旭婧,许 勇,张亚楠. 基于指纹模式匹配的无线传感器网络密钥预分配算法[J]. 计算机工程, 2015, 41(3): 106-109.
- [15] 田 乐. 低工作周期无线传感器网络中的多重洪泛机制[J]. 计算机工程, 2015, 41(3): 102-105.

编辑 索书志

(上接第 10 页)

- [12] 杨春明,屈玉贵. 无线传感器网络中能量高效的时间同步算法[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(5): 532-539.
- [13] Li Z, Chen W, Li M, et al. Incorporating Energy Heterogeneity Into Sensor Network Time Synchronization[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2015, 26(1): 163-173.
- [14] Handy M J, Haase M, Timmermann D. Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy with Deterministic Cluster-head Selection [C]//Proceedings of the 4th International Workshop on Mobile and Wireless Com-

munications Network. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2002: 368-372.

- [15] Wu Y C, Chaudhari Q, Serpedin E. Clock Synchronization of Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2011, 28(1): 124-138.
- [16] Xiao H, Li T, Ogai H, et al. A Self-health Monitoring System for a Wireless Sensor Network Used in Bridge Diagnosis[J]. SICE Journal of Control Measurement & System Integration, 2012, 5(1): 48-54.

编辑 索书志