

基于频偏估计的无线传感器网络时间同步算法

孙毅, 曾璐琨, 武昕, 陆俊, 孙跃

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 针对无线传感器网络经典同步算法稳定性较差, 时钟相偏和频偏联合校正算法存在高开销等问题, 提出一种基于频偏估计的无线传感器网络时间同步算法 (CSMS 算法)。CSMS 算法采用低开销相偏和频偏估计方法, 提高了成对节点的同步精度和稳定性; 结合分层和广播监听构建了同步策略, 能够保证算法的稳定性和同步精度, 实现了与邻居节点及根节点的同步, 同时优化了同步总开销。实验结果表明, CSMS 算法能够有效地平衡同步能耗、同步精度及同步稳定性。

关键词: 无线传感器网络; 时间同步; 低开销; 相偏和频偏估计

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Timing synchronization algorithm based on clock skew estimation for WSN

SUN Yi, ZENG Lu-kun, WU Xin, LU Jun, SUN Yue

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to solve the problem of poor synchronization stability on classical synchronization algorithm, high overhead on joint clock offset and skew correction synchronization algorithm in wireless sensor network, a timing synchronization algorithm based on clock skew estimation for WSN (CSMS) was proposed. The algorithm adopted low-overhead clock offset and skew estimation method to improve the synchronization precision and stability of paired node. At the same time of guaranteeing the stability and accuracy, it realized synchronization with the root node and the neighbors, and optimized synchronization overhead by using the combination of hierarchical network structure and radio listening. The experimental results show that the CSMS algorithm balances energy consumption, accuracy and stability of synchronization.

Key words: wireless sensor network; timing synchronization; low-overhead; clock offset and skew estimation

1 引言

无线传感器网络 (WSN, wireless sensor network) 是由大量具有信息采集、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分布式网络^[1]。时间同步是无线传感器网络的关键技术, 在实现传感器数据融合、节点数据处理、测距定位、协同睡眠等方面至关重要^[2]。

近年来, WSN 的时间同步问题受到广泛关注, 并取得大量研究成果。针对同步开销、同步精度及

同步稳定性等问题, 提出了多种 WSN 时间同步算法^[3-9], 分别从不同的消息发送机制、误差补偿方法及拓扑优化等方面达到提高同步精度、保证同步稳定性和降低同步开销的目的。RBS (reference broadcast synchronization)^[3]是一种利用广播信息实现接收者之间同步的低开销协议, 但未考虑节点的频率漂移, 且同步精度低。IRBS^[4]在 RBS 基础上采用贝叶斯估计提升同步精度, 但不能保持同步的长期稳定, 且增加了同步的总开销。PBS^[5]是一种在成对节点广播域内补偿相偏和频偏的高精度同步

收稿日期: 2014-09-15; 修回日期: 2015-04-29

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (2010ZX03006-005-01); 国家国际科技合作专项基金资助项目 (2013DFG72850)

Foundation Items: The National Science and Technology Major Project (2010ZX03006-005-01); The Special Fund for National International Science Cooperation (2013DFG72850)

协议，但同步开销大。DMLT^[6]综合了 RBS 和 TPSN 算法，实现了全网的低开销同步，但忽略了节点存在的频偏，同步精度较低。CESA^[7]提出一种基于簇状分层的同步算法，结合了单向广播与成对同步 2 种方式，并利用贝叶斯估计优化多跳误差，是一种低开销的时间同步协议，但同步稳定性差。TW-COSE^[8]、JSOS^[9]是基于发送端—接收端的时钟相偏、频偏联合校正同步算法，具有较高的同步精度，但需要多次成对消息交换，因此同步开销大。

综合考虑同步开销、同步精度和同步稳定性 3 个方面，本文提出一种基于频偏估计的无线传感器网络时间同步算法（CSMS 算法）。CSMS 算法采用低开销的时钟相偏和频偏估计方法（SCSE），实现了同步稳定性、同步精度和同步开销的综合最优；采用分层、广播监听和捎带相结合的策略，实现了与邻居节点和根节点的同步，优化了同步总开销。

2 时钟相偏和频偏估计(SCSE)

对于不同的节点其内部晶体振荡器存在差异，因此时钟频率存在差异。随着时间的推移，节点之间的时钟偏差会不断增大。因此，估计并校正节点时钟频率偏差不仅可以提高同步精度，而且可以保持同步的长期稳定。文献[10]提出的 TPSN 算法将节点时钟偏差设定为固定值，因此，不能准确地反映实际误差。文献[11]提出的时钟偏差模型与实际较接近，但计算复杂，同步开销大。实际中很多应用场合对同步精度的要求并不严格，但对能量消耗的限制比较苛刻，因此，在保证有效同步精度的前提下简化时钟参数估计模型非常重要。鉴于上述问题，论文提出一种基于发送者—接收者的低开销时钟相偏、频偏估计方法。

2.1 估计模型

图 1 为存在时钟相偏和频偏时，两节点间的定时信息交换模型。信息互换的时间戳 $T_1^{(A)}$ 、 $T_4^{(A)}$ 和 $T_5^{(A)}$ 均以节点 A 的本地时钟为基准， $T_2^{(B)}$ 、 $T_3^{(B)}$ 和 $T_6^{(B)}$ 均以节点 B 的本地时钟为基准。在 $T_1^{(A)}$ 时刻，节点 A 向节点 B 广播时间同步分组，该分组包含节点 A 的拓扑层次、识别号和时间戳 $T_1^{(A)}$ 。节点 B 在 $T_2^{(B)}$ 时刻收到该同步分组，随机等待一段时间后，向节点 A 发送一个同步请求消息分组，该分组包含节点 B 的拓扑层次、识别号以及时间戳 $T_2^{(B)}$ 和 $T_3^{(B)}$ 。节点 A

在 $T_4^{(A)}$ 时刻收到该同步请求消息分组，等待一段时间后，向节点 B 发送一个同步确认消息分组，该分组包含节点 A 的拓扑层次、识别号以及时间戳 $T_4^{(A)}$ 、 $T_5^{(A)}$ 和 $T_6^{(A)}$ 。最后节点 B 在 $T_6^{(B)}$ 时刻收到该确认消息分组。

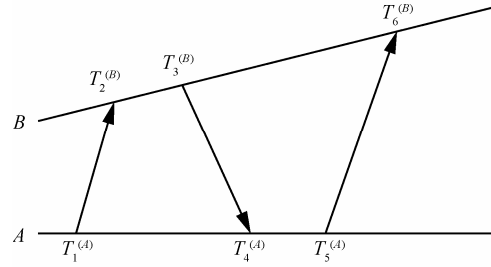


图 1 两节点定时信息交换模型

在短时间内，节点 B 相对于节点 A 的时钟频偏量不变，可表示为^[12]

$$\rho = \frac{T_6^{(B)} - T_2^{(B)}}{T_5^{(A)} - T_1^{(A)}} - 1 \quad (1)$$

$T_4^{(A)}$ 、 $T_6^{(B)}$ 分别表示为

$$T_4^{(A)} = T_3^{(B)} - \text{Offset}_{T_3^{(B)}} + S_{B \rightarrow A} + R_{B \rightarrow A} \quad (2)$$

$$T_6^{(B)} = T_5^{(A)} + \text{Offset}_{T_5^{(A)}} + (S_{A \rightarrow B} + R_{A \rightarrow B})(1 + \rho) \quad (3)$$

其中， $\text{Offset}_{T_3^{(B)}}$ 、 $\text{Offset}_{T_5^{(A)}}$ 分别代表在 $T_3^{(B)}$ 、 $T_5^{(A)}$ 时节点 B 与节点 A 的时钟偏差； $S_{A \rightarrow B}$ 、 $R_{A \rightarrow B}$ 分别代表同步消息分组从节点 A 到节点 B 的过程中，发送端总时延和接收端总时延；类似的， $S_{B \rightarrow A}$ 、 $R_{B \rightarrow A}$ 分别代表节点 B 到节点 A 过程中，发送端总时延和接收端总时延； $S_{A \rightarrow B}$ 、 $R_{A \rightarrow B}$ 、 $S_{B \rightarrow A}$ 和 $R_{B \rightarrow A}$ 均以节点 A 的本地时钟为基准。

$\text{Offset}_{T_3^{(B)}}$ 和 $\text{Offset}_{T_5^{(A)}}$ 存在如下关系，如式(4)所示。

$$\text{Offset}_{T_5^{(A)}} = \text{Offset}_{T_3^{(B)}} + \rho(S_{B \rightarrow A} + R_{B \rightarrow A} + \Delta T) \quad (4)$$

其中， $\Delta T = T_5^{(A)} - T_4^{(A)}$ 。

在较短的时间内，消息分组从节点 A 到节点 B 的时间间隔与节点 B 到节点 A 的间隔几乎相等。综合式(2)~式(4)，可得

$$\text{Offset}_{T_3^{(B)}} = \frac{(T_6^{(B)} - T_5^{(A)}) - (T_4^{(A)} - T_3^{(B)})}{2} - \frac{\rho(T_6^{(B)} - T_3^{(B)})}{2(1 + \rho)} \quad (5)$$

式(5)为节点 B 相对于节点 A 的时钟基准相偏, 记为 Φ 。记 $(Offset_{T_3^{(B)}}, T_3^{(B)}, \rho)$ 为节点 B 的一组同步数据对, 储存在其同步参数集合中。

节点 B 在 $T^{(B)}$ 时, 与节点 A 的时钟偏差如式(6)所示。

$$Offset = Offset_{T_3^{(B)}} + \rho \left(\frac{T^{(B)} - T_3^{(B)}}{1 + \rho} \right) \quad (6)$$

代入后可得

$$Offset = \frac{(T_6^{(B)} - T_5^{(A)}) - (T_4^{(A)} - T_3^{(B)})}{2} - \frac{\rho T_6^{(B)} - T_3^{(B)}}{2(1 + \rho)} + \rho \left(\frac{T^{(B)} - T_3^{(B)}}{1 + \rho} \right) \quad (7)$$

2.2 误差分析

决定同步精度的最主要因素是对真实时钟频偏量 ρ 的估计。根据式(1)可得实际估计的时钟频偏量 $\hat{\rho}$ 为

$$\hat{\rho} = \frac{(S_{A \rightarrow B}^{(2)} - S_{A \rightarrow B}^{(1)}) + (R_{A \rightarrow B}^{(2)} - R_{A \rightarrow B}^{(1)})}{S_{A \rightarrow B}^{(1)} + R_{A \rightarrow B}^{(1)} + \Delta T_1 + S_{B \rightarrow A} + R_{B \rightarrow A} + \Delta T_2} + \frac{\rho \Delta T_1 + S_{B \rightarrow A} + R_{B \rightarrow A} + \Delta T_2 + S_{A \rightarrow B}^{(2)} + R_{A \rightarrow B}^{(2)}}{S_{A \rightarrow B}^{(1)} + R_{A \rightarrow B}^{(1)} + \Delta T_1 + S_{B \rightarrow A} + R_{B \rightarrow A} + \Delta T_2} \quad (8)$$

其中, $S_{A \rightarrow B}^{(1)}$ 、 $R_{A \rightarrow B}^{(1)}$ 表示节点 A 第 1 次向节点 B 发送同步消息分组时的发送端总时延和接收端总时延; $S_{A \rightarrow B}^{(2)}$ 、 $R_{A \rightarrow B}^{(2)}$ 同理为第 2 次发送同步消息分组时的时延信息; ΔT_1 、 ΔT_2 表示 $T_2^{(B)}$ 到 $T_3^{(B)}$ 、 $T_4^{(A)}$ 到 $T_5^{(A)}$ 之间的时间间隔。上述时间均以节点 A 的本地时钟为基准, 即将节点 A 视为标准时钟。

若 $T = S_{A \rightarrow B}^{(1)} + R_{A \rightarrow B}^{(1)} + \Delta T_1 + S_{B \rightarrow A} + R_{B \rightarrow A} + \Delta T$, $\delta_1 = S_{A \rightarrow B}^{(2)} - S_{A \rightarrow B}^{(1)}$, $\delta_2 = R_{A \rightarrow B}^{(2)} - R_{A \rightarrow B}^{(1)}$, 则估计的时钟频偏量 $\hat{\rho}$ 的误差为

$$Error = \hat{\rho} - \rho = \frac{\delta_1 + \delta_2}{T} + \rho \frac{\delta_1 + \delta_2}{T} \quad (9)$$

与真实时钟频偏量 ρ 相比, 估计值 $\hat{\rho}$ 的误差比率为

$$\varepsilon = \frac{\hat{\rho} - \rho}{\rho} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\rho T} + \frac{\delta_1 + \delta_2}{T} \quad (10)$$

可通过 ε 的取值判定所估计同步误差的效果。当 $\varepsilon = 1$ 时, 采用 SCSE 方法估计的同步误差与未采用频偏估计的 TPSN 算法误差相近; 当 $\varepsilon < 1$ 时, 采

用 SCSE 的同步算法误差低于 TPSN, 且 ε 越小性能越优越。实际中, 在极短的时间内, 节点 A 连续 2 次发出消息的延时几乎一致, 即 $\frac{\delta_1 + \delta_2}{T} \ll 1$, 故有

$$\varepsilon \approx \frac{\delta_1 + \delta_2}{\rho T} \quad (11)$$

可见, 当 $\delta_1 + \delta_2 < \rho T$ 时, 采用 SCSE 的同步算法误差可减小频偏带来的影响。

3 CSMS 算法设计

本节将 SCSE 方法扩展至整个无线传感器网络, 提出一种基于频偏估计的无线传感器网络时间同步算法 (CSMS)。CSMS 算法主要分为 2 个阶段: 1) 层次发现阶段, 该阶段与 TPSN 算法层次发现阶段类似, 用于产生网络的分层结构; 2) 同步阶段, 采用 SCSE 方法估计成对节点间的时钟偏移和频偏, 实现节点时钟偏差的动态调整, 保证同步的长期稳定, 并提高同步精度。与 TPSN 相比, CSMS 不需要频繁的同步操作。另外, CSMS 采用了广播监听和捎带技术, 在实现与邻居节点和根节点同步的同时, 进一步减小了全网的同步开销。

3.1 层次发现阶段

层次发现的目的是在网络中创建分层结构, 该阶段包括以下几步: 1) 选择一个根节点, 并赋予根节点第 0 级; 2) 根节点广播层次发现分组 (LDP, level discovery packet), LDP 中包含了发送该分组的节点 ID 和层级; 3) 每个收到 LDP 的节点将自己的层级定义为所收到分组层级的下一级, 并发送包含自己层级的新层次发现分组, 节点一旦定义层级后, 就忽略后来的层次发现分组, 以避免网络泛洪; 4) 重复步骤 3), 直到网络中每个节点均成功定义层级。经过以上步骤后, 即可建立如图 2 所示的网络拓扑结构。

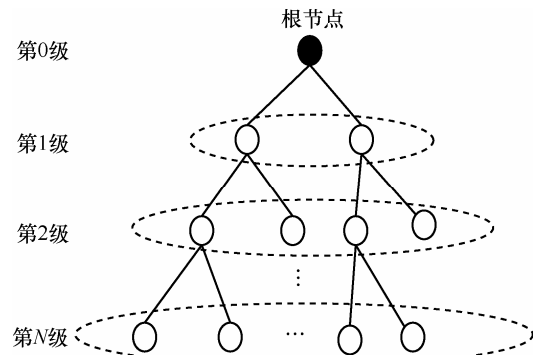


图 2 层次网络拓扑

3.2 同步阶段

层次结构建立后，根节点启动同步，采用 SCSE 方法与第 1 级的所有节点进行同步。随后第 1 级节点与第 2 级节点同步，逐层依次进行，直到所有节点实现同步。整个同步过程中，采用了广播监听和捎带技术。图 3 所示为算法的同步实现，具体步骤如下。

1) 层次号为 0 的节点（根节点）在 $T_1^{(0)}$ 时刻向层次号为 1 的节点广播捎带了 $T_1^{(0)}$ 的同步通知分组 $N_syn(1)$ 。

2) 1 层节点收到 $N_syn(1)$ 后，记录接收时刻 $T_2^{(1)}$ ，并提取消息分组中的 $T_1^{(0)}$ 。等待一段时间后，向层次号为 0 的节点广播捎带了 $T_3^{(1)}$ 的同步请求分组 $R_syn(1)$ 。层次号为 0 的节点收到 $R_syn(1)$ 后，记录接收时间 $T_4^{(0)}$ 。等待一段时间后，向 1 层节点发送捎带了 $T_4^{(0)}$ 、 $T_5^{(0)}$ 的同步应答分组 $S_ack(1)$ 。1 层节点接收到 $S_ack(1)$ 后，记录接收时间 $T_6^{(1)}$ ，同时提取消息分组中的 $T_4^{(0)}$ 、 $T_5^{(0)}$ 。根据式(1)和式(7)，1 层节点计算出与根节点的时钟偏差，并保存各自的同步数据对 $(\phi_1, T_3^{(1)}, \rho_1)$ 至同步参数集中。

3) 层次号为 2 的节点监听到 $R_syn(1)$ 后，记

录本地时间 $T_2^{(2)}$ ，并提取消息分组中的 $T_3^{(1)}$ 。等待一段时间后，广播捎带了 $T_3^{(2)}$ 的消息分组 $R_syn(2)$ 。层次号为 1 的节点收到 $R_syn(2)$ 后，记录接收时间 $T_4^{(1)}$ ，等待一段时间后，向层次号为 2 的节点发送捎带了 $T_4^{(1)}$ 、 $T_5^{(1)}$ 以及同步参数集的消息分组 $S_ack(2)$ 。层次号为 2 的节点接收到 $S_ack(2)$ 后，记录接收时间 $T_6^{(2)}$ ，同时提取并保存 $S_ack(2)$ 中的信息。

4) 利用式(1)和式(5)，可计算出 ρ_2 、 ϕ_2 ，并更新同步参数集为 $(\phi_1, T_3^{(1)}, \rho_1)$ 、 $(\phi_2, T_3^{(2)}, \rho_2)$ 。利用式(1)和式(7)，2 层节点可计算出与 1 层节点的时钟偏差。根据同步参数集，可通过式(12)计算出 2 层节点与根节点的时钟偏差关系。

$$Offset_n = \left(1 - \prod_{i=1}^n \frac{1}{1 + \rho_i} \right) T^{(n)} - \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\rho_i T_3^{(i)}}{1 + \rho_i} \right)^{i-1} \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{1 + \rho_j} \right], \quad j \geq i - 1 \quad (12)$$

其中， n 为当前的层次号； $T^{(n)}$ 为节点的当前本地时刻。

5) 更高层次号的节点重复类似步骤 3)、步骤 4) 的同步过程，直至 N 层节点完成与 $N-1$ 层节点及根节点同步。

CSMS 算法的整体流程如图 4 所示。

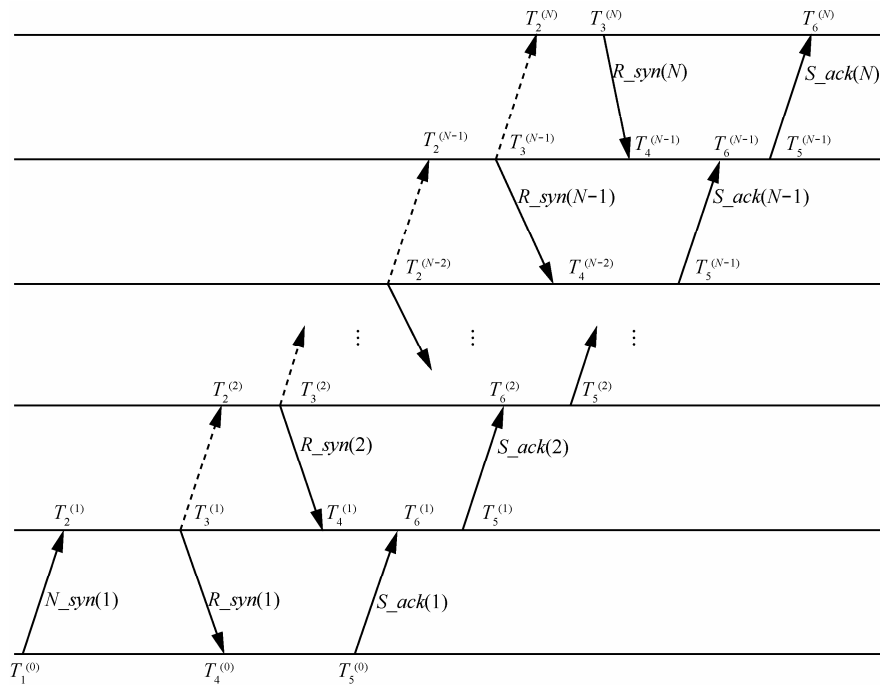


图 3 CSMS 算法同步实现

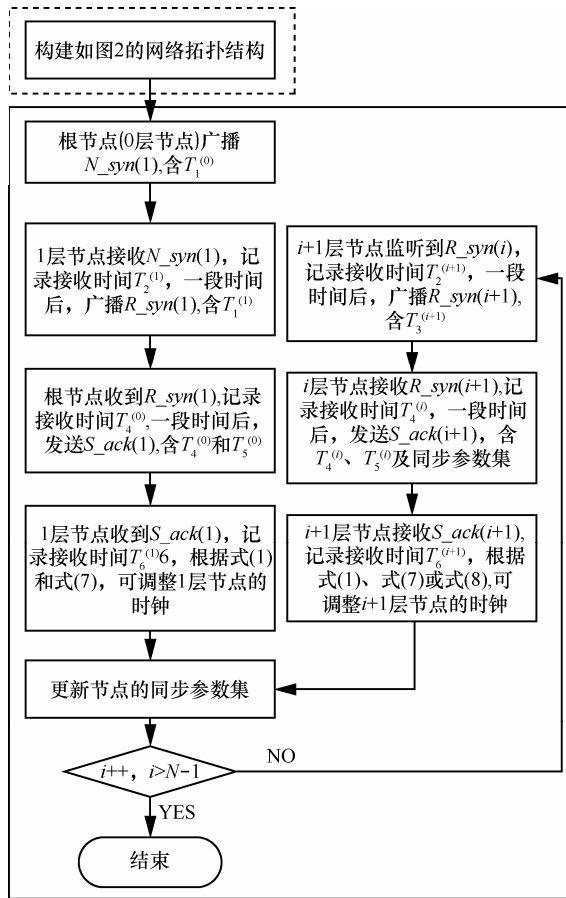


图 4 算法流程

4 实验与分析

为了评估 CSMS 算法的性能, 本文基于该算法进行了同步仿真, 并选取 2 种经典同步算法 TPSN^[10]和 TW-COSE 进行对比。其中 TPSN 没有考虑节点的频偏因素; TW-COSE 考虑了频偏, 通过多次成对消息交换和相偏估计实现同步, 算法复杂度较高。

实验采用了如图 5 所示的线和分层网络实验拓扑结构。实验中, 节点 1 为同步发起节点, 其时间视为标准时间。节点的运行总时间(标准时间)为 2 700 s, 所有节点均在 0 s 时刻同时启动, 此后, 每隔 90 s 节点 1 重新发起新一轮同步, 同步总轮次为 30 轮。从节点 1 发起一轮同步至下一轮开始, 此过程视为一个同步周期。节点的频率漂移量在 -20~20 μs/s 范围内随机产生。每轮同步中, 消息延时在 0.01~0.4 s 之间随机变化。模拟 TW-COSE 算法时, 成对节点一次同步中双向消息的交换次数设为 4。实验对比分析了 CSMS 与 TPSN、TW-COSE 在同步精度、同步稳定性和同步开销方面的性能。

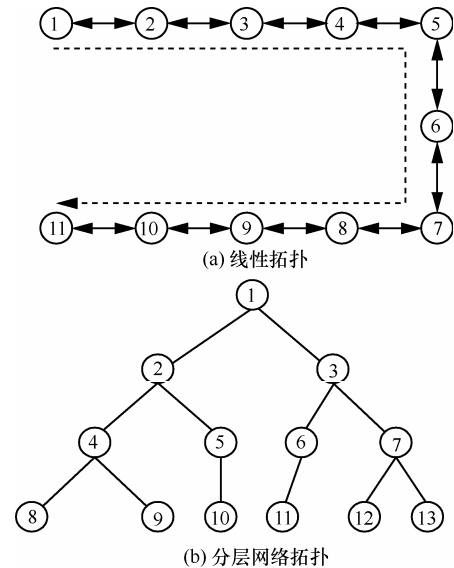


图 5 实验仿真拓扑

4.1 同步精度性能分析

全网节点每次完成同步的时刻记为观测零时刻, 取 $T=30$ s。图 6 和图 7(a)~图 7(d)分别给出了线和分层网络拓扑下, 观测时刻为 0、0.5T、1T、2T 时, 分别采用 CSMS、TPSN 及 TW-COSE 算法后全网平均同步误差随同步轮数变化的对比。由仿真结果可知, 与 TPSN 和 TW-COSE 算法相比, CSMS 算法具有更高的同步精度。这是因为当存在时钟频率偏差时, 节点之间的时钟偏差会随着时间的推移不断增大, 这也是 WSN 节点每隔一段时间就需要同步的主要原因之一。CSMS 和 TW-COSE 算法在计算节点的时钟偏差时, 考虑了节点存在时钟频率偏差, 有效减少了频率偏差的影响。在图 6 和图 7 中, 有个别区间 CSMS 算法的同步精度略低于 TW-COSE 算法, 主要原因是在该轮同步中 CSMS 算法所估计的节点频偏或相偏精度低于 TW-COSE 算法, 但从整体过程观察, 该情况出现的概率很小, 从整体上讲, CSMS 算法的同步精度明显优于 TW-COSE 算法。

4.2 同步稳定性分析

图 8(a)和图 8(b)分别给出了线和分层网络拓扑下, 不同观察时刻时 3 种算法的全网平均同步误差增长趋势对比。由图可知, CSMS 算法的全网平均同步误差增长趋势较 TPSN 和 TW-COSE 算法更加平稳。因此, 与 TPSN 和 TW-COSE 相比, CSMS 算法不需要更频繁的同步, 即可保持同步较长的稳定性。若节点之间存在频率偏差, 随着时间的累积,

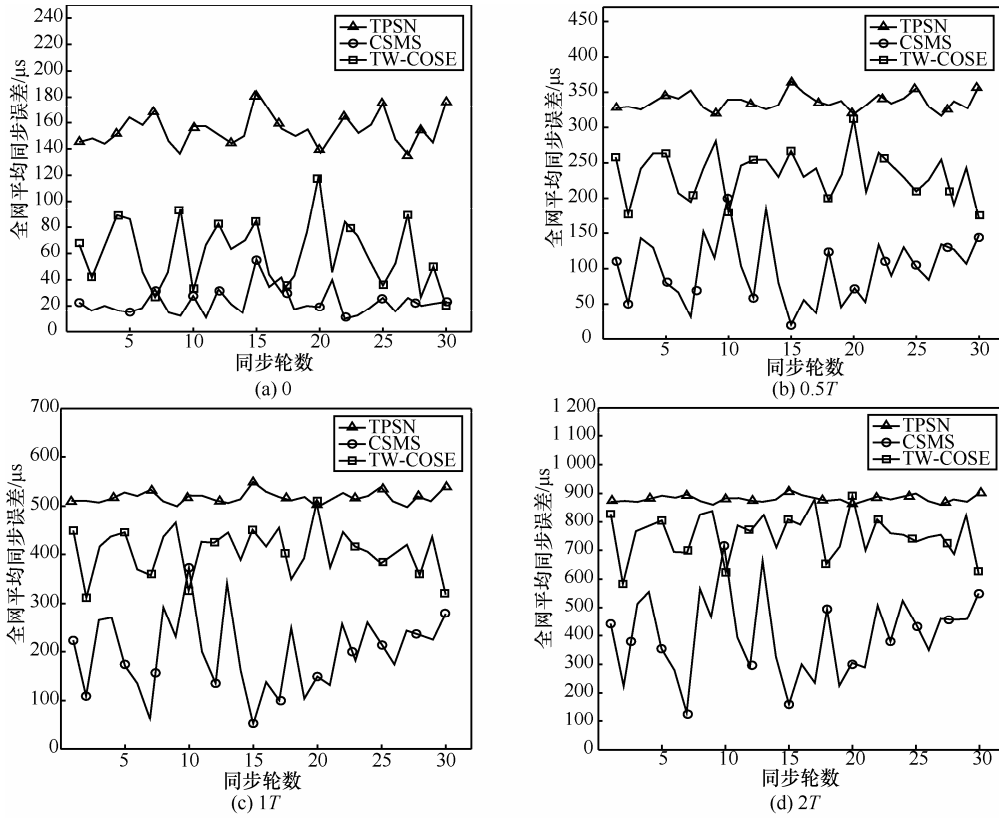


图 6 线性拓扑下，不同观测时刻下的同步误差对比

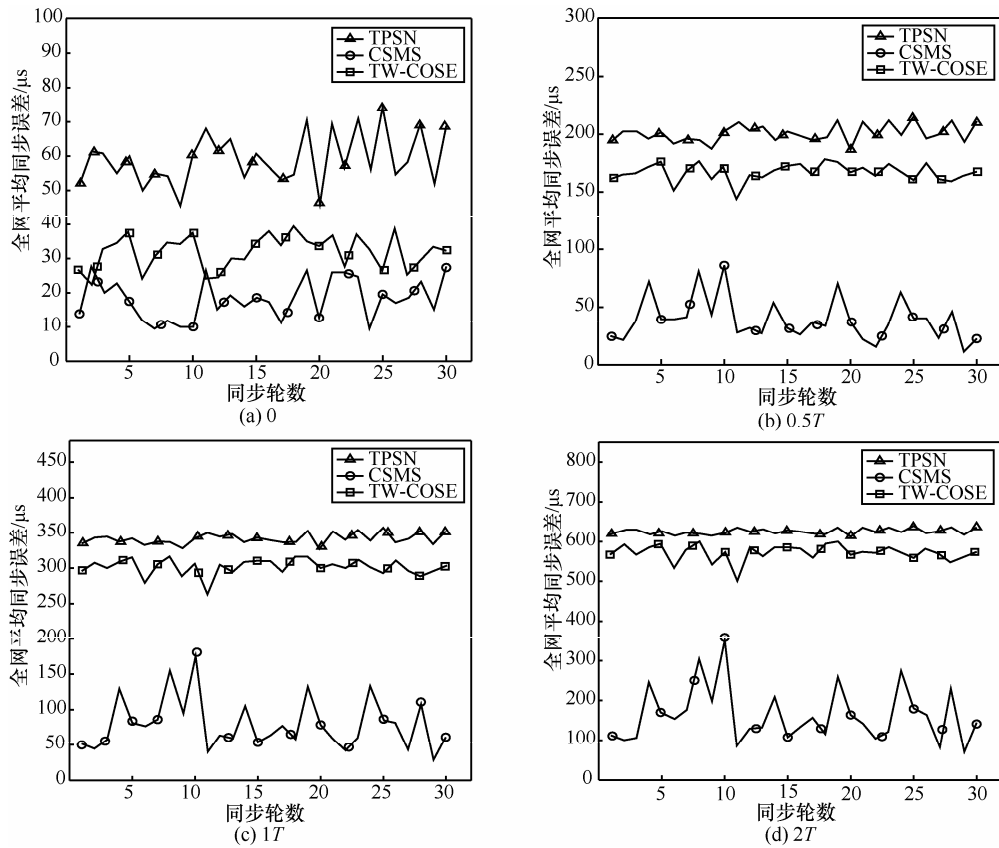


图 7 分层网络拓扑下，不同观测时刻下的同步误差对比

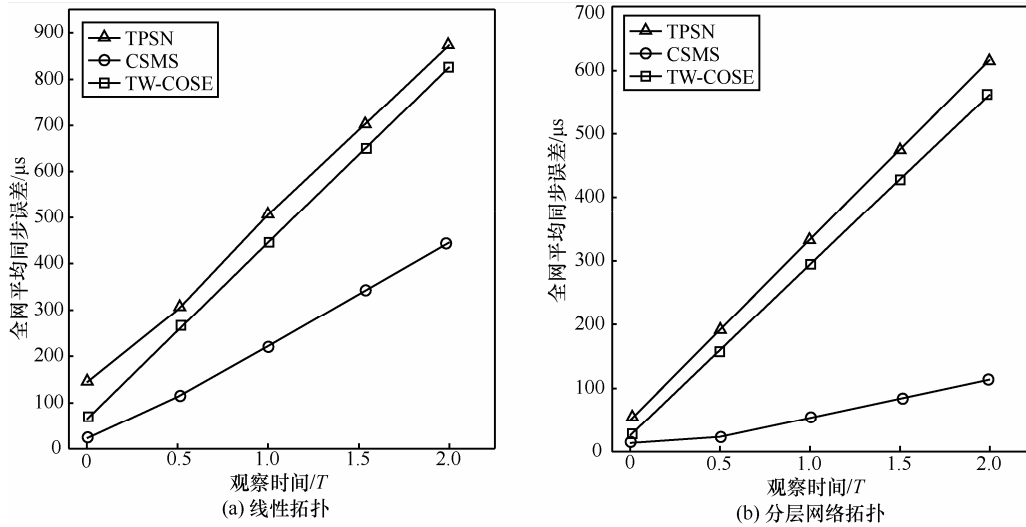


图 8 同步误差增长对比

时钟偏移会不断增大。TPSN 算法假定时钟偏差为固定值，忽略了频率偏差，必然会造成误差的逐步增大。TW-COSE 算法将节点的本地物理时间与已同步节点时间映射为线性关系，通过复杂方法估计出模型中的相关系数（频偏和相偏），从而实现时钟偏差的动态获取，算法的计算复杂度较高。CSMS 算法使用了 SCSE 方法估计时钟频率偏差并将其融入节点之间的时钟偏差计算中，实现了节点之间时钟偏差的动态调整，算法复杂度较小，同时，所估计的频偏更贴近于实际频偏。

4.3 同步开销分析

以同步消息数作为同步开销的衡量指标，表 1 为成对节点同步时 3 种算法的同步开销对比。从表 1 可知，就成对节点同步而言，CSMS 算法同步开销介于经典算法 TPSN 和复杂频偏估计算法 TW-COSE 之间。表 2 为 N 个节点同步时，3 种算法的同步开销对比。从表 2 可知， N 个节点同步时，CSMS 算法与 TPSN 算法的同步开销相近，但远低于 TW-COSE 算法。因此，CSMS 算法在获得高同步精度前提下，有效降低了同步开销。

表 1 成对节点完成同步所需的同步消息数

算法	M
CSMS	3
TPSN	2
TW-COSE	8

表 2 N 个节点完成同步所需的同步消息数

算法	M
CSMS	$2N+1$
TPSN	$2N$
TW-COSE	$16N$

5 结束语

本文在基于发送者—接收者同步方法的基础上，提出了低开销的时钟相偏和频偏估计方法（SCSE）。同时，将其扩展至整个无线传感器网络中，提出了实现与邻居节点和根节点同步的 CSMS 算法，通过采用广播监听，进一步优化了全网络的同步开销。利用仿真实验验证了算法的有效性，实验结果表明，与 TPSN 和 TW-COSE 同步算法相比，CSMS 算法能够保证同步长期的稳定，并有效地提高了同步精度。CSMS 算法平衡了同步开销、同步精度和同步稳定性，实现了同步效果的综合最优。

参考文献:

[1] 孙彦清, 彭舰, 刘唐, 等. 基于动态分区的无线传感器网络非均匀成簇路由协议[J]. 通信学报, 2014, 35(1): 198-206.
SUN Y Q, PENG J, LIU T, *et al.* Uneven clustering routing protocol based on dynamic partition for wireless sensor network[J]. Journal on Communications, 2014, 35(1): 198-206.

[2] 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.
WANG Y J, QIAN Z H, WANG J Q, *et al.* Research on energy-efficient time synchronization algorithm for wireless sensor net-

- works[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(9):2174-2179.
- [3] ELSON J, GIROD L, ESTRIN D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts[A]. Proceedings of the 5th Symposium on Operating System Design and Implementation[C]. Boston, MA, 2002.147-163.
- [4] 李文峰, 王汝传, 孙力娟. 基于RBS的无线传感器网络时间同步算法[J]. 通信学报, 2008,29(6):82-86.
- LI W F, WANG N C, SUN L J. Proved wireless sensor networks time synchronization algorithm based on RBS[J]. Journal on Communications, 2008, 29(6):82-86.
- [5] KYOUNG L N, ERCHIN S. Pairwise broadcast clock synchronization for wireless sensor networks[A]. Proceedings of the IEEE International Workshop: From Theory To Practice in Wireless Sensor Networks[C]. Helsinki, Finland, 2007.1-6.
- [6] XIAO H T, LU C O. A multi-hop low cost time synchronization algorithm for wireless sensor network in bridge health diagnosis system[A]. Proceeding of the 18th International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications[C]. 2012. 392-395.
- [7] SUN Y, NAN J, ZENG L K, *et al.* Cluster-based and energy-balanced time synchronization algorithm for multi-hop wireless sensor networks[J]. IEICE Communications Express, 2014, 1:1-6.
- [8] KYOUNG L N, QASIM M C, ERCHIN S, *et al.* Novel clock phase offset and skew estimation using two-way timing message exchanges for wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2007,55(4):766-777.
- [9] MEI L, WU Y C. On joint synchronization of clock offset and skew for wireless sensor networks under exponential delay[A]. Proceeding of IEEE International Symposium on Circuits and Systems[C]. Paris, French, 2010.461-464.
- [10] GANERIVAL S, KUMAR R, SRIVASTAVA M B. Timing-sync protocol for sensor networks [A]. SenSys 03, Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]. New York, USA, 2003. 138-149.
- [11] CHAUDHURI S P, SAHA A, JOHNSON D B. Adaptive clock synchronization in sensor networks[A]. Proceeding of the Information Processing in Sensor Networks (IPSN)[C]. Berkeley, CA, 2004. 340-348.
- [12] KASIM S Y, AYLIN K. Time synchronization based on slow-flooding in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2014,25(1):244-253.

作者简介:



孙毅 (1972-), 男, 辽宁朝阳人, 华北电力大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络与物联网。



曾璐琨 (1992-), 男, 江西吉安人, 华北电力大学博士生, 主要研究方向为无线传感器网络与物联网、电力系统通信等。



武昕 (1986-), 女, 山西吕梁人, 华北电力大学讲师、硕士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络及信号处理技术。



陆俊 (1976-), 男, 云南广南人, 华北电力大学副教授, 主要研究方向为信息处理理论、电力通信和通信网络等。



孙跃 (1990-), 男, 北京人, 华北电力大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络与物联网技术。