

基于簇的能量均衡无线传感器网络时间同步算法

孙毅, 南婧*, 武昕, 陆俊

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

(*通信作者电子邮箱 njyf@ncepu.edu.cn)

摘要:针对现有时间同步算法应用于多跳无线传感器网络时存在的误差累计和能耗不均衡问题,提出一种基于簇的能量均衡时间同步算法。该算法基于簇状分层的网络拓扑,簇首之间采用双向监听机制代替双向交换机制,以减小通信开销和发送时延带来的同步误差;簇成员节点利用双向交换和单向广播相结合的机制与簇首同步,并通过最优剩余能量选取响应节点,均衡簇内节点能耗。对提出的新方法和传统的同步算法在精度和能耗方面进行理论分析和仿真验证,结果表明,该算法在保证较高同步精度的前提下可以减小通信开销,均衡网内节点能量消耗,延长网络生命周期。

关键词:无线传感器网络;时间同步;簇;多跳;能量均衡

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Cluster-based and energy-balanced time synchronization algorithm for wireless sensor networks

SUN Yi, NAN Jing*, WU Xin, LU Jun

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

Abstract: To solve the problems of synchronization error accumulation and unbalanced energy consumption in multi-hop wireless sensor networks, a cluster-based and energy-balanced time synchronization algorithm for wireless sensor networks was proposed. Based on hierarchical clustering topology, cluster heads in adjacent layers adopted pairwise broadcast mechanism instead of bidirectional pair-wise synchronization mechanism to reduce communication overhead and the synchronization error of transmission delay. Cluster members synchronized the cluster head using the combination of bidirectional pair-wise synchronization and reference broadcast synchronization. In addition, the response node was selected according to residual energy to balance energy consumption of cluster nodes. The performance of synchronization precision and energy consumption of the proposed algorithm and traditional algorithm were analyzed by theoretical analysis and simulation. The results show that the new algorithm not only ensures high synchronization accuracy, but also reduces communication overhead and balances network node energy consumption to lengthen the cycle life of the network.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); time synchronization; cluster; multi-hop; energy balance

0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是由分布在物理空间上的大量微型传感器节点通过无线电通信形成的一个多跳的自组织网络系统,它能够实时监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息并对其进行处理,在国防军事、生物医疗、环境监测、抢险救灾、交通管理和工业控制上都具有广泛的应用前景。时间同步是WSN的一项重要支撑技术,是保证WSN中其他通信协议的前提,如:目标跟踪、数据融合、时分多址调度、协同休眠、定位等都需要网络中的节点保持时钟同步^[1]。

不同于其他分布式系统,WSN具有规模大、动态性强、资源受限等独有特点,这也决定了传统的时间同步算法不再适用于WSN的环境。针对WSN自身的特点,国内外学者已进

行了大量研究,提出了多种WSN时间同步算法,主要分为以下几种:一是基于接收者-接收者的同步机制,如参考广播同步(Reference Broadcast Synchronization, RBS)^[2];二是基于发送者-接收者双向同步机制,如TPSN(Timing-sync Protocol for Sensor Networks)^[3];三是基于发送者-接收者单向同步机制,如延迟测量时间同步协议(Delay Measure Time Synchronization, DMTS)^[4]和泛洪时间同步协议(Flooding Time Synchronization Protocol, FTSP)^[5]等。

目前提出的各种时间同步算法,它们或侧重于提高同步精度^[6-7],或侧重于降低计算复杂度^[8],或侧重于提高算法可扩展性^[9],或侧重于减少同步报文个数以降低能耗^[10-11],本文提出一种基于分簇的能量均衡的WSN时间同步(Cluster-based and Energy-Balanced Time Synchronization for WSN, CEBTS)算法,综合考虑以上因素,在保证较高同步精度的条

收稿日期:2014-03-24;修回日期:2014-06-12。

基金项目:国家科技重大专项基金资助项目(2010ZX03006-005-01);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(12QX12)。

作者简介:孙毅(1972-),男,辽宁朝阳人,教授,博士,主要研究方向:物联网与现代传感、电力系统通信及信息处理;南婧(1989-),女,陕西咸阳人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络、物联网;武昕(1972-),女,山西太原人,讲师,博士,主要研究方向:随机噪声雷达、噪声合成孔径雷达信号处理;陆俊(1976-),男,云南广南人,副教授,博士,主要研究方向:多媒体信息处理与传输、电力系统通信及信息处理。

件下,改善分簇传输机制,有效降低节点能耗,延长网络生命周期。

1 CEBTS 算法描述

CEBTS 算法是在构建簇状层次拓扑的基础上,通过簇间同步和簇内同步完成整个网络的同步。在分簇的网络拓扑模型中,传感器节点可以分为三类:汇聚节点、簇首节点和簇成员节点。主要内容包括:同步拓扑的构建、簇间同步和簇内同步。

1.1 同步拓扑的构建

考虑 WSN 对能耗的限制,采用文献[12]提出的动态层次分簇结构,将全网节点分为簇首节点和簇成员节点,簇首根据低功耗自适应集簇分层型协议(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH)生成。首先,簇首广播携带自身 ID 号的报文,收到该报文的簇内节点选择发射信号强度最大的簇首节点作为自身的簇首;然后,簇首选择距离自己最近的簇首作为下一跳节点。拓扑结构如图 1 所示。

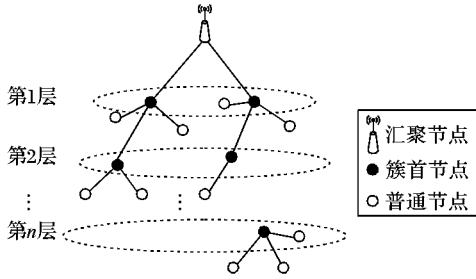


图1 层次分簇的拓扑结构

1.2 簇间同步

簇首与汇聚节点的同步采用发送者-接收者双向交换的同步机制^[3]。簇首直接与汇聚节点同步的过程如图 2 所示, R 为汇聚节点, A, B, C 为簇首节点。首先,簇首 A 向汇聚节点发送同步请求报文,并记录发送时间 T_1 ; 汇聚节点收到同步请求后记录接收时间 T_2 并回复应答报文给 A , 包含时钟信息 T_2 和 T_3 ; 簇首 A 收到应答包后记录接收时间 T_4 , 并利用式(1)计算出与汇聚节点的时间偏移量,从而调整本地时钟与汇聚节点同步。

$$\Delta = 0.5[(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)] \quad (1)$$

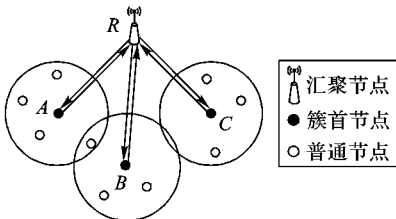


图2 簇首直接与汇聚节点同步

在本文提出的层次拓扑中,当簇首处于较高层次时,需要通过中间节点转发时钟信息,逐次同步到汇聚节点。但直接采用 TPSN 机制会产生大量的报文交换,且中间节点转发会产生更多的时延误差,因此提出一种自适应同步算法:当簇首发送同步请求时,处于上下两层的节点同时接收此报文,并记录接收时间。具体过程如图 3 所示。

图 3 中, T_1^i 表示层次号为 i 的簇首节点发送同步请求报文 $S_{sync}(i)$ 时的本地时间, T_2^i 和 T_4^i 表示接收时间。由图 3 可知, i 层簇首与 $i-1$ 层簇首的同步机制类似 TPSN, 其偏移量 $offset(i)$ 可根据式(1)求出, 并且保存在 i 层簇首缓冲区

中。只是在 $i-1$ 层簇首发送 $S_{sync}(i-1)$ 时, i 层簇首和 $i-2$ 层簇首同时接收该报文并且记录接收时间 T_2^i 和 T_4^{i-2} 。当 sink 节点收到来自 1 层簇首发送的 $S_{sync}(1)$ 时, 返回应答报文 $S_{ack}(1)$ 。 $S_{ack}(i)$ 包含时钟偏移量 $offset(i)$ 。簇首收到应答包后可计算出其与 sink 节点的时钟偏移量, 并且调整自身时钟 T_i 。

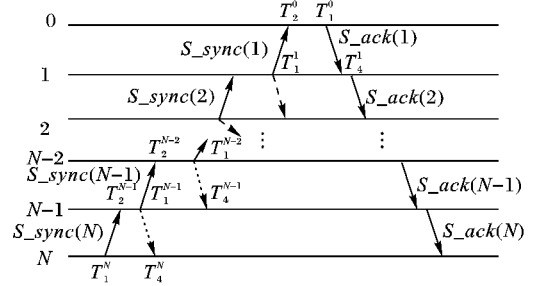


图3 簇间同步

1.3 簇内同步

簇内同步采用双向同步机制和参考广播同步机制相结合的方法, 首先簇首在簇内选取一个回应节点与簇首进行双向同步, 其他节点通过 RBS 计算出与回应节点的偏移量, 间接与簇首同步。

1.3.1 选取回应节点

对于能量受限的 WSN, 节点能耗是除了同步精度之外首要考虑的因素。在进行簇内同步时, 簇内普通节点只需接收簇首广播的同步包, 而回应节点还要承担向簇首节点发送回应包的任务, 所以每执行一次同步, 回应节点比其他簇成员节点消耗更多的能量。现有的算法都是在簇内随机选取回应节点, 这种方法并没有考虑单个节点的剩余能量情况, 可能使得一些剩余能量不足的节点被选为回应节点而导致其很快死亡, 所以本文提出一种根据节点剩余能量动态选取回应节点的方法, 选取标准如式(2):

$$\pi_{energy} = E_{rest}/E_{ini} \quad (2)$$

其中: π_{energy} 为节点等效能量, E_{rest} 为节点剩余能量, E_{ini} 为节点初始能量。簇首根据式(2)选取 π_{energy} 最大的节点作为回应节点。

根据 WSN 中节点的能量模型^[8], 发送数据比接收数据消耗更多的能量, 发送能量与发送距离有关, 距离越大, 耗能越多。式(2)单纯地依靠剩余能量在初始能量所占的比重选择回应节点, 忽略了节点与簇首的距离, 所以被选为回应的节点有可能因距离簇首太远而消耗更多的能量导致快速死亡, 因此对式(2)进行改进如下:

$$\pi_{energy} = a(E_{rest}/E_{ini}) + b(d_{max} - d)/d_{max} \quad (3)$$

其中: a, b 为系数, 不同的应用环境取不同的值, $a + b = 1$; d 表示节点距簇首的距离, d_{max} 为节点到簇首的最大距离。式(3)是关于能量和距离的线性组合, 综合考虑剩余能量和发送距离对节点能耗的影响, 能够有效地均衡节点能耗, 延长网络生命周期。

1.3.2 簇内节点与簇首同步

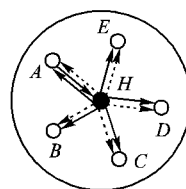


图4 簇内同步

簇首根据上节中提到的算法选出回应节点, 开始同步簇内节点, 同步原理如图 4。

簇首 H 广播一个包含发送时间 T_1 和回应节点的 ID 的同步报文, 收到同步报文的节点记录其接收时间 T_{2i} 并将包

中信息与自身 ID 进行对比,与包中 ID 相同的节点(如 A)成为回应节点,向簇首发送一个包含 T_{2A} 和发送时间 T_{3A} 的回应报文,簇首收到回应节点 A 发送的报文后记录接收时间 T_{4A} ,则簇首通过式(4)计算其出与回应节点 A 的时间偏差 $Offset_{HA}$ 。簇首再次广播一个包含节点 A 的接收时间 T_{2A} 和时间偏差 $Offset_{HA}$ 的报文,所有节点接收到该广播包后,回应节点根据式(4)调整其本地时钟,其他节点(例如 B)根据式(5)调整其本地时钟。重复上述过程,得到多组数据后,节点根据线性回归算法就可求出时钟偏移量和漂移值。

$$Offset_{HA} = 0.5[(T_{2A} - T_1) - (T_4 - T_{3A})] \quad (4)$$

$$Offset_{HB} = Offset_{HA} - (T_{2A} - T_{2B}) \quad (5)$$

2 CEBTS 算法性能分析

2.1 同步误差分析

在 WSN 中,消息传输的不确定性延迟是影响时间同步精度的主要因素。其中,发送延迟、访问延迟与接收处理延迟对同步精度的影响最大。CEBTS 算法误差主要来自簇间节点的双向同步误差和簇内广播同步误差。

由图 2 可得,簇内节点 A 与簇首 H 的误差类似 TPSN 双向同步误差,而其他节点如 B 和 A 的误差类似 RBS 同步误差。

双向同步误差表达式如下:

$$\varepsilon_{TPSN} = 0.5S^{UC} + 0.5P^{UC} + 0.5R^{UC} + 0.5RD_{T_1 \rightarrow T_4}^{H-A} \quad (6)$$

RBS 同步误差表达式如下:

$$\varepsilon_{RBS} = P^{UC} + R^{UC} + RD_{T_1 \rightarrow T_4}^{A-B} \quad (7)$$

其中: S^{UC} 、 P^{UC} 、 R^{UC} 分别表示节点之间的发送时延差、传播时延差、接收时延差, $RD_{T_1 \rightarrow T_4}^{H-A}$ 是指从 T_1 时刻到 T_4 时刻节点 H 与 A 的相对时钟漂移值。则簇成员节点的同步误差 e 应满足:

$$abs(\varepsilon_{TPSN} - \varepsilon_{RBS}) \leq e \leq abs(\varepsilon_{TPSN} + \varepsilon_{RBS}) \quad (8)$$

在簇间同步中,簇首通过多跳与汇聚节点同步。以两跳为例研究本文提出的簇间同步机制多跳误差来源。相邻簇首之间采用 TPSN 同步机制,故由式(6)可得 CEBTS 的两跳同步误差 φ_2 (为了简化分析,再次忽略时钟漂移的影响)为:

$$\begin{aligned} \varphi_2 = & 0.5(S_i - S_{i-2}) + 0.5(P_{i-1-i} - P_{i-1-i}) + \\ & 0.5(P_{i-1-i-2} - P_{i-2-i-1}) + 0.5(R_{i-1} - R_i) + \\ & 0.5(R_{i-2} - R_{i-1}') \end{aligned} \quad (9)$$

TPSN 两跳误差 φ_2' 为:

$$\begin{aligned} \varphi_2' = & 0.5(S_i - S_{i-1}) + 0.5(S_{i-1}' - S_{i-2}) + \\ & 0.5(P_{i-i-1} - P_{i-1-i}) + 0.5(P_{i-1-i-2} - P_{i-2-i-1}) + \\ & 0.5(R_{i-1} - R_i) + 0.5(R_{i-2} - R_{i-1}') \end{aligned} \quad (10)$$

其中: S_i 和 S_i' 表示层次号为 i 的节点在不同时刻的发送时延, P_{i-i-1} 表示层次号为 i 和 $i-1$ 的节点传播时延, R_i 和 R_i' 表示层次号为 i 的节点在不同时刻的接收时延。从式(9)和(10)中可以看出,本文提出的簇间自适应同步机制消除了中间节点带来的发送时延,减小了不确定时延的影响。

假设发送时延 S_i 服从 $N(\mu_1, \sigma_1^2)$, 传播时延 P_i 服从 $N(\mu_2, \sigma_2^2)$, 接收时延 R_i 服从 $N(\mu_3, \sigma_3^2)$, 且 S_i 、 P_i 、 R_i 相互独立。结合概率论相关知识可得一跳同步误差的概率分布为 $\varphi_1 \sim N(0, (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2)/2)$, 则 TPSN 算法的两跳同步误差为 $\varphi_2^{TPSN} \sim N(0, \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2)$, 本文算法的两跳同步误差为 $\varphi_2 \sim N(0, \sigma_1^2/2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2)$ 。由此看出,本文提出的簇间算法使得同步误差的变化幅度小于 TPSN 算法,提高了同步精度。

2.2 同步开销分析

CEBTS 算法的簇内同步阶段,每次只有回应节点跟簇首进行 TPSN 同步,其他普通节点接收簇首的广播信息,所以与 TPSN 算法相比,发送信息大大减少,而与 RBS 算法相比则避免了大量报文的交换和高复杂度的运算,降低了功耗;簇间同步阶段,上下两层节点同时接收中间节点广播的时钟信息,减少了同步报文转发次数。假设节点数为 N 。TPSN 同步机制中,报文开销与节点数 N 关系为 $2N$; RBS 所需同步报文数为 $N(N-1)+1$; 而 CEBTS 中每一层的报文数为 $3n+n(t+1)$, 其中 n 是每层的簇首节点数, t 是跳数, n , t 和分簇方法有关。表 1 列举了三种算法不同节点数时所需报文数。假设 CEBTS 已经按照 1.1 节的方法分好簇, n 和 t 已知。

表 1 同步报文数比较

节点数	TPSN	RBS	CEBTS	节点数	TPSN	RBS	CEBTS
8	16	57	5	85	170	7141	53
24	48	553	17	97	194	9313	77
56	112	3081	33	100	200	9901	105

3 仿真实验与分析

3.1 同步精度性能实验

在相同的参数设置下仿真 RBS、TPSN 和 CEBTS 算法:同步周期设置为 10 s, 仿真时间为 500 s, 经过 50 个周期, 统计得到节点的同步精度参数如表 2 所示。

表 2 不同算法同步精度参数比较

算法	误差均值	误差标准值	最大同步误差	最小同步误差
RBS	37.34	25.38	83.27	0
TPSN	18.56	11.83	44.98	0
CEBTS	20.71	17.93	63.32	0

由表 2 看出, TPSN 算法精度最高, RBS 算法精度最差, CEBTS 算法介于两者之间, 接近 TPSN 的同步精度。因为 CEBTS 算法中, 只有回应节点与簇首进行双向报文交换, 类似 TPSN 算法, 而其他簇内节点与回应节点的同步通过 RBS 机制来实现, 所以 CEBTS 算法同步精度低于 TPSN。由于每轮同步周期, 簇首都会与一个簇内节点进行双向同步, 所以经过多次同步后, 每个节点都有机会与簇首实现双向同步, 因此节点的平均精度高于单向广播的 RBS 同步精度。

在 100 m × 100 m 的范围内随机部署 10, 20, 30, ..., 100 个节点, 分别执行 CEBTS 算法和 RBS 以及随机选取回应节点的分簇方法(简称为算法 1), 统计节点平均同步误差, 结果如图 5 所示。

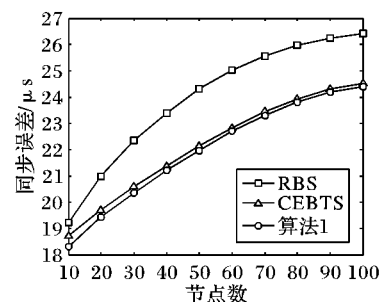


图 5 节点数与同步精度关系

由图 5 可以看出, 三种算法随着节点数的增加, 同步误差逐渐增大。CEBTS 和算法 1 采用双向同步和广播方式相结合

的方式,其同步误差范围如式(8)所示,由图5可知,其平均误差低于RBS。由于算法1采取随机选点的方式使得每个节点成为回应节点的概率相同,即每个节点都有机会与簇首进行双向同步,故精度略高于非均匀选取的CEBTS算法。

3.2 能量消耗性能分析

在 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的范围内随机部署100个节点,节点通信距离为30 m,按照LEACH协议对节点分簇,统计网内节点死亡个数和能量消耗情况。为了更好地说明CEBTS在选取回应节点方面的优势,假设被选为簇首的节点能量足够大,仿真时不会死亡(当节点剩余能量无法完整接收一个同步包时,定义其为死亡节点),只对簇内节点能耗进行统计。利用式(2)选回应节点的方法称为算法2。

从图6中可以看出,CEBTS算法比其他两种算法死亡节点数增加的速度要慢。算法1和算法2在同步进行到第400轮时,已经有节点开始死亡,而CEBTS算法接近450轮时才有节点死亡,说明合理选择回应节点能避免个别节点因负载过重过早死亡;算法1和算法2分别在546轮和684轮时簇内节点全部死亡(只剩簇首节点),而CEBTS算法中,簇内节点全部死亡发生在767轮,说明本文算法推迟了节点的死亡时间,延长了网络生存期。

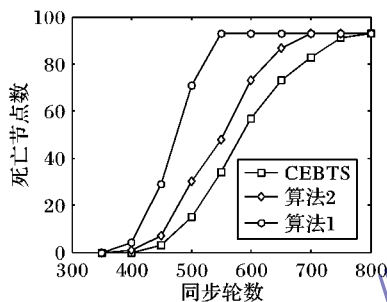


图6 随着同步的进行死亡节点数

对节点的剩余能量进行仿真,并且每隔100轮对节点平均剩余能量进行统计,结果如图7所示。

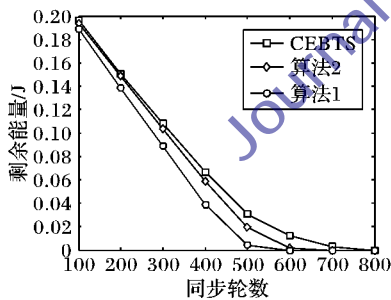


图7 随着同步的进行节点剩余能量

从图7中可以看出,CEBTS算法耗能速度低于其他两种算法。算法1随机选择回应节点没有考虑节点的剩余能量;算法2只考虑了剩余能量而提高了远方节点的耗能速率;而CEBTS算法综合考虑节点剩余能量和发送距离,选取最优节点,平衡了节点的能量消耗。由以上分析可知,本文算法能够使节点的能量得到有效利用,均衡能耗,延长网络生命周期。

4 结语

本文针对WSN能量受限的特点,从节能和均衡能耗以延长网络生命周期方面考虑,提出了一种基于簇的能量均衡WSN时间同步算法(CEBTS)。该算法在簇间同步阶段采用双向监听机制,减小同步开销并消除中间节点转发同步信息时产生的发送时延;在簇内同步阶段根据剩余能量和发送距

离选取回应节点,均衡各节点能耗。通过对CEBTS算法的性能进行分析和仿真验证,结果表明该算法在降低能耗和延长网络寿命方面比没有能量反馈的分簇时间同步算法有较大优势,非常适用于能量受限的多跳WSN。本文提出的算法在精度和能量方面取得了很好的折中,但对于一些精度要求很高的场合,还需考虑节点频率偏移对精度的影响。

参考文献:

- [1] REN F, HUANG H, LIN C. Wireless sensor networks [J]. *Journal of Software*, 2003, 14(7): 1282-1291. (任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291.)
- [2] ELSON J, GIROD L, ESTRIN D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcast [C]// *Proceedings of the Fifth Symposium Operating Systems Design and Implementation*. New York: ACM, 2002, 147-163.
- [3] GANERIVAL 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: ACM, 2003: 138-149.
- [4] PING S. Delay measurement time synchronization for wireless sensor networks, IR-TR-64 [R]. Intel Research Centre, 2003.
- [5] MAROTIM M, KUSY B, SIMON G, et al. The flooding time synchronization protocol [C]// *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. New York: ACM, 2004: 39-49.
- [6] NI Z, YAO F, ZHANG L, et al. Improved average time synchronization algorithm in wireless sensor networks [J]. *Computer Technology and Development*, 2013, 23(5): 42-46. (倪泽宇, 姚放吾, 张磊, 等. 改进的无线传感器网络平均时间同步算法[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(5): 42-46.)
- [7] QI H, WANG H, LIU J, et al. Changeable cycle for improvement based on the Bayes estimation of the TPSN algorithm [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2013, 26(3): 407-410. (齐华, 王恒, 刘军, 等. 可变周期的基于贝叶斯估计的TPSN改进算法[J]. 传感技术学报, 2013, 26(3): 407-410.)
- [8] SHI C, QIU H, CHEN D, et al. Simple distributed time synchronization scheme for wireless sensor networks [J]. *Journal of Xidian University: Natural Science Edition*, 2013, 40(1): 93-99, 147. (师超, 仇洪冰, 陈东华, 等. 一种简单的分布式无线传感器网络时间同步方案[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2013, 40(1): 93-99, 147.)
- [9] GAUTAM G C, SHARMA T P, KATTIYAR V, et al. Time synchronization protocol for wireless sensor networks using clustering [C]// *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Recent Trends in Information Technology*. Piscataway: IEEE, 2011: 417-422.
- [10] GUAN X, ZHANG X, LIU Z. Low-power clustering-based time synchronization mechanism for multi-hop WSN [J]. *Computer Engineering*, 2010, 36(9): 111-113. (关新平, 张晓静, 刘志新. 基于分簇的低功耗多跳WSN时间同步机制[J]. 计算机工程, 2010, 36(9): 111-113.)
- [11] LI Y, WANG Y. Cluster-based energy-efficient time synchronization algorithm for wireless sensor networks [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2013, 32(7): 109-112. (李玉飞, 王玉秀. 基于分簇的高能效无线传感器网络时间同步算法[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(7): 109-112.)
- [12] XU S, WANG P, HUANG X, et al. Design of clustering time synchronization algorithm in wireless sensor networks [J]. *Journal of Fujian Normal University: Natural Science Edition*, 2012, 28(1): 38-40. (徐世武, 王平, 黄晔, 等. 无线传感器网络中分簇时间同步算法的设计[J]. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2012, 28(1): 38-40.)