

一种基于 LEACH 的低延迟和低功耗的 WSN 分簇算法

熊成彪 丁洪伟 董发志 杨志军 保利勇

云南大学信息学院 昆明 650500

(1207683357@qq.com)



摘要 针对经典分簇 LEACH 协议的不足,提出了低延迟、低功耗和网络能耗均匀的改进算法。该算法主要从两个方面对 LEACH 进行了改进:在稳定数据传输阶段采用 CSMA 机制,降低了数据传输延迟;在能量均衡和能耗方面,混入小部分初始能量高的高级节点,在簇头选举阶段首先对节点进行能量感知,并综合考虑节点剩余能量和平均能量,从而延长了网络的生命周期。文中首先对 LEACH 协议进行简单介绍,利用平均周期法对 LEACH 中使用的 CSMA 机制进行分析,从而得到了改进算法的延迟计算方法;然后对改进算法的数据传输阶段的能耗和算法复杂度进行分析,并对改进算法的簇头选举阈值的计算进行讨论;最后对改进算法的数据传输阶段的延时和功耗进行建模分析,并利用 MATLAB 进行仿真对比。仿真结果显示,改进算法使得第一个节点死亡的时间延长了 31%,全部节点死亡的时间延长了 24.7%,并且网络能耗更加均匀,因此,该算法有效地解决了 LEACH 中的热区问题,改进了实际 WSN 应用中节点集中死亡带来的区域信息缺失问题。相比于 LEACH,改进算法的数据传输延迟平均降低了 78.6%,保证了 WSN 应用中数据的实时性,因此改进算法在延迟、生命周期、网络能耗均匀性以及吞吐量等性能上都得到了优化提升。

关键词: WSN; LEACH 协议; 能量感知; CSMA; SEP; 能耗均衡

中图法分类号 TP393

Low-delay and Low-power WSN Clustering Algorithm Based on LEACH

XIONG Cheng-biao, DING Hong-wei, DONG Fa-zhi, YANG Zhi-jun and BAO Li-yong

School of Information Science & Engineering, Yunnan University, Kunming 650500, China

Abstract Aiming at the shortcomings of the classical clustering LEACH protocol, an improved algorithm with low latency, low power consumption and network energy balance was proposed. The algorithm improves the LEACH in two aspects. Firstly, the CSMA mechanism is adopted in the stable data transmission phase to reduce the data transmission delay. Secondly, in terms of energy balance and energy consumption, the strategy is mixed into a small number of advanced nodes with high initial energy, and in the election of the cluster, the remaining energy and average energy of the node are considered comprehensively, which prolongs the network lifetime. In this paper, the LEACH protocol is introduced briefly. The average periodic method is used to analyze the CSMA mechanism in LEACH, and the delay calculation method of the improved algorithm is obtained. Then the energy consumption of the data transmission stage and algorithm complexity of the improved algorithm are analyzed. The calculation of cluster head election threshold of the improved algorithm is discussed. Finally the delay and power consumption of the data transmission stage of the improved algorithm are analyzed, and MATLAB is used to simulate and compare. The simulation results show that the improved algorithm's first node dead time is prolonged by 31%, the dead time of all nodes is prolonged by 24.7%, and the network energy consumption is more uniform, which can effectively solve the hot zone problem in LEACH and the problem of missing regional information caused by node-based death in actual WSN applications. Compared with LEACH data transmission delay, the improved algorithm is reduced by 78.6% on average, ensuring the real-time performance of data in WSN applications. It proves that the performance of the improved algorithm is improved in terms of delay, lifetime, energy consumption uniformity and throughput.

Keywords WSN, LEACH protocol, Energy perception, CSMA, SEP, Energy balance

随着 5G 时代的到来,以及移动边缘计算等新兴技术的出现,WSN 的大规模应用又被推到了新高度^[1]。WSN 可以

对检测区域的信息进行远距离实时观测,观测区域内的众多节点不断采集与传输数据,因此在 WSN 中降低功耗和延时

收稿日期:2019-01-08 返修日期:2019-04-28 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金项目(61461053,61461054,61072079)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (61461053,61461054, 61072079).

通信作者:丁洪伟(dhw1964@163.com)

组,继续睡眠,等待一段时间后再侦听,若信道空闲则立即发送信息分组^[13]。非坚持 CSMA 的模型原理如图 3 所示。

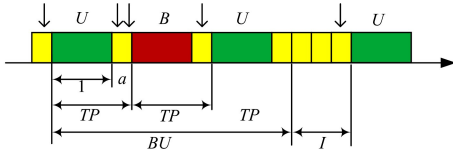


图 3 CSMA 争用信道模型

Fig. 3 CSMA contention channel model

图 3 中侦听信道和空闲时隙的长度为 a , 信息分组发送的时隙长度为 1, 一个传输周期为 TP , 信道中出现 3 种随机过程, 汇聚节点成功接收信息分组为事件 U , 信息分组碰撞为事件 B , 信道空闲为事件 I 。把信道上的信息分组分为忙 (BU) 和闲 (I) 两种状态, 忙 (BU) 包括成功接收信息分组 (U) 和信息分组碰撞 (B) 两种状态。此时, 信道上忙和闲两种状态随机交错出现。设一次循环周期事件 I 出现 j 次, 事件 BU 出现 i 次, 信息分组到达率为 G , 系统终端节点数量为 n , 终端节点发送信息分组的概率为 q_i , 则可以得到:

$$G = q_1 + q_2 + \dots + q_n = \sum_{i=1}^n q_i \quad (2)$$

一次循环周期内出现 (I, BU) 事件的联合概率分布为:

$$P(j, i) = (e^{-aG})^j (1 - e^{-aG})^i \quad (3)$$

一次循环周期内, I 事件出现的次数 $E(N_1)$ 为:

$$E(N_1) = \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} j (e^{-aG})^j (1 - e^{-aG})^i = \frac{1}{1 - e^{-aG}} \quad (4)$$

因此, 空闲事件的平均长度 $E(I)$ 为:

$$E(I) = E(N_1) \times a = \frac{a}{1 - e^{-aG}} \quad (5)$$

同理, 一个循环周期内 BU 事件出现的次数 $E(N_2)$ 为:

$$E(N_2) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} i (1 - e^{-aG})^i (e^{-aG})^j = \frac{1}{e^{-aG}} \quad (6)$$

因此, 忙事件的平均长度 $E(BU)$ 为:

$$E(BU) = (1 + a) \cdot E(N_2) = (1 + a) \cdot \frac{1}{e^{-aG}} \quad (7)$$

在 BU 事件中, 成功接收数据包事件 U 的次数为 $E(NBU_U)$, 设每产生 k 个成功分组, 就有 $i - k$ 个碰撞事件, 则有:

$$\begin{aligned} E(NBU_U) &= \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} C_i^k (e^{-aG})^j (aGe^{-aG})^k (1 - e^{-aG} - aGe^{-aG})^{i-k} \\ &= \frac{aG}{1 - e^{-aG}} \end{aligned} \quad (8)$$

因此, BU 事件中成功接收信息分组的平均长度 $E(BU_U)$ 为:

$$E(BU_U) = E(NBU_U) \times 1 = \frac{aG}{1 - e^{-aG}} \quad (9)$$

则该模型终端节点发送数据包的成功率 S 为:

$$S = \frac{E(BU_U)}{E(BU) + E(I)} = \frac{aGe^{-aG}}{1 + a - e^{-aG}} \quad (10)$$

3.2 LEACH 协议中 CSMA 的数学模型

簇内使用 CSMA 协议, 簇头向 Sink 节点转发数据时仍然使用 CSMA 协议, 相当于多个 CSMA 系统组成了一个双层的 CSMA 系统。假设在一个由 N 个簇头组成的包含 N 簇的双层 CSMA 系统中, 第 i 簇包含 n_i 个终端节点, 第 i 簇的

第 j 个终端节点发送信息分组的概率为 q_{ij} , 则第 i 簇的到达率 G_i 为:

$$G_i = \sum_{j=1}^{n_i} q_{ij} \quad (11)$$

为了简化计算, 假设每个终端节点发送信息分组的概率值均为 q , 则 G_i 可以简化为:

$$G_i = n_i q \quad (12)$$

各簇簇内成员的发送成功率等于对应簇头节点的转发成功率, 因此第 i 个簇头的发送概率 Q_i 为:

$$Q_i = \frac{aG_i e^{-aG_i}}{1 + a - e^{-aG_i}} \quad (13)$$

由此可以得到 LEACH 算法中数据传输阶段 CSMA 的成功率 S_D 为:

$$S_D = \frac{a \sum_{i=1}^N Q_i \exp(-a \sum_{i=1}^N Q_i)}{1 + a - \exp(-a \sum_{i=1}^N Q_i)} \quad (14)$$

3.3 改进算法的延时估算

假设成功发送一个数据包需要一个时隙, 终端节点采集到数据发送的概率均为 q , 则系统成功率为 S_D 。簇头节点仅转发数据包, 在每轮的稳定阶段, 第 i 簇下的终端节点个数为 n_i , 且每轮每个终端节点都需要发送 m 个数据包, 则该轮的延时为最高分簇的延时, 因此改进算法中每轮系统的平均延时为:

$$t_{\text{avg}} = \max\{n_i (m/S_D)\} \quad (15)$$

4 基于能量均衡的改进

单纯地将 LEACH 稳定数据传输阶段的 TDMA 更改成 CSMA 可以降低延时, 但是由于 CSMA 中节点争用信道会造成大量的能量损耗, 导致更换成 CSMA 后的协议生命周期大幅度降低, 因此本文结合文献[2]和文献[15]的优势, 使得簇头的选举和网络中的能量分布得更加均匀, 以延长第一个节点的死亡时间, 从而延长网络的生命周期。

4.1 能量计算模型

本文采用的无线能量消耗模型如图 4 所示, 传输的能量包括数据处理和功率放大两部分。若发送机和接收机的距离大于阈值 d_0 , 则采用自由空间模型, 此时 n 取 2; 若其距离小于 d_0 , 则采用多径衰落模型, 此时 n 取 4^[14]。

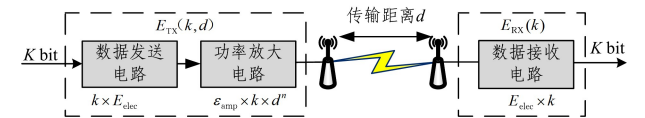


图 4 无线传输能量模型

Fig. 4 Wireless transmission energy model

假设距离为 d 的两个节点间发送了 k bit 的数据, 则发送和接收所消耗的能量为:

$$E_{\text{TX}}(k, d) = \begin{cases} kE_{\text{elec}} + k\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ kE_{\text{elec}} + k\epsilon_{\text{amp}}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (16)$$

$$E_{\text{RX}}(k) = kE_{\text{elec}} \quad (17)$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{\text{amp}}}} \quad (18)$$

其中, E_{elec} 为接收或发射电路处理数据所消耗的能量, ϵ_{fs} 为近

距离放大器的参数, ϵ_{amp} 为远距离放大器的参数, d_0 为距离阈值。根据能量模型, 当 LEACH-CSMA 协议中稳定阶段每轮发送 m 个数据包且每个包长 l bit 时, 可以计算出距离簇头 d_{toCH} 的每个终端节点消耗的能量为:

$$E_{\text{ter}} = \begin{cases} \omega E_{\text{elec}} + \omega \epsilon_{fs} d_{\text{toCH}}^2, & d_{\text{toCH}} < d_0 \\ \omega E_{\text{elec}} + \omega \epsilon_{\text{amp}} d_{\text{toCH}}^4, & d_{\text{toCH}} \geq d_0 \end{cases} \quad (19)$$

其中, $\omega = l(m/S_D)$ 。同时, 若每轮簇头下拥有的终端节点数目为 n , 簇头到 Sink 节点的距离为 d_{toSink} , 则每轮中每个簇头节点消耗的能量为:

$$E_{\text{CH}} = \begin{cases} nmlE_{\text{elec}} + nml\epsilon_{fs}d_{\text{toSink}}^2 + n\omega E_{\text{RX}}, & d_{\text{toSink}} < d_0 \\ nmlE_{\text{elec}} + nml\epsilon_{\text{amp}}d_{\text{toSink}}^4 + n\omega E_{\text{RX}}, & d_{\text{toSink}} \geq d_0 \end{cases} \quad (20)$$

能耗的大小主要由距离来决定, 这就意味着当远离 Sink 的节点被选举成为簇头节点时将导致耗能增大, 而簇头节点的选举是完全随机的, 所以随着轮数的增加, 远离 Sink 的节点死亡速度更快, 造成远离 Sink 的节点大概率死亡, 检测区域的面积越大, 这种现象体现得越为明显^[16]。因此, 虽然一部分节点死亡之后网络还可以继续采集上传数据, 但是存活节点将集中于 Sink 节点附近, 导致远距离区域的检测信息缺失。为了使能量均衡并延长网络的生命周期, 本文将对簇头选举的阈值进行改进。

4.2 簇头选举算法的改进

本节主要讨论稳定阶段数据传输所消耗的能量。在 LEACH-CSMA 协议中, 簇头节点在转发终端节点的数据包时会争用信道, 导致碰撞损坏的数据包需要重新发送, 因此在 CSMA 机制下实际发送的数据包数量要大于 TDMA 机制下实际的发包量, 能量消耗加大。为了延长网络生命周期, 采用文献^[15]中 SEP 算法的思路, 将节点分为普通节点和高级节点两类。高级节点将拥有更多的初始能量, 被选举成为簇头的概率更高, 从而在整体上延长网络的生命周期。

普通节点和高级节点被选举成为簇头的概率权重为:

$$p_{\text{norm}} = \frac{p}{1 + \alpha\beta} \quad (21)$$

$$p_{\text{adv}} = \frac{p}{1 + \alpha\beta} (1 + \alpha) \quad (22)$$

其中, 高级节点的能量比普通节点的能量多 α 倍, β 为高级节点在总节点中的占比, 高级节点成为簇头的概率是普通节点的 $1 + \alpha$ 倍。 P 为簇头占总节点的比例, 因此 p_{norm} 表示簇头节点中普通节点所占的权重, 同时每个节点都可以感知自己的剩余能量。假设第 i 个节点的剩余能量为 $E_{\text{res}}(i)$, 当前死亡节点数为 N_{dead} , 节点总数为 N_{total} , 则节点的平均剩余能量为:

$$E_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{total}}} E_{\text{res}}(i)}{N_{\text{total}} - N_{\text{dead}}} \quad (23)$$

此时, 可以把式(1)的簇头选举阈值更新为:

$$T(s) = \begin{cases} \frac{p_{\text{norm}}}{1 - p_{\text{norm}}(r \bmod \frac{1}{p_{\text{norm}}})}, & \text{if } s \in G' \text{ 且 } E_{\text{res}}(i) > E_{\text{avg}} \\ \frac{p_{\text{adv}}}{1 - p_{\text{adv}}(r \bmod \frac{1}{p_{\text{adv}}})}, & \text{if } s \in G'' \text{ 且 } E_{\text{res}}(i) > E_{\text{avg}} \\ 0, & \end{cases} \quad (24)$$

其中, G' 为 $1/p$ 轮内没有当选过簇头的普通节点的集合, G'' 为 $1/p$ 轮内没有当选过簇头的高级节点的集合。当节点产生的随机数小于阈值, 并且满足约束条件 $E_{\text{res}}(i) > E_{\text{avg}}$ 时, 节点才能被选举成为簇头。改进后的算法把大量的计算任务交给 Sink 节点, 而终端节点无论是高级节点还是普通节点, 都只担负传输数据的任务, 而 Sink 节点由电源供电, 因此不必担心 Sink 节点的能量损耗问题^[17]。改进算法一方面能保证不会把低能量的节点选举为簇头而加速节点死亡, 延长了第一个节点死亡的时间; 另一方面将网络中的小部分节点替换为高级节点, 高级节点拥有的高初始能量使得网络的生命周期更长。

4.3 改进后算法的实现

改进后的算法流程如图 5 所示。

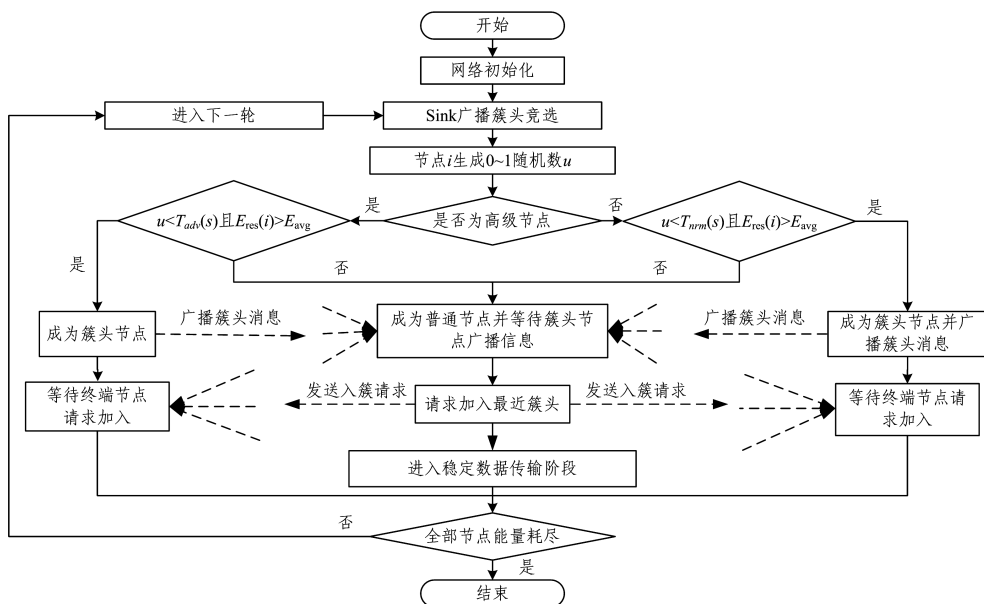


图 5 改进算法流程图

Fig. 5 Flowchart of improved algorithm

Step1 簇头选举阶段, Sink 节点广播簇头竞选消息, 终端节点接收到广播后回复确认消息, 确认消息中包含剩余能量的信息。

Step2 Sink 根据接收到的消息, 利用式(23)、式(24)计算出平均剩余能量和阈值, 并将其广播给终端节点。

Step3 终端节点生成随机数, 并根据节点所属的不同集合(高级节点和普通节点)对比相应的阈值, 若随机数低于阈值, 且满足约束条件, 则该节点被选举成为簇头。

Step4 当选过簇头的节点在当前的 $1/p$ 轮内不再生成随机数, 则把随机数设置为比 1 大许多的常数, 在接下来的 $1/p$ 轮又重新恢复生成随机数。

Step5 入簇阶段, 簇头广播簇头消息, 终端节点根据接收到的簇头广播消息的强弱, 选择最强信号的簇头向其发送请求加入消息。

Step6 稳定数据传输阶段, 入簇完毕后, 终端节点开始采集数据并采用 CSMA 机制向簇头节点发送数据, 簇头节点也采用 CSMA 机制向 Sink 节点转发数据。

4.4 算法的复杂度

假设网络中有 N 个节点, 最终有 N_{CH} 个簇头成功竞选, 每轮内终端节点需要发送 m 个数据包, 每个数据包长度为 l , 每个消息长度为 k_{con} , 则在 LEACH 协议中, 广播簇头选举时接收 N 条信息, 接收簇头节点广播 $N - N_{CH}$ 条信息, 加入簇头节点发送 $N - N_{CH}$ 条信息, 接收 TDMA 时隙表 $N - N_{CH}$ 条信息, 因此数据传输阶段每轮需要发送 $m(N - N_{CH}) + mN_{CH}$ 个数据包。若用每轮网络产生的字节数来衡量算法的复杂度, 则每轮 LEACH 算法的复杂度 $O(N)$ 为:

$$O(N) = k_{con}(4N - 3N_{CH}) + mlN_{CH} \quad (25)$$

同理可知, 改进算法将稳定数据传输阶段改为 CSMA, 簇头无须 TDMA 时隙表的广播, 因此在成簇阶段一共产生了 $3N - 2N_{CH}$ 条消息, 数据传输阶段簇头节点需要转发数据包, 因此每轮共发送 $2m(N - N_{CH})$ 个数据包。最终得到改进算法的复杂度 $O'(N)$ 为:

$$O'(N) = k_{con}(3N - 2N_{CH}) + 2ml(N - N_{CH}) \quad (26)$$

改进算法在成簇阶段的计算量减小, 在数据传输阶段需要发送的数据包增多, 因此改进算法最终的复杂度也有所增加。

4.5 改进算法特点

改进后的算法有以下特点。

(1) 节点需要感知自己的能量, 整个算法需要获取每个节点的能量以计算平均能量, 因此算法是集中式的算法, 节点在进行簇头选举时不需要计算阈值, 阈值的计算由 Sink 节点进行。

(2) 改进后的算法在延迟方面低于 LEACH 算法, 数据传输阶段使用 CSMA 协议争用信道, 相比于 TDMA 可以节约更多的空闲时隙。

(3) 网络耗能相比于 LEACH 更加均匀, 算法改进了簇头的选择方式, 避免了 LEACH 协议耗能不均匀造成的热点区域节点过早死亡的不足。

(4) 相比于 LEACH 协议, 改进后的算法区分不同类别等级的节点, 整个网络的生命周期得以延长。

5 仿真与讨论

本文采用 MATLAB 软件进行仿真, 通过实验对本文提出的改进算法、单纯把 LEACH 稳定数据传输阶段的 TDMA 替换为 CSMA 机制的算法(以下简称 LEACH-CSMA)以及 LEACH 协议进行仿真对比。在 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的检测区域内随机放置 100 个节点, 仿真的具体参数如表 1 所列。

表 1 仿真参数的取值

Table 1 Values of simulation parameters

参数	符号	值
节点总数	N	100
发数据包数	m	1
控制包长度/bit	k_{con}	200
数据处理功耗/(nJ/bit)	E_{elec}	50
放大器参数/(Pj/bit/m ²)	ϵ	10
Sink 坐标	$[X, Y]$	$[50, 50]$
参数 α	α	3
分布区域	M	$100\text{ m} \times 100\text{ m}$
数据包长度/bit	l	4000
发送概率	q	0.5
计算功耗/(nJ/bit)	E_{da}	5
放大器参数/(Pj/bit/m ⁴)	ϵ_{amp}	1×13^{-4}
初始能量值/J	E_0	0.5
参数 β	β	0.2

本文主要对算法的延时、能量分布、生命周期、吞吐量等重要性能指标对算法的影响进行仿真分析。

5.1 延时仿真与讨论

图 6 给出了平均延时仿真的结果。

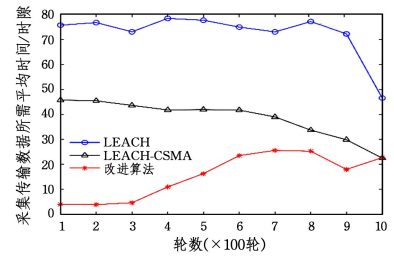


图 6 延迟对比

Fig. 6 Comparison of delay

为了清晰地比较各算法的延迟, 图 6 给出了每 100 轮的平均时延。可以看出, LEACH 算法的总平均时延为 72.55 时隙, LEACH-CSMA 的总平均时延为 38.54 时隙, 改进算法的总平均时延为 15.49 时隙。在 LEACH 中运用 CSMA 机制可以大幅度降低数据传输阶段的延时; 而改进算法优化了簇头的选择, 使得每个分簇更加均匀, 因此相比于 LEACH, 延时平均降低了 78.6%。

能耗均衡性主要通过节点的死亡分布情况来反映, 一般来说, 假如死亡的节点均匀的分布在监控区域, 则比较满足理想的监控需求, 不会因为某个区域的节点成片死亡而影响这个区域的信息缺失; 延迟则通过每轮数据传输所需要的时隙数来反映; 网络生命周期则通过网络运行剩过程中剩余节点的数目来反映, 存活的节点数目是随时间增长而不断减少的。

5.2 能耗均衡性

当 50% 的节点死亡时, 节点的分布情况如图 7 所示。其中, 红色“×”表示死亡节点, 蓝色“o”表示存活节点, 黑色“+”表示 Sink 节点。

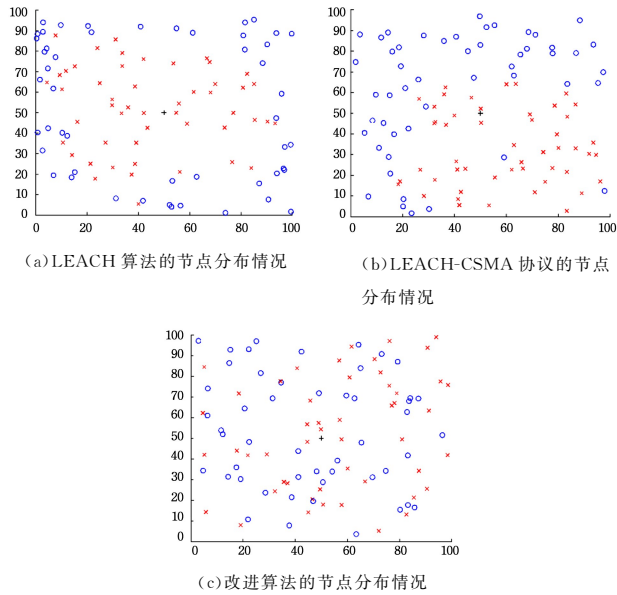


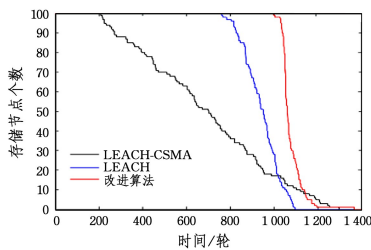
图 7 节点死亡分布图(电子版为彩色)

Fig. 7 Node death distribution

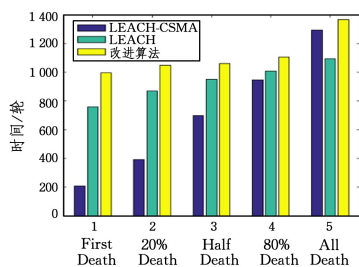
从图 7 中可以看出,LEACH 协议由于随机选举簇头,不考虑节点的剩余能量,导致节点死亡比较集中,当检测区域面积更大时,远距离的节点被选举成为簇头时需要大功率进行数据传输,死亡节点会更加集中在远离 Sink 节点的位置。LEACH-CSMA 算法中,由于只是把 LEACH 中稳定传输阶段的 TDMA 改变为 CSMA,没有对能量均衡进行优化,因此死亡节点也比较集中,且基本集中在 Sink 附近,因为簇头转发数据需要消耗大量能量。改进算法优化了簇头选举,综合考虑了改进后的阈值和节点剩余平均能量,死亡节点分布比较均匀,网络能耗均匀,解决了热点区域节点集中死亡而无法采集数据的问题。

5.3 网络生命周期

存活节点数的变化情况如图 8 所示。



(a) 存活节点数的变化情况



(b) 死亡时间统计

图 8 生命周期对比

Fig. 8 Comparison of lifetime

制传输数据,导致传输数据碰撞重传,从而损失了大量的能量,使得其生命周期总体最短;而改进后的算法延长了生命周期。从死亡时间统计中可以看出,对于第一个节点死亡的时间,改进算法为 998 轮,相比 LEACH 算法的 761 轮延长了 31%。许多文献把生命周期定义为第一个节点的死亡时间,因为第一个节点死亡之后,节点开始陆续死亡,采集的数据将不完整,因此第一个节点的死亡时间是生命周期的重要指标。LEACH 算法中一半节点死亡的时间为 952 轮,全部节点死亡的时间为 1 095 轮;改进算法中一半节点死亡的时间为 1 060 轮,全部节点死亡的时间为 1 366 轮,将全部节点死亡的时间延长了 24.7%,因此改进算法能明显延长网络的生命周期。

5.4 网络吞吐量

吞吐量标志着单位时间内网络成功传送的数据量。依据文献[18],把吞吐量定义为发包量的总和,则在稳定数据传输阶段吞吐量随轮数的变化情况如图 9 所示。吞吐量是衡量网络性能的重要指标,高吞吐量意味着网络能够发送、接收更多的数据包,网络性能良好。

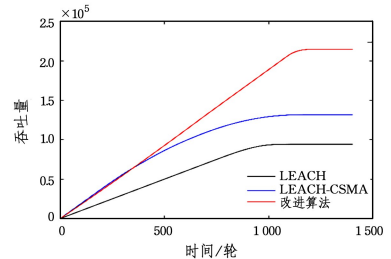


图 9 吞吐量的对比

Fig. 9 Comparison of throughput

死亡时间越长,节点传输的数据包越多,吞吐量越大。从图 9 中可以看出,LEACH-CSMA 由于簇头需要转发数据包,因此吞吐量大于 LEACH 算法;改进算法的吞吐量大幅提升,由于生命周期得到延长,因此拥有最高的吞吐量。

结束语 本文对 LEACH 协议进行了改进,将稳定数据传输阶段的 MAC 协议改为更符合无线传输网络的 CSMA 机制,并进行了建模分析;同时对选举簇头的阈值进行了改进,引入了高级节点和剩余平均能量指标,综合提升了算法性能。从仿真结果可以看出,改进算法由于采用 CSMA 机制传输数据,可以有效地利用信道,避免了空闲时隙的浪费,从而降低了延时;同时,高级节点的加入与选举簇头的阈值改进,使得改进算法与传统 LEACH 相比具有延时低、生命周期长、网络能量均衡和吞吐量高等优点。

参考文献

- [1] LI J R, LI X Y, GAO Y L, et al. Research on Data Forwarding Model in Internet of Things Environment[J]. Journal of Software, 2018(1): 196-224.
- [2] HEINZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]// Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences. Los Alamitos: IEEE, 2000: 3005-3014.

从图 8 中可以看出,LEACH-CSMA 由于利用 CSMA 机

- [3] SIVAKUMAR P, RADHIKA M. Performance Analysis of LEACH-GA over LEACH and LEACH-C in WSN[J]. *Procedia Computer Science*, 2018, 125(1):248-256.
- [4] HUANG L X, WANG H, YUAN L Y, et al. Improved LEACH Protocol Algorithm Based on Energy Balanced and Efficient WSN[J]. *Transactions of Communications*, 2017, 38(S2):164-169.
- [5] BEHERA T M, SAMA U C, MOHAPATRA S K. Energy-efficient modified LEACH protocol for IoT application[J]. *IET Wireless Sensor Systems*, 2018, 10(8):223-228.
- [6] CHENG H, LI C F, YE M, et al. An unequal cluster-based routing protocol in wireless sensor network[J]. *Wireless Networks*, 2009, 15(2):193-207.
- [7] WANG L, XIE B J, LIU Z Z, et al. Improved Algorithm for Non-Uniform Clustering Routing Protocol[J]. *Computer Science*, 2017, 44(2):152-156.
- [8] XU G F, ZHANG X H. Research on Data Fusion Algorithm of Wireless Sensor Networks with Low Delay and Low Energy Consumption[J]. *Microelectronics & Computer*, 2017, 34(9):11-14.
- [9] HAN W W, JIANG A L. A Delay Optimization Algorithm for Wireless Sensor Network Data Fusion[J]. *Mini-micro Systems*, 2015, 36(5):949-953.
- [10] HAQUE M, AHMAD T, IMRAN M. Review of Hierarchical Routing Protocols for Wireless Sensor Networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2018, 72(2):1077-1104.
- [11] MANN P S, SINGH S. Improved metaheuristic based energy-efficient clustering protocol for wireless sensor networks[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2017, 57(1):142-152.
- [12] HAQUE M, AHMAD T, IMRAN M. Review of Hierarchical Routing Protocols for Wireless Sensor Networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2018, 72(2):1077-1104.
- [13] SHERAZI H H R, GRIECO L A, BOGGIA G. A Comprehensive Review on Energy Harvesting MAC Protocols in WSNs: Challenges and Tradeoffs[J]. *Ad Hoc Networks*, 2018, 71(4):117-134.
- [14] WANG L, QIAO L, QI J Y, et al. Energy Optimization Algorithm for Layered Sensing Network Based on Improved Cluster Head Election[J]. *Measurement & Control Technology*, 2018, 37(1):92-95.
- [15] NARANJO P G V, SHOJAFAR M, MOSTAFAEI H, et al. P-SEP: a prolong stable election routing algorithm for energy-limited heterogeneous fog-supported wireless sensor networks[J]. *The Journal of Supercomputing*, 2017, 73(2):733-755.
- [16] VARSHNEY S, KUMAR C, SWAROOP A. Leach Based Hierarchical Routing Protocol for Monitoring of Over-ground Pipelines Using Linear Wireless Sensor Networks[J]. *Procedia Computer Science*, 2018, 125(1):208-214.
- [17] EMAD A, ION M. New Energy Efficient Multi-Hop Routing Techniques for Wireless Sensor Networks; Static and Dynamic Techniques[J]. *Sensors*, 2018, 18(6):1863.
- [18] BAHBAHANI M, ALSUSA E. A Cooperative Clustering Protocol With Duty Cycling for Energy Harvesting Enabled Wireless Sensor Networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, PP(99):1-1.



XIONG Cheng-biao, born in 1995, M. S. candidate, is not member of China Computer Federation (CCF). His main research interest is wireless sensor network.



DING Hong-wei, born in 1964, Ph. D. professor, is not Member of China Computer Federation (CCF). His main research interest is polling multiple access communication theory.