

基于能量均衡高效的 LEACH 改进算法^{*}

谢 佳, 张玲华

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要: LEACH 路由协议是无线传感器网络一个经典的分簇路由方法,但在限能严重的无线网络中,节点功耗高、生存时间短等问题严重影响网络性能,为此提出了改进的基于能量均衡高效的 LEACH-X 协议。通过加入最优簇首数,提出修正的剩余能量因子,考虑节点的剩余能量、周期内当选过簇首的次数以及密度因子,并对部署区域分区,针对区域调整距离因子增益参数的权重来修正簇首选举阈值函数;接着进行二次竞争并最终选举簇首,从而减小节点能耗,使 WSN 存活时间得到一定的延长。仿真结果表明,与传统 LEACH 协议进行对比,LEACH-X 协议降低了网络能耗,延长了网络生存时间。

关键词: 无线传感器网络; LEACH; 最优簇首; 剩余能量因子; 密度因子; 距离因子; 分区

中图分类号: TN92; TP393

文献标志码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.223052

中文引用格式: 谢佳, 张玲华. 基于能量均衡高效的 LEACH 改进算法[J]. 电子技术应用, 2023, 49(1): 63–68.

英文引用格式: Xie Jia, Zhang Linghua. Efficient LEACH algorithm based on energy equalization[J]. Application of Electronic Technique, 2023, 49(1): 63–68.

Efficient LEACH algorithm based on energy equalization

Xie Jia, Zhang Linghua

(School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: LEACH routing protocol is a classical clustering routing method in wireless sensor networks. However, in severely limited wireless networks, high power consumption and short lifetime of nodes seriously affect network performance. In this paper, an improved efficient LEACH-X protocol based on energy balance is proposed. By joining the optimal number of cluster head, the surplus energy correction factor is put forward. Considering the residual energy of nodes, the number of cluster head during the period and density factor, and partitioning the deployment area, the cluster head election threshold function is modified by adjusting the weight of the distance factor gain parameters for the region. Then, the second competition is in progress and ultimately the cluster head is selected, so as to reduce the energy consumption of nodes, the survival time of WSN can be extended to some extent. Simulation results show that compared with the traditional LEACH protocol, the LEACH-X protocol reduces the network energy consumption and prolongs the network lifetime.

Key words: wireless sensor network; LEACH; optimal cluster head; residual energy factor; density factor; distance factor; partition

0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是一种随机部署在某个地域范围内的自组织网络^[1]。WSN^[2]能够监测、感知和收集区域内环境或被监控对象的信息,广泛应用于国防军事、工业过程控制、环境监测等领域^[3],其研究、开发和应用关系到国家安全、经济发展等许多重要方面^[4]。

* 基金项目:国家自然科学基金项目(61771258)

WSN 具有以数据为中心、资源受限、快速部署、网络拓扑频繁变化不易维护等特点^[5]。其应用环境特殊,当节点能量耗尽将无法继续工作。因此,为了能够延长 WSN 的生命周期,设计出简单有效的协议,是 WSN 的一项关键技术。

LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)^[6]是最早被提出来的自适应分簇路由协议,但在严重限能的 WSN 中,对簇首的选择较为随机,且没有将节点密

度、节点负荷和节点剩余能量考虑进簇首选举过程中,整个网络性能较低^[7],不利于WSN的生存。

很多学者提出了改进的LEACH协议。文献[8]中提出了LEACH-C协议,通过获取节点的位置和剩余能量信息参与簇首选举,优化分簇,但频繁交换信息使得网络能耗加快;文献[9]通过建立规模不同的簇提出了EEUC路由协议;文献[10]对EEUC协议进行了改进,但是没有考虑到随着周期不同,各个因子对网络负载均衡的影响也不同;文献[11]的LEACH-Advanced协议加入了剩余能量因子、距离因子,对LEACH算法的阀值函数进行修正,但是没有考虑密度因子的影响。

针对以上问题,本文提出了一种基于能量均衡高效的LEACH改进协议LEACH-X。通过仿真数据的结果得出,LEACH-X协议与传统LEACH和LEACH-Advanced相比,降低了功耗,明显延缓了第一个死亡节点的出现,一定时间内存活节点增多,有效延长了网络寿命。

1 LEACH协议概述

1.1 LEACH协议简介

LEACH工作周期在簇首选举阶段,节点生成一个随机值,该值与阈值 $T(n)$ 比较,若小于阈值,则该节点就被选举为本轮的簇首。阈值 $T(n)$ 公式^[12]如下:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \left(r \bmod \left(\frac{1}{p} \right) \right)}, & n \in G \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中, P 是网络中簇首节点所占比, r 表示当前轮数, G 是在运转($1/p$)轮后未被选择为簇首节点的节点集。

1.2 网络模型

本文对WSN作如下预置条件:

- (1)传感器节点部署随机,部署之后不能再移动;
- (2)传感器节点具有相等的初始能量,其计算、通信和融合数据的能力是相同的;
- (3)传感器节点能量有限,普通节点无能量补充;
- (4)传感器节点可以感知信号强度从而计算获得距离。

1.3 能耗模型

无线传感器网络中根据接收方和发送方之间的距离来决定采用哪种能量模型^[13]进行能量计算:

发送方所消耗的能量为:

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

接收方所消耗的能量为:

$$E_{\text{Rx}} = kE_{\text{elec}} \quad (3)$$

式中, E_{elec} 为收发器或接收器电路所消耗的能量; k 为传输的数据大小; d 是发送和接收方间距离; ϵ_{fs} 、 ϵ_{mp} 为自由

空间和多径衰落的损耗系数; d_0 为距离阀值,定义为:

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{fs}}}{\epsilon_{\text{mp}}}} \quad (4)$$

2 LEACH-X协议

本文引入剩余能量因子、密度因子和距离因子,考虑最优簇首数目和本轮次中当选过簇首的次数,考虑普通节点是否需要入簇的必要性,再结合节点部署区域对阈值公式 $T(n)$ 进行改进,并对候选簇首进行二次竞争选举,减小了条件不佳的节点当选簇首的概率,均衡整个网络的能量负载,延长网络寿命避免部分节点提前死亡而导致网络瘫痪。

2.1 剩余能量因子

节点的初始能量相同,随着运行周期的不断增加,所有节点的能量都减少,而当选过簇首的节点若被频繁选取将导致这些节点提前能量枯竭死亡。根据参考文献[14]引入剩余能量因子 $E_{\text{surplus}}(i)$ 对阈值函数进行修正,定义为:

$$E_{\text{surplus}}(i) = \begin{cases} \frac{E_{\text{current}}(i)}{E_{\text{average}}(r-1)}, & r > 1 \\ \frac{E_{\text{current}}(i)}{E_0}, & r = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $E_{\text{current}}(i)$ 为节点*i*的当前剩余能量, $E_{\text{average}}(r-1)$ 是第*r-1*轮节点的平均能量, E_0 是网络初始时的平均能量。该式表明,节点剩余能量越大,通过阈值函数当选簇首的概率就越大。剩余能量因子的引进充分考虑了节点的剩余能量,使簇首的选取更为合理,延长网络的工作时间。

2.2 密度因子

在实际应用中,大多数无线传感器网络节点都是随机部署的,若簇首节点附近的节点数量少,则会增加通信成本导致节点能量消耗较快。受文献[14]启发,引入归一化邻居节点密度因子 $\tilde{\sigma}(i)$,其定义为:

$$\tilde{\sigma}(i) = \frac{\sigma(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{alive}}} \sigma^2(i)}} \quad (6)$$

$\sigma(i)$ 为邻居节点密度,其计算式为:

$$\sigma(i) = \frac{N_{\text{neighbor}}}{N_{\text{st}}} \quad (7)$$

式中, N_{neighbor} 是在通信半径内的邻居节点数量, N_{st} 为均匀分布簇中节点邻居节点数。邻居节点的集合为:

$$N_{\text{neighbor}} = \{ j | d(i, j) \leq R, j \in N_{\text{alive}} \} \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (8)$$

其中, $d(i, j)$ 为节点*i*、*j*之间的距离, R 为通信半径。根据参考文献[15]得到:

$$R = \sqrt{\frac{A^2}{\pi N p(i)}} \quad (9)$$

其中, A 为一个定值(分布的正方形区域边长); N 为监测

范围内节点总数量; $p(i)$ 表示簇首的数量占所有节点数量的百分比, 其计算式为:

$$p(i) = \frac{k_{\text{num}}}{N_{\text{alive}}} \quad (10)$$

式中, k_{num} 为网络中分簇的数量, N_{alive} 为网络存活节点总数量。根据文献[16], 最优簇首数:

$$k_{\text{num}} = \frac{\sqrt{N_{\text{alive}}}}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sqrt{\varepsilon_{\text{fs}}}}{\sqrt{\varepsilon_{\text{mp}}}} \frac{A}{d_{\text{toSink}}^2} \quad (11)$$

根据密度因子的定义, 若节点密度过小, 数据传输大部分采用多径衰落模式, 数据传输成本很高, 引入密度因子, 通过阈值函数降低其成为簇首的概率, 使网络能耗更均衡。

2.3 距离因子

由能耗模型可知, 距离 Sink 节点较远的节点消耗的能量比其他节点更多。无线传感器网络中, 接收信号的强弱和信号的传输距离成反比, 基于这个原理可以获得节点之间的距离。本文引入参考文献[15]中的距离因子 $d(i)$, 其定义如下:

$$d(i) = \frac{d_{\text{max}} - d_{\text{toSink}}}{d_{\text{max}} - d_{\text{min}}} \quad (12)$$

式中, d_{max} 和 d_{min} 代表网络中节点到 Sink 节点距离的最大值和最小值, d_{toSink} 为节点 i 与 Sink 节点之间的距离。距离因子经过归一化, 数值控制在 0~1 之间, 方便控制参数。距离 Sink 节点越近, 当选簇首的概率越大, 使得簇首的选举更为合理。

2.4 阈值函数

参考文献[16]提出的一种分区方法, 可以将部署区域划分, 分别采取不同的能耗模型。改进的阈值函数为:

$$T(i) = \begin{cases} \frac{p(i)}{1 - p(i)} (M(i) + \tilde{\sigma}(i) + F(i)), & i \in G \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\tilde{\sigma}(i)$ 为密度因子, 函数 $M(i)$ 、 $F(i)$ 的定义为:

$$M(i) = E_{\text{surplus}}(i) + (1 - E_{\text{surplus}}(i)) \frac{p(i)}{1 + C_{\text{times}}} \quad (14)$$

$$F(i) = \begin{cases} 1 + w_1 d(i), & d_{\text{toSink}} < d_0 \\ 1 + w_2 d(i), & d_{\text{toSink}} \geq d_0 \end{cases} \quad (15)$$

其中, C_{times} 为 i 节点当选过簇首的次数, w_1 和 w_2 是增益参数。

新的阈值函数针对节点部署的不同区域采取不同的增益参数。离 Sink 节点较近的区域, 采用自由空间衰落能耗模型, 此时节点能耗相比多径传输要少, 修正时增大距离因子的权重; 对于离 Sink 节点较远区域的节点, 采用多径衰落能耗模型, 节点能耗更快更容易提前死亡, 于是修正时减小距离因子的权重。

2.5 二次选举

参考文献[17]提出了候选簇首权值的定义, 本文在此基础上进行改进, 候选簇首的竞争权值为:

$$W(i) = \lambda_1 E_{\text{surplus}}(i) + \lambda_2 \tilde{\sigma}(i) + \lambda_3 d(i) \quad (16)$$

式中, λ_1 、 λ_2 和 λ_3 是和为 1 的权值因子。根据参考文献[15]及多次实验验证, 将密度因子的加权值 λ_2 设成 1/5 仿真效果较好。对于剩余能量因子的加权值 λ_1 , 随着轮次的增加, 剩余能量越来越少, 为了均衡节点能量, 需更加侧重考虑剩余能量因素。经多次验证, 加权因子 λ_1 取值 3/5, 间距因子的加权值 λ_3 取值 1/5 时得到的仿真结果较好。

根据式(16)可知, 节点的剩余能量越大, 它能承担的成员节点数就越多, 就越适合成为簇首; 同理, 其所含邻居节点数越多, 即相对密度越大, 通信成本越低; 候选簇首到 Sink 节点的距离越近, 其传输数据所需能量就越少, 则更适合当选簇首。

2.6 LEACH-X 算法流程

LEACH-X 算法步骤如下:

(1) 初始阶段, Sink 节点向全网广播信号, 接收节点计算出与 Sink 节点的距离, 按照式(15)划分区域;

(2) 普通节点向 Sink 节点发送位置信息与能量信息;

(3) Sink 节点计算得出最大距离 d_{max} 和最小距离 d_{min} , 平均剩余能量并广播这些消息;

(4) 簇建立阶段, 节点接收首先比较当前能量与平均剩余能量的大小, 再计算得到剩余能量因子 $E_{\text{surplus}}(i)$ 、密度因子 $\tilde{\sigma}(i)$ 、距离因子 $d(i)$, 记录此轮当选过簇首的次数 C_{times} ;

(5) 节点生成随机数值 rand , 对照式(13)选取相应的阈值函数计算 $T(i)$, 小于阈值 $T(i)$, 当选为候选簇首;

(6) 候选簇首根据式(16)计算竞争权值, 并广播自己为簇首的消息, 否则为普通节点;

(7) 普通节点接收到簇首的消息, 分别计算与簇首和基站的距离, 若与基站的距离比任一簇首的距离近则不加入簇, 否则选择最近的簇首加入簇;

(8) 簇建立阶段完成, 进入稳定传输阶段, 普通节点将监测的信息发给簇首节点簇首压缩融合数据发往基站;

(9) 一个周期完成, 循环重复簇建立阶段和稳定传输阶段, 直到网络中所有节点死亡。

LEACH-X 算法流程如图 1 所示。

3 实验仿真与结果分析

本文在 MATLAB 平台上进行仿真实验, 对算法 LEACH、LEACH-Advanced^[12]、LEACH-X 进行性能比较分析。具体参数设置见表 1。

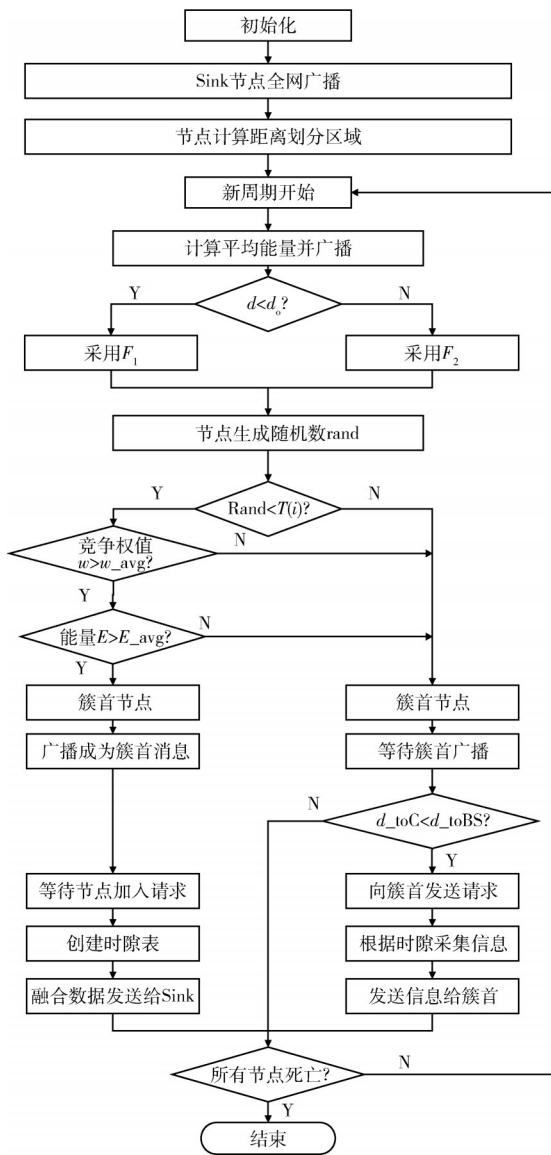


图1 算法流程图

表1 网络参数设置

参数类型	值	参数类型	值
网络范围/m ²	100×100	$E_{elec}/(nJ \cdot bit^{-1})$	50
节点个数/个	100	$E_{DA}/(nJ \cdot bit^{-1})$	5
Sink 节点坐标	(180,225)	p	0.05
节点初始能量/J	0.5	数据包大小/bit	4 000
$\varepsilon_{fs}/(pJ \cdot (bit^{-1} \cdot m^2))$	10	最大周期数	2 500
$\varepsilon_{mp}/(pJ \cdot (bit^{-1} \cdot m^2))$	0.001 3	w_1, w_2	1.7,0.8

3.1 存活节点

本实验假设网络检测区域为 100×100 m² 的方形区域, 节点数量为 100 个, Sink 坐标为 (180,225), 节点随机均匀分布。选取 2 个时间点轮数 $r=1\,200$ 和 $r=1\,400$ 对 3 种算法当前存活节点的分布进行比较, 且 3 种算法的初始分布相同, 如图 2 所示, 其中横坐标与纵坐标表示网

络检测区域的范围, 单位为 m。

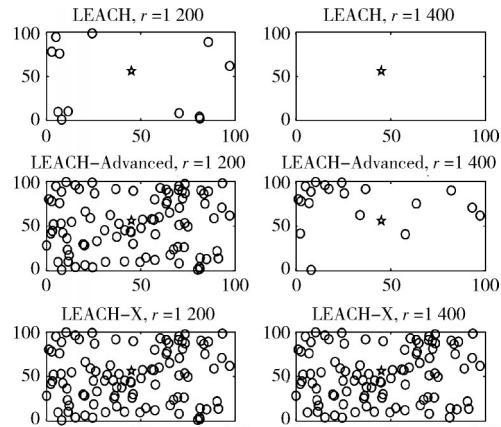


图2 节点分布图

图3 和图4 呈现了随周期数变化的网络存活节点数。

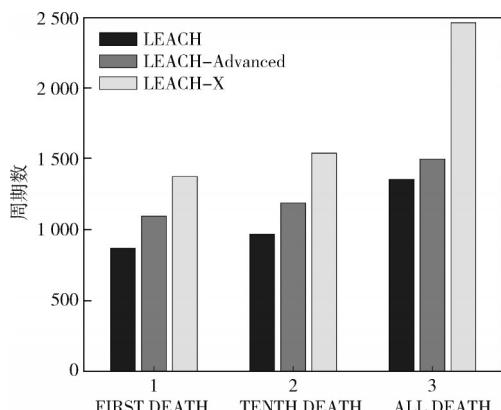


图3 第1个、第10个和所有节点死亡周期

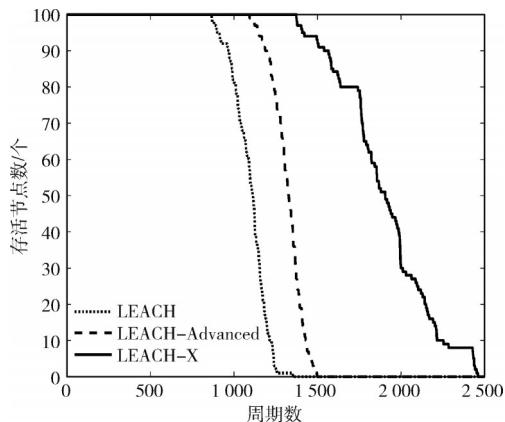


图4 存活节点数

LEACH 算法的第一个死亡节点出现在周期 856, LEACH-Advanced 与 LEACH-X 算法第一个死亡节点出现在周期 1 311 和 1 529, 相较 LEACH 算法延迟了 53% 和 78%。

所有节点死亡则判定网络死亡。LEACH 算法的网络死亡时间在周期 1 369, LEACH-Advanced 算法的网络死亡时间在周期 1 598, 相较 LEACH 延迟了 16.7%, LEACH-X 算法的网络死亡时间为周期 2 412, 相较 LEACH 延迟了 76.1%。

从以上分析可以得出, LEACH-X 算法在延长网络寿命上优于 LEACH 和 LEACH-Advanced 算法, 因为 LEACH-X 对簇首的选举条件多加限制, 且考虑了普通节点加入簇的必要性, 对不同的区域节点采取不同的优化参数, 二次竞争考虑了剩余能量、节点密度和距离, 延缓了节点死亡。

3.2 剩余能量和发送的数据包

网络中设置节点的初始能量为 0.5 J, Sink 节点能量无限制。随周期变化的网络剩余能量如图 5 所示。

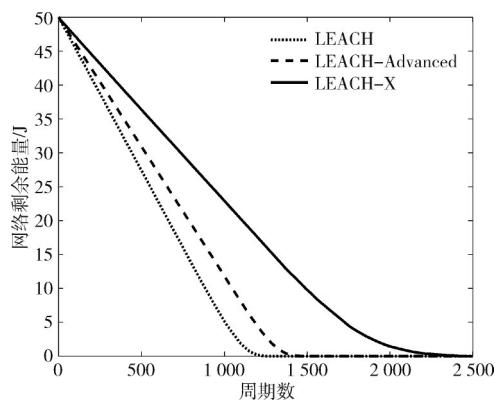


图 5 网络剩余能量

相较前两种算法, LEACH-X 在网络能量损耗 50% 时延迟了大约 55.2% 和 31.5%; 网络能量损耗 90% 时, 相较前两种算法, LEACH-X 延迟了大约 68.8% 和 38.6%。

网络中普通节点将处理后的数据发送给簇首节点或者直接发送到 Sink 节点, 数据经过簇首节点的压缩融合后再发往 Sink, 随周期变化发送到 Sink 节点的数据包数如图 6 所示。可以看到相较于另外两种协议, LEACH-X 发送到 Sink 节点的数据包数量明显增多。

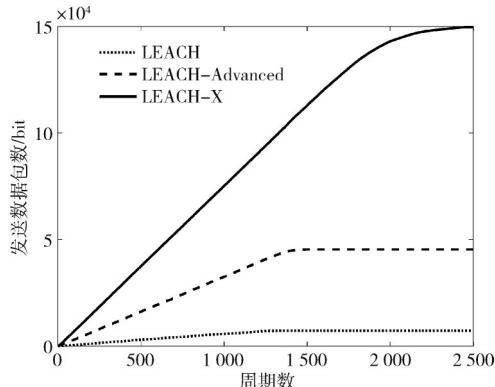


图 6 发送到 Sink 节点的数据包数

3.3 结果分析

根据以上的实验结果, 可以证明 LEACH-X 协议在网络生存时间、能量消耗、数据发送上都要优于 LEACH 和 LEACH-Advanced。从簇首成簇的原理上分析, LEACH 簇首的选举完全随机, 容易使得节点的负载不均衡, 选取剩余能量较低, 距离 Sink 节点不合理的节点成为簇首, 这会导致网络能耗较快, 节点的死亡提前, 网络生存时间大大减短。LEACH-Advanced 利用每个节点发送位置信息和剩余能量生成能耗更低、性能更低的簇, 但没有考虑最优簇首数目、节点当选过簇首的次数和不同区域的划分。

LEACH-X 优化了网络性能:(1)簇首选择充分考虑了节点负荷, 结合最优簇首数目提出密度因子, 合理增大了附近节点密度大的候选节点当选的概率, 有效均衡了网络负载;(2)考虑节点的剩余能量, 增加剩余能量多, 减少多次当选过簇首节点被选举为簇首的概率;(3)充分考虑节点的地理位置, 对节点的部署区域进行分区处理, 提出距离因子并针对不同的区域采用不同的加权参数;(4)二次竞争选举中合理考虑了剩余能量因子、密度因子、距离因子的影响。因此, 改进的 LEACH-X 协议优化了传统簇首选举函数的不合理性, 增大有足够能量且位置、密度更合理的节点当选的概率。相较其他 2 种协议, LEACH-X 协议减少了某些簇首节点能耗过大而加快死亡的情况出现, 网络能耗更低性能更优, 寿命得到了更好的延长。

LEACH-X 对于阈值函数的修正会导致相比 LEACH 增加了多次判断与计算的过程, 这可能会增加节点间通信的次数, 从而使网络的总延迟增加。因此, 该算法更适用于对时延要求不高的网络, 限制了该算法的使用范围。

4 结论

本文基于 LEACH 协议, 提出了改进的 LEACH-X 协议。对簇首选举阶段时的阈值函数进行改进, 改进后的阈值综合考虑了最优簇首数目、邻居节点密度、剩余能量、当选过簇首的次数和到 Sink 的距离, 并对不同部署区域采用不同的优化参数, 进行二次竞争选举, 修改各因子的权重。同时, 对 LEACH、LEACH-Advanced、LEACH-X 进行仿真实验, 结果表明 LEACH-X 使簇首选举更合理, 均衡了簇间能量负载, 减少了网络能量消耗, 有效延长了网络生命周期。

参考文献

- [1] 宋晓莉. 无线传感器网络节点部署优化策略研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2021.
- [2] 秦山, 李军. 无线传感器网络在环境监测中的应用[J]. 环境与发展, 2019, 31(6):173, 175.
- [3] 王瑶. 无线传感器网络能量高效路由协议研究[D]. 桂

- 林:桂林电子科技大学,2020.
- [4] 苗沛然. 无线传感器网络研究现状与应用[J]. 通信电源技术, 2020,37(3):87-88.
- [5] 潘玉兰, 刘广聰. 无线传感器网络的特点和应用[J]. 电子技术与软件工程, 2019(4):14-15.
- [6] HANDY M J, HAASE M, TIMMERMANN D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection[C]// 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communication Network, 2002: 368-372.
- [7] 熊成彪, 丁洪伟, 董发志, 等. 一种基于 LEACH 的低延迟和低功耗的 WSN 分簇算法[J]. 计算机科学, 2020,47(1): 258-264.
- [8] HEINZELMA W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless micro sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-667.
- [9] 刘兴, 杨济海, 杨涛, 等. 无线传感器网络分簇路由协议研究[J]. 无线互联科技, 2020,17(6):12-14.
- [10] WANG L, XIE W W, LIU Z Z, et al. Improved algorithm of non-uniform clustering routing protocol[J]. Computer Science, 2017,44(2): 152-156.
- [11] 王创. LEACH 分簇层次路由算法的研究与改进[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2020,30(4):69-74.
- [12] 朱素霞, 马宏飞, 孙广路. 一种能量高效的无线传感器网络改进 LEACH 协议[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2021,26 (3):91-98.
- [13] 李晓慧, 赵远超, 赵建平. 无线传感器网络泊松分布最优簇首数目的研究[J]. 通信技术, 2020,53(2):335-340.
- [14] 何波. 基于跨层功率控制的无线传感器网络低功耗设计及其实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [15] 黄利晓, 王晖, 袁利永, 等. 基于能量均衡高效 WSN 的 LEACH 协议改进算法 [J]. 通信学报, 2017, 38(S2): 164-169.
- [16] 方旺盛, 陈朕浩, 胡中栋. 分区和能耗均衡的 LEACH 路由改进算法[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(10): 2746-2751.
- [17] 阮晶晶. 能耗均衡的 WSN 非均匀分簇路由算法研究[D]. 武汉: 中南民族大学, 2018.

(收稿日期: 2022-06-01)

作者简介:

谢佳(1998-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 无线传感器网络协议能量均衡。

张玲华(1964-), 女, 通信作者, 教授, 主要研究方向: 智能信号与信息处理、语音信号处理及现代通信技术、现代通信网络与信息处理, E-mail: 15673576397@163.com。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所