

基于动态能量感知与双领导协同的 LEACH 优化

张娜娜¹ 孙其法¹ 王观英¹
ZHANG Nana SUN Qifa WANG Guanying

摘要

针对 LEACH 协议存在能量消耗高、网络存活时间短等问题, 文章提出一种基于动态能量感知与双领导协同的 LEACH 协议改进算法。该算法在簇头选举中引入能量-距离双因子阈值模型, 动态感知节点能量状态并优先选择距离基站较近的节点作为簇头, 从而均衡能耗、延长节点寿命。同时, 引入辅助节点机制, 由能量次高的节点承担数据融合任务, 实现双领导协同通信, 进一步减轻簇头负担。仿真结果表明, 与 LEACH 协议相比, 所提算法在网络存活时间、能耗均衡性及数据传输效率等方面均表现出明显优势, 网络生命周期延长了约 51.6%, 总能量消耗降低了 13.5%, 有效提升了无线传感器网络的整体性能。

关键词

无线传感器网络; 分簇路由协议; 能量感知; 双因子簇头选举

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.01.024

0 引言

无线传感器网络 (wireless sensor network, WSN) 是由大量低成本微型传感器节点组成的自组织无线网络。作为信息感知与数据传输的重要技术, WSN 的应用已从环境监测等传统领域扩展到智慧城市、穿戴设备、工业物联网等新兴领域^[1]。WSN 节点通常依赖电池供电, 频繁通信和高负载工作导致能耗不均, 且部署环境恶劣 (如野外、高危等), 更换电池或维护节点的成本极高。因此, 如何降低节点功耗、延长网络寿命是研究 WSN 的核心问题。

分簇路由协议通过层次化网络管理, 能够显著降低数据传输能耗, 成为目前主流的研究方向。其中低功耗自适应聚类层次协议 (LEACH) 因其分布式特性和能量均衡机制, 是 WSN 的典型代表。该协议采用动态簇头轮换策略, 通过周期性重构簇结构实现网络负载均衡, 较传统平面路由协议可提升约 15% 的生存周期^[2]。但现有研究表明, LEACH 协议存在选举簇头未考虑自身位置、剩余能量及与基站间的距离, 导致高负载节点过早死亡、簇头分布不均产生能量空洞等问题^[3]。近年来, 研究者针对上述问题, 提出多种改进方案。TEEN 协议对数据传输过程进行改进, 但该算法缺乏对节点间的安全性考虑, 容易遭受网络攻击^[4]。LEACH-X 协议提出修正剩余能量因子, 综合考虑节点剩余能量, 历史当选簇头次数及密度因子, 优化簇头选举阈值函数, 通过二次竞争机制, 避免低能节点过早死亡, 但该算法需要多次迭代调整阈值函数, 增加了节点的处理负担^[5]。LEACH-ECP 算法采

用多因素协同的簇头选举策略, 引入权重系数, 实现动态分簇和负载均衡, 但该算法动态阈值计算需频繁更新节点能量、密度等参数, 增加节点负担, 影响网络的实时性^[6]。

本文针对 LEACH 协议中存在的簇头选举未考虑节点当前剩余能量、簇头选取较随意、簇头与基站之间采用单跳通信导致远距离数据传输耗能大的问题, 提出了一种基于动态能量感知的双领导协同分簇路由算法。本算法首先在簇头选举机制中引入能量-距离双因子, 在动态感知节点剩余能量的同时, 提高与基站较近节点的选择概率, 从而延缓簇头死亡时间, 延长网络生命周期。

1 能量损耗模型

本文算法采用一阶无线通信模型^[7], 如图 1 所示, 能量消耗取决于信号的传输距离。

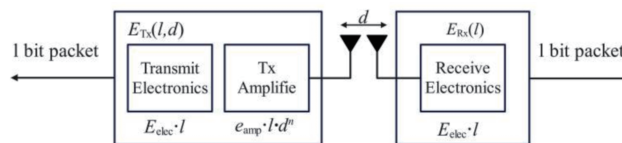


图 1 能量损耗模型

根据以上模型, 可计算出每个传感器节点发送 1 bit 数据包消耗的能量为:

$$E_{Tx}(l, d) = E_{Tx-elec}(l) + E_{Tx-mp}(l, d) = \begin{cases} l \times E_{elec} + l \times e_{amp} \times d^\alpha, & d \geq d_0 \\ l \times E_{elec} + l \times e_{fs} \times d^2, & d < d_0 \end{cases} \quad (1)$$

每个节点接收 1 bit 数据包消耗的能量为:

$$E_{Rx}(l) = E_{Rx-elec}(l) = l \times E_{elec} \quad (2)$$

式中: 根据发送距离 d 与临界阈值 d_0 的大小关系, 衰减功率和功率放大系数 e_{mp} (多路衰减模型系数) 和 e_{fs} (自由空间模

1. 江苏联合职业技术学院徐州财经分院 江苏徐州 221000

型系数)，计算得到数据包发送与接收的能耗值。

2 基于动态能量感知的双领导机制分簇路由算法

2.1 计算最佳通信半径

LEACH 协议中，节点通信半径决定了簇的覆盖规模，同时影响节点分布调节函数值及簇头竞选概率，显著影响 WSN 的能耗与生命周期，因此合理设定通信半径对网络性能至关重要。

假设无线传感器监测区域设为 $M \times M$ 的正方形，节点均匀分布在区域内，并划分为 K 个簇。以接收信号强度为度量，将传感器节点均匀分布转化为每个簇所占的区域面积相等，即每个簇是以簇头为圆心且半径相等的圆，实现理想状态下的区域完全覆盖，则理想通信半径为：

$$\pi R_0^2 = \frac{M^2}{K} \Rightarrow R_0 = \sqrt{\frac{M^2}{K\pi}} \approx 25m \quad (3)$$

式中： R_0 是理想的节点通信半径。

目前，大多数对 LEACH 协议的研究文献中通信半径都采用的是 $R=CR_0$ ， C 的取值一般为 1 或 2。假设理想状态下的区域完全覆盖，会出现两种极端覆盖情况，如图 2 所示。

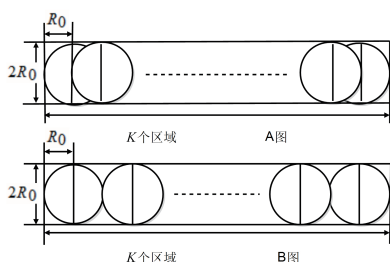


图 2 两种极端覆盖情况

图 2 中，A 图为最小覆盖场景，即通信半径与理想通信半径 R_0 相等，此时覆盖区域会产生大量重叠面积；B 图为最大覆盖场景，即通信半径为理想通信半径 R_0 的 2 倍，此时区域会产生覆盖盲区。

上述两种极端覆盖场景均会加剧网络能量消耗，不利于延长网络生命周期，因此最佳通信半径 R_{best} 应介于两者之间，满足 $R_0 < R_{best} < 2R_0$ 。设理想覆盖面积为 S_C ，则：

$$S_A = 2R_0 \times (K+1)R_0 \quad (4)$$

$$S_B = 2R_0 \times K \times 2R_0 \quad (5)$$

$$2S_C = S_A + S_B = 2(K+1)R_0^2 + 2KR_0^2 \quad (6)$$

假设理想覆盖区域为矩形，其长 $K \times R_{best}$ ，宽 $2R_0$ ，则最佳通信半径可表示为：

$$R_{best} = \frac{(3K+1)}{2K} R_0 \approx \frac{3K}{2K} R_0 = 1.5R_0 \quad (7)$$

计算结果显示，最小覆盖半径 $< R_{best} <$ 最大覆盖半径，该结果验证了数学推导过程与理论分析逻辑的一致性。因此，

最佳通信半径取值为：

$$R_{best} = 1.5R_0 = 1.5 \times 25m = 37.5m \quad (8)$$

2.2 能量 - 距离双因子阈值模型

针对 LEACH 协议中簇头选举机制存在的不足，本文算法引入能量 - 距离双因子，首先在簇头选举阈值 $T(n)$ 中加入对节点剩余能量的动态感知，使节点当选簇头的概率与节点当前剩余能量呈线性正相关，从而避免低能量节点当选簇头导致的提前能量耗尽死亡、数据包接收失败、数据融合中断等加速网络生命周期衰减的问题，保障网络稳定运行，延长网络生命周期。其次，在簇头选举机制中，加入“基站邻近度”权重，即考虑节点与基站之间距离远近的因素，增大基站邻近节点的簇头当选概率。该设计可实现双重优化：一方面，邻近基站的节点当选簇头，其与基站的通信链路更短，能显著降低数据传输过程中的能量消耗，减少网络整体能耗；另一方面，短距离通信保障了控制帧和数据帧的双向快速可达，提升簇内成员节点对基站指令的响应速度。

结合上述“动态能量感知”与“基站邻近度权重”双因子改进设计，本文研究进一步明确簇头选举的核心约束条件：仅当节点在当前轮中同时满足剩余能量大与距离基站近的双重标准，才能当选簇头。双因子改进设计使簇头的选取更加贴合网络节能与稳定运行的需求，实现了网络生命周期的延长，改进后的阈值计算公式为：

$$T(n) = \begin{cases} C_1 \times \frac{E}{E_{total}} + C_2 \times \frac{d_{max}^2}{(d_{max}^2 + d^2)}, n \in G \\ 0, n \notin G \end{cases} \quad (c_1 = 0.5, c_2 = 0.6) \quad (9)$$

式中： E 为节点在本轮中的实时剩余能量； d 为节点到基站的实际距离； E_{total} 为当前轮中所有节点的能量总和； d_{aver} 为所有节点到基站的平均距离； d_{max} 为节点与基站的最近距离； C_1 和 C_2 为常量系数，二者为多组实验测得的最优常量参数，其取值可适配不同网络部署场景下的阈值调节需求。由此可知，簇头选举阈值 $T(n)$ 与节点的当前剩余能量成正比，与到基站的距离成反比，即阈值 $T(n)$ 随能量递增、随距离递减，实现“高能量近基站”节点的优先当选。

2.3 双领导协同的簇头选举机制

数据融合问题是 LEACH 协议中造成簇头过早死亡的主要原因之一^[8]，本文算法从非簇头的成员节点中选取当前轮中剩余能量最大的节点来承担簇头节点的数据融合任务，定义为“辅助节点”，与簇头节点形成“双领导协同架构”。辅助节点聚焦上行数据链路，负责接收簇内成员节点上传的感知数据，融合处理簇内采集到的数据信息并发送往基站，实现向下传达的功能。簇头节点则专注下行任务链路，负责完成基站任务的分配与调度，实现向上传达的功能。

如图 3 数据通信阶段改进算法流程图所示，通过双领导协同架构的功能拆分，有效分担簇头节点的工作负载，避免

簇头节点因同时承担“任务调度”与“数据融合”双重工作导致的能量过度消耗而早衰。同时,辅助节点的引入可减少数据传输与处理环节的能量消耗,实现全网能耗的均衡分配。

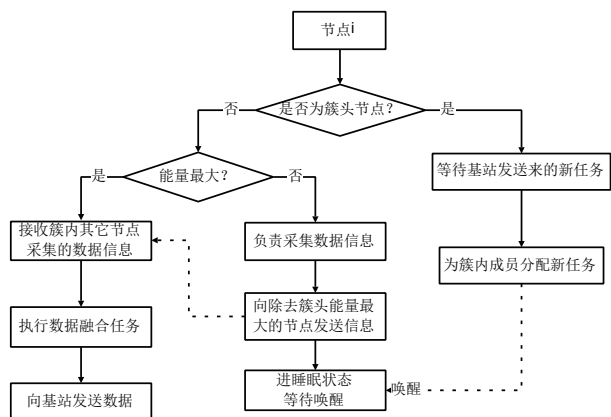


图3 数据通信阶段改进算法流程图

3 仿真结果及分析

本文通过在Cygwin中安装NS2.34仿真平台,构建WSN仿真实验环境,对本文改进算法、LEACH协议进行仿真对比,从网络的存活时间、基站接收的数据总量、网络消耗的总能量三个性能指标对本文设计的改进算法的网络性能优越性进行验证。

3.1 仿真模型

在仿真场景中,定义一个 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 的监测区域,并随机部署了100个无线传感器节点,基站BS(Sink节点)坐标为(50 175),节点初始能量为2 J。根据实验得知,如图4所示,在簇头数目 $K=5$ 时,每轮平均能量消耗最小,即网络运行轮数最多,所以本文实验中的 K_{best} 设置为5。

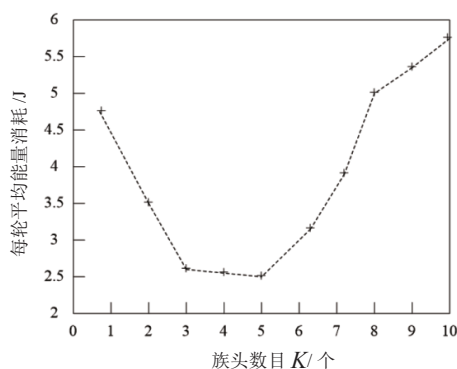


图4 簇头数目和每轮平均能耗关系

表1列出了仿真实验中wireless.tcl和uamp.tcl等配置文件的若干关键参数。合理设定初始参数对实验结果的可靠性具有重要影响,直接关系到仿真输出是否符合预期目标。表内参数部分来源于理论推导的理想取值、部分为贴近实际网络场景而设定的经验值,以及直接采用仿真平台提供的缺省值^[9-10]。

表1 仿真实验参数表

参数	取值
场景区域	$100\text{ m}\times 100\text{ m}$
节点数目 nn	101
簇头数目 num_clusters	5
基站位置	(50 175)
节点初始能量	2 J
发送接收 1bit 能耗 E_{elec}	50 nJ/bit
ϵ_{fs}	$10\text{ pJ}\cdot\text{bit}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$
ϵ_{mp}	$0.001\text{ 3 pJ}\cdot\text{bit}^{-1}\cdot\text{m}^{-4}$
数据融合能量 E_{DA}	$5\text{ nJ}\cdot\text{bit}^{-1}\cdot\text{signal}^{-1}$
带宽	2 Mbit/s
每轮时间 ch_change	20 s
信息包头长度 hdr_size	25 Byte
消息长度 Sig_size	500 Byte
每时间片大小	0.003 2 s
建立时间:稳定时间	1:19
链路层延迟 delay	1-(10~12) s

3.2 仿真结果分析

3.2.1 两种协议在网络生存周期上的性能分析

图5为传统LEACH协议与本文改进算法在网络生存时间方面的对比结果。从图中可以明显看出,传统LEACH协议的网络节点在实验运行至400 s时开始出现死亡现象,到543 s全部节点死亡。而本文改进算法首次出现网络节点死亡的时间为580 s,且所有节点完全死亡的时间延长至823 s。结果表明,本文改进算法相比传统LEACH协议,将网络整体存活时间延长了280 s,性能提升了51.6%。实验证明,本文改进算法在网络存活时间这一指标上实现了显著优化,能够有效延长无线传感器网络的生命周期。

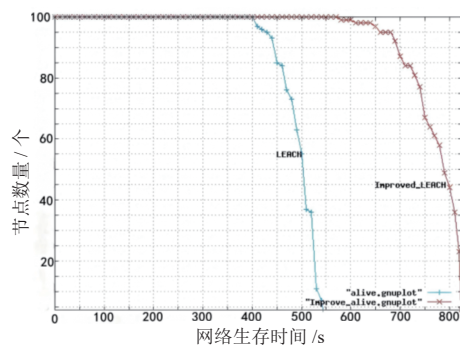


图5 网络生存时间对比

3.2.2 两种协议在网络总能量消耗上的性能分析

图6为传统LEACH协议和本文改进算法在网络总能耗方面的对比结果。纵轴表示节点总能耗,单个传感器节点初始能量为2 J,因此100个节点构成的仿真网络总初始能量为200 J,此参数为能耗对比的基准依据。从图中能耗变化趋势看,本文改进算法的能量消耗速率明显低于LEACH协议。在240 s时,传统LEACH协议总耗能已达99 J,而本文改

进算法仅消耗 22 J, 两者相差 77 J。经计算, 此时本文改进算法比 LEACH 协议的总能耗降低了 77.78%, 也是两协议在整个仿真中的最大差值。在其他时刻内, 本文改进算法的总能耗始终低于传统 LEACH 协议。当 LEACH 协议所有节点在 543 s 因能量耗尽而死亡时, 本文改进算法的总能耗仅为 173 J。在整个 LEACH 协议运行期间, 本文改进算法的总能耗较原协议降低了 13.5%。仿真结果验证了本文改进后的算法在节能方面的优越性, 改进后的算法通过优化簇头节点选取机制, 并引入辅助节点构架双领导协同架构, 分担了簇头节点的能耗负载, 实现全网能耗均衡, 从而延长了无线传感器网络的生命周期。

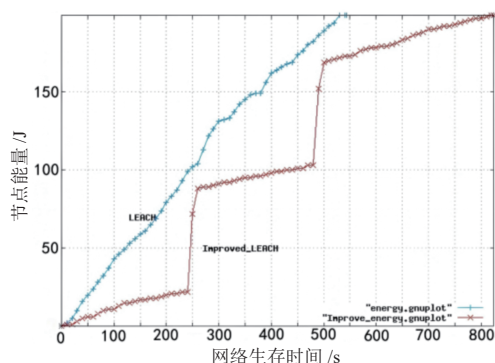


图6 网络总能量消耗对比

3.2.3 两种协议在基站接收数据量上的性能分析

图7是协议改进前后基站所接收数据总量的对比结果。从图中可以看出, 本文改进后的算法不仅延长了网络生存时间, 在数据传输方面也表现出不同特征。在相同时间节点, 本文改进算法中基站接收到的数据总量明显低于传统 LEACH 协议, 且在 543 s 差异值达到最大。实验证明, 本文改进后的算法在数据传输方面具有更优的性能, 能够在保证网络可靠性的前提下提升数据传输率, 在无线传感器网络真实场景中更具实用性。

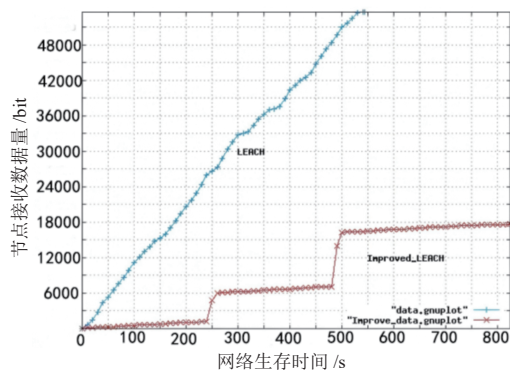


图7 基站接收数据量对比

4 结论

本文提出了一种基于动态能量感知与双领导协同的 LEACH 改进算法, 通过数据建模推导出最佳通信半径, 避

免覆盖重叠或盲区造成的能量浪费。引入能量-距离双因子阈值模型, 优化簇头选举机制, 避免低能量节点过早当选簇头, 同时缩短簇头与基站的通信链路损耗。设置辅助节点分担数据融合任务, 实现簇内双领导分工协作, 缓解单一簇头的高负载压力。实验结果表明, 改进算法能有效均衡全网能耗, 延缓低能量节点提前失效, 抑制能量空洞的形成, 同时提高数据传输的可靠性, 为无线传感器网络低维护、高续航需求场景提供了一种高效、可扩展的节能路由方案。

参考文献:

- [1] WAN Z P, LIU S J, NI W C, et al. An energy-efficient multi-level adaptive clustering routing algorithm for underwater wireless sensor networks[J]. Cluster comput, 2019, 22:14651-14660.
- [2] HEINZELMA N W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C/OL]//Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Piscataway: IEEE, 2000[2025-12-02]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/926982DOI: 10.1109/HICSS.2000.926982>.
- [3] 苗长云, 郭芮, 李杰. 基于节点剩余能量和位置的无线传感网络分簇方法[J]. 天津工业大学学报, 2023, 42(2):61-66.
- [4] 车步波, 郭改枝. 无线传感器网络协议 TEEN 的传输效率及安全性研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2018, 20(1):102-106.
- [5] 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.
- [6] 顾逸, 倪晓军. 基于动态能量阈值的 LEACH 改进算法[J]. 计算机与现代化, 2025(2):70-76.
- [7] 张洁, 王庆文, 屈正庚. 一种新的基于分簇协同中继的无线传感器网络路由机制[J]. 微型电脑应用, 2025, 41(1):14-19.
- [8] 李波, 郝丽君, 陈嵩杰, 等. 基于 LEACH 协议的能量优化方法[J]. 计算机工程与设计, 2024, 45(3):656-662.
- [9] 侯华, 蔡剑平, 周佳明, 等. 基于混沌改进灰狼优化的 WSNs 分簇路由算法[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(12):140-144.
- [10] 雒明世, 何潘金. 无线传感器网络 LEACH 算法的改进与仿真分析[J]. 无线通信技术, 2023, 32(4):38-42.

【作者简介】

张娜娜(1990—), 女, 江苏徐州人, 硕士, 助教, 研究方向: 无线传感器网络、数据挖掘。

孙其法(1991—), 男, 山东枣庄人, 硕士, 讲师, 研究方向: 数据挖掘、时间序列。

王观英(1989—), 女, 江苏徐州人, 硕士, 讲师, 研究方向: 模式识别、机器学习。

(收稿日期: 2025-09-18 修回日期: 2026-01-05)