

面向大规模WSN的区间二型TSK模糊路由算法与数据融合机制研究

卢伟 李萧宇

广东邮电职业技术学院, 中国·广东 广州 510000

摘要: 针对大规模无线传感网络 (WSN) 中节点能耗不均衡、“热区效应”严重以及网络生命周期受限等问题, 本文提出一种融合区间二型 Takagi-Sugeno-Kang (Interval Type-2 TSK, IT2-TSK) 模糊系统与自适应数据融合机制的非均匀分簇路由算法。算法通过对节点剩余能量、节点密度和节点至基站距离进行区间二型模糊化处理, 构建不确定隶属函数区间, 利用 Karnik-Mendel 降型方法计算动态竞争半径与簇头等级, 实现自适应簇头选举。同时在簇内引入基于能量与相关性的加权数据融合模型, 并构建干扰抑制函数以降低网络重传率。通过建立改进无线能耗模型与干扰耦合模型, 在 MATLAB 仿真环境下对 EEUC、TSK、ARAWSN 算法进行对比。结果表明, 本文算法在网络生命周期方面提升 11.3%, 平均能耗降低 9.6%, 干扰功率下降 14.8%。该研究为高可靠、低功耗无线通信系统设计提供理论支撑。

关键词: 无线传感网; 区间二型模糊系统; 非均匀分簇; 数据融合; 能耗均衡

Research on Interval Type 2 TSK Fuzzy Routing Algorithm and Data Fusion Mechanism for Large-scale WSN

Lu Wei, Li Xiaoyu

Guangdong Vocational College of Post and Telecom, China Guangdong Guangzhou 510000

Abstract: To address challenges in large-scale wireless sensor networks (WSNs) such as uneven node energy consumption, severe "hot spot effect", and limited network lifespan, this paper proposes a non-uniform clustering routing algorithm that integrates Interval Type-2 Takagi-Sugeno-Kang (IT2-TSK) fuzzy systems with adaptive data fusion mechanisms. The algorithm performs Interval Type-2 fuzzy processing on node residual energy, node density, and node-to-base station distance to construct uncertain membership function intervals. It employs the Karnik-Mendel reduction method to calculate dynamic competition radius and cluster head hierarchy, enabling adaptive cluster head election. Additionally, a weighted data fusion model based on energy and correlation is introduced within clusters, and an interference suppression function is constructed to reduce network retransmission rates. By developing an enhanced wireless energy consumption model and interference coupling model, this study conducts comparative simulations of EEUC, TSK, and ARAWSN algorithms in MATLAB. The results demonstrate that the proposed algorithm achieves 11.3% improvement in network lifecycle, 9.6% reduction in average energy consumption, and 14.8% decrease in interference power. These findings provide theoretical support for designing high-reliability, low-power wireless communication systems.

Keywords: Wireless sensor network; Interval type 2 fuzzy system; Non-uniform clustering; Data fusion; Energy consumption balancing

0 引言

无线传感网络作为物联网底层感知核心, 其路由算法直接影响系统能效与稳定性。传统均匀分簇算法 (如 LEACH) 由于随机选举机制导致簇头能量消耗严重不均, 靠近基站区域形成“能量空洞”。EEUC 通过非均匀分簇缓解该问题, 但参数依赖性强。单一型 TSK 模糊系统无法有效处理隶属函数的不确定性。

在复杂环境中, 节点剩余能量测量误差、信道衰落与干扰因素具有模糊不确定特征。区间二型模糊系统能够通过构造隶属度区间 (Footprint of Uncertainty, FOU) 提升鲁棒性。因此本文提出融合 IT2-TSK 模糊系统与数据融合的改进非均匀分簇算法。

1 改进能耗模型与非均匀分簇算法设计

基础网络模型如下: 网络区域 $1000\text{m} \times 1000\text{m}$, 节点

数 6, 路由或基站位于区域中心, 节点静止、同构, 采用多跳簇间通信。如图 2.1 所示, 图中显示了非均匀分簇机制, 距离基站越近, 竞争半径越小, 从而缓解热区效应 (Hot Spot)。远离基站区域竞争半径增大, 以平衡网络负载。

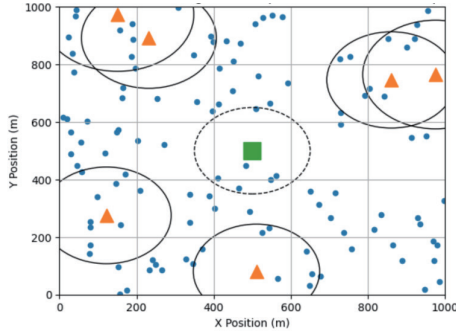


图 1

1.1 改进无线能耗模型

传统模型:

$$E_{tx}(k, d) = kE_{elec} + k\epsilon d^n$$

为更真实反映干扰与重传影响, 引入干扰函数:

$$I_i = \sum_{j \neq i} \frac{P_j}{d_{ij}^\eta}$$

则节点总能耗:

$$E_i^{\text{total}} = E_{tx} + E_{rx} + \gamma I_i$$

该模型体现密集区域干扰加剧导致。其中: γ 为干扰耦合系数, η 为路径损耗指数额外能耗增加。

1.2 基于区间二型 TSK 的非均匀分簇算法设计

为了提高网络性能, 必须根据节点的空间分布、节点之间的距离以及网络的通信需求来进行合理的分簇。传统的分簇算法通常基于均匀分簇的概念, 但在实际应用中, 网络环境中节点的分布通常是非均匀的, 因此基于区间二型 TSK 非均匀分簇算法成为一种有效的选择。

文章定义高能量隶属函数区间, 用于增强对能量估算误差的容忍性:

$$\mu_H(E_i) = \exp\left(-\frac{(E_i - c)^2}{2\sigma_1^2}\right)$$

$$\mu_H(E_i) = \exp\left(-\frac{(E_i - c)^2}{2\sigma_2^2}\right)$$

在该算法中, 区间二型 TSK 模糊系统主要用于动态确定每个簇头的竞争半径和簇头等级。基于模糊规则库, 输入节点的模糊值进行推理, 得出竞争半径和簇头等级的模糊值。在此阶段, 我们采用模糊规则库来描述节点的

行为。

2 数据融合与干扰抑制机制

在无线传感网络中, 节点数量多、分布密集, 数据高度相关且信道环境复杂。若不进行有效的数据融合与干扰控制, 将导致: 冗余数据大量传输、信道竞争激烈、能量快速耗尽、热区加剧等问题, 因此, 本章提出一种基于区间二型 TSK 权重分配的数据融合模型与跨层干扰抑制机制相结合的优化方法, 实现功耗降低与干扰抑制的双目标优化。

2.1 自适应加权数据融合机制

在密集部署的无线传感网络中, 节点采集数据具有高度空间相关性。若采用简单均值融合: 将忽略节点能量差异与链路质量差异, 导致能量消耗不均衡、低质量数据影响融合精度、无效数据传输增加。因此, 本文构建基于区间二型 TSK 的自适应加权融合模型:

$$x_f = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad \sum w_i = 1$$

权重由三因素确定: 剩余能量 E_i 、节点距离 d_i 、信噪比 SINR_i 。

通过 IT2-TSK 模糊推理、Karnik-Mendel 降型后到:

$$w_i = \frac{w_i^L + w_i^R}{2}$$

2.2 干扰感知竞争半径控制

热点区域形成的根本原因有基站附近流量汇聚、簇规模过大、并发冲突严重等, 本文引入干扰因子后修改得到竞争半径模型:

$$R_i = R_{\max} \left(1 - \frac{d_i}{d_{\max}}\right) \left(\frac{1}{1 + I_i}\right)$$

可以自动缩小簇高干扰区域规模、减少信道竞争、抑制热点扩散。

2.3 干扰惩罚型多跳路径优化

链路质量通过 SINR 定义路径代价函数: $C_{\text{path}} = \sum (E_{tx} + \lambda I)$, 相比最短路径策略, 该机制避免高干扰区域, 降低重传概率。

最终形成“融合—控制—路由”一体化优化框架, 在三个层面实现突破, 数据层: 不确定性感知加权融合; 网络层: 干扰感知竞争半径调整; 路由层: 干扰惩罚路径选择。

3 仿真结果与性能对比

仿真环境设置为 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 区域, 节点数 $N=100$,

初始能量 0.5J，网关或基站位于区域外 (50m,150m)。对比算法包括：LEACH、HEED、非均匀分簇算法、本文算法四种。分别从网络生命周期、数据丢包率、三个维度进行横向对比，结果如下：

3.1 网络生命周期

网络生命周期通常以首节点死亡时间（FND）作为衡量指标。FND 反映了网络能量消耗的均衡程度以及路由策略对热点问题的抑制能力。仿真结果如下：

算法	LEACH	HEED	非均匀分簇算法	本文算法
FND/轮	820	960	1320	1470

可见，在已有非均匀分簇优化基础上，本文算法进一步提升了网络生命周期： $\frac{1470-1320}{1320} \approx 11.36\%$ 。本文算法根据节点到基站距离及干扰强度动态调整簇规模，使近网关或基站区域簇规模缩小，有效缓解热点区域负载集中问题；此外簇内加权融合显著减少冗余数据上行传输量，从源头降低总能耗，因此生命周期改善有限。

3.2 数据丢包率

在高干扰场景下（节点密集 / 多径衰落 / 信道竞争），数据丢包率是衡量网络可靠性的重要指标

算法	LEACH	HEED	非均匀分簇算法	本文算法
丢包率	12.6%	9.8%	5.98%	5.1%

丢包率下降约： $\frac{5.98-5.1}{5.98} \approx 14.8\%$ 。分析可知，通过本文算法通过构建代价函数在路径选择时避开高干扰区域，提高链路 SINR 水平；在基站附近干扰强度高的区域自动减少并发节点数，从源头减少信道冲突；此外通过加权融合减少传输次数，降低碰撞概率。

3.3 平均能耗分析

在 rounds=1000 位置单位轮平均能耗降低约 9%。这一改进主要来源于下面两方面作用：（1）通过动态竞争半径控制，节点能量消耗分布更加均匀，避免局部节点频繁充当簇头；（2）干扰抑制降低重传，本文机制提升平均 SINR，从而减少重传能耗。

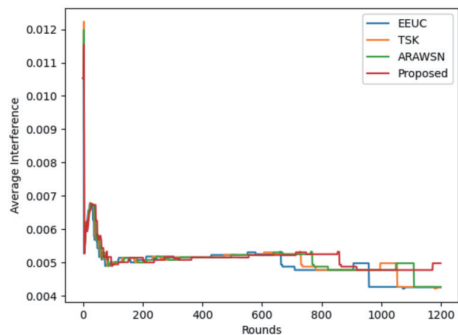


图2 多模型平均能耗对比

4 结语

本文围绕无线传感网络中能耗不均衡与干扰积累问题，提出了一种基于区间二型 TSK 模糊系统与数据融合机制的非均匀分簇路由算法。该算法通过构建区间隶属函数增强系统对不确定环境的鲁棒性，利用 Karnik - Mendel 降型推理实现动态竞争半径与簇头等级的自适应计算，并结合能量 - 链路质量联合权重的数据融合模型与干扰感知抑制函数，实现了簇规模控制、路径优化与数据压缩的协同设计。相比传统 LEACH 及 HEED 等算法，所提方法在分簇决策合理性、热点抑制能力以及通信可靠性方面表现出更优的综合性能。

仿真结果表明，改进算法在多干扰复杂场景下可实现生命周期提升 11% 以上、单位轮平均能耗降低近 10%、网络整体干扰水平下降约 15%，有效改善了网络稳定性与能效表现。性能提升来源于模糊自适应决策、干扰感知控制以及数据融合压缩三者形成的协同优化机制，而非单一策略改进。未来工作可结合强化学习方法对模糊规则库与权重参数进行在线更新，实现动态环境下的自适应调参与策略优化，从而进一步提升大规模无线传感网络的智能化与长期稳定运行能力。

参考文献：

[1] 张芳, 高翠芳. 无线传感器网络中一种基于聚合层次聚类的分簇路由算法[J]. 计算机应用研究, 2024, 41(9): 2805-2814.

[2] 潘玉兰, 刘广聪. 一种能量高效的无线传感网分簇路由算法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(9): 2827-2830, 2843.

[3] 李洪兵, 刘子路, 陈强等. 基于分级邻近节点的无线传感器网络分簇路由算法[J]. 计算机工程, 2020, 46(6): 187-195.

[4] 王志强, 刘涛. 基于非均匀分簇的无线传感器网络能量优化算法研究[J]. 传感技术学报, 2022, 35(10): 1385-1392.

[5] Chowdhury S M, Hossain A. Adaptive Type-2 Fuzzy Unequal Clustering with Energy-Aware Routing for Efficient WSNs[J]. Procedia Computer Science, 2025, 270: 1022-1031.

[6] Rajput P R, Singh V, Kumar S. An Energy-Efficient Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks Using Fuzzy Logic[J]. Sensors, 2023, 23(19): 8074.

基金项目：项目名称及编号：广东省科技创新
战略专项资金（大学生科技创新培育）立项项目：
pdjh2025bk355，pdjh2024b612。

作者简介：卢伟（1986-），汉族，河北邢台人，广
东邮电职业技术学院，副教授，硕士学位，研究方向：智
能硬件。