

# 基于非均匀分簇的无线传感器 网络负载均衡路由算法

潘继强<sup>1</sup>, 丁涛<sup>2</sup>, 郭冬<sup>2</sup>, 周广彬<sup>1</sup>, 雍龙泉<sup>1</sup>

(1. 陕西理工大学 数学与计算机科学学院, 陕西 汉中 723001;

2. 汉中市中心医院 计算机网络中心, 陕西 汉中 723000)

**摘要:** 针对非均匀分簇的无线传感器网络中各节点剩余能量相差较大, 导致无线传感器网络节点能量消耗不均, 影响负载均衡性, 限制了信息传输效率, 使丢包率上升的问题, 提出一种负载均衡的无线传感器网络非均匀分簇路由算法. 首先, 利用混合式能量高效分簇协议对无线传感器网络中的节点进行非均匀分簇, 计算每个节点的成簇概率, 选择成簇概率最高的节点作为候选簇首节点; 其次, 基于节点剩余能量和节点间的距离设计节点评价函数, 计算每个节点的评价函数值, 选择评价函数值最高的节点作为簇首构建代价函数, 选取中继节点提高信息传输效率, 形成簇间多跳路由算法; 最后, 将数据传输任务分散到网络中的多个节点, 以减少单个节点的能量消耗, 实现无线传感器网络非均匀分簇路由负载均衡. 实验结果表明, 该算法的各节点剩余能量仅在 6 J 上下波动, 且曲线波动幅度较小, 在 2 000 bit 传输数据量时的网络丢包率较低, 为 0.22%, 负载均衡性较高.

**关键词:** 负载均衡; HEED 协议; 非均匀分簇; 节点评价函数; 无线传感器网络

**中图分类号:** TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5489(2025)06-1744-07

## Load Balancing Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks Based on Non-uniform Clustering

PAN Jiqiang<sup>1</sup>, DING Tao<sup>2</sup>, GUO Dong<sup>2</sup>, ZHOU Guangbin<sup>1</sup>, YONG Longquan<sup>1</sup>

(1. School of Mathematics and Computer Science, Shaanxi University of Technology,

Hanzhong 723001, Shaanxi Province, China;

2. Computer Network Center, Hanzhong Central Hospital, Hanzhong 723000, Shaanxi Province, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the significant disparities in residual energy among nodes led to uneven energy consumption, affecting load balancing, limiting information transmission efficiency, and increasing packet loss rates in wireless sensor networks employing non-uniform clustering, we proposed a load-balanced non-uniform clustering routing algorithm for wireless sensor networks. Firstly, we used a hybrid energy-efficient distributed clustering protocol to perform non-uniform clustering of nodes in wireless sensor networks, calculated the clustering probability for each node and

收稿日期: 2024-10-28.

第一作者简介: 潘继强(1978—), 男, 汉族, 硕士, 副教授, 从事无线传感器网络路由算法的研究, E-mail: pjq@snu.edu.cn.

通信作者简介: 丁涛(1983—), 男, 汉族, 硕士, 高级工程师, 从事无线传感器网络路由算法、医疗信息化应用和医疗物联网应用的研究, E-mail: dingkit@163.com.

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(批准号: 2024JC-YBMS-014)、陕西省教育厅青年创新团队项目(批准号: 23JP024)和汉中市中心医院院级科研基金对外合作培优专项项目(批准号: YK2416).

selected the node with the highest probability as a candidate cluster head node. Secondly, we designed a node evaluation function based on residual energy of nodes and its distance to neighbors, calculated the evaluation function value of each node, elected the node with the highest evaluation function value as the cluster head to construct a cost function, selected relay nodes to enhance transmission efficiency, and formed an inter-cluster multi-hop routing algorithm. Finally, we distributed the data transmission tasks to multiple nodes in the network to reduce single-node energy consumption and achieve non-uniform clustering routing load balancing in wireless sensor networks. Experimental results show that the residual energy of each node in this algorithm only fluctuates around 6 J, and the fluctuation amplitude of the curve is small. The network packet loss rate is low at 0.22% when transmitting 2 000 bit data volumes, indicating high load balancing.

**Keywords:** load balancing; HEED protocol; non-uniform clustering; node evaluation function; wireless sensor network

由于无线传感器网络中各节点能量主要来源于电池供电, 而电池更换频率会直接影响无线传感器网络总能量, 因此在总能量有限的情况下, 如何均衡分配能量、提高网络负载能力的研究备受关注<sup>[1]</sup>. 研究非均匀分簇路由算法具有较高的应用价值<sup>[2]</sup>. 苗俊先等<sup>[3]</sup>利用  $K$  均值算法进行非均匀分簇, 结合节点的传输距离、能量消耗和信息传输次数确定簇间传输的中继节点, 但该算法利用  $K$  均值算法进行分簇的过程中易受环境因素干扰, 导致分簇及簇首选举的效果较差. 王珊等<sup>[4]</sup>利用  $K$ -means 算法根据节点间距离划分出  $K$  个簇群, 通过 AHP(analytic hierarchy process)模型确定簇头竞选影响因素的权重, 并选出簇头, 以构建簇间路由, 但该算法中 AHP 模型通过人工赋值, 获得的权重主观性较强, 导致网络各节点的剩余能量相差较大. Wang 等<sup>[5]</sup>利用自组织映射神经网络进行节点聚类, 将决策域概念引入萤火虫算法, 优化网络结构, 提高分簇效果, 但基于改进的蚁群优化算法建立簇间路由, 该算法中萤火虫算法的收敛速度较慢, 从而降低了网络负载均衡性. 焦万果等<sup>[6]</sup>利用自适应优化算法与和声算法对遗传算法进行优化, 根据网络能耗和节点分布模型获得簇头个数, 通过优化的遗传算法完成簇头和中继节点的选择, 实现分簇传输, 但该方法中遗传算法的编程实现较复杂, 导致网络丢包率较高.

为解决上述方法中存在的问题, 本文提出一种负载均衡的无线传感器网络非均匀分簇路由算法, 采用 HEED(hybrid energy-efficient distributed clustering)协议进行簇群划分, 根据概率迭代选簇算法计算无线传感器网络各节点的成簇概率, 选取候选簇首节点, 设计无线传感器网络的分簇半径, 基于簇首与汇聚节点之间的距离对簇半径进行调整, 再结合评价函数完成无线传感器网络的非均匀分簇及簇首选举, 通过选取剩余能量最大且成员节点数量最大的簇首作为中继节点, 减少环境因素的干扰, 获得负载均衡的无线传感器网络非均匀分簇路由算法.

## 1 无线传感器网络的非均匀分簇及簇首选举

HEED 协议可以考虑每个节点的能量消耗, 从而优化簇首选举, 确保能量消耗在整个网络中均匀分布. 利用 HEED 协议对无线传感器网络中的所有节点进行非均匀分簇, 根据各节点的分布和能量状况动态调整簇的大小, 使簇首合理分布, 避免节点密集区域能量消耗过快, 根据节点剩余能量和节点间的距离设计节点评价函数, 基于评价函数获取各簇群的簇首, 利于后续簇间多跳路由的建立.

### 1.1 基于 HEED 协议的非均匀分簇

假设基于无线传感器网络的自由传输模型与多径衰落模型<sup>[7-8]</sup>获得的对应模型下发送 1 bit 数据需要的能耗分别为  $\varphi_g$  和  $\varphi_q$ , 则根据网络能耗和节点分布获得非均匀分簇的最佳簇群个数  $l$  为

$$l = \sqrt{\frac{\varphi_g Q^2 M}{2\pi\varphi_q f_{i\text{-sink}}^4}} \quad (1)$$

其中:  $Q^2$  为无线传感器网络节点的分布区域面积, 该区域边长均为  $Q$ ;  $M$  为网络节点数量;  $f_{i\text{-sink}}$  为

网络中第  $i$  个节点与汇聚点 sink 之间的距离.

确定最佳簇群个数后, 利用 HEED 协议<sup>[9]</sup>进行簇群划分, 根据概率迭代选簇算法计算无线传感器网络各节点的成簇概率:

$$A_j = \max \left\{ V_{\text{prob}} \cdot \frac{R_{\text{res}}}{R_{\text{max}}}, a_{\text{min}} \right\}, \quad (2)$$

其中:  $V_{\text{prob}}$  为簇首与总节点之间的数量比值;  $R_{\text{res}}$  为网络节点剩余的能量;  $R_{\text{max}}$  为节点的蓄能最大值;  $a_{\text{min}}$  为预先设置的节点收敛概率下限, 该值可解决节点能量过低导致的收敛缓慢问题.

根据式(2)计算无线传感器网络中各节点的成簇概率  $A_j$ , 选取前  $l$  个  $A_j$  值最大的节点作为候选簇首节点. 确定各候选簇首后, 根据 HEED 协议设计无线传感器网络的分簇半径为

$$T_v = \left( 1 - v \cdot \frac{f_{i \text{ sink max}} - f_{i \text{ sink}}}{f_{i \text{ sink max}} - f_{i \text{ sink min}}} \right) \cdot T, \quad (3)$$

其中  $f_{i \text{ sink}}$  为第  $i$  个候选簇首节点与 sink 之间的距离,  $v \in (0, 1)$  表示具有调整功能的参数,  $f_{i \text{ sink max}}$  和  $f_{i \text{ sink min}}$  分别为各候选簇首和 sink 之间的距离上限和下限,  $T$  为各簇半径上限.

获取各簇群半径后, 即可根据簇半径完成非均匀分簇. 该非均匀分簇方法可基于簇首与汇聚节点之间的距离对簇半径进行调整, 当距离较大时,  $f_{i \text{ sink}}$  较大,  $\left( 1 - v \cdot \frac{f_{i \text{ sink max}} - f_{i \text{ sink}}}{f_{i \text{ sink max}} - f_{i \text{ sink min}}} \right)$  值也随之增大, 此时簇半径  $T_v$  也较大, 从而完成无线传感器网络非均匀分簇<sup>[10]</sup>.

## 1.2 基于评价函数的簇首选举

对于无线传感器网络中各簇群簇首的选举, 需根据簇首节点的能量分布<sup>[11]</sup>与节点间的距离建立节点评价函数, 包含节点剩余能量、通信能力等参数, 选择剩余能量较高的节点作为簇首, 可确保簇首节点有足够的能量处理簇内的数据收集、融合和传输任务, 从而提高整个簇的能量效率. 簇首节点需与簇内其他节点以及其他簇首节点进行通信, 需具备较强的通信能力. 基于能量效率、通信能力和负载均衡三方面因素将各簇群中评价函数最高的节点作为簇首节点.

在无线传感器网络的节点路径构建过程中, 通常需要综合节点自身的能量及邻居节点的能量, 即与基站之间距离较大的邻居节点需要的能量较大, 反之所需能量较小. 基于此特征, 设计无线传感器网络的节点评价函数  $g(z)$  为

$$g(z) = \epsilon r_z + \mu \bar{r}, \quad (4)$$

其中:  $\epsilon$  和  $\mu$  分别表示第  $z$  个节点与其邻居节点的能量驱动因素,  $\epsilon + \mu = 1$  且  $\epsilon, \mu \in [0, 1]$ ;  $r_z$  表示第  $z$  个节点的剩余能量;  $\bar{r}$  表示  $z$  所有邻居节点的平均等效能量. 式(4)中对于第  $z$  个节点的邻居节点的等效平均能量  $\bar{r}$  为

$$\bar{r} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1, i \neq z}^n \bar{r}_i, \quad (5)$$

其中  $\bar{r}_i$  表示第  $z$  个节点的邻居节点  $i$  的等量能效,  $r_i$  表示节点  $i$  的剩余能量. 基于邻居节点  $i$  的剩余能量和该节点到第  $z$  个节点的距离获得的函数  $g(r_i, t_i)$  为

$$g(r_i, t_i) = \frac{r_i t_i}{t_i + 1}, \quad (6)$$

其中  $t_i$  表示邻居节点  $i$  与第  $z$  个节点之间的距离.

结合式(5)和式(6), 将式(4)进行如下转换:

$$g(z) = \epsilon r_z + \frac{\mu}{n-1} \sum_{i=1, i \neq z}^n \frac{r_i t_i}{t_i + 1}. \quad (7)$$

根据式(7)计算无线传感器网络各簇群中节点的评价函数值<sup>[12]</sup>, 将各簇群中评价函数最高的节点作为最终簇首, 从而完成簇首选举.

## 2 基于簇首节点与代价函数的簇间多跳路由负载均衡设计

在无线传感器网络中, 多跳传输可将数据传输任务分散到网络中的多个节点, 避免单一节点因

直接与远距离的基站通信而耗尽能量,使能量能均衡消耗.完成无线传感器网络的非均匀分簇后,各簇间的传输方式选择多跳传输<sup>[13]</sup>,多跳传输可结合负载均衡算法,通过动态调整数据传输路径,将数据流量分配到负载较轻的节点和路径上,避免过载.基于簇首节点与代价函数的簇间多跳路由负载均衡设计如下.

设置阈值  $Y_{th}$ ,假设  $d_i$  和 B 分别为簇首和基站,  $d_i$  和 B 之间的距离定义为  $F(d_i, B)$ ,如果  $F(d_i, B) < Y_{th}$ ,则表示簇首节点  $d_i$  能与基站 B 直接通信,反之,将簇首节点作为中继节点进行信息传输.

在确定与基站 B 直接通信的簇首节点后,对剩余的簇首节点则作为中继节点进行数据传输.已知  $d_i$  是无线传感器网络中可以与基站 B 直接通信的簇首节点,则  $d_i$  的中继节点集合  $d_i \cdot RN$  为

$$d_i \cdot RN = \{d_j | F(d_j, B) < F(d_i, B)\}, \quad (8)$$

其中  $d_j$  表示与基站 B 之间为多跳传输的簇首节点,  $F(d_j, B)$  为  $d_j$  与基站 B 之间的距离,  $F(d_i, B)$  为  $d_i$  与基站 B 之间的距离.

为实现无线传感器网络的负载均衡<sup>[14]</sup>,需根据各簇首节点的能量消耗选择中继节点,构建簇间传输路径.如果中继节点集合  $d_i \cdot RN$  为一个空集,则表明簇首节点  $d_i$  与基站 B 之间为单跳传输,即簇首节点  $d_i$  没有中继节点;如果  $d_j$  属于  $d_i$  的中继节点,则  $d_j$  和  $d_i$  的能量消耗为

$$D = F^2(d_i, d_j) + F^2(d_j, B), \quad (9)$$

其中  $F(d_i, d_j)$  为簇首节点  $d_i$  与其中继节点  $d_j$  之间的距离.根据式(9)选取中继节点集合  $d_i \cdot RN$  中能量消耗最小的两个簇首节点,将这两个簇首节点中代价函数较小的节点作为  $d_i$  的中继节点,其中任意簇首节点  $d_j$  的代价函数  $\text{cost}(d_i, d_j)$  为

$$\text{cost}(d_i, d_j) = \begin{cases} \chi \frac{\overline{U}_{neighbor}(d_i)}{\overline{U}_{current}(d_j)} + (1 - \chi) \frac{W(d_j)}{\overline{W}(d_i)}, & F(d_i, B) \leq I_0, \\ +\infty, & F(d_i, B) > I_0, \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $\chi$  表示加权系数,取值在  $0 \sim 1$  之间;  $\overline{U}_{neighbor}(d_i)$  为  $d_i$  的邻居簇首的平均剩余能量;  $W(d_j)$  为  $d_j$  的成员节点总数;  $\overline{W}(d_i)$  为  $d_i$  的邻居簇首所拥有的成员节点均值;  $I_0$  表示根据实际情况设置的竞争半径上限;  $\overline{U}_{current}(d_j)$  为  $d_j$  的剩余能量.则最终选取簇首节点  $d_i$  的中继节点的代价函数为

$$\text{cost}(RN_i) = \min\{\text{cost}(d_i, d_j)\}. \quad (11)$$

由于中继节点进行数据传输时的能量需求较大<sup>[15]</sup>,而成员节点数较多的簇群的传输能量较大,因此根据剩余能量和成员节点数量构建代价函数,通过选取剩余能量最大且成员节点数量最多的簇首作为中继节点,以减少环境因素对中继节点的干扰,获得传输效率最大化的簇间多跳路由算法,实现无线传感器网络的负载均衡.

### 3 实验

以某无线传感器网络为实验对象,其中包含多个传感器节点,分布在一个二维区域内,用于监测环境参数(如温度、湿度、光照等).节点数量为 100 个,区域大小为  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ ,每个节点的初始能量为 1 000 J,通信半径为 20 m,数据包大小为 50 字节.实验对象基本拓扑结构如图 1 所示.

本文设置节点能量初始值为 0.3 J,参数  $Q=120$ ,基站的位置坐标为(90,110),带宽为 9.5 kHz,竞争半径上限  $I_0=230$ ,簇首比例为 0.1,加权系数  $\chi=0.5$ .

在无线传感器网络的分簇路由算法中,选举出的簇首消耗能量会影响最终的数据传输效率和网络整体能量消耗,簇首消耗能量越小,网络整体能量消耗越小,数据传输的效率越高,此时簇首选举的效果也较好.利用本文算法、AHP 算法和改进遗传算法对图 1 中的无线传感网络进行簇首选举,不同算法选出的簇首消耗能量对比如图 2 所示,其中箱体的上下边界线分别表示簇首消耗能量的最大值和最小值,中位线表示簇首消耗能量的平均值,箱体长度反映了簇首消耗能量的波动幅度.

由图 2 可见:随着无线传感器网络传输数据量的增加,传输任务难度增加,3 种算法选举出的簇首

消耗能量均值均有上升;当簇首节点数量相同时,本文算法选举出的簇首消耗能量远低于 AHP 算法和改进遗传算法,均在 0.1 J 以下,且本文算法的簇首消耗能量波动幅度也低于其他两种算法,表明本文算法的簇首选举效果较好,不易受环境因素的干扰,选出的簇首节点具有稳定性,能有效降低网络能耗.

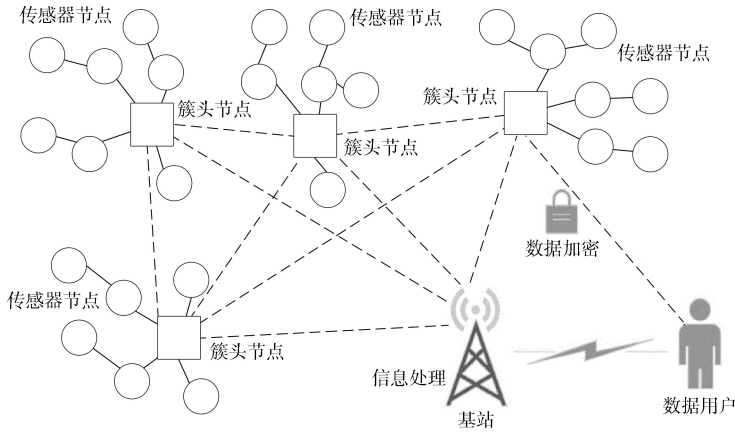


图 1 无线传感器网络基本拓扑结构

Fig. 1 Basic topology structure of wireless sensor network

当无线传感器网络负载均衡时,网络中各节点的能量消耗值较平均,各节点的剩余能量也相差较小,因此,通过网络节点的剩余能量能判断网络的整体负载均衡性,节点剩余能量相差越小,网络的负载均衡性越高.本文算法、AHP 算法和改进遗传算法中的无线传感器网络节点剩余能量对比结果如图 3 所示.

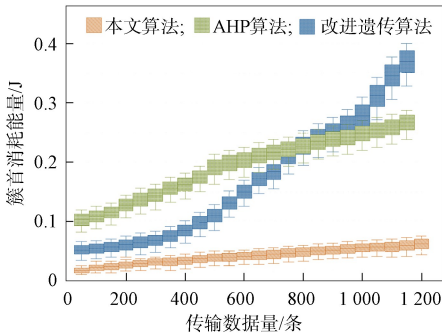


图 2 不同算法簇首消耗能量对比结果

Fig. 2 Comparison results of energy consumption of cluster heads by different algorithms

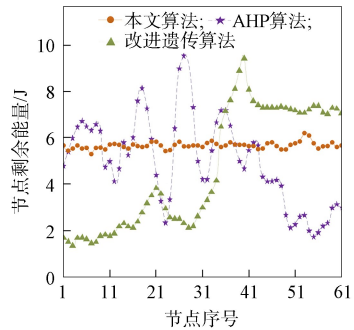


图 3 不同算法节点剩余能量对比结果

Fig. 3 Comparison results of node residual energy by different algorithms

由图 3 可见,本文算法中的网络节点剩余能量仅在 6 J 上下波动,且曲线波动幅度较小,而 AHP 算法和改进遗传算法的网络节点剩余能量曲线波动幅度较大,这是因为本文算法在分簇过程中和后续中继节点的选择时均考虑了节点的位置以及能量消耗,从而使各节点的负载及能量消耗相近,进而提高了无线传感器网络的负载均衡性.

当无线传感器网络中各节点的负载不均衡时,网络中负载过大的节点和路径将会出现数据传输错误,导致部分传输数据丢失,此时会增加网络整体丢包率,因此,网络丢包率是衡量无线传感器网络负载均衡效果的重要指标,丢包率越小,表明网络的负载均衡效果越好.计算本文算法、AHP 算法和改进遗传算法中的网络丢包率,丢包率随传输数据量变化的情况列于表 1.由表 1 可见,当无线传感器网络传输数据总量逐渐增加时,网络的总体负载随之增加,信息传输的复杂性和难度升高,因此 3 种算法的网络丢包率呈上升趋势.当无线传感器网络传输的数据总量相同时,本文算法远低于 AHP 算法和改进遗传算法的网络丢包率,表明本文算法能有效提高无线传感器网络负载均衡性.

表 1 不同算法的网络丢包率  
Table 1 Network packet loss rate of different algorithms

传输数据量/(条·bit <sup>-1</sup> )	本文算法	AHP 算法	改进遗传算法
200	0.03	0.09	0.08
400	0.04	0.12	0.11
600	0.06	0.14	0.15
800	0.07	0.17	0.17
1 000	0.09	0.21	0.20
1 200	0.12	0.25	0.23
1 400	0.14	0.28	0.28
1 600	0.17	0.32	0.33
1 800	0.19	0.34	0.35
2 000	0.22	0.38	0.39

为验证本文算法在吞吐量指标上的性能, 选取 100 个节点随机分布在 100 m×100 m 的监测区域, 初始节点能量为 2 J, 数据包大小为 4 000 bits, 算法的迭代次数设为 1 200, 3 种算法的吞吐量对比结果如图 4 所示. 由图 4 可见, AHP 算法在迭代 600 次后吞吐量急剧下降, 表明大量节点死亡, 改进遗传算法在迭代 800 次后性能明显下降, 而本文算法在整个迭代周期内保持了相对稳定的吞吐量, 能将网络中的数据传输任务较均匀地分散到多个节点上, 实现了网络负载均衡, 有效延长了网络生命周期. 这是因为本文算法能根据节点密度和剩余能量动态调整簇大小, 避免了热点区域过早死亡, 并综合考虑剩余能量和距离的节点评价函数, 优化了簇首选择, 优化的中继节点选择减少了远距离传输的能量消耗, 最后通过代价函数将数据传输任务合理分配到多个节点实现负载均衡.

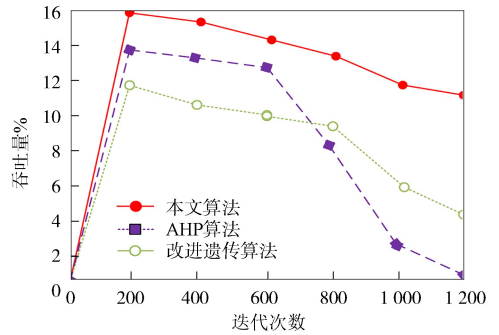


图 4 不同算法吞吐量对比结果  
Fig. 4 Comparison results of throughput of different algorithms

综上所述, 针对无线传感器网络中存在着负载均衡性较差、能量消耗不均和信息传输效率较低的问题, 本文提出了一种考虑负载均衡的非均匀分簇算法. 该算法基于簇首和汇聚节点之间的距离对簇半径进行调整, 结合评价函数完成无线传感器网络的非均匀分簇及簇首选举, 通过选取剩余能量最大且成员节点数量最大的簇首作为中继节点, 能减少环境因素对中继节点的干扰, 获得传输效率最大化的簇间多跳路由算法, 保证簇首选举效果较好, 具有较高的稳定性, 能有效提高网络丢包率和负载均衡性, 促进了无线传感器网络的资源优化调度.

参 考 文 献

[ 1 ] 李阳, 李焱, 王瑞, 等. 无线传感器网络单线电能传输系统的电磁安全性分析 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(4): 808-815. (LI Y, LI Y, WANG R, et al. Electromagnetic Security Analysis of Single-Wire Power Transmission System in Wireless Sensor Networks [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(4): 808-815.)

[ 2 ] 苟平章, 原晨, 张芬. 基于软件定义的 WSNs 非均匀分簇 QoS 路由算法 [J]. 计算机工程与科学, 2022, 44(2): 227-236. (GOU P Z, YUAN C, ZHANG F. WSNs Heterogeneous Clustering QoS Routing Algorithm Based on Software Definition [J]. Computer Engineering and Science, 2022, 44(2): 227-236.)

[ 3 ] 苗俊先, 赵一帆, 李波, 等. WSN 中能耗均衡的非均匀分簇路由算法 [J]. 计算机工程与设计, 2022, 43(2): 301-307. (MIAO J X, ZHAO Y F, LI B, et al. Heterogeneous Clustering Routing Algorithm for Energy Balancing in WSN [J]. Computer Engineering and Design, 2022, 43(2): 301-307.)

[ 4 ] 王珊, 梁敏, 路芳瑞, 等. 一种基于 AHP 的无线传感器网络分簇路由算法 [J]. 火力与指挥控制, 2023, 48(9): 77-81. (WANG S, LIANG M, LU F R, et al. A Clustering Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks

- Based on AHP [J]. *Fire Control & Command Control*, 2023, 48(9): 77-81.)
- [5] WANG Z S, DING H W, LI B, et al. Energy Efficient Cluster Based Routing Protocol for WSN Using Firefly Algorithm and Ant Colony Optimization [J]. *Wireless Personal Communications*, 2022, 125(3): 2167-2200.
- [6] 焦万果, 丁富贵, 石剑恒. 一种基于改进遗传算法的分簇路由算法 [J]. *北京邮电大学学报*, 2023, 46(6): 83-88. (JIAO W G, DING F G, SHI J H. A Clustering Routing Algorithm Based on Improved Genetic Algorithm [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2023, 46(6): 83-88.)
- [7] TACHE M D, PĂSCUȚOIU O, BORCOCI E. Optimization Algorithms in SDN: Routing, Load Balancing, and Delay Optimization [J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(14): 5967-1-5967-16.
- [8] MEHRA P S. LBECR: Load Balanced, Efficient Clustering and Routing Protocol for Sustainable Internet of Things in Smart Cities [J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2023, 14(8): 10493-10515.
- [9] 赵小强, 崔砚鹏, 郭铮, 等. 基于虚拟力的 WSNs 能量高效分簇路由协议 [J]. *软件学报*, 2022, 33(2): 622-640. (ZHAO X Q, CUI Y P, GUO Z, et al. WSNs Energy-Efficient Clustering Routing Protocol Based on Virtual Force [J]. *Journal of Software*, 2022, 33(2): 622-640.)
- [10] 陈辉, 高岩. 基于双簇头的 WSNs 非均匀分簇路由算法 [J]. *计算机工程*, 2022, 48(10): 184-192. (CHEN H, GAO Y. WSNs Non-uniform Clustering Routing Algorithm Based on Double Cluster Heads [J]. *Computer Engineering*, 2022, 48(10): 184-192.)
- [11] QUY V K, CHEHRI A, QUY N M, et al. An Efficient Routing Algorithm for Self-organizing Networks in 5G-Based Intelligent Transportation Systems [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2023, 70(1): 1757-1765.
- [12] 秦广为, 谢文科, 邹行健, 等. 基于相干合成涡旋光束光场分布角向不变性的评价函数构建及其应用研究 [J]. *光子学报*, 2023, 52(12): 183-193. (QIN G W, XIE W K, ZOU X J, et al. Construction and Application of Evaluation Function Based on Angular Invariance of Field Distribution of Coherent Synthetic Vortex Beams [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(12): 183-193.)
- [13] 叶继华, 肖波, 杨思渝, 等. 结合相对熵和多跳转发路由的改进 WSN 节能策略 [J]. *计算机科学与探索*, 2021, 15(1): 119-131. (YE J H, XIAO B, YANG S Y, et al. Improved WSN Energy Saving Strategy Combining Relative Entropy and Multi-hop Forwarding Routing [J]. *Journal of Computer Science and Exploration*, 2021, 15(1): 119-131.)
- [14] ROBERTS M K, RAMASAMY P. An Improved High Performance Clustering Based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks in IoT [J]. *Telecommunication Systems*, 2023, 82(1): 45-59.
- [15] SAMADI R, NAZARI A, SEITZ J. Intelligent Energy-Aware Routing Protocol in Mobile IoT Networks Based on SDN [J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2023, 7(4): 2093-2103.

(责任编辑: 韩 啸)