

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005286

## 基于能量的非完全分簇路由算法\*

伍敏君

(中山火炬职业技术学院 光电信息学院 中山 528400)

**摘要:** 针对 LEACH 算法中节点能量消耗过快而容易死亡、簇头选举机制不合理及稳定周期短等问题,为提高网络稳定性,有效利用节点能量,提出了一种非完全分簇路由算法。该算法考虑节点剩余能量来选举簇头,利用基站能量充足的优势,建立非完全分簇,采用平面路由和分簇路由相结合的方式来实现数据传输,以均衡网络负载。仿真结果表明,该算法对比 LEACH,网络稳定周期延长了 29.48%,稳定周期占网络生命周期比例提高至 72.53%,网络性能更优。

**关键词:** 无线传感器网络;算法;分簇;能量;路由

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Incomplete clustered routing algorithm based on energy

Wu Minjun

(School of Optoelectronic and Information Technology, Zhongshan Torch Polytechnic, Zhongshan 528400, China)

**Abstract:** Aiming at improving network stability and energy efficiency, an incomplete clustered routing algorithm was proposed to solve problems that fast energy consumption and easy death of nodes and unreasonable cluster-head election and short network stable period in cluster routing protocol of LEACH. Considering remaining energy of nodes in cluster-head election, the proposed algorithm takes advantage of sufficient energy of base station to establish incomplete cluster. With combination of flat routing and cluster routing to transmit data, the algorithm can fairly distribute energy consumption in the entire network. Simulation results show that the networks performance better in terms of stable period by 29.48% and the proportion of stable period in lifetime to 72.53%.

**Keywords:** wireless sensor networks; algorithm; cluster; energy; routing

## 0 引言

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSNs)被广泛应用于国防军事、工农业生产、环境监测、医疗健康、交通监管、智能家居等领域<sup>[1]</sup>。WSNs 中分布大量传感器节点,监测相关物理量信息,如温度、湿度、水分、有害气体含量等<sup>[2]</sup>。节点具有自组织、独立计算能力,能快速组成网络,实现传感数据感知、存储、计算、传输等<sup>[3]</sup>。节点体积较微小,携带的电池能量有限且难以补充,设计 WSNs 时,首要考虑的是能量高效利用率<sup>[4-5]</sup>。

按照拓扑结构,WSNs 路由协议分为平面路由协议和分簇路由协议<sup>[6]</sup>。平面路由协议中,各节点地位平等,不存在任何层次或等级差异,其优点是路由简单,但网络扩展性差,适用于小规模网络。分簇路由协议中,节点分为簇头节点和成员节点,其优点是不需要路由表维护,拓扑管理方

便,可扩展性好。LEACH(low-energy adaptive clustering hierarchy)<sup>[7]</sup>是经典的分簇路由协议。

国内外学者对 LEACH 算法提出了各种改进。针对 LEACH 算法簇头选举随机性,提出了簇头选取改进算法,利用分布式地址分配策略,优化簇头选举<sup>[8]</sup>。文献[9]提出了 CAVCR 算法,簇头选举中考虑能量和相邻节点数、距离等。针对 LEACH 算法单跳通信能耗较大,提出了多跳分簇算法 LEACH-M<sup>[10]</sup>、ZMC<sup>[11]</sup>。文献[12]提出了一种适用于水下声传感网的簇间多跳分簇技术,以综合属性值选取簇头。文献[13]提出了一种分布式多跳分簇路由协议,以 BS 为根节点动态路由树完成簇间路由。文献[14]采用分簇树型拓扑结构构建网络,降低节点失效对网络的影响。

目前提出的分簇算法大多数基于完全分簇,即节点均参与分簇。为此,本文提出一种基于能量的非完全分簇路由算法(incomplete clustered routing algorithm based on

收稿日期:2020-10-30

\* 基金项目:2018 年广东省普通高校青年创新人才类(自然科学)项目(2018GkQNCX138)资助

• 60 •

energy, ICRAE), 利用基站能量不受限优势, 采用平面路由技术和分簇路由技术结合方式传输数据, 优化数据传输方式, 考虑节点剩余能量选举簇头, 使选举机制更合理。仿真结果表明, 该算法延长了网络生命周期和稳定周期, 提高了稳定周期占网络生命周期比例, 增强网络稳定性。

## 1 相关研究

### 1.1 MTE 协议

最小传输能量(minimum transmission energy, MTE)协议<sup>[15]</sup>是一种平面路由协议, 网络中节点将数据发送至其基站方向上最近的下一跳节点。节点 A 通过节点 B, 向节点 C 发送数据的条件为:

$$E_{TX}(d_{AB}) + E_{TX}(d_{BC}) < E_{TX}(d_{AC}) \quad (1)$$

$$d_{AB}^2 + d_{BC}^2 < d_{AC}^2 \quad (2)$$

式中:  $E_{TX}(d_{AB})$  为节点 A 发送数据到 B 消耗的能量;  $E_{TX}(d_{BC})$  为节点 B 发送数据到 C 消耗的能量;  $E_{TX}(d_{AC})$  为节点 A 发送数据到 C 消耗的能量;  $d_{AB}$  为节点 A 到 B 的距离;  $d_{BC}$  为节点 B 到 C 的距离;  $d_{AC}$  为节点 A 到 C 的距离。

如图 1 所示, 从节点 A 发送数据到节点 C, 以节点 B 为中转节点, 能耗更少。

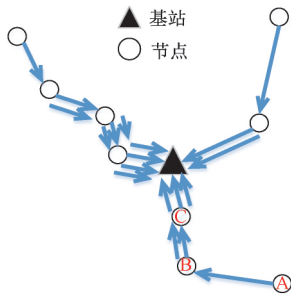


图 1 MTE 协议的数据传输

### 1.2 LEACH 协议

LEACH 协议, 是 WSNs 的分布式分簇路由协议, 节点自主轮流选举簇头, 按轮进行分簇。每一轮分为簇建立阶段和稳定阶段组成。

在簇建立阶段, 每个节点  $n$  产生  $[0, 1]$  随机数, 如果此数值低于阈值  $T(n)$ , 则该节点当选为簇头, 向周围节点广播自身当选簇头消息。  $T(n)$  为:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \times [r \bmod (1/p)]}, & n \in G \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $p$  为簇头占节点总数百分比;  $r$  为当前轮次;  $G$  为最近  $1/p$  轮中未当选过簇头的节点集合。

簇头选定后, 各节点加入最近分簇中, 向该簇头发送加入请求。分簇建立后, 簇头向各成员节点发送簇内数据传输 TDMA(time division multiple address)调度。

在稳定阶段, 各成员节点等待 TDMA 时隙到来, 将数据发送到簇头。簇头接收并融合数据后, 发送到 BS。在此

阶段, 簇头一直处于工作状态, 相对于成员节点, 簇头耗能较大。LEACH 协议采用轮流当选簇头机制, 以均衡各个节点能量消耗。

LEACH 协议分簇结构如图 2 所示。

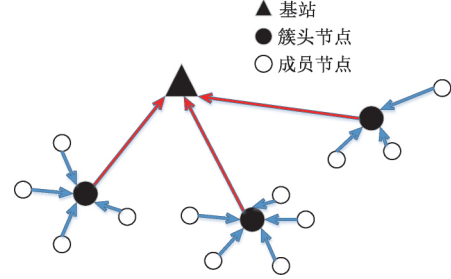


图 2 LEACH 协议分簇结构

MTE 中节点通过下一跳节点来转发数据, 近 BS 节点承担较重数据包中转任务, 消耗更多能量, 导致节点死亡过快, 网络能量消耗不均衡, 影响其稳定性和寿命。LEACH 提出所有节点轮流当选簇头, 承担数据包转发任务, 目的是使每个节点能量消耗更加均衡, 但 LEACH 算法中簇头选举具有随机性。

## 2 ICRAE 算法

### 2.1 能量模型

节点能耗主要集中在发送和接收的通信能耗, 以及数据处理(主要为数据融合)能耗等, 其能量消耗模型如图 3 所示。

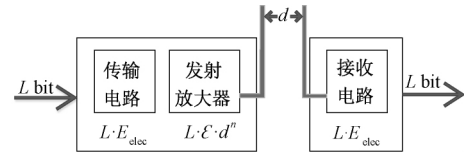


图 3 无线电能消耗模型

节点发送数据包能耗  $E_{TX}(L, d)$  与数据包长度  $L$ 、传输距离  $d$  有关, 则:

$$E_{TX}(L, d) = \begin{cases} L \cdot E_{elec} + L \cdot \epsilon_{fs} \cdot d^2, & d \leq d_0 \\ L \cdot E_{elec} + L \cdot \epsilon_{mp} \cdot d^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $E_{elec}$  为每发送或接收 1 bit 消息消耗的能量;  $d_0$  为距离阈值;  $\epsilon_{fs}$ 、 $\epsilon_{mp}$  为自由空间传输、多路径衰减传输两种模型的能耗系数。

节点接收数据包能耗  $E_{RX}(L)$ , 仅与数据包长度  $L$  有关, 则:

$$E_{RX}(L) = L \cdot E_{elec} \quad (5)$$

### 2.2 网络假设

为保证算法正常运行, 结合无线传感器网络特性, 提出以下网络假设:

1) 网络是静态网络, 节点部署后不移动;

- 2) 只有一个基站, 位于网络区域正中央, 能量不受限制;
- 3) 同构网络, 所有节点初始能量相同, 能量不能补充;
- 4) 节点具有唯一 ID 号, 能感知自身能量信息和位置信息;
- 5) 节点可根据传输距离调节发射功率;
- 6) 网络无线信道具有对称性。

### 2.3 簇头的选举

网络中部署  $n$  个节点, 簇头选举前, 统计死亡节点个数  $dead$ , 根据节点  $i$  当前剩余能量  $E_{\text{current}}(i)$ , 计算出存活节点平均能量值  $E_{\text{average}}$ 。当  $E_{\text{current}}(i)$  低于  $E_{\text{average}}$ , 则当前轮中不选为簇头; 反之, 该节点成为候选簇头。

$$E_{\text{average}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{\text{current}}(i)}{n - dead} \quad (6)$$

候选簇头随机生成  $[0, 1]$  的随机数  $rand$ , 当  $rand$  小于阈值  $T_1(n)$ , 则当选为簇头,  $T_1(n)$  为:

$$T_1(n) = T(n) \frac{E_{\text{current}}(i)}{E_{\text{average}}} \quad (7)$$

### 2.4 非完全分簇建立

簇头选举后, 非簇头节点分别计算自身到 BS 和所有簇头的距离, 根据距离最小值来确定是否加入分簇。如果到某个簇头距离最小, 则发送请求加入该分簇; 如果到 BS 距离最小, 则不加入任何分簇。这种分簇过程中, 并非每个节点都加入到分簇中, 因此称为“非完全分簇”。

### 2.5 数据传输

在数据传输阶段, 每个节点根据自身是否分簇来传输数据。ICRAE 算法中与 BS 直接通信的节点有两种: 簇头和未加入分簇的非簇头节点。如图 4 所示, 每轮中数据传输具体流程如下:

1) 在分簇内, 各传感器节点根据分配的 TDMA 调度, 通过单跳方式, 将数据传输到簇头。簇头融合所有数据, 以单跳方式向 BS 发送处理后的数据包。分簇内通信以及簇头与 BS 通信方式, 与 LEACH 协议一致。

2) 没有加入分簇节点, 位于 BS 附近区域, 均以单跳方式向 BS 发送数据包。此区域内利用 BS 能量充足优势, 不选举簇头节点, 不建立分簇, 节点直接向 BS 发送数据包, 以节省能量。

LEACH 协议的节点均加入分簇, 设  $n$  个节点均匀随机分布到  $k$  个分簇内, 则每个分簇有  $n/k$  个节点, 各成员节点与簇头距离为  $d_{\text{toCH}_i}$ , 均向簇头发送  $L$  bit 数据消耗的能量  $E_1$  为:

$$E_1 = \left(\frac{n}{k} - 1\right) \cdot L \cdot E_{\text{elec}} + L \cdot \epsilon_{\text{fs}} \cdot \sum_{i=1}^{\frac{n}{k}-1} d_{\text{toCH}_i}^2 \quad (8)$$

簇头接收成员节点数据消耗的能量  $E_2$  为:

$$E_2 = \left(\frac{n}{k} - 1\right) \cdot L \cdot E_{\text{elec}} \quad (9)$$

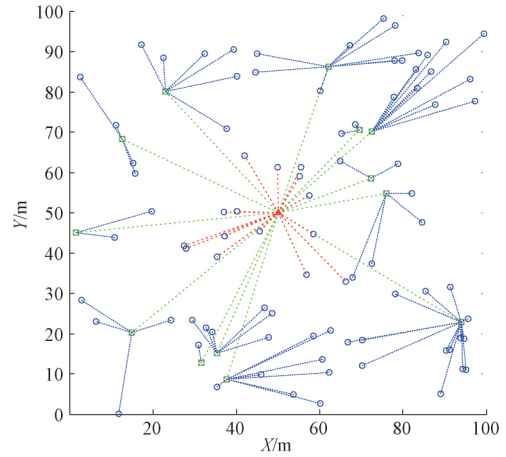


图 4 ICRAE 算法的数据传输

设融合单位数据消耗的能量为  $E_{\text{DA}}$ , 则簇头融合数据包消耗的能量  $E_3$  为:

$$E_3 = \frac{n}{k} \cdot L \cdot E_{\text{DA}} \quad (10)$$

设簇头与 BS 距离为  $d_{\text{CHtoBS}}$ , 则簇头将数据包发送至 BS 消耗的能量  $E_4$  为:

$$E_4 = L \cdot E_{\text{elec}} + L \cdot \epsilon_{\text{fs}} \cdot d_{\text{CHtoBS}}^2 \quad (11)$$

每个分簇内消耗能量  $E$  是  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 、 $E_4$  总和, 则:

$$E = \left(2 \cdot \frac{n}{k} - 1\right) \cdot L \cdot E_{\text{elec}} + \frac{n}{k} \cdot L \cdot E_{\text{DA}} + L \cdot \epsilon_{\text{fs}} \cdot$$

$$\left(\sum_{i=1}^{\frac{n}{k}-1} d_{\text{toCH}_i}^2 + d_{\text{CHtoBS}}^2\right) \quad (12)$$

ICRAE 算法中近 BS 区域不分簇, 设节点均匀随机分布, 有  $(k-1)$  个分簇, 则未加入分簇的节点数量为  $n/k$ , 考虑  $d < d_0$  情况, 节点  $i$  与 BS 距离为  $d_{\text{toBS}_i}$ , 则节点  $i$  采集数据并发送至 BS 所消耗能量  $E'$  为:

$$E' = \frac{n}{k} \cdot L \cdot E_{\text{elec}} + L \cdot \epsilon_{\text{fs}} \cdot \sum_{i=1}^{\frac{n}{k}} d_{\text{toBS}_i}^2 \quad (13)$$

可见, 采用非完全分簇方式, 式 (13) 与 (12) 对比, 节省了能量。

### 2.6 ICRAE 算法流程图

ICRAE 算法的流程如图 5 所示。

## 3 仿真结果与分析

### 3.1 性能指标

本文通过 MATLAB 仿真软件来验证 ICRAE 算法的有效性及其优劣性, 对比 MTE、LEACH、ICRAE 三种算法如下性能指标。

1) 第一个节点死亡 (first node dead, FND) 时间, 也称稳定周期, 是指从网络开始工作到第一个节点死亡的时间段。当网络中出现节点死亡, 某些区域数据准确性将受影

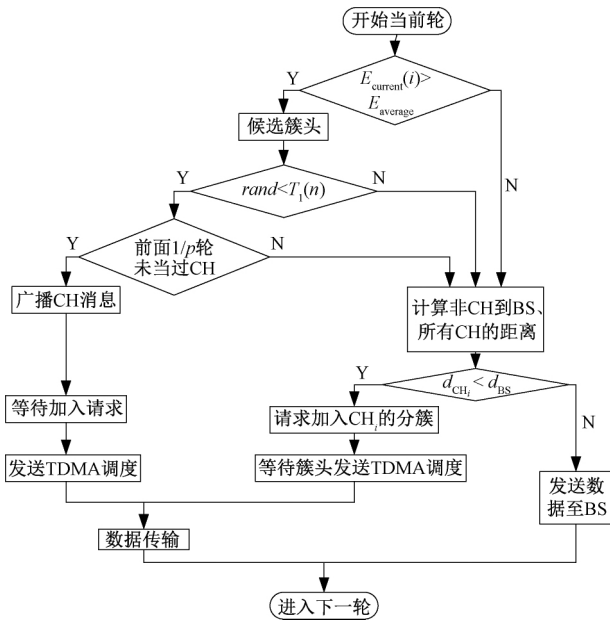


图 5 ICRAE 算法流程

响,稳定周期越长,网络稳定工作时间越长,性能越好。

2)网络 1/2 节点死亡(half node dead,HND)时间。

3)最后一个节点死亡(last node dead,LND)时间,也称网络生命周期,是指从网络开始工作到最后一个节点死亡的时间段。

4)稳定周期比例,是指网络稳定周期占网络生命周期的比例。稳定周期比例越长,网络稳定性越好。

5)数据传输量,是指向基站发送数据量的总和。

### 3.2 仿真场景与参数设置

假设网络仿真环境为  $M \times M$ , 基站位于网络区域正中央,随机部署  $n$  个节点,每个节点初始能量均为  $E_0$ 。节点分布如图 6 所示,△表示基站,○表示节点。

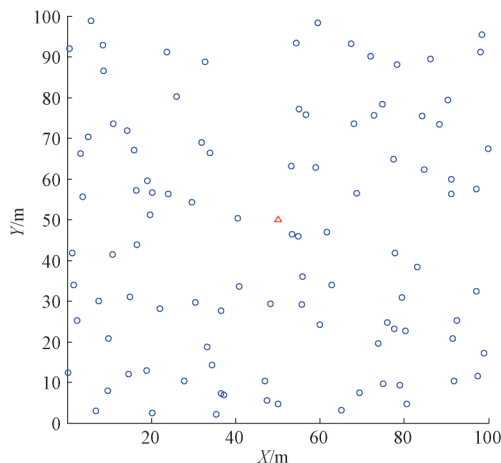


图 6 节点分布

网络中各仿真参数如表 1 所示。

表 1 网络基本参数

| 网络参数                         | 取值              |
|------------------------------|-----------------|
| 网络覆盖区域/m                     | (0,0)~(100,100) |
| 基站坐标/m                       | (50,50)         |
| 节点总数 $n$                     | 100             |
| 节点初始能量 $E_0$ /J              | 0.2             |
| 簇头节点比例 $p$                   | 0.1             |
| 数据包大小 $L$ /bit               | 4000            |
| $E_{elec}/(nJ/bit)$          | 50              |
| $E_{DA}/(nJ/bit)$            | 5               |
| $\epsilon_{fs}/(pJ/bit/m^2)$ | 10              |
| $\epsilon_{mp}/(pJ/bit/m^4)$ | 0.0013          |
| $d_0$ /m                     | 87.7            |

### 3.3 仿真结果分析

节点存活数随时间变化情况如图 7 所示。横坐标为网络仿真轮数,纵坐标为网络节点存活数量。与 MTE 协议相比,LEACH 和 ICRAE 算法的曲线趋势更陡峭,说明节点死亡时间更集中。

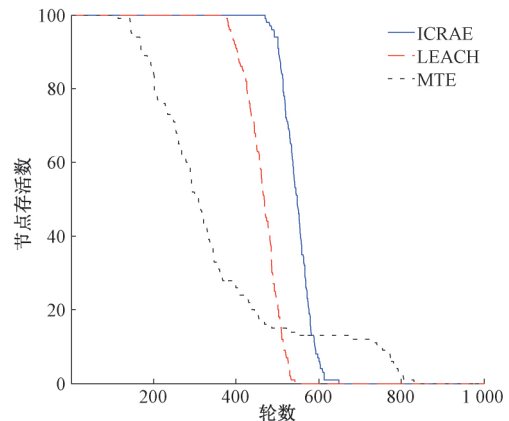


图 7 节点存活情况

FND、HND、LND 值如表 2 所示。在 MTE 协议中,FND 时间为 113 轮。LEACH 协议的 FND(稳定周期)时间为 363 轮,对比 MTE 协议提高了 221.24%。ICRAE 算法的 FND 时间为 470 轮,对比 MTE 协议提高了 315.93%,对比 LEACH 协议提高了 29.48%。

MTE 的 HND 时间为 308 轮。LEACH 协议的 HND 时间为 467 轮,对比 MTE 提高了 51.62%。ICRAE 算法的 HND 时间为 547 轮,对比 MTE 提高了 77.60%,对比 LEACH 协议提高了 17.13%。

MTE 的 LND 时间为 831 轮。LEACH 协议的 LND 时间为 542 轮,对比 MTE 降低了 34.78%。ICRAE 算法的 LND 时间为 648 轮,对比 LEACH 协议提高了 19.55%。

表 2 3 种算法性能对比

| 算法    | FND | HND | LND |
|-------|-----|-----|-----|
| MTE   | 113 | 308 | 831 |
| LEACH | 363 | 467 | 542 |
| ICRAE | 470 | 547 | 648 |

稳定周期占网络生命周期的比例如表 3 所示。MTE 网络生命周期最长,但稳定周期最短,稳定周期比例为 13.60%,3 种算法中比例最小,网络稳定性能差。LEACH 比例为 66.97%,比 MTE 提升了 53.37%。ICRAE 算法延长了网络稳定周期比例至 72.53%,网络稳定性能更优。

表 3 稳定周期占生命周期比例

| 算法    | 稳定周期占生命周期比例/% |
|-------|---------------|
| MTE   | 13.60         |
| LEACH | 66.97         |
| ICRAE | 72.53         |

向基站传输数据量如图 8 所示。MTE 传输量为 5 325 L, LEACH 传输量为 4 954 L。由于 LEACH 生命周期缩短了,对比 MTE,其传输量减少了 6.97%。ICRAE 传输量为 12 474 L,是 LEACH 的 2.52 倍。ICRAE 算法采用了非完全分簇,近 BS 区域的节点均直接向 BS 发送数据,因此数据量比其他两种协议更多。

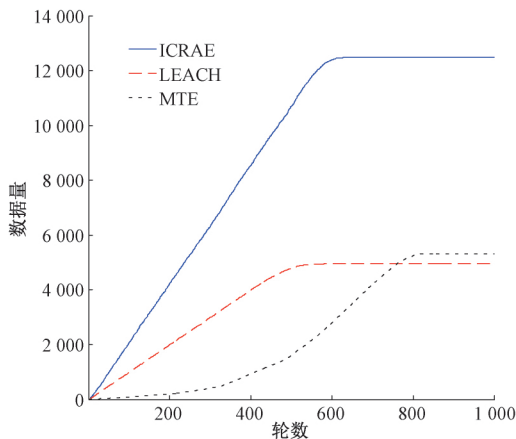


图 8 向基站传输数据量对比

#### 4 结 论

本文在 LEACH 算法基础上,提出了一种基于能量的非完全分簇路由算法 ICRAE。该算法利用基站能量优势,通过平面路由技术和分簇技术相结合,在不分簇区域,节点直接与 BS 通信,在分簇区域选取剩余能量大于平均值的节点当选簇头,使网络能耗更加均衡。仿真结果表明,改进后的算法在延长稳定周期及其比例、降低传输能耗、均衡网络负载等方面具有一定优越性。下一步主要对无线传感器

网络的非分簇区域与分簇区域内非均匀分簇方案进行综合研究,包括非均匀分簇半径与 BS 距离、能量消耗的关系,进一步改善无线传感器网络的性能。

#### 参考文献

- [1] FANIAN F, RAFSANJANI M K. Cluster-based routing protocols in wireless sensor networks; a survey based on methodology[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2019, 142(15): 111-142.
- [2] 唐延枝. 基于能耗优化的无线传感器网络路由协议的研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2020.
- [3] CURRY R M, SMITH J C. A survey of optimization algorithms for wireless sensor network lifetime maximization[J]. Computers & Industrial Engineering, 2016(101): 145-166.
- [4] 李姿景, 乐丽琴. 提高寿命周期的节能传感器网络设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(7): 115-121.
- [5] 汪全涛, 李珂, 胡斌, 等. 线性 WSNs 能耗均衡的非均匀网络部署方案[J]. 电子测量技术, 2019, 42(10): 73-77.
- [6] ARORA V K, SHARMA V, SACHDEVA M. A survey on LEACH and other's routing protocols in wireless sensor network[J]. Optik, 2016, 127(16): 6590-6600.
- [7] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [8] 赵亮, 兰智高, 熊志利. 基于 LEACH 的无线传感器网络簇首选取改进算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(12): 86-93.
- [9] 刘晶, 苏守宝. 一种簇半径可变的无线传感器网络分簇算法[J]. 电子测量技术, 2018, 41(2): 6-9.
- [10] 余修武, 胡沐芳, 刘琴, 等. 基于蜂窝虚拟网格的 WSN 混合多跳分簇路由算法[J]. 传感技术学报, 2018, 31(10): 1573-1577.
- [11] 胡源, 牛玉刚, 邹媛媛. 基于区域划分的 WSN 非均匀多跳分簇路由算法[J]. 控制与决策, 2017, 32(9): 1695-1700.
- [12] 毕帅帅, 王黎明, 钱钢, 等. 基于分簇技术的水下声传感器网络的数据汇聚研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(12): 56-59.
- [13] 赵东方, 施伟斌, 罗力源, 等. 基于路由树的分布式自适应动态多跳分簇路由协议[J]. 电子测量技术, 2020, 43(2): 148-152.
- [14] 李研, 黄辰辰, 严锡君. 基于无线传感器网络的粮库监测系统[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(4): 54-58.
- [15] 吴文平. WSN 路由协议“热点”问题的分析与研究[J]. 阴山学刊(自然科学版), 2017, 31(3): 49-51.

#### 作者简介

伍敏君, 工学硕士, 讲师, 主要研究方向为无线传感器网络技术、计算机应用技术。

E-mail: magieng\_zstp@163.com