



# WSN 中基于多因素的能量优化分簇路由算法

田纪尧, 刘广钟

(上海海事大学 信息工程学院, 上海 201306)

**摘要:** 无线传感器网络中的节点存在电源能量有限的问题, 极大地影响了网络节点使用寿命。为此, 提出一种基于多因素的能量优化分簇路由算法。通过模糊规则算法并结合节点的相对剩余能量、相对中心度、相对密度选出最优簇首, 引入泰尔指数用于改进蚁群算法的概率函数。在此基础上, 综合考虑节点能耗与通信链路质量建立线性规划模型。仿真结果表明, 与 CFEL、LEACH 等算法相比, 该算法能够延长网络生命周期, 降低网络能量消耗, 提高网络负载均衡能力。

**关键词:** 无线传感器网络; 模糊规则; 蚁群算法; 泰尔指数; 负载均衡

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式: 田纪尧, 刘广钟. WSN 中基于多因素的能量优化分簇路由算法[J]. 计算机工程, 2020, 46(1): 179-186.  
英文引用格式: TIAN Jiyao, LIU Guangzhong. Energy-optimized clustering routing algorithm based on multi-factors in WSN[J]. Computer Engineering, 2020, 46(1): 179-186.

## Energy-Optimized Clustering Routing Algorithm Based on Multi-Factors in WSN

TIAN Jiyao, LIU Guangzhong

(School of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**[Abstract]** In Wireless Sensor Network (WSN), the network nodes only have limited power energy, which greatly affects their service life. Therefore, this paper proposes an energy-optimized clustering routing algorithm based on multiple. First, the optimal cluster head is selected based on fuzzy rule algorithm and the combination of the relative residual energy, the relative centrality and the relative density of nodes. Then, this paper introduces the Theil index to improve the probability function of the ant colony algorithm. On this basis, this paper establishes a linear planning model with a comprehensive consideration of node energy consumption and the quality of communication link. Simulation results show that compared with CFEL, LEACH algorithms, the proposed algorithm can extend network life circle, reduce energy consumption and improve load balancing.

**[Key words]** Wireless Sensor Network (WSN); fuzzy rule; ant colony algorithm; Theil index; loading balancing

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0053514

### 0 概述

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是一种分布式传感网络,其由微小、能量有限的传感器组成,主要应用于环境监测、军事、航空、工业、商业等领域<sup>[1]</sup>。目前基于分簇的分层路由已经被证明是提高网络能量利用效率最有效的技术之一<sup>[2]</sup>。通过分簇,普通节点收集信息,簇头对信息融合整理进而传输至基站。传统的 LEACH<sup>[3]</sup>协议采用“随机选取簇首,单跳传输至基站”的机制。由于簇首的选取带

有一定随机性,簇首任务繁重,较其他的节点要消耗更多的能量,这样会加快低能量节点的死亡。同时,在簇间路由阶段,簇首选择单跳方式直接与基站通信,导致距离较远的节点由于长距离传输而增加传输能耗,也会加快节点死亡。因此,无线传感器网络研究的主要目标是最小化能量消耗并延长网络寿命<sup>[4]</sup>。

模糊算法在无需建立数学建模基础上<sup>[5]</sup>,对多个因素综合评价得出优先级,并以传统的蚁群优化(Ant Colony Optimization, ACO)<sup>[6]</sup>算法作为路由选择的基础。由此,本文提出一种基于多因素的能量

基金项目:国家自然科学基金(61202370);上海市教委科研创新项目(14YZ110);中国博士后科学基金(2014M561512)。

作者简介:田纪尧(1994—),男,硕士研究生,主研方向为分布式计算、无线传感器网络;刘广钟,教授、博士。

收稿日期:2018-12-28 修回日期:2019-03-15 E-mail:767178770@qq.com

优化分簇路由算法,利用模糊理论推选出最优簇首,引入泰尔指数改进蚁群算法的转移概率函数,并在信息素更新过程中建立多因素线性规划模型提高能量优化率,以延长整个网络生命周期。

## 1 相关工作

针对 LEACH 分簇协议存在的不足,研究人员提出多种关于改进的分层路由协议。文献[7]提出 LEACH-C 协议,通过基站记录所有节点的位置和能量状况,依据数据信息求出网络整体的能量剩余状态,然而每个节点需要与基站通信,簇首的选取过程采取集中式,由基站负责挑选簇首,从而增大整个网络的能量消耗,并不适用大规模网络。文献[8]提出 EEUC 协议,该协议通过节点与基站之间不同距离划分为规模的簇,然而在该协议的设计过程中并未将节点的剩余能量考虑其中,极易出现在后续轮的簇首推选中,使能量较低的节点成为簇首。文献[9]为延长网络生命周期提出了 REAC-IN 协议,然而结合节点剩余能量和区域平均能量确定簇首的方式极易造成距离基站远的节点承担巨大的运输任务。文献[10]以聚类方式按照节点之间的位置分为不同区域,以节点剩余能量确定区域之间的距离,但个别节点剩余能量较多,无法实现传输能量动态平衡。文献[11]提出的 BEERA 协议改进 LEACH 阈值和最优半径选择簇头,以跳数确定簇间路由,然而跳数小的 2 个簇头之间会一直担任转发任务,降低了网络负载均衡性能。

近年来,众多学者将模糊理论和蚁群算法应用于分簇路由协议。文献[12-13]的 2 种协议采用模糊理论,基于距离和能量 2 个要素推选簇首,摒弃随机概率选择簇首,较 LEACH 相比有效延长了网络寿命。CHBFT<sup>[14]</sup>虽采用模糊规则算法推选簇头,然而在簇间路由确定中仅限于小规模网络。文献[15]对基于 ACO 的分簇路由协议进行了全面审查,提到以能量为基础的 BABR、EEABR、ACO-QoS 等和以位置为基础的 ASTRL、UMM、ODTS 等均未综合考虑节点之间的相对距离和剩余能量,以致簇首能量消耗过快,从而缩减网络整体生命周期。文献[16]提出一种基于蚁群的新路由算法,考虑节点之间的通信距离、剩余能量,利用蚁群算法寻找到最优路径,此过程未考虑信息素更新带来的局部消耗过快问题。文献[17]提出 CFEL 协议,该协议应用模糊规则并基于距离和能量 2 个要素推选合适的簇首。该协议要求每个节点配置 GPS,但未考虑节点密度这个变量,一方面增加了节点的整体开销,另一方面选取簇首中密度较大的簇可能会造成消耗能量快,同时,其对簇间路由阶段没有进行改进,不利于提高网络利用率。

本文提出一种基于多因素的能量优化分簇路由算法。该算法通过将模糊理论和蚁群优化相结合选取最优簇首和簇间路由,从而加强簇首选举质量,提高负载均衡性能。

## 2 系统模型

### 2.1 网络模型

本文算法采用与文献[18]类似的网络模型, MFEO 协议对无线传感器网络作出以下假设:

- 1) 区域内的所有节点随机分布在检测区域内,所有节点初始能量相同且基站能量无限。
- 2) 节点数为 100,检测区域面积为 100 m × 100 m。
- 3) 节点没有配备 GPS 天线,因此它们无法感知位置信息,相反可以基于接收信号强度来计算节点之间的近似距离。
- 4) 所有节点具有相同属性和性能,既可以担任普通节点,也可以担任簇首,簇首节点会进行数据融合去除冗余。

### 2.2 能量模型

本文使用与经典 LEACH 协议相同的一阶无线电模型<sup>[19]</sup>,根据发送点与接收点之间的距离采用自由空间和多路径衰减模型,无线电模型如图 1 所示。

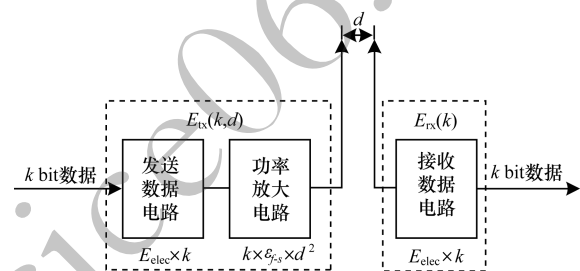


图 1 无线电模型

Fig. 1 Radio model

节点将  $k$  bit 数据发送到距离为  $d$  的节点消耗能量为:

$$E_{tx}(k, d) = \begin{cases} k \times E_{elec} + k \times \epsilon_{fs} \times d^2, & d < d' \\ k \times E_{elec} + k \times \epsilon_{m-p} \times d^4, & d \geq d' \end{cases} \quad (1)$$

节点接收  $k$  bit 数据消耗的能量为:

$$E_{rx}(k) = k \times E_{elec} \quad (2)$$

由式(1)可知:

$$d' = \sqrt{\epsilon_{fs} / \epsilon_{m-p}} \quad (3)$$

其中,  $E_{elec}$  为节点发送或接收 1 bit 数据所消耗的能量,  $\epsilon_{fs}$  与  $\epsilon_{m-p}$  分别为自由空间模型和多路径衰减模型中功率放大的能量损耗,单位分别为  $J/(\text{bit} \cdot \text{m}^2)$  和  $J/(\text{bit} \cdot \text{m}^4)$ ,  $d$  为两节点之间距离,  $d'$  为传输距离阈值,当消息传输距离小于  $d'$  时采用自由空间模型,否则使用多径衰落模型。

## 3 算法描述

本文算法每轮分为分簇阶段和数据传输阶段。在分簇阶段,一方面完成网络分簇,另一方面选出簇

首。通过改进的模糊规则算法,综合考虑节点因素推选出合适的簇首,在每个簇中只有一个簇首,完成数据收集、转发和数据融合去除冗余传至基站。在数据传输过程中,传统意义的“蚁群算法”设计中缺少能耗与通信质量均衡,通过对蚁群算法中的概率转移模型进行优化并且在信息素更新过程中建立能量消耗与通信质量线性规划,从而优化全局信息素的更新。

### 3.1 网络分簇

采用非均匀分簇方式将网络分为大小不同的区域,首先选出部分节点作为候选节点,存储于集合  $TC(i)$ ,其次基站通过给定的功率向所有的节点发送广播,按照式(4)中的能量竞争半径分簇<sup>[20]</sup>。

$$R(i) = \left( c_1 \times \frac{E_{ini} - E_{res}(i)}{E_{ini}} + c_2 \times \frac{d(i, B_{BS}) - d_{min}}{d_{max} - d_{min}} \right) \times R_c \quad (4)$$

$$c_1 + c_2 = 1$$

其中,  $E_{ini}$  为节点初始能量,  $E_{res}$  为节点剩余能量,  $c_1$ 、 $c_2$  为控制取值参数 ( $c_1, c_2 > 0, c_1, c_2 < 1$ ), 与节点到基站的距离成递减关系,  $n$  为节点所在簇内节点总数,  $d_{max}$  和  $d_{min}$  分别为节点到基站的极大值与最小值,  $d(i, B_{BS})$  为节点到基站的距离, 每个节点可以根据 RSSI 计算出自己与基站之间的距离,  $R_c = \sqrt{2} \times \sqrt{E_{elec}/\epsilon_{fs}}$  为节点的最大竞争半径。

### 3.2 簇首选取

模糊控制器通过使用模糊思维对建立的数学模型进行控制,其结构包括模糊变量输入、建立隶属度函数、模糊规则表和解模糊过程<sup>[21]</sup>。MFE0 算法在簇头选取阶段以候选节点的相对剩余能量、相对中心度、节点所在簇相对密度 3 个变量作为输入变量,通过变量模糊化、模糊规则制定、解模糊化,得到一个机会变量,从而推出最优簇头。

#### 3.2.1 模糊变量的确定

确定模糊变量主要有以下 3 点:

##### 1) 相对剩余能量

节点的相剩余能量是指候选节点  $T_{TC(i)}$  的剩余能量和所在簇中的所有节点平均剩余能量之比。在网络的运行过程中,能量作为网络生命周期持续运行的基本条件,只有相对剩余能量较多,成为簇首的可能性更大,则相对剩余能量为:

$$R_{RE}(T_{TC(i)}) = \frac{E_{residual}(T_{TC(i)})}{\sum_{j=1}^n E_{residual}(T_{TC(j)})/n} \quad (5)$$

其中,  $E_{residual}(T_{TC(i)})$  表示当前候选节点剩余能量,  $\sum_{j=1}^n E_{residual}(T_{TC(j)})/n$  表示当前候选节点所在簇内各候选节点平均剩余能量,  $n$  表示当前簇所有候选节点数目。

##### 2) 相对中心度

节点的相对中心度计算公式为<sup>[22]</sup>:

$$D(X) = \left( \left( x_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \right)^2 + \left( y_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

其中,  $x_i$  和  $y_i$  代表候选节点  $i$  的横坐标和纵坐标。

候选节点的相对中心度是指节点与其邻居节点的紧密程度,紧密程度越高,节点之间通信距离越短,消耗的能量越少,则相对中心度为:

$$R_{RD} = \frac{D(X) - D_{min}}{D_{max} - D_{min}} \quad (7)$$

其中,  $D(X)$  为当前候选节点的中心度,  $D_{max}$  和  $D_{min}$  分别代表所在簇内最大、最小中心度。

##### 3) 相对密度

节点密度是指在一定的通信范围内节点附近密集程度(具体而言是指一个节点在信息交流范围内节点的数目),节点密度计算公式为:

$$C_{CD} = \frac{Sum(T_{TC(i)})}{R_{max}^{RD} - R_{min}^{RD}} \quad (8)$$

其中,  $Sum(i)$  为当前候选节点  $i$  通信范围内的邻居数目,  $R_{RD}$  代表式(7)中的相对中心度。

针对一个簇内的候选节点,簇头担任的任务是将各节点收集到的数据进行融合进而转发至基站,若邻居多的节点,其任务工作量更加艰巨,因而考虑相对密度这一变量,如式(9)所示。

$$R_{RCD}(T_{TC(i)}) = \frac{C_{CD}(T_{TC(i)})}{C_{max}^{CD} - C_{min}^{CD}} \quad (9)$$

其中,  $C_{max}^{CD}$  和  $C_{min}^{CD}$  分别代表候选节点所在簇内最大密度和最小密度。

从式(5)、式(7)、式(9)可知,在簇首选取过程中,综合考虑节点的剩余能量、中心度、密度 3 个因素,候选节点的相对剩余能量越大,与邻居节点越紧密以及密度越大,成为簇首的可能也越大。下文将对 3 个模糊变量模糊化,即建立隶属度函数和模糊规则库。

#### 3.2.2 模糊变量的模糊化

模糊规则控制即通过输入精确值,模糊处理综合多个指标进行分析,最后经过解模糊过程输出精确值。候选节点相对剩余能量、相对中心度、相对密度 3 个变量作为模糊输入值,机会变量作为输出变量。中间的模糊化过程包括建立隶属度函数和模糊规则库。

在建立隶属度函数过程中,通过输入变量和输出变量确定参数及等级,如表 1 所示。

表 1 隶属度函数参数及等级

Table 1 Parameters and levels membership function

相对剩余能量	相对中心度	相对密度
少	近	稀疏
适中	中等	均匀
多	远	稠密

隶属度函数的确定带有一定的主观性,需要参考一定的经验。相对剩余能量采取梯形隶属度函数;相对中心度和相对密度采用梯形隶属度函数和高斯隶属函数,如图 2 所示。

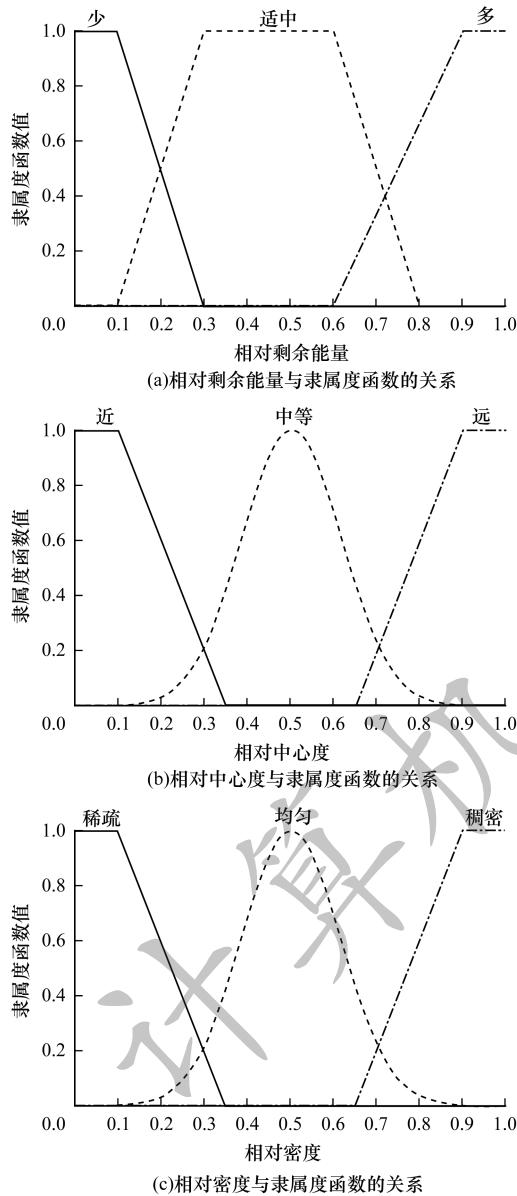


图 2 变量隶属度函数的输入

Fig. 2 Input of variable membership function

3 个变量作为输入值进行模糊运算,通过模糊规则将输出变量即机会变量 Chance 分为 7 个等级,如图 3 所示。

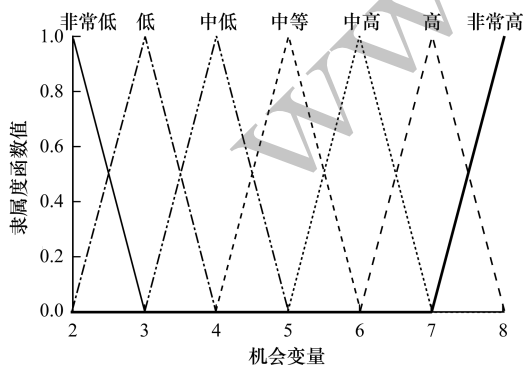


图 3 机会变量隶属度函数的输出

Fig. 3 Output of the membership function of the chance variable

模糊规则的制定基于 3 条输入变量,共有  $3 \times 3 \times 3 = 27$  条规则。MFEO 算法采用“IF-THEN”规则,即 IF  $X, Y, Z$ , THEN  $C$ ,其中,  $X$  代表相对剩余能量模糊集合,  $Y$  代表相对中心度模糊集合,  $Z$  代表相对密度模糊集合,  $C$  代表机会变量对应的模糊集合。如对于簇内的每个节点,相对剩余能量越多,相对中心度越紧密以及相对密度越大,则成为簇头的机会更大。模糊规则如表 2 所示,其中括号中数字为节点数。

表 2 模糊规则  
Table 2 Fuzzy rules

相对剩余能量	相对中心度	相对密度	机会变量
少(1)	近(1)	稀疏(1)	2
少(1)	近(1)	均匀(2)	3
少(1)	近(1)	稠密(3)	4
少(1)	中等(2)	稀疏(1)	3
少(1)	中等(2)	均匀(2)	4
少(1)	中等(2)	稠密(3)	5
少(1)	远(3)	稀疏(1)	4
少(1)	远(3)	均匀(2)	5
少(1)	远(3)	稠密(3)	6
适中(2)	近(1)	稀疏(1)	3
适中(2)	近(1)	均匀(2)	4
适中(2)	近(1)	稠密(3)	5
适中(2)	中等(2)	稀疏(1)	4
适中(2)	中等(2)	均匀(2)	5
适中(2)	中等(2)	稠密(3)	6
适中(2)	远(3)	稀疏(1)	5
适中(2)	远(3)	均匀(2)	6
适中(2)	远(3)	稠密(3)	7
多(3)	近(1)	稀疏(1)	4
多(3)	近(1)	均匀(2)	5
多(3)	近(1)	稠密(3)	6
多(3)	中等(2)	稀疏(1)	5
多(3)	中等(2)	均匀(2)	6
多(3)	中等(2)	稠密(3)	7
多(3)	远(3)	稀疏(1)	6
多(3)	远(3)	均匀(2)	7
多(3)	远(3)	稠密(3)	8

### 3.2.3 解模糊化

解模糊化的过程则是把经过模糊规则处理的数据通过一定方法转变成具体的数值,MFEO 算法采用式(10)提出的重心法 COG(Centre of Gravity)<sup>[23]</sup>,计算公式如下:

$$C_{\text{COG}} = \frac{\int z(x) \cdot x \, dx}{\int z(x) \, dx} \quad (10)$$

重心法为每一个节点求出一个确定的数值,数值的大小说明了簇首当选的优先级,则通过综合考虑节点的剩余能量、邻居节点的紧密程度及相对密

度,从而确定最优簇首。此时,在通信半径  $d$  范围内,最佳的簇头选取完毕并存储于集合  $CH(i)$  中,范围内的其他节点自动转为普通节点。之后,簇首进行发送广播,普通节点收到广播后选择最近范围内的簇首发送请求入簇请求,簇首收到广播后将请求的节点加入到自己的邻居表中,随后向簇中的成员发送确认消息并分配 TDMA 时隙,簇头则会通过计算自己的时隙大小,根据其时隙的数值大小向簇首发送数据。

### 3.3 簇间路由

在分簇完成后,选择合适的簇间路由是数据传输阶段的关键。为实现能量消耗的均衡,提高网络数据传输的有效性,采用蚁群算法作为路由选择的基础,引入经济学中的泰尔指数综合考虑剩余能量与簇首间的距离,进而优化转移概率模型,并且在信息素更新过程中引入能耗因子建立多因素线性规划模型。

#### 3.3.1 蚁群算法转移概率函数的优化

基于传统的转移概率函数,数据包传输过程假设为“蚂蚁”寻径过程, $t$ 时刻蚂蚁  $k$  从节点  $m$  选择下一跳为  $n$  的概率函数为:

$$P_{m,n}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{m,n}^\alpha \times \eta_{m,n}^\beta}{\sum_{q \in M_i} \tau_{m,q}^\alpha \times \eta_{m,q}^\beta}, & q \in M_i \\ 0, & q \notin M_i \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\tau_{mn}$ 为路径 $(m,n)$ 上的信息素, $m$ 和 $n$ 分别代表2个簇首,初始信息素为 $\tau_0$ ,存储在簇首的路由表中, $\eta_{m,n}$ 为局部启发因素, $\alpha$ 和 $\beta$ 分别为信息素权重、启发因子权重, $q$ 代表下一跳的节点, $M_i$ 代表下一跳集合。“蚂蚁”可以根据信息素及局部的启发因素确定下一跳。

经济学中的泰尔指数是一种度量个人或社会人均经济分配不均的方法,计算公式如式(12)所示。

$$C_n = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{X} \log_a \frac{\frac{x_i}{X}}{\frac{p_i}{P}} \quad (12)$$

其中, $x_i$ 、 $p_i$ 分别代表第 $i$ 个样本单位指标值和人口, $X$ 、 $P$ 分别代表总体样本单位的指标值和人口综合<sup>[24]</sup>。簇首选择下一跳过程中需要考虑多种因素,簇内节点将数据传输至簇首时,簇首的剩余能量不均以及各簇首之间相对距离不同,从而簇间路由的确定涉及到多因素不均的情形。因此,将泰尔指数引入到簇间路由确定过程中,即:

$$C_{i,j} = \sum_{j \in M_i} \frac{E_{res}(j)}{E_{res}} \log_a \frac{\frac{E_{res}(j)}{E_{res}}}{\frac{d(i,j)}{d_{max}}} \quad (13)$$

$$d(i,j) = [(x_1^i - x_1^j)^2 + (x_2^i - x_2^j)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

其中, $d(i,j)$ 代表2个簇首之间的 Euclid 距离, $d_{max}$ 表示2个簇首之间最大的距离, $E_{res}$ 为候选簇首剩余能量, $\overline{E_{res}}$ 为候选簇首节点平均剩余能量。下一跳剩余能量越多并且距离当前簇首距离越近,则信息素的浓度较高,从而被选的概率增大,基于上述分析,将式(13)带入式(11)中,从而 $t$ 时刻蚂蚁 $k$ 从簇首 $m$ 选择簇首 $n$ 的概率函数为:

$$P_{m,n}^k(t) = \frac{\tau_{m,n}^\alpha \times [C_{m,n}]^\beta}{\sum_{q \in M_i} \tau_{m,q}^\alpha \times [C_{m,q}]^\beta}, q \in M_i \quad (15)$$

在新的转移概率函数中,优化局部启发因素,综合考虑簇首的剩余能量与相对距离,防止在下一跳簇首选取过程中存在选择的节点剩余能量高且相对距离远的情况,进而选择下一跳更具有针对性。最后选取的簇首按照概率大小依次存入集合 $M_{next}$ 。

$$M_{next} = \operatorname{argmax}(P_{m,q}), \forall q \in M_i \quad (16)$$

#### 3.3.2 信息素更新

前向蚂蚁从初始地到目的地后,后向蚂蚁完成信息素的更新。由于“正反馈”的特性,最短路径上的信息素含量会升高,导致会有更多的蚂蚁通过此路径,这样带来的结果使得该路径的能量不断地被消耗,加速该路径上的节点快速死亡。此外,由于非最优路径上的信息素会随时间不断挥发,最初找到的最佳路径不再是需要的“合适路径”。因而,在信息素更新过程中,为提高全局路径的利用性,信息素更新采用局部和全局相互结合的规则。

局部更新公式为:

$$\tau_{m,n}^k(t+1) = (1-\rho)\tau_{m,n}^k(t) + \Delta\tau_{m,n}^k(t) \quad (17)$$

其中, $\rho$ 表示挥发因子且 $\rho \in [0 \sim 1]$ , $(1-\rho)$ 表示持久性因子, $\Delta\tau_{m,n}^k(t)$ 为信息素增量。

为防止信息素更新过程中出现局部更新滞留或者全局更新挥发过快的情况,综合网络能量和通信距离建立一个线性规划模型,提高整体网络的通信效率。路径的通信能量取决于簇首与下一跳的相对能量值,通信距离则需要当前节点与下一跳之间的相对距离值表示,为两者建立的线性规划问题如式(18)所示。

$$c_{m,n}^k = \alpha \times \frac{d(m,n)}{d_{max}} + \beta \times \frac{E_0 - E_{res}(n)}{E_0} \quad (18)$$

$$\alpha + \beta = 1, m, n \in M_i$$

其中, $c_{m,n}^k$ 表示蚂蚁 $k$ 从当前簇首 $m$ 与下一跳簇首 $n$ 之间的能耗参数, $\frac{d(m,n)}{d_{max}}$ 表示当前2个簇首之间的相对距离, $\frac{E_0 - E_{res}(n)}{E_0}$ 表示下一跳的能量相对值, $\alpha$ 、 $\beta \in [0,1]$ 为平衡因子,此能耗参数通过 $\alpha$ 、 $\beta$ 2个参数平衡能量与距离之间的关系,如当相对能量值较小时,提高 $\alpha$ 相对值。

当一次迭代后所有的蚂蚁到达目的地,将式(18)引入其中,进行全局信息素更新。

$$\Delta\tau_{m,n}^k(t) = \frac{Q_k \times ct_{m,n}^k}{L^k} \quad (19)$$

其中,  $Q^k$  为蚂蚁  $k$  释放的信息素浓度,  $L^k$  为蚂蚁  $k$  从目的地到终点所记录的最佳路径。

通过上述公式可知,在信息素更新过程中,综合考虑簇首之间的相对能量值及距离问题,同时采用局部和全局更新方式,可有效保持信息素更新的动态平衡。

### 3.4 复杂度分析

时间复杂度是衡量算法计算量的标准,本节主要分析 MFEO 算法的时间复杂度。MFEO 算法将整个分簇路由协议分为 2 个阶段:利用模糊算法进行簇首的选举与优化蚁群算法的转移概率函数,完成簇间路由的确定。2 个阶段的伪代码如下:

#### 伪代码 1 簇首选举过程

```

Begin
1. For i = 1 to S(i)
2. Sink node broadcast to each node i with a given power
3. Calculate the R(i) based on 式(1)
4. End For
5. For i = 1 to TC(i)
6. Launch fuzzy logic to calculate RE( TC ), RD, RCD
based on 式(5)、式(7)、式(9)
7. Output Chance variable for each TC(i)
8. End For
9. Select Cluster Headers saved in CH(i)
10. For i = 1 to CH(i)
11. Each Cluster Header sends message to ordinary nodes
in R(i)
12. Sensor nodes join cluster and allocate the TDMA
13. End For
End

```

#### 伪代码 2 簇间路由过程

```

Begin
1. For each Cluserter Header in CH(i)
2. Compute  $p_{m,n}(t)$  based on 式(15)
3. Stored by probability in  $M_{next}(i)$ 
4. End For
5. While ( $M_{next}(i) \neq \emptyset$ )
6. Update pheromone based on 式(19)
7. Each Cluster Header establish inter-cluster routing
dynamically based on 式(18)
8. End While
End

```

在第 1 阶段中,核心部分为第 5 步~第 12 步。初始化阶段基站发布消息通过 RSSI 测出每个节点到基站的距离。假设参与簇首竞选的有  $N_{NT}$  个,通过模糊算法有  $M$  个候选簇首竞选成功,簇首发布  $M$  条广播,通信半径内其他  $N - M$  个节点自动转为普通节点,发布入簇的消息,从而分簇阶段完成。在第 2 阶段中, $M$  个簇首通过蚁群算法发布  $M$  条消息,按照转移概率大小进行排序,进而建立  $M$  条簇间路由,因此,整个网络复杂度为: $O(N) = 1 + N_{NT} + M + N - M + M = (T + 1)N + M + 1$ 。

## 4 仿真结果与分析

### 4.1 参数设置

采用 Matlab 平台对本文提出的 MFEO 和已有的 LEACH、CFEL 算法进行仿真。仿真环境是在一个长和宽为 100 m 的正方形区域内随机部署 100 个无线传感器节点。部分参数如表 3 所示,无线传感器网络节点部署仿真模型如图 4 所示。

表 3 部分仿真参数

Table 3 Part of simulation parameters

参数	数值
网络节点数	100
网路范围/m <sup>2</sup>	(0,0) ~ (100,100)
基站位置	(50,50)
初始能量/J	0.5
$E_{elec}/(nJ \cdot bit^{-1})$	50
$\epsilon_{fs}/(pJ \cdot bit^{-1} \cdot m^{-2})$	10
$\epsilon_{m-p}/(pJ \cdot bit^{-1} \cdot m^{-4})$	0.001 3
信息素比重 $\alpha$	3
启发值比重 $\beta$	6
挥发率 $\rho$	0.8

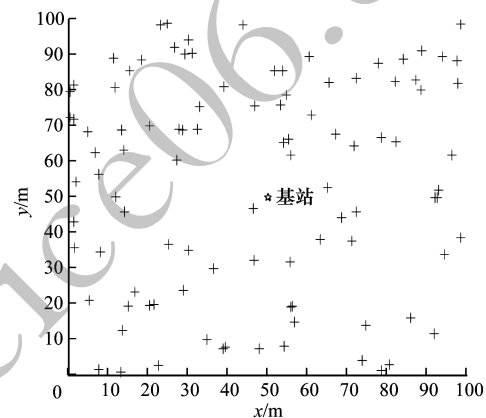


图 4 无线传感器节点部署示意图

Fig. 4 Wireless sensor node deployment

### 4.2 仿真性能指标分析

MFEO 算法在簇首选取阶段采用模糊规则算法,以“轮”为基础,与 CFEL 算法相比加入“相对密度”要素,与 LEACH 相比未采用随机概率选取簇首,以提高簇首选择的针对性;在簇间路由阶段,采用优化的蚁群算法,同时考虑簇首能量与相对距离,此外,建立线性规划问题,加强“信息素”更新过程,提高下一跳选择的针对性。实验分别从网络生命周期、网络能耗、网络的负载均衡 3 个方面进行讨论分析。

#### 4.2.1 网络生命周期

图 5 是 MFEO 与 CFEL、LEACH 算法在死亡节点数目的对比曲线。实验以 4 000 轮为基础,死亡节点数是网络生命周期的体现,死亡节点越少,则网络的生命周期则越长。从图 5 可知,3 种算法出现死亡节点区间轮数分别为 [1 500, 1 800]、[1 800, 2 000]、

[2 500,3 000]。由于 MFEO 在簇首选取阶段,综合“相对能量”“相对中心度”“相对密度”3 个要素。在距离普通节点远、处于稀疏的情况下提高簇首选取的高效性,所以节点相对剩余能量多、邻居节点多、彼此之间相对距离近的节点更有可能成为簇首。同时,在簇间路由阶段,对蚁群算法中的转移概率函数进行优化,在选择下一跳过程中,不仅考虑相对剩余能量,同时考虑簇首之间的相对距离,从而提高了选择下一跳的合理性。因此,MFEO 在能量的消耗方面较 CFEL、LEACH 算法有所提高,从而延长了整个网络的生命周期。

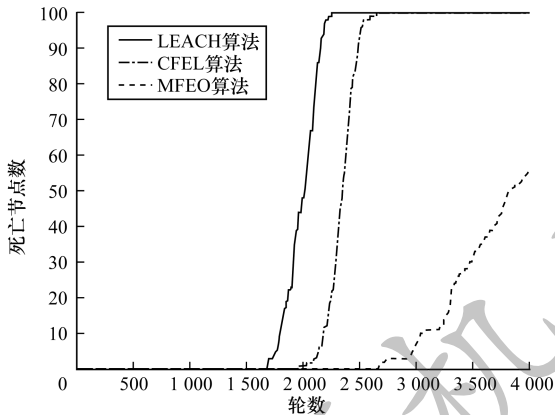


图 5 LEACH、CFEL、MFEO 3 种算法死亡节点数对比

Fig. 5 Comparison of the dead nodes number of LEACH, CFEL, MFEO algorithms

#### 4.2.2 网络能耗

维持无线传感器网络中的节点寿命主要是节点能量,因此,节点剩余能量越多,整个网络维持的时间越久。图 6 是 MFEO 与 CFEL、LEACH 三者的节点剩余能量对比。从图 6 可知,在整个网络的运行过程中,MFEO 在同一轮中与 CFEL、LEACH 相比,剩余能量较多,说明 MFEO 明显降低了能量的消耗。这得益于在选取簇首过程中综合考虑了多种因素,因而选出的簇首更具有合理性,其次在数据传输过程中,普通节点将数据传输至所在簇的簇首后,优化搜索最佳路径方式,减少了网络传输中能量消耗。

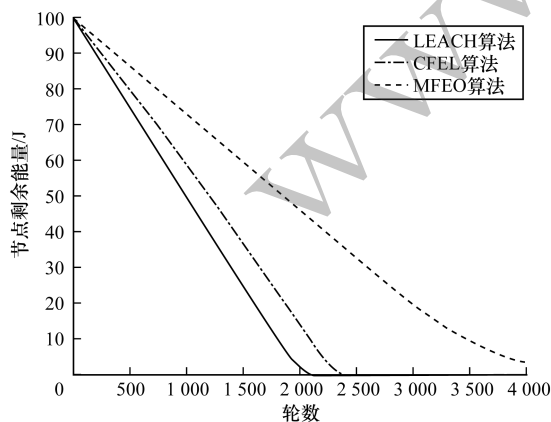


图 6 LEACH、CFEL、MFEO 3 种算法节点剩余能量对比

Fig. 6 Comparison of the remaining energy of nodes of LEACH, CFEL, MFEO algorithm

#### 4.2.3 网络负载均衡

图 7 为 MFEO 与 CFEL、LEACH 算法节点平均方差对比。在初始的运行过程中,三者具有相同的走向,MFEO 与 CFEL、LEACH 相比,出现波峰的时间较晚,并且数值大于后者,从而说明了 MFEO 提高了负载均衡能力。这主要是由于在簇首路由建立过程中,不仅要考虑数据的传输,同时综合考虑数据传输过程中通信质量与能量消耗的均衡,为两者建立线性规划,从而减少数据传输造成的节点能耗不均的问题。

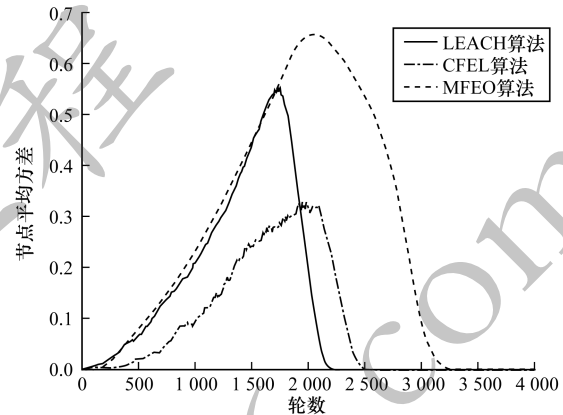


图 7 MFEO、CFEL、LEACH 3 种算法节点平均方差对比

Fig. 7 Comparison of the average variance of MFEO, CFEL, LEACH algorithms

## 5 结束语

为降低 WSN 中的能量消耗、延长网络的生命周期,本文提出一种基于多因素的能量优化分簇路由算法(MFEO)。综合相对剩余能量、相对中心度、相对密度 3 个变量,利用模糊规则算法选出最优簇首,引入经济学中的泰尔系数改进概率转移函数模型,优化信息素的更新过程,同时建立通信质量与能量消耗线性规划模型,以选择簇首之间的最佳路径。仿真结果表明,与 CFEL、LEACH 算法相比,MFEO 算法能明显提高网络生命周期并降低能量消耗。

### 参考文献

- [1] YICK J, MUKHERJEE B, GHOSAL D. Wireless sensor network survey[J]. Computer Networks, 2008, 52(12): 2292-2330.
- [2] KUMAR R, KUMAR D. Hybrid swarm intelligence energy efficient clustered routing algorithm for wireless sensor networks[J]. Journal of Sensors, 2016(3): 1-19.
- [3] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]//Proceedings of IEEE HICSS' 00. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2000: 1-10.
- [4] ANASTASI G, CONTI M, DI FRANCESCO M. A comprehensive analysis of the MAC unreliability problem in IEEE 802.15.4 wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(1): 52-65.

- [5] MAO Song, ZHAO Chenglin, ZHOU Zheng, et al. An improved fuzzy unequal clustering algorithm for wireless sensor network [C]//Proceedings of IEEE ICST' 11. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2011: 245-250.
- [6] LIAO Fubao, ZHANG Wenmei. Uneven clustering routing protocol for wireless sensor networks based on improved ant colony algorithm [J]. Computer Measurement and Control, 2017, 25(4): 147-152. (in Chinese)  
廖福保, 张文梅. 改进的基于蚁群算法的非均匀分簇路由协议 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(4): 147-152.
- [7] HEINZELMAN W R, KULIK J, BALAKRISHNAN H. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks [C]//Proceedings of ACM MobiCom' 99. New York, USA: ACM Press, 1999: 1-12.
- [8] LI Chengfa, CHEN Guihai, YE Mao. An unevencluster-based routing protocol for wireless sensor network [J]. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(1): 27-36. (in Chinese)  
李成法, 陈贵海, 叶懋. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议 [J]. 计算机学报, 2007, 30(1): 27-36.
- [9] LEU J S, CHIANG T H. Energy efficient clustering scheme for prolonging the lifetime of wireless sensor network with isolated nodes [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(2): 259-262.
- [10] CHUNAWALE A, SIRSIKAR S. Minimization of average energy consumption to prolong lifetime of wireless sensor network [C]//Proceedings of IEEE Global Conference on Wireless Computing and Networking. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 244-248.
- [11] FENG Jiang MAO Xiaorong WU Chunchun. A clustering routing algorithm for wireless sensor network with balanced and efficient energy [J]. Computer Engineering, 2012, 38(23): 88-91. (in Chinese)  
冯江, 茅晓荣, 吴春春. 一种能量均衡有效的 WSN 分簇路由算法 [J]. 计算机工程, 2012, 38(23): 88-91.
- [12] KIM J M, PARK S H, HAN Y J, et al. CHEF: cluster head election mechanism using fuzzy logic in wireless sensor networks [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Advanced Communication Technology. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2008: 654-659.
- [13] AHAMAD F, KUMAR R. Energy efficient region based clustering algorithm for WSN using fuzzy logic [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics Information Communication Technology. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2016: 124-135.
- [14] TAO Zhiyong JIANG Shoufeng. Cluster head election algorithm in wireless sensor network based on fuzzy theory [J]. Computer Engineering, 2015, 41(9): 115-119. (in Chinese)  
陶志勇, 蒋守凤. 基于模糊理论的无线传感器网络簇首选举算法 [J]. 计算机工程, 2015, 41(9): 115-119.
- [15] LIU Xuxun. Routing protocols based on ant colony optimization in wireless sensor networks: a survey [J]. IEEE Access, 2017, 15: 26303-26317.
- [16] SUN Yongjun, DONG Wenxin, CHEN Yahuan. Improved routing algorithm based on ant colony optimization in wireless sensor networks [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(6): 1317-1320.
- [17] ALAMI H E, NAJID A. CFFL: cluster formation using fuzzy logic for wireless sensor networks [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Systems and Applications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [18] NAGHIBZADEH M, TAHERI H. Fuzzy-based clustering solution for hot spot problem in wireless sensor networks [C]//Proceedings of the 7th IEEE International Symposium on Telecommunications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 729-734.
- [19] YANG Junying. Clustering method for energy balance in wireless sensor networks [J]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2012. (in Chinese)  
杨英军. 无线传感器网络中能耗均衡的分簇方法 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2012.
- [20] LIU Tieliu, WU Yongquan. Energy optimization approach based on clustering routing algorithm for wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(5): 764-770. (in Chinese)  
刘铁流, 巫咏群. 基于能量优化的无线传感器网络分簇路由算法研究 [J]. 传感技术学报, 2011, 24(5): 764-770.
- [21] HAMOUDA Y. Smart irrigation decision support based on fuzzy logic using wireless sensor network [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Promising Electronic Technologies. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2017: 109-113.
- [22] LIU Hong, LI Haowei. Uneven clustering routing algorithm based on ant colony optimization [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2018, 46(8): 50-54. (in Chinese)  
刘宏, 李好威. 基于蚁群优化的非均匀分簇路由算法 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(8): 50-54.
- [23] SUNDARAM K, GANAPATHY V, SUDHAKARA P. Fuzzy logic based unequal clustering in wireless sensor network for minimizing energy consumption [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Computing and Communications Technologies. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2017: 304-309.
- [24] MA Xiaoli. Summary of methods for measuring income distribution gap [J]. Times Finance, 2009(5): 46-48. (in Chinese)  
马晓丽. 收入分配差距衡量方法综述 [J]. 时代金融, 2009(5): 46-48.