

# WSN 中基于非线性自适应 PSO 的分簇策略

李童悦 马文平

(西安电子科技大学通信工程学院 西安 710071)

**摘要** 如何更大程度地延长网络的生命周期是设计无线传感器网络路由协议时需要考虑的重要因素。针对此问题,提出一种新型的基于改进粒子群优化的分簇算法。该算法调整了传统粒子群优化算法的惯性权重系数,能够避免其过早陷入局部最优;同时考虑到能量均衡和传输路径,将转发节点与簇头协作,以减轻簇头的能耗。仿真对比实验表明,改进算法在合理分配节点和平衡簇结构系统方面具有良好的性能。

**关键词** 无线传感器网络,分簇算法,粒子群优化算法,能量均衡

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.05.007

## Clustering Method in Wireless Sensor Networks Using Nonlinear Adaptive PSO Algorithm

LI Tong-yue MA Wen-ping

(School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract** How to prolong the network lifetime is an important factor when designing a routing protocol in wireless sensor network. To solve this problem, a novel clustering algorithm based on the improved particle swarm optimization was presented. The algorithm modifies the inertial weight to avoid particles trapping in local optimum. It also takes into account both energy balance and transmission distance, and cooperates relays nodes with cluster heads to reduce the excessive energy consumption of cluster heads. This paper compared the proposed algorithm with other algorithms in various scenarios. Simulation results show that the proposed algorithm has good capability on distributing nodes and balancing cluster system.

**Keywords** Wireless sensor network, Clustering algorithm, Particle swarm optimization algorithm, Energy balance

## 1 引言

在大多数无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)中,由于受到价格、硬件体积等影响,传感器节点的通信处理能力、计算能力更差且存储量更小<sup>[1-3]</sup>。传感器节点一般通过飞机布撒或人工布置等方式大量部署在比较偏远和严峻的环境中,常采用电池供电,能量十分有限<sup>[4]</sup>。因此,在设计路由协议时,能效问题是讨论的热点<sup>[5-6]</sup>。分簇算法将网络层次化,可以延长网络的生命周期,改善网络的能效问题<sup>[7-8]</sup>。最具代表性的分簇算法是 LEACH 协议<sup>[9]</sup>,其以“轮”循环形式,通过阈值随机选举簇头节点,使得节点均有机会当选簇头,均衡了节点的能量消耗。在 HEED 协议<sup>[10]</sup>中,选举簇头时考虑了节点的剩余能量和簇内通信开销,同时簇头节点以多跳方式传输数据到基站。LECP-CP<sup>[11]</sup>则改进了竞争半径,提出了更加精准和合理的簇半径来最小化网络中的能量消耗。在 EEUC 算法<sup>[12]</sup>中,节点在选择簇头时考虑了候选簇头到基站的距离,构造出了大小不同的簇以均衡簇头负载。在 SEECH 协议<sup>[13]</sup>中,部分剩余能量较高的节点被选取作为转发节点,以将簇头节点的数据传输到基站。

近年来,许多优化算法被广泛应用于 WSN 中<sup>[14-15]</sup>。1995 年提出的粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法主要通过随机选择的粒子来表示不同的方法,不断迭代寻找,通过适应度函数来评价粒子的质量,从而寻找最优粒子。PSO 算法精度高、容易实现且收敛速度快,比其他遗传算法更简单、高效。本文在传统 PSO 算法的基础上对惯性权重系数进行非线性动态变化,以避免其过早陷入局部最优;同时,选举最佳簇头和转发节点,以均衡节点能耗,延长生命周期。

## 2 系统模型

### 2.1 网络模型

假设二维正方形区域中随机分布  $N$  个传感器节点,构建的 WSN 具有如下性质:

- 1) 节点均可进行信息采集及监测工作,并将数据转发给其他节点或直接传输到基站;
- 2) 所有节点同质且初始能量相等,保持静止且能量有限,而基站的供应能量不受限;
- 3) 所有节点均可定位记录自己的位置信息;
- 4) 每个节点可动态调整自身发射功率的大小。

到稿日期:2017-02-27 返修日期:2017-04-04 本文受国家自然科学基金(61373171),高等学校创新引智计划项目(B08038)资助。

李童悦(1992-),女,硕士,主要研究方向为无线传感网,E-mail:litongyue0706@163.com;马文平(1966-),男,博士后,教授,博士生导师,主要研究方向为通信理论,E-mail:wp\_ma@mail.xidian.edu.cn(通信作者)。

### 2.2 无线通信能量消耗模型

本文采用的无线通信能耗模型分为自由空间模型和多路径衰减模型。节点发送  $k$  bit 数据到距离为  $d$  的接收器时消耗的能量  $E_{TX}$  为:

$$E_{TX}(k, d) = \begin{cases} kE_{elec} + k\epsilon_{fs}d^2, & d \leq d_0 \\ kE_{elec} + k\epsilon_{fs}d^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \quad (2)$$

簇头节点融合处理  $k$  bit 数据需要消耗的能量为:

$$E_{AG}(k) = kE_{DA} \quad (3)$$

接收器接收  $k$  bit 数据消耗的能量  $E_{RX}$  为:

$$E_{RX}(k) = kE_{elec} \quad (4)$$

其中,  $E_{dec}$  为收发电路的能量消耗,  $\epsilon_{fs}$  和  $\epsilon_{mp}$  分别为自由空间和多路衰减信道模型上的放大器能量损耗系数,  $d_0$  是两种模型的通信距离阈值。

### 2.3 网络生命周期模型

在大规模 WSN 应用中, 邻近节点配备相同的感知装备来监测数据, 当个别节点失效时, 网络系统仍可接收到相关数据。因此, 提出一种更有效的衡量生命周期的标准——部分死亡节点的时间 (Part Node Died, PND), 它在节点密度较高的 WSN 中更适用。式(5)描述了网络的生命周期。

$$T_N^m = T[\delta = \frac{m}{N}] \quad (5)$$

其中,  $N$  为网络节点数,  $m$  为存活节点数。式(5)表明, PND 为网络中存活节点比例低于阈值  $\delta$  时的时间。

## 3 基于改进 PSO 的分簇算法

### 3.1 分簇阶段的改进

在改进算法中, 网络节点分为簇头节点、转发节点和普通节点。分簇算法包括两个阶段: 1) 初始化阶段, 主要负责确定簇头节点、转发节点, 以及各簇与基站间的路径, 并建立网络结构; 2) 数据传输阶段, 簇头节点与转发节点协作传输数据到基站。图 1 给出了其网络拓扑结构。

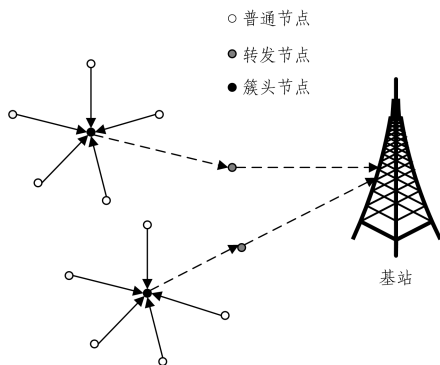


图 1 网络拓扑结构

Fig.1 Topology of network

#### 3.1.1 簇头节点的选举

假设在一个具有  $N$  个传感器节点的网络中, 簇头节点的数量为  $n$ , 每一个簇头节点有且只有一个转发节点, 则簇内平均节点总数为  $N/n$ 。其中一个簇包含一个簇头节、一个转发节点和  $N/n - 2$  个普通节点。

簇头节点在  $CH = \{CH_1, CH_2, \dots, CH_i, \dots, CH_n\}$  中, 非

簇头节点在  $C\tilde{H}$  中。基站筛选出剩余能量较高和距离基站较近的节点作为簇头节点。此过程可被看作优化问题, 数学表达式为:

$$F_{CH} = a \times R_E^{CH} + (1-a) \times R_L^{CH} \quad (6)$$

其中,  $F_{CH}$  由两部分构成。  $a$  为  $R_E^{CH}$  和  $R_L^{CH}$  对  $F_{CH}$  的影响系数, 本文中取  $a$  为取 0.5;  $R_E^{CH}$  是簇头节点与非簇头节点的平均剩余能量比值, 在当前轮中可表示为:

$$R_E^{CH} = \frac{\bar{E}_{CH}}{\bar{E}_{C\tilde{H}}} = \frac{\sum_{\forall node_i \in CH} E_{CH}(i) / |CH|}{\sum_{\forall node_j \in C\tilde{H}} E_{C\tilde{H}}(j) / |C\tilde{H}|} \quad (7)$$

其中,  $\bar{E}_{CH}$  和  $\bar{E}_{C\tilde{H}}$  分别是簇头和簇头节点的剩余能量均值,  $|CH|$  和  $|C\tilde{H}|$  表示簇头和簇头节点数。若要使  $R_E^{CH}$  值最大化, 则须选取能量较高的节点作为簇头节点。  $R_L^{CH}$  为非簇头和簇头节点到基站距离的比值, 可表示为:

$$R_L^{CH} = \frac{\bar{D}_{C\tilde{H}}}{D_{CH}} = \frac{\sum_{\forall node_j \in C\tilde{H}} D(node_j, BS) / |C\tilde{H}|}{\sum_{\forall node_i \in CH} D(node_i, BS) / |CH|} \quad (8)$$

其中,  $D(node_j, BS)$  为节点  $j$  到基站的距离。此问题可被看作一个 NP 难问题, 可利用本文提出的改进 PSO 算法加以解决。

#### 3.1.2 转发节点的选举

转发节点负责接收簇头节点的数据并将其发送给基站。与其他算法不同的是, 改进协议中每个簇头节点都有专属的转发节点, 因此减少了簇头在选择转发节点过程中的能耗。转发节点在  $RN = \{RN_1, RN_2, \dots, RN_z, \dots, RN_m\}$  中, 普通节点在  $CN$  中。与簇头节点选举过程类似, 转发节点的选举过程表示为:

$$F_{RN} = b \times R_E^{RN} + (1-b) \times R_L^{RN} \quad (9)$$

$$R_E^{RN} = \frac{\bar{E}_{RN}}{E_{CN}} = \frac{\sum_{\forall node_z \in RN} E_{RN}(z) / |RN|}{\sum_{\forall node_k \in CN} E_{CN}(k) / |CN|} \quad (10)$$

其中,  $\bar{E}_{RN}$  为转发节点剩余能量的均值,  $|RN|$  和  $|CN|$  分别表示转发节点和普通节点的个数。要使得  $R_E^{RN}$  值最大, 则须选取能量较高的节点作为转发节点。

同时,  $R_L^{RN}$  的函数表达式为:

$$R_L^{RN} = \frac{\bar{L}_{CN}}{L_{RN}} = \frac{\sum_{\forall node_k \in CN} [D(node_k, BS) + D(node_k, CH_i)] / |CN|}{\sum_{\forall node_z \in RN} [D(RN_z, BS) + D(RN_z, CH_i)] / |RN|} \quad (11)$$

由式(11)可得, 在选举  $CH_i$  的转发节点  $RN_z$  时, 考虑到各路径的距离。  $R_L^{RN}$  的值越大, 簇头与转发节点之间的数据传输开销越小。在图 2 中, 节点 C 距簇头节点的距离和距基站的距离之和最小, 因此基站最终会选择节点 C 作为转发节点。

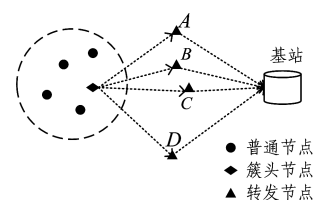


图 2 转发节点的选举过程

Fig.2 Election process of relay nodes

### 3.2 簇头和转发节点的 PSO 更新算法

在簇结构初始化阶段中,改进 PSO 算法的流程包括如下 6 个主要步骤。

#### 1) 初始化优化问题和算法的相关参数

假设在  $D$  维空间内随机选取  $M$  个粒子,每个粒子  $i$  的当前位置向量  $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}]$ ,速度向量  $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}]$ 。

#### 2) 计算适应度函数值

粒子群在  $D$  维空间中进行搜索,每个粒子根据式(6)和式(9)来计算适应度函数值。在搜索过程中,每个粒子  $i$  的个体极值由向量  $P_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id}]$  表示,所有粒子的全局极值由向量  $P_g = [p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd}]$  表示。

#### 3) 更新粒子的个体极值和粒子群的全局极值

当粒子  $i$  的当前适应度函数值大于个体极值时,用当前值替换个体极值,否则不变;对于每个粒子,将其当前适应度函数值与全局极值进行比较,若当前值较大,则进行替换,否则不变。

#### 4) 更新位置向量和速度向量

在每次迭代中,粒子根据式(12)和式(13)来更新速度  $v_{ij}^{k+1}$  和位置  $x_{ij}^{k+1}$ :

$$v_{ij}^{k+1} = \omega v_{ij}^k + c_1 r_1 (p_{ij}^k - x_{ij}^k) + c_2 r_2 (p_{gj}^k - x_{ij}^k) \quad (12)$$

$$x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} \quad (13)$$

其中,  $v_{ij}$  为  $j$  维空间中粒子  $i$  的速度向量,取值范围为  $[v_{\min}, v_{\max}]$ ;  $x_{ij}$ ,  $p_{ij}$ ,  $p_{gj}$  和  $v_{ij}$  的下标的意义均相同;  $r_1$  和  $r_2$  为  $[0, 1]$  中的随机数;  $c_1$  和  $c_2$  为学习因子,通常设为 2.0;  $\omega$  为惯性权重系数。

#### 5) 改进惯性权重系数

在 PSO 算法中,根据惯性权重系数  $\omega$  大小的变化来改变算法寻优值的节奏。 $\omega$  能够平衡全局搜索( $\omega$  取较大值)和局部搜索( $\omega$  取较小值)之间的关系。针对传统 PSO 算法易过早陷入局部最优,从而影响结果的精准度的问题,提出一种非线性动态变化的权重系数  $\omega$ ,即:

$$\omega = (\omega_{\max} - \omega_{\min} - h_1) \times e^{\frac{1}{1+h_2 \times t/N}} \quad (14)$$

其中,  $\omega_{\max}$  和  $\omega_{\min}$  分别表示  $\omega$  的上限和下限,通常设为 0.9 和 0.4;  $N$  为允许的最大迭代次数;  $t$  为当前的迭代次数;  $h_1$  和  $h_2$  是控制因子。

6) 返回到步骤 4) 重复执行,直到找到最优解,即选举出最佳簇头节点和转发节点。

### 3.3 算法的整体流程

#### 3.3.1 簇结构初始化阶段

网络中的各节点均有唯一的 ID 值,步骤如下:

1) 各节点广播一条 Node-MSG 信息,信息包括该节点的剩余能量和所在位置。

2) 基站接收到信息后,执行上述簇头节点 PSO 更新算法以选举出最优簇头节点,并通过广播簇头节点的 ID 信息来通知各节点的当前簇头位置。簇头节点接收该信息后,广播一条包含自身 ID 的 CH-ADV 消息,宣布成为簇头节点。

3) 同样地,基站根据上述转发节点 PSO 更新算法选举出最优转发节点。转发节点确认自己的身份后,广播包含自身

ID 值和通信簇头节点 ID 的 RN-ADV 消息来通知各节点。普通节点根据 CH-ADV 消息的强度大小来选择将加入的簇。

4) 普通节点加入簇后,向所在簇内的簇头节点发送一条 JOIN-REQ 消息,该消息包含节点的 ID、加入簇头节点的 ID 以及自身的剩余能量。簇头接收到消息后进行确认,各节点的工作任务分配完成。

簇头节点为簇内普通节点建立 TDMA 工作时间槽,所有节点在自己的时间槽内被唤醒工作,在其余时间处于休眠状态,这样有利于提高频谱效率并减少节点的能量消耗。

#### 3.3.2 数据传输阶段

在此阶段,普通节点按照工作时间槽发送数据到簇头节点。簇头始终处于工作状态以接收数据,并进行数据融合处理以去除冗余信息和降低噪声干扰,之后将处理后的数据发送到转发节点,转发节点再将其发送到基站,从而完成数据传输的整个过程。

## 4 实验结果及分析

### 4.1 仿真参数的设置

设定网络覆盖面积为  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ ,基站位置坐标为  $(50 \text{ m}, 175 \text{ m})$ ,初始能量为:  $E_0 = 1 \text{ J}$ ,  $E_{DA} = 5 \text{ nJ}$ ,  $\epsilon_{fs} = 10 \text{ pJ/bit/m}^2$ ,  $\epsilon_{mp} = 0.0013 \text{ pJ/bit/m}^2$ ,  $E_{elec} = 50 \text{ nJ}$ 。

### 4.2 影响系数 $a$ 和 $b$ 的选取

本文在簇头和转发节点的适应度函数中考虑了两大因素,即能量和距离,但需要平衡两者的权重关系,选取最佳的影响系数。在仿真环境下,分别在  $a=0.1, b=0.1$ ;  $a=0.3, b=0.3$ ;  $a=0.7, b=0.7$  以及  $a=0.5, b=0.5$  这 4 种不同的取值下对比网络节点的剩余能量均方差的平均值。均方差的大小反映了节点能耗的均衡程度,能够体现出能量利用的效率。如图 3 所示,只有当能量和距离这两种因素有着相同的权重比时,节点能耗才相对稳定;若仅侧重考虑一个因素,例如当  $a=0.1, b=0.1$  时,均方差最大,说明此时选取的簇头和转发节点距离基站位置较近,但是剩余能量水平较低,这些节点会因为负载过大而很快死亡,导致网络节点的剩余能量很不均匀。综合以上分析,本文选取  $a=0.5, b=0.5$  作为算法中的适应度函数的影响系数。

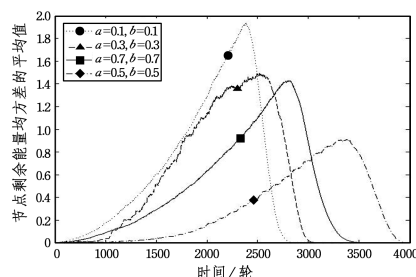


图 3 不同  $a, b$  值下节点能耗均衡程度的对比

Fig. 3 Comparison of node energy balance with different  $a$  and  $b$

### 4.3 不同节点密度下的网络生命周期对比

节点密度是影响网络生命周期的重要因素,因此在不同节点数量下对比所提算法与 LEACH, HEED 和 LECP-CP 的生命周期,如图 4 所示。可以看出,节点数量从 100 不断增加到 400 的过程中,改进算法的性能始终优于其他 3 种协议。

LEACH 协议在簇头的选举方式上具有随机性,簇头节点分布不均匀,能量消耗不均衡。HEED 在一定范围内只有一个簇头节点,导致簇头节点负载过重而过早失效。LECP-CP 根据节点自身信息选取不同的竞争半径来竞选簇头,因此在一定程度上比 LEACH 和 HEED 的性能好。在改进算法中簇头节点和转发节点协作,每个簇头都有专属的转发节点,节省了簇头每次选择最佳转发节点的能量。

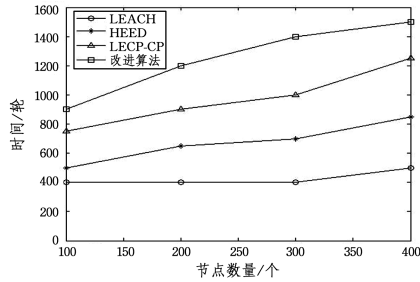


图 4 不同节点数量下的轮数对比

Fig. 4 Comparison of the number of rounds with different number of nodes

#### 4.4 3 种不同方案下的网络生命周期对比

假设在 3 种不同的方案中,节点数量、网络覆盖面积以及基站位置各不相同,如表 1 所列。通过仿真比较所提算法与 LEACH-C,EEUC 和 SEECH 的各自网络生命周期的变化。图 5—图 7 分别给出了 3 种方案下 LEACH-C, EEUC, SEECH 与改进算法的死亡节点数的对比结果。

表 1 3 种不同的仿真方案

Table 1 Three different simulation programs

参数	方案 1	方案 2	方案 3
区域面积	(100 m,100 m)	(100 m,100 m)	(200 m,200 m)
基站位置	(50 m,175 m)	(50 m,200 m)	(100 m,375 m)
节点数量/个	100	400	1000

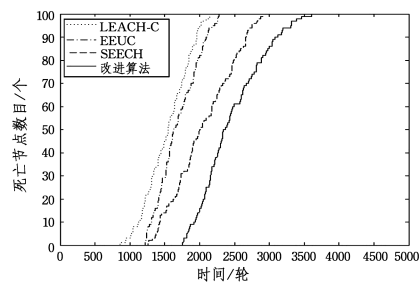


图 5 在方案 1 下的生命周期对比

Fig. 5 Comparison of life cycle of program 1

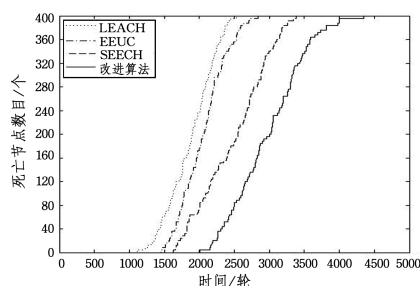


图 6 在方案 2 下的生命周期对比

Fig. 6 Comparison of life cycle of program 2

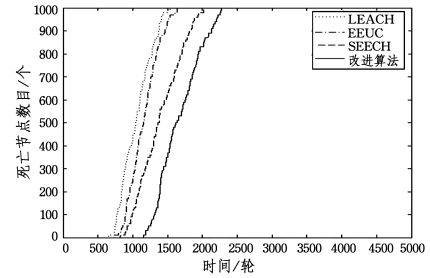


图 7 在方案 3 下的生命周期对比

Fig. 7 Comparison of life cycle of program 3

在区域面积方面,随着面积的不断扩大,网络中节点间的距离增大,数据的传输开销的绝大部分受距离的影响。在 LEACH-C 协议中节点都是以单跳方式将数据传输到基站,因此距离的增大会使得节点耗能急剧增加。EEUC 协议采用非均匀分簇的方法,减少了基站附近簇头节点的能量负载,与 LEACH-C 相比延长了网络生命周期。在 SEECH 协议中虽然也有转发节点负责簇头数据的传输,但是簇头节点每次都要经过计算比较来选择下一跳中继节点,计算过程随着距离的增加而变得复杂。改进算法会根据网络面积的变化来调整簇头节点和转发节点的选择。适应度函数中的距离因素很好地解决了数据传输开销中距离位置的影响。

同时,随着网络中节点密度的不断增加,LEACH-C 协议在基于阈值的随机簇头选举中会产生大量的计算;EEUC 协议在进行簇头节点多跳路由选择时,也会产生繁琐的计算过程;在 SEECH 协议中则会出现多个簇头节点选取同一个转发节点作为中继节点的情况,从而加快了转发节点的能耗速度;改进算法根据网络结构合理划分每类节点的个数,在选举节点时也不会造成节点分工冲突的问题,同时在转发节点传输数据时,由于转发节点与簇头节点相匹配,因此可以有条不紊地负责指定簇头节点的数据传输任务,从而减少了网络传输时延,延长了网络的生命周期。

表 2 列出了各协议在 3 种方案下的 PND 对比,其直观地表明改进算法能够有效地提高网络系统的性能。

表 2 LEACH-C,EEUC,SEECH 与改进算法的 PND 对比

Table 2 Comparison of PND of LEACH-C,EEUC,SEECH and proposed algorithm

方案	协议	轮数	对比
方案 1	LEACH-C	1520	1
	EEUC	1633	1.07
	SEECH	1860	1.22
	proposed	2085	1.37
方案 2	LEACH-C	1529	1
	EEUC	1868	1.22
	SEECH	2075	1.36
	proposed	2236	1.46
方案 3	LEACH-C	1011	1
	EEUC	1268	1.25
	SEECH	1621	1.60
	proposed	1730	1.71

**结束语** 本文提出了一种新型的基于簇的无线传感网络路由协议。在该协议中,转发节点负责将簇头节点处理后的数据发送给基站,减少了簇头节点的负载,延长了网络生命周

期;同时,利用改进 PSO 节点更新算法来构建最优簇结构,使网络性能得到进一步优化。通过改变网络节点密度、网络覆盖区域面积和基站位置坐标等参数,将改进算法与其他优化算法进行仿真对比,结果证明改进算法在最小化网络整体能量开销和平衡各节点能量消耗方面确实具有良好的性能。

### 参考文献

- [1] ZHANG D, LI G, ZHENG K, et al. An energy-balanced routing method based on forward-aware factor for wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(1):766-773.
- [2] WANG B, LIM H B, MA D. A coverage-aware clustering protocol for wireless sensor networks[J]. *Computer Networks*, 2012, 56(5):1599-1611.
- [3] WANG B. Coverage problems in sensor networks: A survey[J]. *ACM Computing Surveys(CSUR)*, 2011, 43(4):32.
- [4] SINGH B, LOBIYAL D K. A novel energy-aware cluster head selection based on particle swarm optimization for wireless sensor networks[J]. *Human-Centric Computing and Information Sciences*, 2012, 2(1):1-18.
- [5] JIN J, SRIDHARAN A, KRISHNAMACHARI B, et al. Handling inelastic traffic in wireless sensor networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, 28(7):1105-1115.
- [6] AWEYA J. Technique for differential timing transfer over packet networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, 9(1):325-336.
- [7] YU J, QI Y, WANG G, et al. A cluster-based routing protocol for wireless sensor networks with nonuniform node distribution[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2012, 66(1):54-61.
- [8] YU J, QI Y, WANG G, et al. An energy-aware distributed unequal clustering protocol for wireless sensor networks[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2011(3):876-879.
- [9] 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.
- [10] YOUNIS O, FAHMY S. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2004, 3(4):366-379.
- [11] YU J, FENG L, JIA L, et al. A local energy consumption prediction-based clustering protocol for wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2014, 14(12):23017-13040.
- [12] LI C F, CHEN G H, YE M, et al. An Uneven Cluster Based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2007, 30(1):27-36. (in Chinese)  
李成法, 陈贵海, 叶懋, 等. 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.
- [13] TARHANI M, KAVIAN Y S, SIAVOSHI S. SEECH: Scalable energy efficient clustering hierarchy protocol in wireless sensor networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(11):3944-3954.
- [14] LIN Y, ZHANG J, CHUNG H S H, et al. An ant colony optimization approach for maximizing the lifetime of heterogeneous wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2012, 42(3):408-420.
- [15] HOANG D C, YADAV P, KUMAR R, et al. Real-time implementation of a harmony search algorithm-based clustering protocol for energy-efficient wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(1):774-783.
- (上接第 37 页)
- 杨玉丽, 彭新光, 黄名选, 等. 基于离散粒子群优化的云工作流调度度[J]. *计算机应用研究*, 2014, 31(12):3677-3681.
- [8] SU S, LI J, HUANG Q, et al. Cost-efficient task scheduling for executing large programs in the cloud[J]. *Parallel Computing*, 2013, 39(4):177-188.
- [9] GARG R, SINGH A. Multi-objective Workflow Grid Scheduling Based on Discrete Particle Swarm Optimization[M]// *Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing*. Springer Berlin Heidelberg, 2011:183-190.
- [10] GARG R, SINGH A K. Multi-objective workflow grid scheduling using  $\epsilon$ -fuzzy dominance sort based discrete particle swarm optimization[J]. *Journal of Supercomputing*, 2014, 68(2):709-732.
- [11] ZHANG F, CAO J, HWANG K, et al. Ordinal Optimized Scheduling of Scientific Workflows in Elastic Compute Clouds[C]// *IEEE Third International Conference on Cloud Computing Technology and Science*. IEEE Computer Society, 2011:9-17.
- [12] LI K W, ZHANG G X, ZHU Z M. A decomposition-based multi-objective workflow scheduling algorithm in cloud computing[J]. *Computer Engineering & Science*, 2016, 38(8):1588-1594. (in Chinese)  
李克武, 张功萱, 朱昭萌. 云环境中基于分解的多目标工作流调度算法[J]. *计算机工程与科学*, 2016, 38(8):1588-1594.
- [13] CHEN W, DEELMAN E. WorkflowSim: a toolkit for simulating scientific workflows in distributed environments[C]// *IEEE 8th International Conference on E-Science (e-Science)*. USA: IEEE Press, 2012:1-8.
- [14] JUVE G, CHERVENAK A, DEELMAN E, et al. Characterizing and profiling scientific workflows[J]. *Future Generation Computer System*, 2013, 29(3):682-692.