

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2021.03.008

基于多信息素蚁群优化的 WSN 节能路由方案^①

陈 涛¹, 刘姗姗², 梁修荣³

1. 重庆城市职业学院 信息与智能工程系, 重庆 永川 402160; 2. 四川师范大学 计算机科学学院, 成都 610101;
3. 重庆城市职业学院 图文信息中心, 重庆 永川 402160

摘要: 针对当前无线传感器网络节能路由算法中出现的计算效率低和节能效果不佳等问题, 本文提出一种基于多信息素蚁群优化的节能路由方案. 该方案通过综合考虑节点剩余能量、相邻节点数和节点间距离等因素, 在节点能量利用率较低的情况下, 利用多信息素蚁群优化算法寻找传感器节点到基站的最佳路由, 以经济的能耗将传感数据传输到基站. 实验结果表明: 与其他对比算法相比, 本文提出的算法具有明显优势, 能够有效实现节能路由开销, 提高网络寿命的目标.

关 键 词: 无线传感器网络; 蚁群优化算法; 多信息素; 节能路由

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2021)03-0045-06

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)由空间专用的传感器节点组成, 用于监视、聚合所收集的数据并将其转发到基站(Base Station, BS)位置, 用于检测大坝水位、观察空气质量等多个领域^[1]. WSN 中的传感器节点需要消耗一定的能量来感知、处理和传输处理后的数据. 传感器节点由电池供电, 由于其是随机部署及无人值守, 一般很难进行更换或充电^[2]. 此外, 每个传感器节点都有一定的检测范围, 可以通过访问接收信号的强度来估计其与源节点的距离, 接收到的信号随着目标节点和源节点之间距离的增加而衰减^[3].

为了提高无线传感器网络的性能, 研究者们对能量消耗和高效路由技术等问题进行了分析和研究. 通常, 节能路由通过在传感器节点之间均匀地分配负载来降低功耗, 利用各类算法在多种可能性中选择一组低成本的路径^[4-5]. Lalwani 等^[6]提出了一种基于生物地理学的节能路由架构, 通过优化簇头和路由来降低传感器功耗, 但是由于生物地理学优化算法容易陷入局部最优, 使得算法的整体性能降低. Venkataramana 等^[7]通过引入支配节点概念来解决传感器节点间能量合理分配的问题, 在保证网络生存期和吞吐量的前提下, 提供一种节能路由方案, 但是节能效果不佳. Pandey 等^[8]提出了协议重指派低功耗自适应集簇分层型协议(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH)的路由算法, 在原有 LEACH 协议的基础上引入重新任命的理念, 通过对节点进行多次分配的方式实现节点间的负载均衡, 但是 LEACH 协议的稳定性不够. Yamamoto 等^[9]提出了一种基于终端剩余能量的蚁群算法, 用于解决由于自适应路由管理中二元性的存在导致通信负载不均衡而引起的能量空洞问题. Arora 等^[10]提出一种基于蚁群优化自组织树的能量平衡算法, 该算法基于剩余能量和节点密度选择簇头, 然后利用所有簇头构建自组织动态树, 最后使用蚁群优化技术探索簇间和簇内通信的最佳路由来实现降低功耗的目标. 但是传统蚁群优化只使用一种信息素来有效地发现最佳途径, 计算效率较低.

针对上述节能路由算法中出现的问题, 本文提出一种基于多信息素蚁群优化的无线传感器网络节能路由方案, 采用多信息素蚁群算法对 WSN 中的多目标进行优化, 通过检测节点间的距离、剩余能量和相邻

① 收稿日期: 2020-03-24

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201803901); 重庆市永川区 2018 年公益类科技计划项目(Ycstc-2018cc0501).

作者简介: 陈 涛, 硕士, 讲师, 主要从事物联网及大数据技术研究.

节点数来确定有效的路由, 保证传感节点能够以经济的能耗通过最优路由将数据传输到基站, 实现节约开销, 延长网络寿命的目的.

1 基本蚁群算法

蚁群优化算法(Ant Colony Optimization, ACO)^[11]是基于蚂蚁觅食过程而提出的一种群智能算法. 蚂蚁在寻找食物的过程中会在路径上释放一定的信息素, 之后的蚂蚁通过感觉信息素的浓度, 沿着信息素最高的路径寻找食物, 同时继续释放信息素. 由于形成了正反馈机制, 信息素会在通向食物源较短的路径上越积越多, 吸引了更多的蚂蚁聚集到该路径中, 从而最终选出最优路径.

假定蚂蚁种群的个数为 m , 节点个数为 n , 在初始阶段, m 只蚂蚁被任意放置在不同的节点上, 每条路径上的初始信息素为 $\tau_{ij}(0)$. 蚂蚁根据每条路径上信息素的量决定转移方向, 在 t 时刻从节点 i 移动到节点 j 的移动概率 $p_{i,j}(t)$ 可表示为

$$p_{i,j}(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{i,j}(t)]^\alpha [\eta_{i,j}(t)]^\beta}{\sum_{k \in \text{advoid}(t)} [\tau_{i,k}(t)]^\alpha [\eta_{i,k}(t)]^\beta} & j \in \text{advoid}(t) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\tau_{i,j}(t)$ 表示 t 时刻节点 (i, j) 上的信息素数量, $\eta_{i,j}(t)$ 表示 t 时刻节点 (i, j) 上的启发函数, 即 $\eta_{i,j}(t) = 1/d_{i,j}$. $d_{i,j}$ 表示节点 (i, j) 之间的欧几里得距离, α, β 表示控制参数.

信息素的更新是指蚂蚁在找到食物后, 对其在路径上留下的信息素进行更新

$$\tau_{i,j}(t+n) = (1-\rho)\tau_{i,j}(t) + \rho\Delta\tau_{i,j}(t) \quad (2)$$

$$\Delta\tau_{i,j}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{i,j}^k(t) \quad (3)$$

$$\Delta\tau_{i,j}^k(t) = \begin{cases} Q/L_k & \text{第 } k \text{ 只蚂蚁经过节点 } (i, j) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中, Q 为信息质量系数, 表示蚂蚁一次释放的信息绝对质量, L_k 表示本次周游中所走的路径总长度. $\rho \in [0, 1]$ 是挥发系数, $\Delta\tau_{i,j}^k(t)$ 和 $\Delta\tau_{i,j}(t)$ 分别为一次循环第 k 只蚂蚁和 m 只蚂蚁在节点 (i, j) 处的信息素增量. 记录 t 时刻所有蚂蚁的行走节点信息, 通过对比选取最佳适应度的蚂蚁信息. 经过多次迭代后的最佳适应度蚂蚁信息即为最优解.

2 多信息素蚁群优化模型

在无线传感器网络中, 为了满足数据采集质量和解析度的要求, 以及尽可能增加网络寿命的需要, 在传感器节点部署过程中实际数目往往大于感知任务所必须的数目. 但是, 为了避免信息冗余, 不可能所有传感器节点同时感知任务. 因此, 需要考虑节点的信息效用和覆盖范围, 节点间的距离及剩余能量等因素来选择一条最优路由将数据传输到基站. 节能路由采用最短路径优化算法计算传感器节点到基站的消息传输路径, 首先建立最短路径的路由表, 然后节点根据多条传输路径向基站节点发送感应数据时, 此时只需选择其父节点作为传输中继, 而不用向网络中每个节点做广播操作, 从而避免了不必要的能量消耗.

2.1 模型设置

假定 WSN 中, 设定区域 A 内存有 N 个随机部署的传感器节点 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$ 和一个基站, 基站与网络区域存在一定距离. 传感器节点和基站不可移动, 传感器节点能量受限, 而基站能量不受限制. 所有传感器节点都可以直接或间接(通过中间传感器节点)与基站通信, 每个传感器节点都有唯一的身份标识号(Identity Document, ID). 网络中用于发送和接收消息的无线信道是对称的.

本文采用多信息素蚁群算法对 WSN 中传感器节点间的距离、剩余能量和相邻节点数 3 个目标进行优化, 利用第一信息素感测节点之间的距离, 发现网络中每个传感器节点的可用邻居, 并将它们的信息存储在一维矩阵中; 第二信息素存储有关相邻节点剩余能量的信息; 第三信息素使用概率密度分布函数确定树状结构中主动参与向 BS 传输所需传感器节点的最佳数量. 其中, 第一信息素为局部信息素, 第二、第三信息素为全局信息素. 局部信息素用于发现最佳节点间的距离, 即最优局部路径; 全局信息素用来控制全局

最优路径. 初始化蚂蚁种群数量为 M , ϵ 为选择传感器节点的最小概率.

2.2 父节点选择

在上述模型假设的基础上, 所有节点采用多信息素蚁群优化算法发现父节点. 首先, 初始化蚂蚁种群, 每个传感器节点释放一个前向蚂蚁 k , 对于当前传感器节点 i , 在其同步信号的时隙内广播一个数据包, 该数据包包含其坐标和半径为 $r2$ 的圆内剩余能量的信息. 其邻居节点 j 根据与节点 i 之间的距离, 以下列概率接收该数据

$$P_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{若 } d_{ij} > r2 \\ \exp(-\alpha(d_{ij} - r1)^\beta) & \text{若 } r1 < d_{ij} \leq r2 \\ 1 & \text{若 } d_{ij} \leq r1 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: α 和 β 表示衰减参数, d_{ij} 是传感器节点 i 和 j 之间的距离, $r1$ 和 $r2$ 分别表示传感器节点检测到的最小和最大距离. 从式(5)可以看出, 当前传感器节点 i 可以感知到半径为 $r1$ 的圆内的所有事件, 当半径超过 $r1$ 后检测的概率呈指数下降, 而在 $r2$ 范围以外的事件将不会被感知.

根据式(5), 在当前传感器节点 i 的布尔圆盘模型范围内, 将可以检测到的相邻节点组合成一个传感器节点覆盖集合 A_{neigh} , 该集合可以采用表示为

$$A_{neigh} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6), 当前传感器节点 i 覆盖范围内的每个节点在 t 时刻的剩余能量定义为

$$RES_{ij}(t) = A_{neigh} \times residualEgy_j(t) \quad (7)$$

式(7)中: $residualEgy_j(t)$ 表示覆盖集合 A_{neigh} 的第 j 个传感器节点的剩余能量.

每只蚂蚁根据第三信息素 $\min SN_{ij}$ 从其覆盖集 A_{neigh} 中发现传感器节点 i 所需的最小邻居节点数, 此步骤的目标是从覆盖集中确定每个传感器节点所需的最小传感器节点数, 以完成传输过程. 这是因为参与传输流量数据的节点越少, 网络的生存期就越长. 为了实现这一目标, 采用高斯函数初始化第三信息素 $\min SN_{ij}$.

$$\min SN_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{j - \mu_i}{\sigma}\right)^2\right) & \text{若 } j \leq n_i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: n_i 是覆盖集合 A_{neigh} 中的传感器节点数, $j = 1, \dots, n_i$. σ 是一个常数, μ_i 初始化为零, 由于传感器节点 i 必须由一些传感器覆盖, 当蚁群中出现蚂蚁未能组成有效的传感器覆盖集合时, 说明传感器节点 i 区域内的传感器分布不足, 因此需要增加 μ_i 值, 确保在所有蚂蚁情况下都可以组成有效的传感器覆盖. 利用 $\min SN_{ij}$ 评估蚂蚁 k 在 t 时刻选择第 l 个节点作为邻居节点的概率.

$$SelProb_{n_l^k} = \begin{cases} \frac{\min SN_{n_l^k}(t)}{\sum_{s=1}^N \min SN_{is}(t)} & \text{若 } n_l^k \leq n_i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: n_l^k 表示由蚂蚁 k 从覆盖集 A_{neigh} 中确定的最小节点数. 在每个节点的迭代开始时计算此概率, 将概率大于预定义阈值 ϵ 的节点, 选取为传感器节点 i 的邻居集.

为了识别当前传感器节点 i 所需节点数, 可以通过计算由蚂蚁 k 设置的邻居集中每个传感器节点的概率来获得, 其定义为

$$ParSel(sen_{i,p}^k) = \begin{cases} \frac{RES_{ip}(t) + V_p^k(t)}{\sum_{s \in n_p^k} (RES_{ps}(t) + V_s^k(t))} & \text{若 } i \in n_p^k \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中: s 表示已识别的相邻节点, V_p^k 表示蚂蚁 k 选择第 p 相邻节点作为父节点的次数信息. 选择具有最大概率 $ParSel(sen_{i,p}^k)$ 的节点作为当前传感器节点 i 的父节点.

当蚂蚁 k 选择节点 p 作为合格的父节点后, p 传感器节点的记录值 V_p^k 更新为

$$V_p^k(t+1) = V_p^k(t) + \Delta V_{pi}^k \tag{11}$$

式中： ΔV_{pi}^k 为变量，当蚂蚁 k 选择节点 p 作为节点 i 的父节点时， ΔV_{pi}^k 为固定常数，否则为 0。整个蚁群中所有蚂蚁都采用蚂蚁 k 的方式选择它们合格的父节点，其中具有最高 V_p^k 值的父节点作为最终父节点。

假定所有传感器节点都具有相同的功能，因此可以评估在一个传感器节点上实施该算法的复杂性。在父节点选择过程中，传感器节点的算法复杂度为 $O(neigh)$ ，其中 $neigh$ 是传感器节点的邻居节点数量，而传感器节点的 $O(1)$ 表示该节点直接与基站通信。在树形成过程中，如果当前传感器是父节点，则传感器节点的算法复杂度计算为 $O(s)$ ，其中与传感器节点关联的子节点数目不计其中。否则，对于没有任何关联子节点的传感器节点，复杂度为 $O(1)$ 。一旦树形成之后，开始执行 TDMA(Time Division Multiple Access, TDMA) 无线自组网时分多址接入^[12]，数据传输阶段启动。

3 评估指标与实验结果分析

为了验证本文提出的路由方案的有效性，通过在网络仿真器 NS2 环境中进行仿真测试，采用波士顿大学提供的无线传感器网络仿真框架，对本文设计算法的性能进行测试。传感器节点的数目为 100，在 100 m×100 m 的网络区域内随机分布，并且以速度为 4 000 bits/s 数据包的形式传输传感信息，基站位于网络区域外。为了定量评估算法的性能，采用第一节点死亡、半数节点死亡、网络生存周期和节点剩余能量作为测试指标，并与低功耗自适应集簇分层型路由算法 (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH)^[8]、基于单信息素蚁群优化算法 (Ant Colony Optimization, ACO)^[10]、基于树的聚类算法 (Tree based clustering, TBC)^[13] 和多目标分布式模糊聚类算法 (Multi-objective distributed fuzzy clustering algorithm, MODFCA)^[14] 等现有算法进行比较。

3.1 评估指标

为了评估本文提出的节能路由算法的性能，采用以下绩效指标进行评估：①第一节点的死亡时间 (First Node Dead, FND)，此度量描述第一个节点死亡后的轮循次数，通常用于评估周期性部署的 WSN 性能；②半数节点的死亡时间 (Half Node Dead, HND)，此参数用于表示半数节点死亡的轮循次数，并在无线网络的应用区域 (覆盖范围是主要关注区域) 中考虑使用；③网络生存周期 (Network lifetime, NLT)，网络生存周期通过所有节点死亡之后的轮循次数来衡量，用于衡量网络的总寿命；④节点剩余能量 (Remaining Energy, RE)，每个传感器必须消耗一些能量来传输数据，该数据根据所使用的路由策略有所不同，可以在每个轮循之后从节点自身显示的能量中减去传感器节点所消耗的能量来计算。

3.2 实验结果

图 1 给出了不同节能方案在 FND, HND, NLT 指标上的能量效率。从图 1 中可以看出，本文通过考虑多个信息素来发现传感器节点和 BS 之间优化路由的方法明显优于其他方案。

根据剩余能量和 100×100 m² 网络区域内活动节点的数量进一步评估算法的性能，测试结果如图 2、图 3 所示。从图 2、图 3 中可以观察到，本文方法的节点剩余能量在 1 200 轮循后为 0，比 ACO 方法延长了 200 轮，网络寿命提高 20%，这是因为本文方法具有选择功耗最小父节点的优化能力。

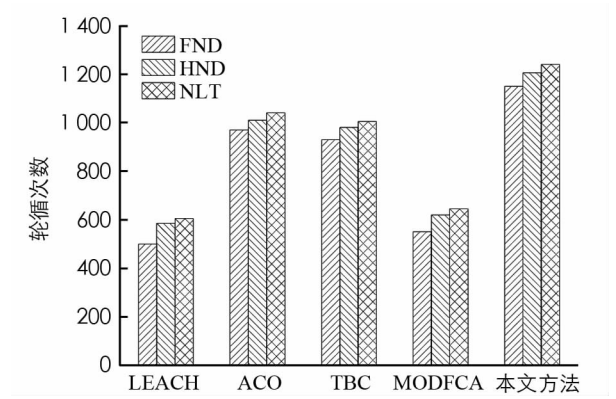


图 1 不同节能方案的网络寿命对比

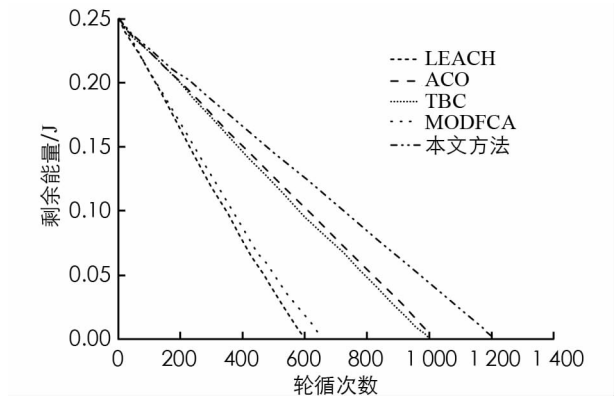


图 2 不同节能方案中剩余能量指标的对比

在无线网络的初始部署阶段,可能无法精确预测真正需要的节点数量,因此在网络设计过程中需要考虑可伸缩性,即在不重组整个网络的情况下,确定网络在一定的可接受阈值范围内容纳额外传感节点的能力. WSN 网络路由协议必须具有足够的能力来提供所需的网络可伸缩性,以便适当地执行. 因此,本文为了验证算法的可扩展性,将传感器节点的数量从 100 个增加至 300 个. 可伸缩性通过测量每个节能路由方案执行轮循次数之后的第一个节点死亡时间来计算,轮循次数或稳定周期越大,可伸缩性越好. 图 4 给出了测试对比结果. 从图 4 中可以看出,在 $100\times 100\text{ m}^2$ 区域内,当节点数目从 100 个增加到 300 个时,所有路由方案的稳定周期(轮循次数)都有所增加,这是因为随着节点数目增加,节点间距离减小. 相对于其他方案,本文提出的算法在传输期间利用较少节点能量消耗的多个信息素来选择最佳可用父节点,从而赋予了更大的可伸缩性.

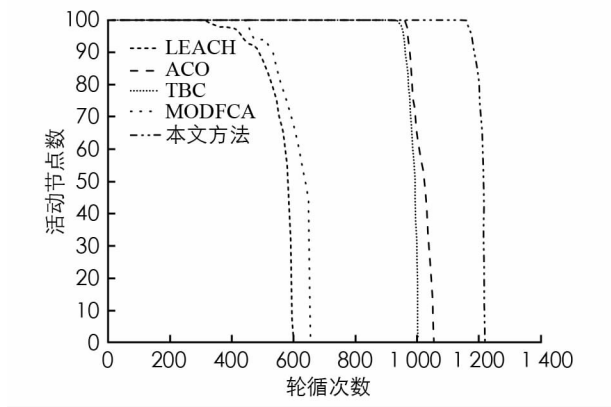


图 3 不同节能方案
在活动节点指标的对比

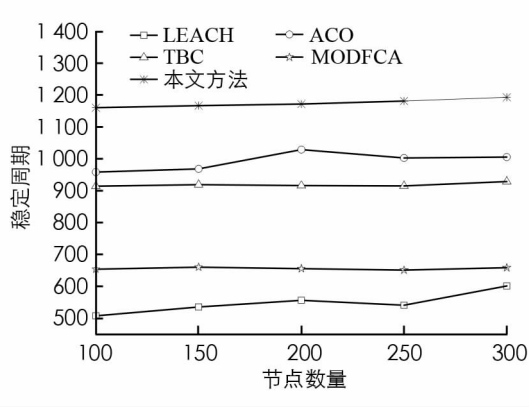


图 4 不同节能方案
在节点数量改变时的稳定周期对比

在不同数量的传感器节点上计算网络的总剩余能量(Total remaining energy, TRE),以揭示本文提出方案的稳健性,对比结果如图 5 所示. 图 5a、图 5b 分别给出了不同节能方案在传感器节点数量为 100 和 300 时总剩余能量的测试结果,从图 5 中可以看出,与其他方案相比,本文提出的方法具有明显优势.

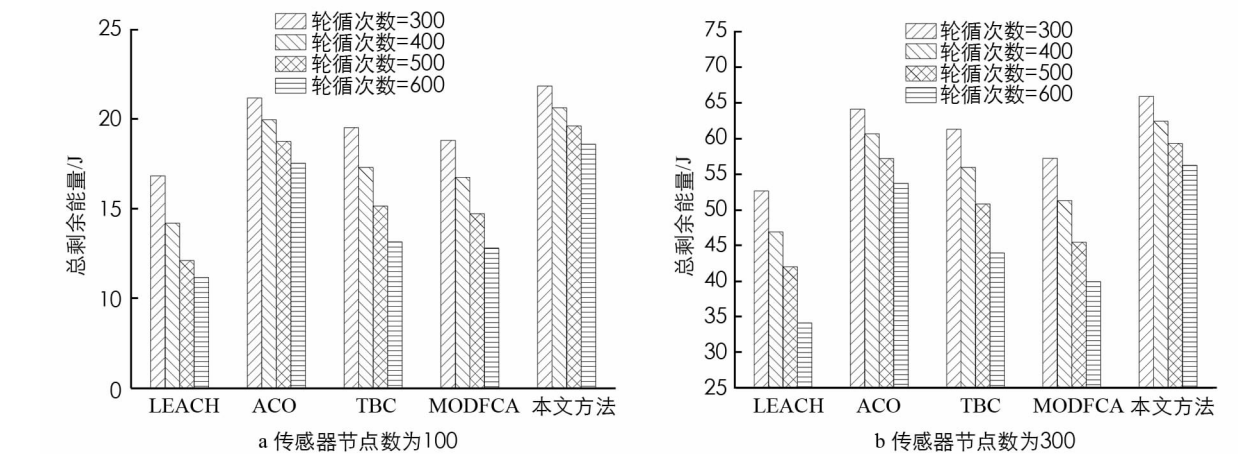


图 5 不同节能方案中总剩余能量的测试结果

4 结 语

本文提出一种基于多信息素蚁群优化的无线传感器网络节能路由算法,用于解决当前节能路由算法中出现的路由开销较大,传感器节点能耗高的问题. 该算法采用多信息素蚁群优化算法通过检测节点间的距离、剩余能量和相邻节点数来优化有效的路由,将传感器节点感知信息以最经济的能耗路径传输到基站,实现了节省路由开销和传感器节点能量的目的. 实验结果表明,本文提出的节能方案能够有效延长网络的使用寿命,比其他节能路由算法的性能更佳.

参考文献:

- [1] GENTA, LOBIYAL K, ABAWAJY. Energy Efficient Multipath Routing Algorithm for Wireless Multimedia Sensor Network [J]. *Sensors*, 2019, 19(17): 3642.
- [2] SELVI M, VELVIZHY P, GANAPATHY S, et al. A Rule Based Delay Constrained Energy Efficient Routing Technique for Wireless Sensor Networks [J]. *Cluster Computing*, 2019, 22(S5): 10839-10848.
- [3] YARINEZHAD R, HASHEMI S N. A Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks Based on Clustering and an Fpt-approximation Algorithm [J]. *Journal of Systems and Software*, 2019, 155: 145-161.
- [4] SAJWAN M, GOSAIN D, SHARMA A K. Hybrid Energy-efficient Multi-path Routing for Wireless Sensor Networks [J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2018, 67: 96-113.
- [5] 刘 宏, 关业欢, 吕孟伟. 基于自适应权重的无线传感器网络分簇路由协议 [J]. *小型微型计算机系统*, 2019, 40(12): 2603-2607.
- [6] LALWANI P, BANKA H, KUMAR C. BERA: a Biogeography-based Energy Saving Routing Architecture for Wireless Sensor Networks [J]. *Soft Computing*, 2018, 22(5): 1651-1667.
- [7] VENKATARAMANA S, SEKHAR B, DESHAI N, et al. Efficient Time Reducing and Energy Saving Routing Algorithm for Wireless Sensor Network [C]//2018 International Conference on Computer Vision and Machine Learning(IC-CVML). Andhra Pradesh: IEEE, 2018.
- [8] PANDEY S, KUMAR R. Re-LEACH: An Energy-Efficient Secure Routing Protocol for Wireless Sensor Networks [M]//International Conference on Computer Networks and Communication Technologies. Singapore: Springer Singapore, 2018.
- [9] YAMAMOTO R, NISHIBU S, YAMAZAKI T, et al. ACO-Inspired Energy-Aware Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks [J]. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 2019, 1: 5-13.
- [10] ARORA V K, SHARMA V, SACHDEVA M. ACO Optimized Self-organized Tree-based Energy Balance Algorithm for Wireless Sensor Network [J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2019, 10(12): 4963-4975.
- [11] 郑本立, 李跃辉. 基于改进蚁群算法的 SDN 网络负载均衡研究 [J]. *计算机科学*, 2019, 46(S1): 291-294.
- [12] 周 逊, 李其超, 宋威威, 等. 一种高效低时延的无人机自组网多跳 TDMA 协议 [J]. *光通信研究*, 2019(4): 55-60.
- [13] MITTAL N, SINGH U, SALGOTRA R. Tree-Based Threshold-Sensitive Energy-Efficient Routing Approach for Wireless Sensor Networks [J]. *Wireless Personal Communications*, 2019, 108(1): 473-492.
- [14] ABDOLKARIMI M, ADABI S, SHARIFI A. A New Multi-objective Distributed Fuzzy Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks with Mobile Gateways [J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2018, 89: 92-104.

Energy-Efficient Routing Scheme Based on Multi Pheromone Ant Colony Optimization for WSNs

CHEN Tao¹, LIU Shan-shan², LIANG Xiu-rong³

1. Department of Information and Intelligent Engineering, Chongqing City Vocational College, Yongchuan Chongqing 402160, China;

2. College of Computer Science, Sichuan Normal university, Chengdu 610101, China;

3. Graphics and Text Information Center, Chongqing City Vocational College, Yongchuan Chongqing 402160, China

Abstract: Aiming at the problems of low computing efficiency and poor energy-efficient in the current wireless sensor network routing algorithms, a Energy-efficient routing scheme based on multi pheromone ant colony optimization has been proposed. In this scheme, considering the residual energy, the number of adjacent nodes and the distance between nodes, the multi pheromone ant colony optimization algorithm is used to find the best route from sensor node to base station when the energy utilization rate of nodes is low, and the sensor data is transmitted to base station with economic energy consumption. The experimental results show that compared with other algorithms, the proposed algorithm has obvious advantages, and can effectively achieve the goal of energy-efficient routing cost and improve network lifetime.

Key words: wireless sensor network; ant colony optimization; multi pheromone; energy-efficient routing

责任编辑 夏 娟