

文章编号: 2095—0411 (2014) 02 - 0032 - 06

# 基于蚁群优化算法的无线传感器网络跨层路由协议<sup>\*</sup>

王洪元, 刘志远, 卜 莹

(常州大学 信息科学与工程学院, 江苏 常州 213164)

**摘要:** 针对无线传感器网络对实时性、鲁棒性及能耗平衡要求较高的特点, 提出了基于蚁群算法和跨层优化的无线传感器网络路由协议 ABCRO (Ant - Based & Cross - layer Routing Optimization)。算法综合考虑各层之间的信息共享机制, 将链路的通信开销和链路通信情况以数据的形式转换为网络性能优良的评估参数; 通过将接纳控制网络节点机制、信息素禁忌表的双向更新、节点剩余能量信息维护及跳数更新等信息加入路由选择公式, 有效增强算法的可扩展性, 降低通信过程中的拥塞问题。仿真实验表明 ABCRO 算法能够较快的找出一条最优的路径, 从而平衡网络能耗, 降低冲突率, 有效提高网络整体性能, 延长网络寿命。

**关键词:** 蚁群算法; 无线传感器网络; 跨层优化; 能耗平衡; 网络冲突

中图分类号: TP 312

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095—0411.2014.02.009

## Ant Colony Optimization Algorithm For WSN Cross-Layer Routing Protocol

WANG Hong-yuan, LIU Zhi-yuan, BU Ying

(School of Information Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** In view of the characteristics of high demand for wireless sensor networks in real - time, robustness and energy balance, this paper puts forward a wireless sensor network routing protocol based on ant colony algorithm and optimization of and cross layer named ABCRO (Ant - Based & Cross - layer Routing Optimization). Considering information sharing mechanism between the layers, the algorithm converts the communication overhead and link communication for excellent network performance evaluation parameters in the form of data, through adding the information to the routing algorithm such as admission control mechanism of network nodes. Two - way update of pheromone taboo table, information maintenance for noderesidual energy and hop count update, thus enhancing the scalability of the algorithm effectively and reducing congestion problems in the communication process. Simulation results show that ABCRO algorithm can quickly find out an optimal path, so as to balance the network energy consumption and decrease the rate of online conflict, effectively improve the overall network performance and prolong the network life.

**Key words:** ant colony algorithm; wireless sensor network; cross layer optimization; network conflict

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2013 - 12 - 20。

基金项目: 江苏省学研前瞻性联合研究项目 (BY2012097)。

作者简介: 王洪元 (1960—), 男, 江苏常熟人, 博士, 教授, 主要从事人工智能系统研究。

近年来无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, WSN)<sup>[1]</sup> 技术日趋成熟, 并得到了广泛的关注和应用。WSN 具有低功耗、低成本、分布式和自组织的优点, 但是节点通常采用电池供电, 每个节点的能量有限<sup>[2]</sup>, 有些节点可能因自然原因或者人为损坏、性能不稳定等失效, 能否维护网络的稳健性是评价一个路由协议的重要因素。

设计一个好的路由协议对于降低节点能耗、延长网络寿命具有重要意义。目前, 无线传感器网络的路由协议一般都是基于节能来设计的<sup>[3]</sup>, 这些协议只能利用局部信息, 对于能耗的优化受到限制, 从提高整体网络生命的角度看, 这些协议并没有取得显著的效果。

将蚁群算法应用于路由协议的设计中, 利用蚁群算法的网络分布式、组网简单、适应性强等特点很好的均衡了网络负载, 延长路网络寿命<sup>[4]</sup>。高效节能蚁群路由 (energy - efficient ant - based routing, EEABR) 算法在蚁群最优化 (ant colony optimization, ACO) 机制的基础上考虑无线传感器网络节点的能量水平和路由路径的长度, 从而节省能量, 达到网络的最大生存周期<sup>[5]</sup>。但是 EEABR 并未考虑不同协议层之间的影响以及网络拥塞问题, 因此本文提出了一种基于跨层负载感知和路由代价的蚁群算法路由协议 ABCRO, 将路由跨层设计思想和蚁群算法结合起来解决无线传感器网络中的负载均衡和网络拥塞的问题, 并与 EEABR 算法进行比较。仿真结果表明, 该算法可以有效的应用到无线传感器网络, 其在能量有效性, 网络工作寿命等方面总体上优于传统的 EEABR 协议。

## 1 无线传感网的路由优化设计思想

本文设计的算法目的是在不出现通信拥塞的情况下选择路由代价最小的路径, 在解决网络拥塞问题的同时考虑算法的收敛速度和搜索能力。算法采用前向蚂蚁 (Fant) 和后向蚂蚁 (Bant) 两种路由发现分组<sup>[6]</sup>。当蚂蚁行军到某一节点时若发现节点所处链路质量较差, 即丢包率较高, 以及若节点自身能量消耗过大, 都将会被陆续到达的蚂蚁抛弃, 从而避免节点成为新路径的中间某一节点。以控制接纳的方案缓解链路中拥塞节点转发前向蚂蚁而带来的附加能量开销, 从而提高整体链路的通信质量以及平衡网络能耗。若负载较轻的节点接收到传递过来的蚂蚁分组后, 在确保不会出现环路传递的情况下, 对本节点进行路由表和信息素的更新, 同时

传递蚂蚁分组继续搜寻链路的后续节点, 从而降低后续路由建立的传输代价和时延, 并提高信息素的更新效率。

算法具体实现时, 将对网络性能有较大影响的多种因子映射为控制信息素表更新及启发式因子路由代价的可变参数, 包括节点剩余能量、节点到汇聚节点的欧氏距离、路径节点的丢包重传率、节点到汇聚节点的跳数等。在对路径进行选择时对不同的影响因子赋予不同的影响权值, 使算法能够适应网络冲突较高、路由阻塞等情况, 根据节点的实时信息对路由选择进行动态控制, 从而最终找出在约束条件下的最优路径。

### 1.1 网络模型

本文所构建的网络由大量随机同构节点组成, 非均匀的分布在一定的监测范围内, 假设网络只有一个汇聚 sink 节点, 普通节点具有数据采集传输和中继的能力, sink 节点负责接收和处理源节点传送的数据。若源节点需要将数据发送到汇聚节点, 需要在邻节点集合中选择一个作为下一跳的节点, 之后依次进行选择。

$$p(N_i) = \{N_j \mid R_j > d_{ij}, N_j \in N\} \quad (1)$$

式中:  $R_j$ —通信半径;  $d_{ij}$ —节点  $i$  到周围节点  $j$  的直线欧式距离。

### 1.2 路由表的更新规则

无线传感器网络具有较强的灵活性, 其网络是动态变化的, 无线网络中的节点每隔一段时间需要检测其周围节点的变化情况, 及时发现周围是否有节点丢失或插入, 若有则及时更新路由表相关的信息, 提高系统的鲁棒性。

当节点  $k$  插入网络进之后, 经过路由表更新, 节点  $i$  获得所有有关节点  $k$  的信息, 对于新插入进的节点不做任何特殊处理, 依然按照概率选择式 (1) 与其他原始节点平等选择竞争。

在建立源节点到目的节点 sink 的路径后, 便可以直接进行数据的传输。蚁群算法中路径的选择主要是根据信息素的浓度来决定最优路径, 而每个从源节点到目的节点 sink 的蚂蚁为一个数据的数据包, 路径的增强通过经过该路径的蚂蚁修改路径上节点的信息素浓度来实现。后继蚂蚁能够根据信息素的浓度选择哪条路径传输数据, 从而实现蚁群算法的自动寻优机制。

路径信息素的浓度主要由两种机制来实现: 信

息素的自动挥发和增加。当蚂蚁从节点  $N_i$  转发数据到节点  $N_j$  时, 节点  $N_i$  路由表中对应的  $N_j$  的表项信息素浓度增强, 增强方式按照公式 (2)。同时为了避免蚁群算法的局部收敛过快, 蚁群算法还设定路径的信息素含量周期性的挥发, 增加周期性挥发系数可有效降低历史性的信息素的影响。

$$p_i = \begin{cases} \frac{M}{K} \frac{p_j}{\sum_{1 \leq l \leq k} p_l} & 1 \leq i \leq k \\ \frac{1}{K} & M < i \leq K \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $k$ —路由表更新之前的节点个数;  $p_j$  ( $j=1, 2 \cdots k$ )—节点原始邻节点的被选择概率;  $K$ —更新后的节点个数;  $M$ —增加的节点个数。

### 1.3 节点选择规则

#### 1.3.1 基于跨层负载感知的启发式因子

启发式因子实质上是描述网络路由代价的变量。在无线传感器网络中, 节点的分布都是非均匀性的, 相同的数据在不同的路径中传播所造成的能量消耗代价是不均衡的, 而且无线传感器网络节点的能量有限。因此在设计路由协议时, 一方面需要考虑节点自身能耗, 另一方面需要充分考虑无线传感器网络路由协议在各个方向的能量消耗代价均衡。蚁群算法具有较强的全局搜索能力, 以一定的概率规则寻找全局最优解。现有的大部分路由协议算法使用节点剩余能量和路径传输跳数作为路径代价的计算参量<sup>[7]</sup>, 然而能耗最小的路径往往不是能耗均衡的最优路径。因此本文通过改善算法启发式因子, 从而增强算法的全局寻优的能力。设启发式因子构建如公式:

$$\eta_j = f(E_{C_j}^C, E_{C_j}^{C_1} \cdots E_{C_j}^{C_{h_j}}, h_j), j \in N_i^k \quad (3)$$

式中:  $C_j$ —人工蚂蚁以  $j$  作为下一跳邻节点的路径;  $h_j$ —该路径的跳数;  $E_{C_j}^{C_n}$  ( $n=1, 2 \cdots h_j$ )—路径上距离最终目的 sink 节点  $n$  跳的节点剩余能量;  $N_i^k$ —路径上距离最终目的 sink 节点的节点集。

#### 1.3.2 基于剩余能量的启发式因子构建

考虑到仅使用跳数和剩余能量作为启发式因子的路由代价很难实现节点能耗均衡, 本文提出了基于剩余能量及路由跳数结合的路由代价模型。无线传感器网络中的节点大部分属于同构节点, 在传输或转发相同数据量的数据时所消耗的基本能量相同。在路由代价方程中加入节点能耗以及节点剩余能量, 即加入节点  $n$  转发一定数据包后的剩余能量与转发之前的能量之差  $E'$ 。

$$\Gamma_n = \frac{1}{E_n - E'} - \frac{1}{E_n} = \frac{E'}{E_n (E_n - E')} \quad (4)$$

式中:  $n=1, 2 \cdots h-1$  表示节点的跳数;  $E_n$  表示节点  $n$  的剩余能量。由式 (4) 可以得出数据包越大, 路由代价越大; 节点能量剩余越小, 节点在整个路径中的对应的路由代价越大。蚁群通过计算数据包对路由代价的影响以及通过判断节点剩余能量大小, 可绕开剩余能量较小的节点, 从而保证网络能耗均衡。

节点剩余能量  $E_n \gg E'$ , 因此可以在实际计算中简化算法, 得到式 (5)。

$$\Gamma_n = \frac{E'}{E_n (E_n - E')} \approx \frac{E'}{E_n^2} \quad (5)$$

在实际网络运行过程中, 距离 sink 节点越近的路径转发节点其转发数据的次数越多, 其能量下降越快, 因此在路由代价构建过程中需要充分考虑到距离 sink 节点越近的节点的路由代价权重, 如式 (6) 所示。

$$\Gamma_n = \lambda^n \frac{E'}{E_n^2} \quad (6)$$

式中  $\lambda$  的取值与路径有关,  $0 < \lambda < 1$ 。式 (6) 增强了跳数多的节点在路由代价中的影响力, 利用式 (6) 构建的启发式因子如式 (7) 所示。

$$\eta_j = \frac{\Gamma_j^{-1}}{\sum_{l \in N_i^k} \Gamma_l^{-1}} = \frac{\left( \lambda^n \frac{E'}{(E_{C_j}^{C_n})^2} \right)^{-1}}{\sum_{l \in N_i^k} \lambda^n \frac{E'}{(E_{C_j}^{C_n})^2}} \quad (7)$$

式中:  $E_{C_j}^{C_n}$ —路径  $C_j$  中第  $n$  跳节点的剩余能量。

#### 1.3.3 基于路由代价的信息素更新策略

蚁群算法在工作过程中通过蚂蚁不断在经过的路径上释放信息素, 从而使路径上的节点获得额外的信息素, 同时信息素会随着时间的延迟而挥发<sup>[8]</sup>。对于信息素的改变量的计算方法, Dorigo M 根据信息素更新时间不同, 提出了 3 种基本蚁群算法模型, 分别是 Ant - Cycle 模型 (蚁周模型)、Ant - Quantity 模型 (蚁量模型) 和 Ant - Density 模型 (蚁密模型)。经文献 [9] 实验论证, 蚁周模型的性能明显优于蚁量和蚁密模型, 但其并不能对无线传感器网络做出整体的分析计算。因此, 本文提出一种新的路由代价模型如式 (8) 所示, 对应的改进代价方程如式 (9) 所示。

$$\Delta \tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{C_{ij}}, & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁在本次循环中} \\ & \text{经过 } (i, j) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $Q$ —信息素浓度;  $C_{ij}$ —节点  $(i, j)$  的路径长度。

$$c_{\text{tabu}}^k = \varphi * c_i + (1 - \varphi) * c_p \quad (9)$$

式中:  $\text{tabu}$ —当前蚂蚁  $k$  在路径中已走过的节点;  $c_i$ —节点  $i$  的代价;  $c_p$ —代价函数;  $\varphi$ —常量, 综合考虑两个代价函数对路由代价的影响。

$$c_i = \frac{1}{d_{ij}} + \frac{1}{d_{j\text{sink}}} \quad (10)$$

式中:  $d_{ij}$ —节点  $i$  到临节点  $j$  的欧式距离;  $d_{j\text{sink}}$ —临节点  $j$  到节点  $\text{sink}$  的欧式距离。式 (10) 表明欧式距离在路由选择中所占的比重, 综合考虑节点相对于邻节点的欧式距离以及邻节点到节点  $\text{sink}$  的欧式距离, 通过增加变量, 尽量避免节点选择距离较远的节点作为下一跳节点, 降低路由开销。

WSN 节点在监测区域一般都是大范围的随机铺盖, 数目较为集中, 节点之间无线发送很容易导致信道相互干扰、数据冲突等, 导致链路传输误码率较高及网络拥塞<sup>[10]</sup>。本文在 MAC 层采用 CS-MA/CA 模型, 结合握手信号以及重发机制来降低碰撞率。若节点传送数据包, 需要通过 RTS/CTS/DATA/ACK 4 步握手交互的方式工作。当节点发送 RTS 或 DATA 之后没有接收到相应的 CTS 或 ACK 反馈返回, 或定时器超时, 则 MAC 会自动启动重传机制。

$$c_p = \frac{1}{m_p * h_p} = \frac{F_c}{h_p} \quad (11)$$

式中:  $m_p$ —链路质量,  $h_p$ —该路径的最小跳数,  $F_c$ —重传次数统计量。通过跨层在 MAC 层提取出有效的路由参数, 可以有效感知当前路径拥塞情况及链路质量, 求解出的数据传输路径能够满足对无线传感器网络的高可靠性要求。

## 2 无线传感器网络的跨层优化实现

### 2.1 蚂蚁数据包结构

#### 2.1.1 Ant Packet

无线传感器网络初始搜寻路径时, 节点向整个网络发送 ant package 消息包, 即路径搜寻蚂蚁。同时在整个网络中建立和更新路径上各节点的信息素浓度。

#### 2.1.2 New Node Packet

网络在运行过程中很难保持一成不变, 根据环境监测需求可能不断有新节点加入到网络, 当新节点加入到网络中时及时向周围节点发送 New Node

Packet 报文。

#### 2.1.3 Node\_packet

由于节点一直处于网络监测状态或中继路由传输状态, 随着时间延时, 网络中的某节点的能量会处于变化状态, 甚至节点由于能量不足退出传感网络监测。因此需要节点及时向周围的节点发送自身状态信息, 从而在蚁群算法构建时能够获取足够的节点信息来判断最优路径。而且, 当周围有新的节点加入时, 原住节点需要向新节点发送自己的 NP 报文, 从而将自己的信息告诉新节点。

#### 2.1.4 Node\_awk

对邻节点发送过来的数据包, 若接收成功, 则发送一个确认信息, 提供源发送节点该节点是否能够正常工作, 同时提供给源节点该链路的数据包发送成功率, 为链路选择提供判断依据。

### 2.2 算法实现步骤

①节点通过 GPS 或预定位置信息获取自己当前的地理位置。为保证初始节点的被搜索到的概率相等, 保证蚂蚁的初始搜索能力, 将所有节点初始信息素浓度设置相等, 启发式因子设置为 1, 能量强度大小设置相等。同时节点拥有周围节点的能量列表, 以及邻节点的相关信息。任何节点在网络中有唯一标识。②通过按需的方式, 每隔一段时间节点生成一个前向蚂蚁 (FANT) 开始探索可到达  $\text{sink}$  节点的路径。当链路  $L$  中的中间节点  $i$  在收到节点  $i-1$  的 F ANT 后, 根据 F ANT 所携带的节点列表判断当前的链路是否出现环路, 若出现环路则丢弃 F ANT, 否则在路由链路中增加节点  $i$ 。③中间节点收到来自邻节点的前向蚂蚁时, 若其跳数超过预先设定的生命值或者检测到蚂蚁经过的循环路径较长时, 便丢弃该蚂蚁分组, 否则按照公式 1 所计算得出的概率选择下一跳节点。同时对所经过的节点进行对应的表项值的修改, 更新节点的信息素、跳数和目的节点标识等。④F ANT 到达目的节点后, 目的节点根据整个路由链路信息创建 B ANT, 同时将链路表中所有节点信息倒序插入 B ANT 节点列表域, 按照源路由的方式选择下一跳节点向源节点进行转发, F ANT 自动消亡。⑤中间节点  $i$  收到来自节点  $i+1$  的 B ANT 后对信息素表中的各个表项的信息素值和路由代价按照预定的公式规则进行更新, 之后选择 B ANT 中的下一跳节点对蚂蚁分组进行转发。直到返回源节点。

### 3 算法的仿真和分析结果

#### 3.1 仿真参数

本文利用 ns2 作为仿真平台对设计的基于蚁群优化的无线传感网跨层路由协议进行实验。感知区域为  $(0, 0)$  到  $(200, 200)$  的平面正方形监测区域, 随机生成 100 个节点, 节点通信半径默认设置为 20m, 基站位置默认为  $(0, 0)$ 。设置节点初始能量为 2J, 数据包长度为 500byte。

蚁群算法中  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\rho$ 、 $m$ 、 $Q$  等参数的设置对算法的运行结果影响较大<sup>[11]</sup>。其中  $\alpha$  反应了蚁群在路径寻找过程中信息素的变化率, 影响蚂蚁对于下一跳节点的选择概率, 但过大可能使蚁群搜索路径过早的陷入局部; 最优启发因子  $\beta$  越大, 则蚁群选择距离目标节点越短的路径的可能性越大;  $\rho$  为路径上信息素的挥发系数, 通常设置  $0 < \rho < 1$  来模仿生物蚂蚁信息素的挥发, 从而避免某条路径上信息素的不断增加;  $m$  表示蚂蚁个数;  $Q$  表示每次蚂蚁经过一条路径时所释放的信息素量。因此利用蚁群算法解决无线传感器网路问题时, 合理地配置参数大小, 对于算法的全局收敛性和性能效率具有重要的影响。本文采用的蚁群算法参数: 迭代次数  $N_c = 10$ ,  $\alpha = 1.5$ ,  $\beta = 2$ ,  $\rho = 0.2$ ,  $Q = 2e_7$ 。

#### 3.2 仿真结果分析

##### 3.2.1 网络平均能量消耗

网络生存时间的长短与网络总能量的消耗量成反比, 能量消耗越多则网络的生存时间就越长。同时, 网络的总能耗为网络内部所有节点平均能耗之和。因此通过统计在不同时间点节点的平均能耗可以推测网络的整体性能。

本文定义的节点平均能耗为特定模拟时间内网络消耗总能量与节点总数之比。分别检测节点平均能耗随节点数量和仿真时间的变化情况, 如图 1, 图 2 所示。

从图 1 可以看出, ABCRO 算法比 EEABR 算法在节点平均能量消耗上有了较大的提高。当节点数目为 200 时, ABCRO 的平均能耗比 EEABR 减少近 20%。从图 2 可以看出, 开始运行的结果显示 EEABR 的能量消耗小于 ABCRO, 原因为开始收发阶段向蚂蚁报文的收发开销比 EEABR 算法要大, 且初始阶段 ABCRO 算法需要节点获取的周围节点信息要多。但随着协议持续运行, 模拟时间大

于 60s 后, ABCRO 的平均能耗要低于 EEABR。这是因为蚂蚁包在选择下一跳节点时, 通过对邻节点位置以及邻节点距离 sink 节点的位置等多种状态参数来控制下一跳节点的选择概率。避免路径产生环路, 同时增加算法的收敛速度, 从而有利于寻找最优解, 所以节点平均能耗相对较小。

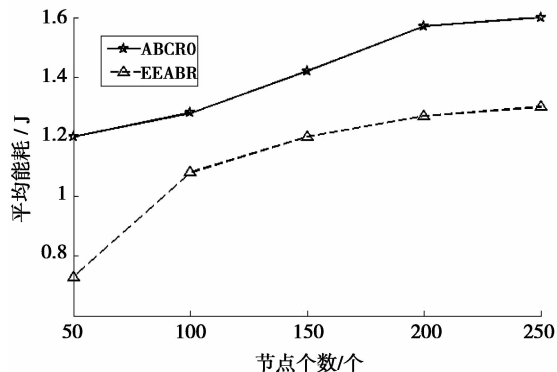


图 1 节点平均能耗随节点数量变化图

Fig. 1 Nodes with average energy consumption change in the number of nodes

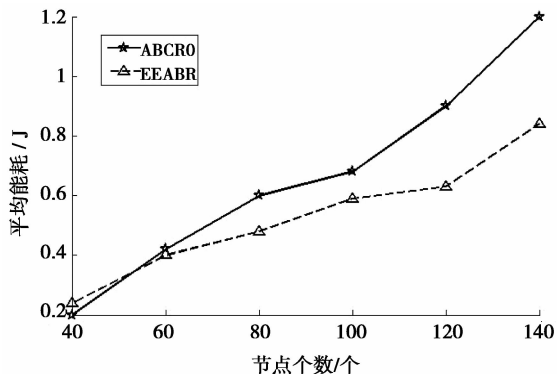


图 2 节点平均能耗随仿真时间变化图

Fig. 2 Node average change in energy consumption over the simulation time

##### 3.2.2 存活节点个数

工作一段时间后, 若节点由于能量耗尽死亡的数量越多, 则代表网络寿命越短, 可持续性越差。网络中存活节点的个数越多则网络的寿命越长。本文对比 ABCRO 和 EEABR 协议的网络生命周期, 采用节点存活时间和网络存活节点个数作为网络寿命的评价指标, 网络生存节点个数随模拟时间变化情况如图 3 所示。

图 3 中 EEABR 比 ABCRO 算法更早出现节点丢失及死亡。随着时间延迟, ABCRO 整体节点丢失的幅度比 EEABR 更缓慢, 因此 ABCRO 的整体生命周期要高于 EEABR, 在完成相同的监测任务的基础上使用 PRACA 路由协议的网络性能更好,

能够提供更长时间的网路服务。

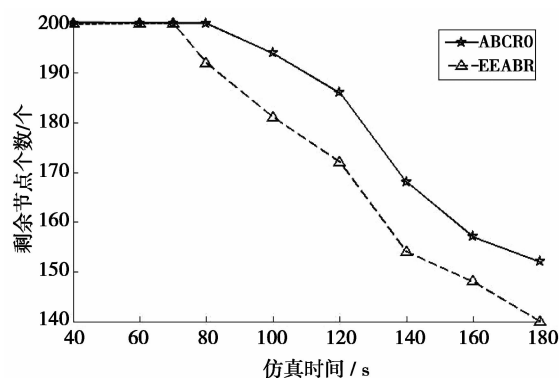


图3 网络生存节点个数随模拟时间变化情况

Fig. 3 The number of nodes in the network to survive changes over the simulation time

## 4 结 论

本文从节点能耗以及网络数据拥塞的角度出发, 针对蚁群算法在蚂蚁报文设计、状态转移概率公式以及信息素的更新公式等方面进行优化, 以跨层控制的思想来构造路由代价公式, 提出了一种基于蚁群优化算法的无线传感器网络跨层路由协议。从实验结果可以看出, 蚁群优化算法 ABCRO 相比较 EEABR 具有更强的能量有效性和更长的网络生命周期, 降低了网络拥塞情况, 有效的提高了网络的整体性能。

## 参考文献:

- [1] Akyildiz I, Su W, Sankarsubramaniam Y, et al. A Survey on Sensor Networks [C]. New York: Elsevier, 2002: 102 - 114.
- [2] 李智明, 陈佳品, 李振波. 基于能耗优化的 AODV 路由协议 [J]. 传感器与微系统, 2012, 31 (7): 42 - 43.
- [3] 闰苏莉, 武晓朦, 魏娜, 等. 基于改进遗传算法的油田配电网无功智能化 [J]. 电子设计工程, 2009, 17 (1): 20 - 22.
- [4] Aghaei R, Rahman M A, Gueaieb W, et al. Ant Colony - Based Reinforcement Learning Algorithm for Routing in Wireless Sensor Networks [C]. Warsaw: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2007: 73 - 79.
- [5] 金彦亮, 张勇, 薛用. 基于拥塞控制的无线传感网蚁群最优化路由协议 [J]. 上海大学学报: 自然科学版, 2012, 18 (6): 552 - 554.
- [6] Mesut Gunes, Udo Sorges, Imed Bouazizi. ARA - the ant - colony based routing algorithm for MANETs [J]. Parallel Processing Workshops, 2002, 13 (3): 79 - 85.
- [7] 陈凤超, 李融林. 基于路由代价的无线传感器网络蚁群路由算法 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2011, 39 (5): 36 - 43.
- [8] Lee J W, Ju - Jang L. Ant - colony - based scheduling algorithm for energy - efficient coverage of WSN [J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12 (10): 3036 - 3046.
- [9] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agent [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1996, 26 (1): 29 - 41.
- [10] Beboit L, Bart B, Ingrid M. A survey on wireless body area networks [J]. Wireless Networks, 2011, 17 (1): 1 - 18.
- [11] 陈宇. 基于改进蚁群算法的无线传感器网络路由的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012.