

# 基于人工蜂群的无线传感器网络能耗均衡算法

廖利, 王华东

(周口师范学院 计算机科学与技术学院, 河南 周口 466001)

**摘要:** 由于无线传感器网络中的节点链路状况、数据传输能耗及节点剩余能量的限制, 造成网络中部分感知节点寿命缩短, 影响网络生存周期, 提出了一种基于人工蜂群算法的 WSNs 能耗均衡算法, 优化网络能耗均衡, 从而提高网络寿命; 文章给出了网络能耗相应的数学模型及优化求解算法, 介绍人工蜂群算法的寻找食物过程, 阐述了人工蜂群算法在网络能耗均衡方面的实现步骤; 通过实验仿真证明, 文章提到的算法与 LEACH 分簇算法、蚁群优化算法相比, 具有更好的能耗和负载均衡能量、丢包率和时延性, 有效地提高了网络生存周期。

**关键词:** 无线传感器网络; 人工蜂群算法; 能量均衡; 生命周期; 路由策略

## Energy Balance Routing Algorithm Based on Artificial Bee Colony Algorithm for Wireless Sensor Networks

Liao Li, Wang Huadong

(School of Computer Science and Technology, Zhoukou Normal University, Zhoukou 466001, China)

**Abstract:** Owe to the wireless sensor network node link status, data transmission energy consumption and residual energy constraints, causing shortening fraction sensor network lifetime, affecting the network life cycle. Proposes a WSNs energy equalization algorithm based on artificial bee colony algorithm, optimization of network energy consumption, so as to improve the network lifetime. This paper presents a mathematical model of energy consumption and corresponding optimization algorithm, artificial bee colony algorithm describes the process of looking for food, illustrates the steps of artificial bee colony algorithm to balance the energy consumption of the network. Through simulation experiments demonstrate that this algorithm compared with LEACH clustering algorithms, Ant Colony optimization algorithm, it has better power consumption and load-balancing the energy, the packet loss rate and delay, effectively improve the network life cycle.

**Keywords:** wireless sensor networks; artificial bee colony algorithm; energy balance; life cycle; routing strategy

## 0 引言

无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSNs) 由许多个感知节点组成, 节点一般具有采集数据和通信能力、计算能力, 以多跳通信、自组织方式组成的网络, 并由电池供电, 因此如何高效合理使用节点的能源, 提高网络通信能力、延长网络寿命是无线传感器网络关键技术之一<sup>[1]</sup>。感知节点由于能量有限, 容易出现“热区效应”、“路由空洞”等现象造成网络中部分节点负载过重而能量尽早的耗完, 造成感知节点过早死亡等情况, 因此如何减少“热区效应”、“路由空洞”等问题, 如何降低网络能耗, 延长网络寿命, 保证网络内的负载均衡是无线传感器网络重要的研究方向<sup>[2]</sup>。

国内一些学者提出了一些能耗均衡算法, 如曹永洁等<sup>[3]</sup>提出了一种新的无线传感器网络能耗均衡的流量调节机制, 从而延长网络寿命; 陈凤超等<sup>[4]</sup>提出了一种新的基于路由代价的无线传感器网络蚁群路由算法, 利用蚁群算法的优越性能应用到转发路由中, 提高了路由转发效率; 乐俊等<sup>[5]</sup>提出了无线传感器网络中一种基于非均匀划分的分簇数据融合算法; 以及梁平

元, 刘星成等<sup>[6]</sup>提出了一种新的基于协作 MIMO 的多跳 WSN 动态分簇选择算法。以上这些算法延长网络寿命, 但在全网能耗均衡方面并不理想, 本文提出一种新的基于人工蜂群算法的 WSNs 能耗均衡算法, 优化网络能耗均衡, 提高网络寿命。

## 1 WSNs 能耗模型

给定一个  $M \times M$  的正方形区域内随机播撒放置了  $N$  个感知节点, 其中定义: 1) 在监测区域内, 采集感知节点, 路由节点及汇集节点位置固定, 均不会移动。2) 网络里面的感知节点, 路由节点及汇集节点结构一样, 其中感知和路由节点能量有限, 汇集节点能耗无限。3) 网络数据传输链路是对称的, 假如知道节点发射功率, 那么接收者可以根据 RSSI 算法来计算发射者的近似距离。

为了简化 WSNs 路由能耗均衡问题, 利用图论相关知识对 WSNs 网络进行简化处理, 将其看做是一个无向加权连通网络。定义为一个  $n$  个点  $m$  条边的连通图  $G(V, E)$  网络模型, 其中  $V$  为簇首和 Sink 节点,  $E$  是网络连通边集。另外定义  $C$  为簇首节点集合, 有  $N$  个子节点, 路由问题可以理解为在  $G$  中寻找从簇头  $C$  中任意发送数据的子节点到汇聚节点满足能耗均衡要求的多条路径。定义网络中每一跳链路  $i$  消耗能量  $e_i$ , 链路延迟时间为  $t_i$ , 传输链路带宽为  $b_i$ , 那么通过  $N$  跳数路由由链路要满足目标函数  $f_{\text{fitness}}(\text{Sink})$  最小:

$$f_{\text{fitness}}(\text{Sink}) = \sum_{i=1}^n (\alpha \cdot e_i + \beta \cdot t_i + \gamma \cdot \frac{1}{b_i}) \quad (1)$$

收稿日期: 2014-06-16; 修回日期: 2014-07-14;

基金项目: 国家自然科学基金(61103143)。

作者简介: 廖利(1979-), 女, 湖北武汉市人, 硕士, 讲师, 主要从事计算机应用方向的研究。

王华东(1977-), 男, 河南沈丘县人, 硕士, 副教授, 主要从事网络通信方向的研究。

$$\min f_{\text{fitness}}(\text{Sink}) = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{n_i} \left[ \epsilon(E(s_j^{(i)} s_{j+1}^{(i)})) + \eta(T(s_j^{(i)} s_{j+1}^{(i)})) + \mu \left( \frac{1}{B(s_j^{(i)} s_{j+1}^{(i)})} \right) \right] \quad (2)$$

其中:  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $\gamma$  分别表示各个因子权重系数。

利用一阶无线电通信模型来计算网络路由节点能耗, 定义发送 1 bit 数据到距离为  $d$  的位置, 消耗能量的总和为发射电路损耗与功率放大损耗之和, 如公式 3。

$$E_{Tx}(s, d) = \begin{cases} s \cdot E_{elec} + s \cdot \epsilon_{fs} \cdot d^2, & d < d_0 \\ s \cdot E_{elec} + s \cdot \epsilon_{mp} \cdot d^1, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $E_{elec}$  为发射电路能量损耗,  $\epsilon_{fs}$  和  $\epsilon_{mp}$  分别表示自由空间模型和多路径衰减模型中功率放大所需的能量。节点接收 1 bit 的能量消耗如式 (4):

$$E_{Rx}(s) = s \cdot E_{elec} \quad (4)$$

## 2 人工蜂群算法

人工蜂群算法 (artificial bee colony algorithm, ABC) 是在 2005 年研究学者 Karaboga 根据蜜蜂群体觅食行为, 建立在蜜蜂群体生活习性模型基础上, 提出的一种新的元启发式智能仿生算法, 它是一宗非数值计算的组合优化算法。算法中蜜蜂群体通过不同个体分工协作、角色转换和舞蹈行为涌现出来的群体智能。蜜蜂群体可以在任何环境下以较高的效率从食物源中采集花蜜, 同时还可以根据环境变化而改变自己的生活习性, 能够非常好的适应环境<sup>[7]</sup>。

蜂群采蜜过程中产生非常高的群体智慧, 它采蜜过程中去寻找蜜源这个最小搜索模型包含 3 个基本组成要素: 食物源、雇佣蜂和未被雇佣的蜜蜂。在人工智能算法中, 把蜜蜂群体分为 3 类: 引领蜂, 跟随蜂以及侦查蜂。其中引领蜂、跟随蜂主要是对蜜源的开采, 侦查蜂主要是去侦查蜜源, 尽量找到多个蜜源。引领蜂根据找到蜜源的数量和大小, 选择比较好的蜜源作为初始蜜源并标记, 再释放与标记的蜜源成正比的路径信息, 以招募其它的跟随蜂。跟随蜂则采用轮盘赌方式取合适的标记蜜源, 同时在其附近搜索新的蜜源, 与初始引领蜂标记蜜源进行比较, 选取其中较好的收益度较大的蜜源, 更改本次循环的初始标记蜜源。假如在采蜜过程中, 蜜源经过一段时间后它的蜜源搜索方式还不变, 则相应的引领蜂就变成侦查蜂, 随机搜索去寻找新蜜源, 来代替初始标记蜜源中的相应位置, 确定最终蜜源位置地点。

## 3 ABC 在 WSNs 能耗均衡中的应用

基于人工蜂群算法的无线传感器网络能耗均衡路由协议 (balanced energy consumption routing protocol for WSNs based on artificial bee colony algorithm, ABC-BECP) 的设计思想, 是基于蜜蜂寻找最佳蜜源的思想而来, 它主要分为路径搜索和数据传输过程中是否进行数据融合。在 ABC-BECP 通信协议中, 将人工蜂群分为引领蜂, 跟随蜂以及侦查蜂。其中侦查蜂主要负责寻找数据传输路径, 在探路过程中, 节点与侦查蜂分别记录网络跳数、节点的 ID 号码参数, 这样侦查蜂搜集的各条记录就形成了感知节点数据传输的选择路径, 获得网络的拓扑结构, 并建立数据通信路径表, 建立基于节点跳数的备选路径集。而引领蜂和跟随蜂主要负责采蜜, 及感知节点采集到的进行数据传输工作。无线传感器网络数据传输是基于数据驱动的, 因此本文提出的 ABC-BECP 数据传输阶段是否需要进行

数据融合。假如在传输数据阶段不需要进行数据融合, 那么源节点就会查询自己的数据发送路径表, 选择其它路径再转发数据包。假如需要进行数据融合处理时, 簇头节点会在收到一跳跳数时进行数据融合, 之后将融合后的数据转发给后面的节点, 一直到汇聚节点 Sink 处。

基于人工蜂群算法路径搜索步骤如下。

步骤 1: 设置主要初始参数: 种群个数、最大循环次数等, 其中引领蜂和跟随蜂各占 50%, 侦查蜂 1 个;

步骤 2: 随机产生若干个初始蜜源;

步骤 3: 引领蜂搜索蜜源, 计算蜜源适应度值, 进入循环;

步骤 4: 跟随蜂分享蜜源信息, 选择其中一个蜜源, 然后搜索临近新蜜源, 寻找新的路径;

步骤 5: 对新蜜源计算适应度值, 并根据贪婪机制选择更优的蜜源;

步骤 6: 若循环至限定次数后, 蜜源适应度值仍不达标则放弃, 引领蜂变成侦查蜂继续搜索, 然后更新位置;

步骤 7: 存储此时的最优解;

步骤 8: 循环次数加 1;

步骤 9: 寻找  $N$  跳路由链路要满足目标函数  $f(\text{Sink})$  最小, 满足终止条件, 达到最大循环次数。

本文提出的 ABC-BECP 通信协议运用蜜蜂采蜜, 周期的寻找最佳蜜源的方式来更新数据通信路径表, 进而时常更新网络的拓扑结构。ABC-BECP 通信协议将 2 个节点间距及剩余能量融入蜜蜂寻找蜜源的过程中, 源节点以一定的概率选择后继通信节点, 因此, 数据包的传输路径不会总是沿着同一条路径, 在不同的路径上实现数据包的分流, 实现能耗的均匀分布, 达到了网络中能量均衡消耗的目的。

## 4 仿真实验与分析

仿真环境设置在  $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$  的监测区域中随机抛洒无线传感器网络节点, 节点个数设为 100 个, 所有节点通信距离设定一样, 都设置为 30 m, 节点初始能量为 1 J, 节点传输能量损耗为 50 nJ/bit, 接收数据能量消耗为 30 nJ/bit, 发送数据包大小为 80 bytes, 整个仿真实验运行时间为 300 s, 实验仿真计算机配置为内存 4G 的奔腾处理器, 仿真环境采用的是 Matlab 编程, 版本为 R2008a。

人工蜂群参数设置: 循环次数  $C = 100$ , 引领蜂和跟随蜂总数  $S$  为 50, 且各占总数的一半, 控制参数限定次数为 10, 蜂群初始权重  $r_{\min} = 0.4$ ,  $r_{\max} = 1.2$ ,  $r$  初始值设为 1, 阈值  $\epsilon = 10^{-6}$ 。实验中所用的参数如表 1 所示。

表 1 仿真实验参数

参数	取值
网络规模	200 m × 200 m
节点个数	200
初始能量	1 J
通信范围	50 m
传输能耗	30 nJ/bit
接收能耗	20 nJ/bit
数据包大小	4 kB
仿真时间	500 s

本文主要从能耗均衡性分析、负载均衡性分析、网络总能耗分析、网络节点存活个数、丢包率及时延等方面对 leach 经典分簇算法<sup>[8]</sup>、基于蚁群算法的 Ant-BECP 协议<sup>[9]</sup>及本文提出 ABC-BECP 的 WSNs 能耗均衡算法进行对比分析。其中 Ant-BECP 算法在簇内的感知节点将采集到的数据发送到簇头，之后对数据进行融合，并采用优化后的蚁群算法，充分考虑链路能量、带宽及时延等情况选择下一跳路由。

1) 能耗均衡性分析:

无线传感器网络以数据为中心，能耗负载均衡是衡量网络性能参数的重要指标。一般的感知节点采集到的数据都往无线传感器网络汇聚节点发送，导致网络造成拥塞，形成能量空洞，而能耗是否均衡是评判网络寿命的重要依据，负载均衡性对延长整个 WSNs 的生命周期至关重要。负载均衡性的衡量标准可以用所有节点负载的方差来描述:

$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}{n}$$

其中:  $E_i$  为感知节点  $i$  的能耗负载,  $\bar{E}$  是网络负载平均值,  $n$  为无线传感器网络所有节点个数。节点负载方差  $\varphi$  值越大说明负载能耗均衡性较差, 反之如果  $\varphi$  值越小, 说明网络能耗均衡性越好。LEACH 经典分簇算法、基于蚁群算法的 Ant-BECP 协议和本文提出的算法网络能耗均衡性结果如图 1 所示。

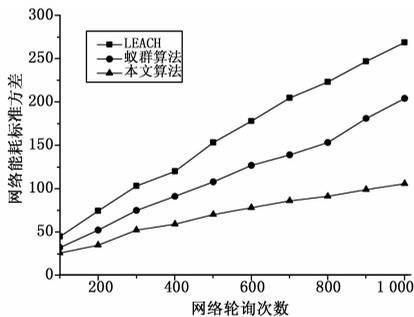


图 1 网络的能耗均衡性对比

从图 1 中可以看出, 随着仿真轮询次数的增加, 3 种算法的能耗都在增大, 都呈现线性增长趋势, 但是 LEACH 经典分簇算法的能耗标准方差最大, 则说明该算法的负载能耗均衡性较差, Ant-BECP 算法次之, 能耗均衡性效果一般, 本文提出的算法能耗均方差最小, 则说明该算法的负载能耗均衡性最好, 另外通过计算, 本文算法的能耗均衡性标准方差比 LEACH 算法低 67.5%, 比 Ant-BECP 算法低 26.4%。

2) 负载均衡性分析:

负载均衡因子 (load balancing factor, LBF) 是负载均衡建立在现有的无线传感器网络架构之上, 为网络性能分析提供一种方便快捷有效地评估方法, 有效扩展网络的带宽、提高网络吞吐量以及增加网络数据处理能力、增强网络性能、提高网络灵活性和可用性。其中我们先定义: 节点度的意思是节点的邻居个数, 节点度的大小反映了网络的连通性能。另外  $L_{LBF}$  定义为网络内部成员感知节点数 (包括簇头节点) 方差的倒数, 其中如  $L_{LBF}$  越大, 则网络负载均衡性能越好, 具体计算公式为:

$$L_{LBF} = \frac{n_c}{\sum_{i=1}^{n_c} (x_i - u)^2}$$

其中:  $n_c$  为无线传感器网络感知节点的个数;  $x_i$  为第  $i$  个簇头成员中感知节点数;  $u$  则为所有簇头节点的平均节点数。本文对 3 种算法的群间负载平衡性能分析进行对比, 具体结构如图 2 所示。

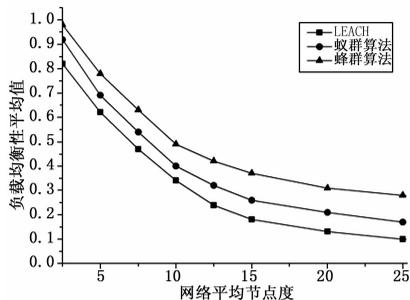


图 2 网络 LBF 性能对比

从图 2 中看出, 相对于经典分簇算法 LEACH、基于蚁群算法的 Ant-BECP 算法没有本文提出算法获得更好的负载均衡因子的性能。随着节点度的增加, 负载均衡平均值都逐渐降低, 但是从下降的幅度来看, LEACH 算法的  $L_{LBF}$  值下降最明显, Ant-BECP 算法次之, 本文提出的算法  $L_{LBF}$  值最高, 说明本文提出的算法负载均衡性最好。另外通过计算, 本文算法的负载均衡性平均值比 LEACH 算法高 55%, 比 Ant-BECP 算法高 31.4%。

3) 网络总能量消耗:

在无线传感器网络中, 网络总能量消耗也是评价网络均衡性的重要指标。图 3 给出了 3 种算法随轮询次数的增加, 网络总能耗消耗情况对比。

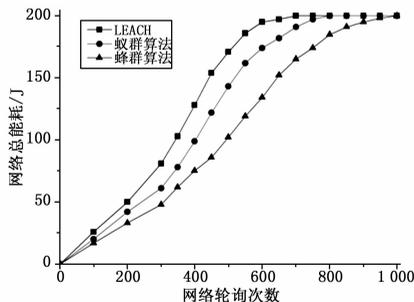


图 3 网络总能耗对比

从图 3 中可以看出, 随着网络轮询次数的增加, 网络的总能耗都在增加, 而且都增加的比较迅速, 但是 LEACH 算法在 600 次轮询之后能耗接近耗完, 网络接近“死亡”, Ant-BECP 算法在 700 次轮询左右能耗耗尽, 而本文提出是算法在接近 900 次轮询之后, 网络能耗耗尽。说明本文的算法网络工作时间最长, 生存周期也最长。

4) 节点存活个数:

3 种算法的网络节点存活个数如图 4 所示。从图中可以看出, 3 种算法都在 400 次轮询次数时, 网络感知节点能耗尽, 开始“死亡”, 但是 LEACH 算法的节点存活个数下降非常快, Ant-BECP 算法次之, 本文提出的算法网络节点存活