

文章编号: 1001-0920(2012)06-0929-04

## 一种基于分簇蚁群策略的无线传感器网络路由算法

刘 逵<sup>1</sup>, 刘三阳<sup>1</sup>, 冯海林<sup>1</sup>, 焦合华<sup>1,2</sup>

(1. 西安电子科技大学 理学院, 西安 710071; 2. 长江师范学院 数学与计算机学院, 重庆 408100)

**摘要:** 如何最大化地延长网络的生存时间是无线传感器(WSN)网络研究的核心问题. 基于分簇策略, 提出一种能量有效的路由算法(EEA). 该算法利用分簇原理减少了参与寻找最优路径的节点数, 从而降低了系统的能耗. 同时设计一种改进的最优路径评价标准, 该标准兼顾了传输路径上各节点的剩余能量和最优路径上总的能量消耗. 仿真结果表明, 与其他蚁群策略的路由算法(如: 基于蚁群算法的路由算法(ARA)和EEAWSN)相比, 该算法能在寻找最优路径时避开剩余能量少的节点, 使最优路径上各节点的能量呈整体性衰落, 从而沿长了网络的寿命.

**关键词:** 无线传感器网络; 分簇; 蚁群算法; 最优路径度

中图分类号: TN 915

文献标识码: A

## An energy efficient routing algorithm based on clustering and ant colony optimization for wireless sensor networks

LIU Kui<sup>1</sup>, LIU San-yang<sup>1</sup>, FENG Hai-lin<sup>1</sup>, JIAO He-hua<sup>1,2</sup>

(1. School of Science, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. College of Mathematics & Computer Science, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China. Correspondent: LIU Kui, E-mail: liukui\_1980@163.com)

**Abstract:** How to make efficient use of the limited energy of nodes so as to prolong the lifetime of the wireless sensor network(WSN) is an important problem. An energy efficient routing algorithm(EEA) based on clustering is presented. This algorithm uses clustering to reduce the number of nodes which join in researching route, which can reduce consumer energy. The improve route optimal degree is presented to evaluate the performance of the chosen route. Simulation results show that, compared with other algorithms, like ant colony optimization(ACO)-based routing algorithm(ARA) and EEAWSN, the proposed approach is able to keep away from the node with less residual energy, which can improve the life of networks.

**Key words:** wireless sensor network; clustering; ant colony optimization; route optimal degree

### 1 引言

无线传感器网络是集传感器技术、嵌入式技术以及低功耗无线通信技术而形成的一种以自组网络(Ad.Hoc)方式构成的无线网络. 其主体是低成本、低功耗、多功能的集成化微型传感器. 这些微型传感器具有无线通信、数据采集和处理的功能. 无线传感器网络能通过其节点完成对监测对象的信息采集, 并利用嵌入式系统对信息进行简单处理, 然后再通过随机自组织网络以多跳中继方式将信息传送给目标节点, 从而完成对监测区域的掌控<sup>[1-3]</sup>. 但传感器节点通常是采用能量有限的电池为其提供能量, 且其工作环境通常比较恶劣, 替换节点的电池或对电池进行充电十分困难. 因此, 在保证网络的容量、节点

的吞吐量<sup>[4]</sup>以及对被监测区域的覆盖成度<sup>[5-8]</sup>这3个前提条件下, 如何有效利用节点的有限能量<sup>[9-10]</sup>, 从而最大化延长网络的生存时间变得至关重要. 蚁群算法<sup>[11]</sup>对于解决网络路由问题具有良好的效果. 文献[12]提出的路由算法(ARA)可找到从源节点到目标节点的最短路径, 但没有考虑节点的剩余能量, 这样可能出现某些节点被过多的使用, 从而导致其过早死亡的情况. 文献[13]则从平均剩余能量和最小剩余能量的角度出发, 找到了平均剩余能量最大的最优路径; 但没有充分利用传感器网络自身的特点, 采用最大分簇策略来减少参与寻找最优路径的节点数目, 进而减少网络的能耗.

本文在上述算法的基础上, 提出一种基于能量有

收稿日期: 2010-10-23; 修回日期: 2011-02-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60874085, 60974082).

作者简介: 刘逵(1980—), 男, 博士生, 从事无线传感器网络算法及其优化的研究; 刘三阳(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 从事现代优化理论与方法、网络算法及其在通信网中的应用等研究.

效的最大分簇蚁群优化算法 (EEA). 该算法首先求出源节点和目标节点的最大圆簇, 利用最大圆簇来减少参与寻找最优路径的节点数目, 进而降低了网络寻找最优路径的能耗. 该算法还给出了一种新的最优路径度判定标准来评价路径的最优性, 该评价标准能保证找到一条路由能耗小、最少剩余能量节点的剩余能量大以及节点平均剩余能量大的最优路径; 同时均衡了路由上各节点的剩余能量, 保证了最优路由上的节点呈整体性衰落, 从而沿长了网络的寿命.

## 2 通信能量消耗模型

本文提出的无线传感器网络是一个分布在 2 维区域上的网络, 并假设各节点的接收和发射天线是全方位的, 并在同一频率下进行数据通信; 源节点和目标节点均随机产生; 网络中所有节点都是同构的且能量有限, 同时每个节点都有唯一的标识 (id). 通信能量消耗模型采用文献 [1] 的模型. 当源节点要发送大小为  $k$  比特的信息给相距为  $d$  的目标节点时, 源节点和目标节点双方的能量消耗量如下:

发射能量消耗

$$E_{Tx}(k, d) = \begin{cases} E_1 \times k + a \times k \times d^2, & d \leq d_0; \\ E_1 \times k + b \times k \times d^4, & d > d_0. \end{cases} \quad (1)$$

接收能量消耗

$$E_{Rx}(k) = E_1 \times k. \quad (2)$$

其中:  $E_1$  为发送或接收的功耗, 当传输距离不大于阈值  $d_0$  时, 功率放大损耗采用自由能量模型; 当传输距离大于阈值  $d_0$  时, 功率放大损耗采用多路径衰减模型;  $a, b$  为这两种情况下单位功率放大时所需的能量.

## 3 EEA 算法

### 3.1 理论基础

对于随机生成的无线传感器网络图  $G(v, E)$ , 其中:  $V(G)$  为图  $G(v, E)$  的顶点集,  $E(G)$  为图  $G(v, E)$  的边集, 任意两节点  $v_i$  与  $v_j$  之间如果存在一条边, 则记该边为  $e(v_i, v_j)$ , 且该边的权定义为两节点之间距离  $d^*$  的平方. 设源节点为  $v_i$ , 目标节点为  $v_j$ , 以两节点之间连线的中点  $O$  为圆心, 以  $(\sqrt{2} + 1)d^*$  为直径做最大圆簇. 在最大圆簇内节点组成的集合为  $v_1$ , 在最大圆簇内边组成的集合为  $E_1$ , 以  $v_1$  为顶点集、 $E_1$  为边集的图  $G_1(v_1, E_1)$  为图  $G(v, E)$  的子图. 以下定理保证了源节点  $v_i$  和目标节点  $v_j$  在子图  $G_1(v_1, E_1)$  中的最优路集与其在图  $G(v, E)$  中的最优路集相同. 这样便可在子图  $G_1(v_1, E_1)$  上寻找源节点  $v_i$  到目标节点  $v_j$  之间的最优路集, 降低了蚁群的搜索范围, 从而达到降低网络能耗的目标. 设源节点  $v_i$  与目标节点  $v_j$  之间直接传输单位比特的信息所消耗的能量为  $E^*$ .

**定理 1 (最小圆簇定理)** 由源节点  $v_i$  途经一个中间节点  $w$  到目标节点  $v_j$  的路由, 如果在这条路由上传输单位比特的信息所消耗的总能量小于等于  $E^*$ , 则节点  $w$  一定在以  $O$  为圆心、 $d^*$  为直径的最小圆簇内.

**证明** 设源节点  $v_i$  与节点  $w$  之间的距离为  $d_1$ , 节点  $w$  与目标节点  $v_j$  之间的距离为  $d_2$ . 因为路由  $v_i w v_j$  上传输单位比特的信息所消耗的总能量小于等于  $E^*$ , 所以  $d_1^2 + d_2^2 \leq (d^*)^2$ , 即角  $\angle v_i w v_j \geq 90^\circ$ . 因此, 节点  $w$  一定在以  $O$  为圆心、 $d^*$  为直径的最小圆簇内.  $\square$

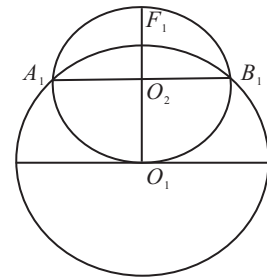


图 1 最小圆簇半径最大外扩图示

如图 1 所示, 以圆  $C_1$  中的任一条弦  $A_1B_1$  为直径做圆  $C_2$ , 设圆  $C_2$  上距圆  $C_1$  的圆心  $O_1$  最远的点为  $F_1$ ,  $h_1$  为  $O_1F_1$  两点之间的距离. 当弦  $A_1B_1$  的长为  $\sqrt{2}r_1$  时,  $h_1$  达到最大值  $\sqrt{2}r_1$ , 即当弦长为  $\sqrt{2}r_1$  时, 圆  $C_2$  把圆  $C_1$  的半径向外扩的最长, 此时外扩的距离为  $(\sqrt{2} - 1)r_1$ . 设弦  $A_1B_1$  的中点为  $O_2$ , 弦心距  $O_1O_2$  的长为  $x$ , 满足  $0 < x < r_1$ , 则圆  $C_2$  的半径为  $r_2 = \sqrt{r_1^2 - x^2}$ , 所以点  $O_1$  到点  $F_1$  的距离为

$$h(x) = |O_1F_1| = x + \sqrt{r_1^2 - x^2},$$

其导函数为

$$h'(x) = 1 - \frac{x}{\sqrt{r_1^2 - x^2}}.$$

当  $x = \sqrt{2}/2r_1$  时,  $h'(x) = 0$ ; 当  $0 < x < \sqrt{2}/2r_1$  时,  $h'(x) > 0$ ; 当  $\sqrt{2}/2r_1 < x < r_1$  时,  $h'(x) < 0$ . 因此当  $x = \sqrt{2}/2r_1$  时,  $h(x)$  达到最大值  $\sqrt{2}r_1$ , 即当弦  $A_1B_1$  长为  $2\sqrt{r_1^2 - x^2} = \sqrt{2}r_1$  时, 圆  $C_2$  把圆  $C_1$  的半径向外扩  $(\sqrt{2} - 1)r_1$ . 此时外扩的距离达到最大值. 同理, 以圆  $C_2$  中的任意弦  $A_2B_2$  为直径做圆  $C_3$ , 当弦  $A_2B_2$  的长为  $\sqrt{2}r_2$  时,  $h_2$  达到最大值  $\sqrt{2}r_2$ , 即当弦  $A_2B_2$  长为  $\sqrt{2}r_2$  时, 圆  $C_3$  把圆  $C_2$  的半径向外扩  $(\sqrt{2} - 1)r_2 = (\sqrt{2} - 1)(\sqrt{2}/2)r_1$ . 此时外扩的距离达到最大值. 依次做下去, 当弦  $A_1B_1$  与弦  $A_2B_2, \dots$  平行时, 外扩的总长度

$$H = h_1 + h_2 + \dots + h_n + \dots =$$

$$(\sqrt{2} - 1)r_1(1 + (\sqrt{2}/2) + (\sqrt{2}/2)^2 + \dots) = \sqrt{2}r_1.$$

因此可得以下最大圆簇定理.

**定理 2**(最大圆簇定理) 由源节点  $v_i$  途经一些中间节点到目标节点  $v_j$  的路由, 如果在这条路由上传输单位比特的信息所消耗的总能耗小于等于  $E^*$ , 则途经的这些节点一定在以  $O$  为圆心、 $(\sqrt{2} + 1)d^*$  为直径的最大圆簇内.

证明过程从略.

同时可证明, 在以边长的 4 次幂作为该边的权时找到的最优路径图  $G'$ , 是在以边长的 2 次幂作为该边的权时找到的最优路径图  $G$  的子图, 从而得到在最优路径图  $G'$  中的最优路也是最优路径图  $G$  中的路由. 因此, 在最优路径图  $G'$  中的最优路也一定在最优路径图  $G$  的最大圆簇内. 即对不同的路径衰退模式, 其对应的最优路均在最大圆簇内.

**定理 3** 最优路径图  $G'$  是最优路径图  $G$  的子图.

**证明** 要证最优路径图  $G'$  是最优路径图  $G$  的子图, 即由最优路径图  $G$  变换成最优路径图  $G'$  时, 无新边加入到最优路径图  $G$  中. 假设边  $(v_p, v_q)$  被加入, 边  $(v_p, v_q)$  为节点  $v_p$  到  $v_q$  的最短路, 设最优路径图  $G$  上路  $(v_p = v_{m0}, v_{m1}, v_{m2}, \dots, v_{m(n-1)}, v_{mn} = v_q)$  为最短路, 则

$$|v_p - v_q|^4 = (|v_p - v_q|^2)^2 \geq \left( \sum_{r=1}^n |v_{mr} - v_{m(r-1)}|^2 \right)^2 \geq \sum_{r=1}^n |v_{mr} - v_{m(r-1)}|^4$$

互相矛盾, 所以边  $(v_p, v_q)$  不能加入. 即最优路径图  $G'$  是最优路径图  $G$  的子图.  $\square$

### 3.2 最优路径度

文献 [13] 提出了一个路径最优度定义, 利用它来判定最优路可兼顾路由总能耗小、节点剩余能量最小以及平均剩余能量大这几个目标, 但忽视了路由上其他节点的剩余能量情况, 即不能保证整条路由上的节点呈整体性衰落. 本文在此基础上提出了一个新的最优路径评定标准  $D$  来评价路径是否为最优. 该标准能均衡各节点的剩余能量, 定义如下:

$$D = \sqrt{\lambda_1 \sigma^2 + \left( \frac{\lambda_2 \times \text{En}_1}{\lambda_3 \times \text{En}_2 + \lambda_4 \times \text{En}_3} \right)^2}. \quad (3)$$

其中:  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  为偏向参数, 均大于 0 且和为 1;  $\sigma$  为该路径上各节点剩余能量的方差;  $\text{En}_1$  为该路径上传输一条信息时总的能量消耗;  $\text{En}_2$  为该路径上所有节点的平均剩余能量;  $\text{En}_3$  为该路径上所有节点中剩余能量最小的节点. 通过式 (3) 可对路径进行整体评价, 它能兼顾各节点的剩余能量和路由中总的能量消耗, 使最优路径上各节点的能量呈整体性衰落, 从而延长了网络的寿命.  $D$  越小, 对应的路径越优.

### 3.3 EEA 算法描述

首先对网络进行初始化. 每个节点均要建立各自的邻居列表来存贮以下信息: 邻居节点地址 (id), 当前父节点 (parent), 路径花费 (cost), 孩子标志 (child Liveness) 自身节点的位置信息与基站的位置信息, 自身节点与邻居节点之间的信息素以及自身节点的剩余能量信息. 当找到最优路径时, 在时钟任务的更新函数 `update Table()` 中调用邻居列表更新函数对各节点的邻居列表进行更新, 以便进行下一轮寻找最优路径. 利用最大圆簇原理和最优路径度构造的 EEA 算法如下:

**Step 1:** 源节点  $u$  广播搜寻信息, 寻找目标节点  $v$ . 当找到目标节点  $v$  时, 源节点  $u$  利用自己的位置信息和目标节点  $v$  的位置信息计算出两节点之间的距离  $d^*$ , 同时计算出两者的中点坐标.

**Step 2:** 在源节点  $u$  处放  $m$  个种群的蚂蚁, 每个种群有  $n$  只, 每隔一段时间, 派出一只蚂蚁向前寻找到达目标节点  $v$  的路径. 每只蚂蚁携带的信息为: 最大圆簇的圆心坐标及半径  $(\sqrt{2} + 1)d^*/2$ , 源节点及路由经过的各节点的 id, 路由上各节点的剩余能量和各节点之间的距离.

**Step 3:** 位于节点  $i$  的蚂蚁  $k$  按伪随机比例规则<sup>[11]</sup>在邻居列表中选择节点  $j$  作为下一跳访问节点, 到节点  $j$  后, 节点  $j$  首先利用自己的位置信息和蚂蚁  $k$  携带的信息来验证自己是否在最大圆簇内. 如果节点  $j$  不在最大圆簇内, 则蚂蚁  $k$  原路退回到节点  $i$ , 同时节点  $i$  将自己邻居列表中的节点  $j$  去掉, 然后重新利用随机比例规则在邻居列表中选择下一跳邻居节点; 如果节点  $j$  在最大圆簇内, 则转 Step 4.

**Step 4:** 更新蚂蚁携带的信息, 然后按下式更新局部信息素:

$$\bar{h}_{ij} \leftarrow (1 - \xi)\bar{h}_{ij} + \xi h_0.$$

其中:  $0 < \xi < 1$ ,  $h_0$  为信息素的初始值.

**Step 5:** 每当一个蚂蚁到达目标节点后, 计算该路径的权. 如果权之和小于等于源节点到目标节点直接通信的值, 则将所携带的信息存放在目的节点, 并根据式 (3) 计算路径最优度. 当一个种群的蚂蚁都到达目的节点后, 选出最优路径度最小的路径, 将其放入最优路径集中, 并按如下规则进行全局信息素更新:

$$\bar{h}_{ij} \leftarrow (1 - \rho)\bar{h}_{ij} + \rho \Delta \bar{h}_{ij}^{bs}, \quad \forall (i, j) \in T^{bs}.$$

其中:  $\rho$  为信息素的蒸发率,  $\Delta \bar{h}_{ij}^{bs} = 1/C^{bs}$  为信息素的增量,  $C^{bs}$  为最优路径的长度,  $T^{bs}$  为最优路径上各边组成的集合. 然后开始第 2 个种群的寻优, 在邻居列表中重复 Step 3, Step 4. 依此类推, 得到最优路径集, 从中找出路径度最小的路径即为最优路径.

## 4 仿真实验

将本文算法与文献[13]的EEAWSN算法以及文献[12]的ARA算法进行了仿真比较. 仿真条件为: 在 $100\text{m} \times 120\text{m}$ 的长方形区域内, 均匀布署了150个节点, 且节点的初始能量均为1J. 在源节点和目标节点距离相等时, 传送100bit的信息量, 分别利用这3种路由算法寻找各自对应的最优路径进行传送, 3种算法各自的网络总能耗之间的关系如图2所示. 由图2可知, 本文算法网络节点的总能耗最低. 同时在源节点距目标节点较近时, 本文算法比EEAWSN算法和ARA算法的网络总能耗小很多. 这主要是由于源节点和目标节点相距越近, 利用最大圆簇方法去掉的节点数目就越多, 从而用来寻找最优路集的子图就越小.

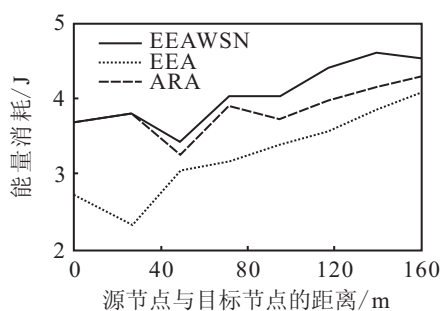


图2 3种算法对应的网络总能耗

图3为3种算法各自最优路径上所有节点的平均剩余能量之间的关系. 从图3可以看出, 本文提出的算法具有较高的节点平均剩余能量.

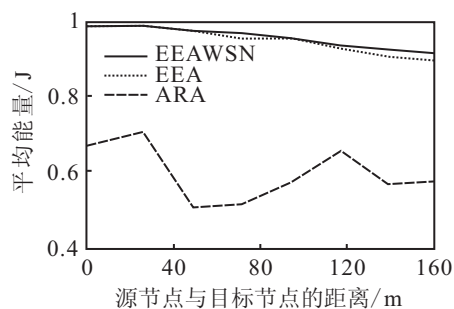


图3 最优路径上节点的平均剩余能量

图4为3种算法各自最优路径上剩余能量最少的节点与其能量之间的关系.

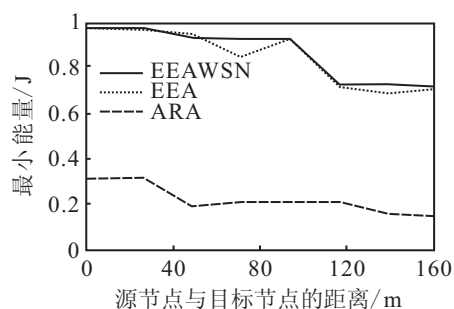


图4 最优路径上剩余能量最小节点的剩余能量

从图4可以看出, 本文算法找到的最优路径上剩余能量最少的节点具有较高的最小剩余能量, 因为该算法能在寻找最优路径时避开剩余能量少的节点, 同时兼顾路由总能耗小、节点最小剩余能量大和路由上各节点能量均衡的要求, 从而保证了最优路径上的节点能量呈整体性衰落.

## 5 结 论

本文基于最大分簇策略, 结合一种新的最优路径评价定义, 给出了一种能量有效的路由算法(EEA). 该算法利用最大圆簇减少了参与寻找最优路径的节点数目, 从而达到了降低系统能耗的目标. 而设定的最优路径评价标准能保证算法在寻找最优路时避开剩余能量少的节点, 同时兼顾传输路径上各节点的剩余能量和路径上总的能量消耗, 使最优路径上各节点的能量呈整体性衰落, 从而沿长了网络的寿命.

## 参考文献(References)

- [1] Liu B, Towsley D. A study of the coverage of large-scale sensor networks[C]. Proc of IEEE Int'l Conf on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems. Chicago, 2004: 475-483.
- [2] Shu T, Krunz M. Joint power/rate optimization for CDMA-based wireless sensor networks[C]. Proc of SenMetrics 2005 - The 3rd Int Work-Shop on Measurement, Modelling, and Performance Analysis of Wireless Sensor Networks. San Diego, 2005: 106-115.
- [3] Akyildiz I, Kasimoglu I. Wireless sensor and actor networks: Research challenges[J]. Ad Hoc Networks J, 2004, 2(4): 351-367.
- [4] Kiess W, Tarp A, Mauve M. Thoughts on mobile ad-hoc network test-beds[C]. Proc of IEEE ICPS Workshop on Multi-hop Ad Hoc Networks: From Theory to Reality. Santorini, 2005: 93-100.
- [5] Ai J, Abouzeid A. Coverage by directional sensors in randomly deployed wireless sensor networks[J]. Combinatorial Optimization, 2006, 11(1): 21-41.
- [6] Du X, Lin F. Maintaining differentiated coverage in heterogeneous sensor networks[J]. Eurasip J of Wireless Communications and Networking, 2005, 5(4): 565-572.
- [7] Tian D, Georganas N. Connectivity maintenance and coverage preservation in wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(6): 744-761.
- [8] Sim K M. Ant colony optimization for routing and load-balancing[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetic: Part A, 2003, 33(5): 560-572.
- [9] Mohamed R, Fahmy S, Pandurangan G. Latency-sensitive power control for wireless ad hoc networks[C]. Proc of the MSWiM 2005. Montreal: ACM Press, 2005: 31-38.

(下转第936页)