

具有能量和位置意识基于 ACO 的 WSN 路由算法

王小明, 安小明

(陕西师范大学计算机科学学院, 陕西西安 710062)

摘 要: 通过融合传感器节点的剩余能量和地理位置信息, 设计一种具有传感器节点能量和地理位置意识的基于蚁群优化方法的无线传感器网络路由算法(ELACO); 针对路由空洞现象, 提出一种路由回退机制, 提高了路由搜索成功率. 仿真结果表明, ELACO 算法具有很高的路由查寻成功率, 能够更好地均衡传感器节点能量消耗, 从而延长网络使用寿命.

关键词: 无线传感器网络; 蚁群优化方法; 前向区域; 前向邻居节点; 路由回退机制

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 08-1763-07

An Energy and Location Aware ACO Based Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks

WANG Xiao-ming, AN Xiao-ming

(School of Computer Science, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China)

Abstract: An energy and location aware ACO based routing algorithm (ELACO) for WSNs is also designed by fusing the energy and location information of nodes. To bypass dead ends, a backward routing mechanism is established, as a result, the routing success rate increases. Simulation results show that the ELACO has a higher search success rate, efficiently balance node energy consumption to prolong the network lifetime.

Key words: WSN; ant colony optimization method; forward district; forward neighbor node; backward routing mechanism

1 引言

无线传感器网络^[1]路由协议负责在网络层寻找一条数据传输路径, 将数据包从产生该数据包的源节点(Source)以多跳通信的方式转发至 Sink 节点. 从网络拓扑结构的观点看, 路由协议可以划分为平面路由、层次路由和基于地理位置的路由三大类^[2,3]. 典型的平面路由协议有 Flooding、Directed Diffusion、SPIN、Rumor、Gossiping、SPEED 等. 在平面多跳无线传感器网络中, 平面路由协议通常采用以数据为中心的路由策略. 研究表明, 以数据为中心的路由策略通过多传感器节点协同工作能够消除冗余数据, 从而达到节约节点能量的目的. 层次化路由通过执行数据聚集和融合有效减少传输到 Sink 节点的数据量, 从而降低传感器节点能量消耗. LEACH 协议是最具有代表性的一种层次路由协议, 它能有效降低传感器节点能量消耗, 从而延长网络使用寿命. 平面路由和层次路由协议大多是通过路由探测包获得传感器节点之间的连接关系和链路特性来确定路由路径. 然

而, 以这两种方式建立的路由路径会因网络中的一个或多个传感器节点失效或移动而经常中断, 需要维护端到端的路由路径信息, 缺乏对网络动态变化的自适应性. 基于地理位置的路由协议能够很好地解决上述问题^[3,4]. 利用传感器节点定位技术(例如 GPS), 传感器节点可以方便地获得自身、邻居传感器节点及 Sink 节点的地理位置信息. 传感器节点利用这些信息可以实施定向路由发现, 有效避免路由探测包的盲目泛洪. 以地理位置信息为基础的路由在整个数据传输中不需要维护端到端的全局链路状态信息, 不需要存储路由信息表, 也不需要发送路由更新信息, 只要求网络中每个传感器节点准确地存储其邻居传感器节点的状态信息, 它不但可以降低节点的能量消耗, 对传感器节点的内存和处理能力要求不高, 而且能够提供一定的数据传输保障, 具有良好的网络可扩展性和鲁棒性.

传感器节点的电源能量成为无线传感器网络中最宝贵的资源之一, 延长网络寿命成为无线传感器网络研究面临的巨大挑战. 因此, 设计节能、高效的路由协议成

为无线传感器网络研究的热点^[5-7]. 对大规模、资源受限的无线传感器网络而言, 最大化网络寿命被证明是一个 NP-hard 问题^[1], 所以最优路由并非总能够得到, 解决该问题的途径是设计高效近似算法. 为了尽可能提高近似算法的性能, 利用智能优化方法设计高效近似算法是一种自然而且有效的途径^[8,9]. 本文提出一种新的基于节点地理位置的无线传感器网络路由模式, 设计具有能量和位置意识的基于蚁群优化方法的无线传感器网络路由算法(以下简称 ELACO 算法), ELACO 算法通过融合传感器节点的能量和地理位置信息智能地搜索从 Source 节点到 Sink 节点的优化路径, 以降低和均衡传感器节点能量消耗, 从而延长网络寿命; 针对某些节点能量消耗殆尽而退出网络, 从而形成网络空洞(hole)现象, 本文提出一种新的路由回退机制, 有效提高了路由成功率.

2 相关工作

Ko 和 Vaidya 针对无线移动网络提出了一个基于位置的路由策略(LAR)^[10]. LAR 利用传感器节点的位置信息进行路径搜索, Source 节点根据 Sink 节点的位置计算出路由选择的查寻域, 从 Source 节点到 Sink 节点的路径所经过的任意传感器节点必然位于查寻域内. 通过上述方法限定路由查寻范围, 在一定程度上减少了不必要的数据传输, 可以降低网络开销. 如果在规定时间内没有找到合适的路径, Source 节点将扩大查寻域, 重新发送路由请求信息. 随着查寻域的扩大, 建立路径的可能性相应增加. 当查寻域扩大到全网范围, LAR 就成了一般的泛洪(flooding)协议.

Shih 和 Yen 提出了 LARDAR 路由协议^[4], 类似于 LAR, LARDAR 协议根据当前传感器节点和 Sink 节点的位置信息确定了一个三角形查寻域. 与 LAR 不同的是 LARDAR 利用了递归的思想, 即每一跳传感器节点的选择都要确定一个查寻域, 当前传感器节点 S 的下一跳节点必须位于一个三角形查寻域之内.

Basagni 等人提出了一种定向区域泛洪路由协议 DREAM^[4]. 在 DREAM 协议中, Source 节点和每个中间传感器节点分别计算自己到 Sink 节点的方向. 与 LAR 相同, 根据 Sink 节点的位置信息可以确定一个期望域, 由期望域就可以确定一个夹角范围, 称为转发域. 从 Source 节点到期望域的两条切线的夹角间的区域是转发域, 参与路由的传感器节点将数据转发给转发域内所有一跳邻居节点, 直到数据成功传送到 Sink 节点.

与采用一般 Flooding 策略的路由协议相比较, LAR、LARDAR 和 DREAM 协议都缩小了路径选择的查寻范围, 有效减少了参与路由的传感器节点个数, 从而降低了节点能量消耗. 然而, 值得注意的是 DREAM、LAR 和

LARDAR 在各自的查寻范围内仍然采用广播路由模式请求信息, 其本质仍然是基于 Flooding 策略的路由.

3 智能路由策略

3.1 问题描述

用图 $G = (V, E)$ 表示无线传感器网络, 其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 表示传感器节点的集合, $N = |V|$ 表示传感器节点的个数, $E = \{(v_i, v_j) | i \neq j, (v_i, v_j) \in V \times V, v_i \text{ 和 } v_j \text{ 互为邻居节点}\}$ 是边的集合. 对任意两个传感器节点 v_i 和 v_j , 如果 v_i 位于 v_j 的通信范围内, 且 v_j 位于 v_i 的通信范围内, 则称传感器节点 v_i 和 v_j 互为邻居节点, 在图 G 中存在边 $(v_i, v_j) \in E$. 用坐标 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 分别表示传感器节点 v_i 和 v_j 的地理位置(假设传感器节点带有定位系统, 可以准确测出自身位置), 则传感器节点 v_i 和 v_j 之间的距离 d_{ij} 用下列公式计算:

$$d_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (1)$$

为讨论方便, 本文假设无线传感器网络由大量随机分布在固定范围内的传感器节点构成, 每个传感器节点的通讯半径为 R , 网络中只有一个 Sink 节点. 对任意传感器节点 v_i , 其邻居节点集合为:

$$N(v_i) = \{v_j | R \geq d_{i,j}, v_j \in V\} \quad (2)$$

如果传感器节点 v_i 需要将数据发送给下一跳节点, 则下一跳节点只能从 v_i 的邻居节点集合 $N(v_i)$ 内选择. 由于从某个 Source 节点到 Sink 节点之间可能存在多条路径, 如何选择其中一条路径传输数据, 才能使数据传输的网络费用(如节点能量消耗, 数据传输时间延迟等)最小? 即 WSN 路由问题. 本文基于蚁群优化方法设计一种高效近似算法来解决上述问题.

3.2 基于蚁群优化方法的路由策略

首先, 我们定义传感器节点的前向区域和前向邻居新概念.

定义 1 用圆 $R(v_i)$ 表示传感器节点 v_i 的通信范围, Sink 节点到圆 $R(v_i)$ 的两条切线与经过两个切点的两条半径所围成的区域称为传感器节点 v_i 的前向区域.

定义 2 位于传感器节点 v_i 前向区域内的 v_i 的邻居节点称为 v_i 的前向邻居节点, v_i 的前向邻居节点集合记为 $N_f(v_i)$.

如图 1 所示, 四边形 $IADC$ 是传感器节点 I 的前向区域, 扇形 ACI 中的所有传感器节点是传感器节点 I 的前向邻居节点.

为有效刻画前向区域中节点位置特征, 我们定义偏转角和偏转边界角概念.

定义 3 传感器节点 I 为蚂蚁当前所在的传感器节点, 传感器节点 J 是 I 的一个前向邻居节点, 用 D 表

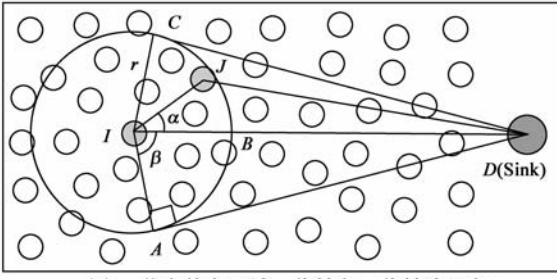


图1 节点前向区域、偏转角、偏转边界角

示 Sink 节点,如图 1 所示.以 (I, J) 和 (I, D) 为边,以 I 为顶点的角 α 称为传感器节点 J 关于传感器节点 I 和 Sink 节点 D 的偏转角.偏转角 α_{IJ} 按下式计算:

$$\alpha_{I,J} = \arccos \frac{d_{I,J}^2 + d_{I,D}^2 - d_{J,D}^2}{2 \times d_{I,J} \times d_{I,D}} \quad (3)$$

定义 4 偏转边界角是偏转角的最大值.如图 1 所示,角 β 是传感器节点 J 关于传感器节点 I 和 Sink 节点 D 的偏转边界角,其计算方法如下:

$$\beta_I = \arccos \frac{r}{d_{I,D}} \quad (4)$$

通过偏转角和偏转边界角,我们可以将节点 I 的前向邻居节点集合 $N_f(I)$ 形式化表示为:

$$N_f(I) = \{v_j | v_j \in V, d_{I,J} \leq r, \alpha_{I,J} \leq \beta_I\} \quad (5)$$

假设网络中除 Sink 节点外,其他的传感器节点的初始能量都相同.每个传感器节点装有一个存储模块,用来记录自身及邻居节点的相关信息,包括传感器节点位置、剩余能量、邻居节点位置及其当前剩余能量等.为了模拟蚁群算法中的信息素,每个传感器节点中都存有一个记录 τ_{IJ} ,表示该传感器节点到邻居节点的路径上的信息素强度.网络中的蚂蚁是一个具有记忆和存储能力的数据包,所占用的空间很小.针对无线传感器网络路由的特点,网络中的蚂蚁具有如下特性:①蚂蚁具有记忆功能,能够记住所经过传感器节点的信息.②蚂蚁具有顺序记录所经过的传感器节点从而形成一条路径的能力.蚂蚁每次到达 Sink 节点之后能够立即按原路返回,并且对所经过路径的信息素进行更新.③处在传感器节点 v_i 的蚂蚁只能向传感器节点 v_j 的前向邻居节点移动.④蚂蚁可以读取和修改所处传感器节点的信息.

网络中的每只蚂蚁从 Source 节点出发,通过多跳的方式向 Sink 节点移动,目的是寻找一条从 Source 节点到 Sink 节点的最小费用路径.位于传感器节点 v_i 的蚂蚁 k 按照各条路径上的信息素以及前向邻居节点的剩余能量来计算转移概率 $P_{i,j}^k$.这里状态转移概率 $P_{i,j}^k$ 表示蚂蚁 k 选择前向邻居节点 v_j 作为下一跳节点的可能性,是传感器节点剩余能量和位置信息的融合.状态转移概率 $P_{i,j}^k$ 按下式计算:

$$P_{i,j}^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{i,j}]^\mu \cdot [\eta_{i,j}]^\lambda}{\sum_{v_h \in N_f(v_i)} [\tau_{i,h}]^\mu \cdot [\eta_{i,h}]^\lambda}, & v_j \in N_f(v_i) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

其中, τ_{ij} 表示传感器节点 v_i 到邻居节点 v_j 的路径 $l_{i,j}$ 上的信息素值.初始时刻 t_0 ,相邻传感器节点之间的路径 $l_{i,j}$ 上的信息素 $\tau_{i,j}(t_0)$ 是关于节点之间距离的函数,按如下公式计算:

$$\tau_{i,j}(t_0) = \frac{d_{i,D}}{d_{i,j} + d_{j,D}} \times \left(1 - \frac{d_{i,j}}{\sum_{v_h \in N_f(v_i)} d_{i,h}}\right) \quad (7)$$

$\eta_{i,j}$ 是能量启发函数,按下式计算:

$$\eta_{i,j} = \frac{e_j}{\sum_{v_h \in N_f(v_i)} e_h} \quad (8)$$

其中, e_h 表示传感器节点 I 的前向邻居节点 $v_h \in N_f(I)$ 的剩余能量.在公式(6)中, μ 为距离信息素启发因子,表示距离信息素轨迹的相对重要性,反映了蚂蚁在运动过程中所积累的信息在蚂蚁运动时所起的作用,其值越大表示蚂蚁越倾向于选择短距离路径; λ 是能量启发因子,反映了蚂蚁在运动过程中节点能量信息在蚂蚁选择路径中所起的作用,其值越大表示蚂蚁越倾向于选择剩余能量高的邻居节点作为下一跳节点.

前向邻居节点集合限定了下一跳节点的选择范围,将路由由搜寻界定在一个趋向于 Sink 节点的区域内.传感器节点 v_i 选择 v_j 作为下一跳节点后,传感器节点 v_j 再根据 Sink 节点的位置信息计算出前向邻居节点集合,搜寻出下一跳节点,直至到达 Sink 节点为止.在搜索路径的过程中,如果当前传感器节点 J 没有前向邻居节点,则将传感器节点 J 标记为无效节点,如图 2(a)所示.然后,蚂蚁返回传感器节点 J 的上一跳节点 I ,并且在传感器节点 I 的前向邻居节点集合中删除传感器节点 J ,再重新进行下一跳节点的选择,如图 2(b)所示.我们称这一过程为路由回退策略.在一次路由选择过程中,如果蚂蚁遵循路由回退策略退回至 Source 节点,并且 Source 节点再无其它前向邻居节点可供选择,则本次路由搜寻失败,意味着该 Source 节点与 Sink 节点之间没有可达路径.

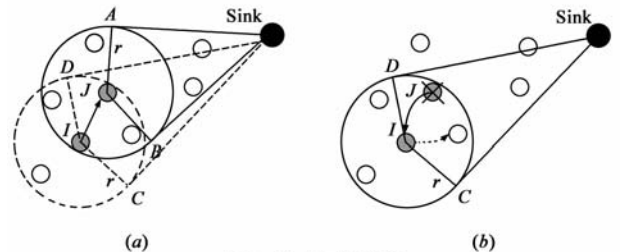


图2 路由回退机制

当蚂蚁 k 完成一次搜索后,产生了一条从 source 节

点到 Sink 节点的路径 $path(k)$. 所有蚂蚁完成一次搜索为一个循环, 用 t 记录循环次数, t_{\max} 表示最大循环次数. 一次循环之后, 每个蚂蚁沿着各自到达 Sink 节点的路径原路返回到 Source 节点, 并更新信息素. 第 t 次循环时链路 l_{ij} 上的信息素数量按如下规则进行调整:

$$\tau_{l,j}(t+1) = (1-\rho)\tau_{l,j}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{l,j}^k(t) \quad (9)$$

$$\Delta\tau_{l,j}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L^k(t)}, & \text{如果蚂蚁 } k \text{ 通过 } l_{ij} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (10)$$

其中 m 表示蚂蚁总数, $\Delta\tau_{l,j}^k(t)$ 表示蚂蚁 k 在第 t 次搜索返回时留在链路 l_{ij} 上的信息素, $L^k(t)$ 表示蚂蚁 k 在第 t 次搜索中所走过路径 $path(k)$ 的长度, Q 是信息素常量; 常数 ρ 是信息素挥发因子, 表示信息素自动挥发的程度, 通常 $0 \leq \rho \leq 1$. 信息素自动挥发机制形成了一个负反馈, 能够有效避免蚂蚁搜索的解过早局部收敛. 每条路径上的信息素初值 τ_{ij} 按式(7)计算. 当 $t \geq t_{\max}$ 时, 蚂蚁搜索路径的过程结束, 此时如果绝大多数蚂蚁集中在一条路径上, 意味着蚂蚁找到了一条从 Source 节点到 Sink 节点的最优路径.

为了使蚂蚁搜索路由路径的过程对 WSN 的节点状态及布设的随机性具有自适应性, 本文提出一种随机比例选择规则, 以实现蚂蚁随机选择下一跳节点.

定义 5 已知 n 个独立的概率事件, 分别记为: 事件 1, 事件 2, ..., 事件 n , 从这些概率事件中选择一个事件当作执行事件的步骤如下:

① 计算 n 个独立事件分别发生的概率, 用 P_1, P_2, \dots, P_n 表示. 显然, $P_1 + P_2 + \dots + P_n = 1$;

② 用 $P'_0, P'_1, P'_2, \dots, P'_n$ (对区间 $[0, 1]$ 进行分割, 其中, $P'_0 = 0, P'_1 = P'_0 + P_1, \dots, P'_n = P'_{n-1} + P_n$;

③ 产生一个 0 到 1 之间的随机数 p , 如果 $P'_{l-1} \leq p \leq P'_l$, 那么选择事件 l 当作执行事件; 这一过程称为随机比例规则.

由于 p 是随机产生的, 那么区间 $[P'_{l-1}, P'_l]$ 的宽度 $W_l = P'_l - P'_{l-1} = P_l$, W_l 的值越大, 则选择事件 l 当作执行事件的可能性就越大. 因此上述规则是合理的. 为深入理解随机比例选择规则, 通过一个例子来说明这一过程. 假设有 5 个独立事件, 其发生的概率分别为: $P_1 = 0.15, P_2 = 0.1, P_3 = 0.3, P_4 = 0.2, P_5 = 0.25$. 根据定义 5, $P'_0 = 0, P'_1 = 0.15, P'_2 = 0.25, P'_3 = 0.55, P'_4 = 0.75, P'_5 = 1$, 如图 3 所示. 如果产生的随机数 $p = 0.5$, 显然, $P'_2 \leq 0.5 \leq P'_3$, 那么选择事件 3 作为执行事件.

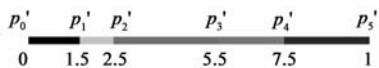


图3 随机比例选择规则实例

假设蚂蚁 k 处在传感器节点 v_l , 传感器节点 v_l 的前向邻居节点集合为 $N_f(v_l)$, 集合 $N_f(v_l)$ 的元素个数为 $|N_f(v_l)|$. 蚂蚁 k 选择集合 $N_f(v_l)$ 中的传感器节点 v_j 作为下一跳节点的概率为 $P'_{l,j}$. 我们设计一个算法用来实施随机比例选择规则, 用伪码描述如图 4. 使用蚁群优化方法和随机比例规则, 我们设计 ELACO 算法, 其伪码描述如图 5. 对于 ELACO 算法进行深入分析发现: 在前向区域路由模式下, 若存在一条从 Source 节点到 Sink 节点的路由路径, 那么, ELACO 算法一定能够找到这条路径; 用 ELACO 算法找到的从 Source 节点到 Sink 节点的路由路径中一定不含有回路; ELACO 算法的时间复杂度为 $O(t \cdot |V|^2(m))$, 其中, t 为循环次数, $|V|$ 为网络中的传感器节点个数, m 为蚂蚁总数.

算法 1 RPS: Random Probability Selection

Input 传感器节点 v_l , 蚂蚁 k

Output 蚂蚁 k 的下一跳节点

```

1: Begin
2: 由式(5)计算传感器节点  $v_l$  的前向邻居节点集合
    $N_f(I) = \{v_j | v_j \in V, d_{l,j} \leq r, a_{l,j} \leq \beta_l\}$ 
3: For  $J = 1$  to  $|N_f(v_l)|$ 
4:   根据公式(1)~(8), 计算蚂蚁  $k$  选择传感器节点  $v_j$  作为  $v_l$ 
   的下一跳节点的概率  $P'_{l,j}$ 
5: End For
6:  $P'_0 = 0$ 
7: For  $J = 1$  to  $|N_f(v_l)|$ 
8:    $P'_J = P'_{J-1} + P'_{l,J}$ 
9: End For
10: 产生 0 到 1 之间的随机数  $p$ 
11: For  $J = 1$  to  $|N_f(v_l)|$ 
12:   If  $P'_{J-1} \leq p \leq P'_J$  then
13:     蚂蚁  $k$  选择邻居节点  $v_j$  作为  $v_l$  的下一跳节点
14:   Exit For
15: End If
16: End For
17: Return(传感器节点  $v_j$ )
18: End

```

图4 随机比例选择算法

4 仿真实验

4.1 评价指标

本文主要对以下 WSN 性能进行仿真模拟: ① 节点能量消耗: 网络成功发送一定数量数据包所消耗的节点能量总和. ② 数据包传输时间延迟: 本文用包含在路由路径上的节点个数(跳数)表示数据包传输时间延迟. ③ 节点能量效率: 网络发送一定数量的数据包, 其中成功发送到 Sink 节点的数据包所消耗的节点能量与节点能量消耗总量的比值. ④ 节点能量消耗均衡性: 本

文用节点能量标准方差来描述节点能量的均衡程度,节点能量标准方差越小,表明传感器节点能量分布越均衡,因而网络寿命越长.假设网络中有 n 个传感器节点, e_I 表示传感器节点 I 的当前剩余能量,则节点能量标准方差按下式计算:

$$\hat{E} = \sqrt{\sum_{I=1}^n (e_I - \bar{E})^2} \quad (11)$$

其中, \bar{E} 表示所有传感器节点当前剩余能量的平均值,按下式计算:

$$\bar{E} = \frac{\sum_{I=1}^n e_I}{n} \quad (12)$$

⑤发送成功率:Source 节点发送一定数量的数据包,其中成功传输到 Sink 节点的数据包个数与 Source 节点发送的总数据包个数的比值.⑥网络寿命:在应用预先定义的数据传输成功率下,网络能够最多成功发送的数据包个数.

Algorithm 2 ELACO

Input Source node ID, Sink node, number of ant m

Output the optimization path

1: Begin

2: Initialization $t = 0, t_{\max}, \tau_f(t), \Delta\tau_{I,J}(t) = 0$, 蚂蚁路径存储链表 Rm

3: While $t < t_{\max}$

4: For $k = 1$ to m

5: 将源节点 Source 放入 Rm 中,令当前节点 $v_I = \text{Source}$

6: While $v_I \neq \text{Sink}$

5: 当前传感器节点 v_I 根据式(9)计算前向邻居节点集合 $N_f(I)$

6: If $N_f(I) = \Phi$

7: If $v_I = \text{Source}$

8: 无法找到路径,结束程序

9: End If

10: 蚂蚁返回上一跳传感器节点

11: End If

12: 蚂蚁 k 按照算法 RPS 在集合 $N_f(v_I)$ 中选择下一跳节点 $v_J, Rm \leftarrow J$

13: $v_I = v_J$

14: End While

15: For $i = 0$ to $|Rm| - 1$

16: 按照式(10)计算 $\Delta\tau^k(t)$

17: 按照式(9)计算 $\tau_{Rm(i), Rm(i+1)}(t+1)$

18: End For

19: End For

20: $t \leftarrow t + 1$

21: End While

22: Return(the optimization path)

23: End

图5 ELACO 算法

4.2 仿真环境及参数设置

我们采用 Visual C++ 6.0 设计了一个基于蚁群优化方法的 WSN 路由仿真软件平台.仿真实验的网络场景是:在 200×200 平方米的方形区域内分别随机布设 1000、1200、1400、1600、1800、2000 个传感器节点,每个传感器节点的通信半径为 30m,初始能量为 10J(焦耳),Sink 节点的能量为足够大.每只蚂蚁相当于 10Byte 大小的数据包,每个 Source 节点需要发送的每个数据包大小为 1000Byte.传感器节点发送蚂蚁或数据包均需消耗能量.每个传感器节点将一个 ω -bit 的数据包发送到距离该节点 d 米远的节点所消耗的能量按下式计算^[11]:

$$E_{Tr}(\omega, d) = E_{elec} \cdot \omega + \epsilon_{amp} \cdot \omega \cdot d^\theta \quad (13)$$

其中, E_{elec} 表示发射装置和接收电路每发送或接收单位 bit 数据所消耗的能量, ω_{amp} 表示发射放大器将每 bit 数据传送单位平方米所耗的能量, θ 为传播衰减指数,通常情况下 $2 \leq \theta \leq 5$. θ 的具体取值由周围环境决定,当网络环境平坦无障碍时, θ 取值为 2;在障碍物较多的区域进行远距离传输时, θ 取值为 3~5.本文实验设定 $E_{elec} = 50 \text{ nJ/bit}$, $\epsilon_{amp} = 100 \text{ pJ/bit/m}^2$, $\theta = 3$.每个传感器节点接收 n -bit 的数据包所消耗的能量按下式计算^[11]:

$$E_{Re}(\omega) = E_{elec} \cdot \omega \quad (14)$$

信息素挥发因子 $\rho = 0.3$,算法的最大循环次数 $t_{\max} = 100$,信息素常量 $Q = 10$.在状态转移概率 P_{IJ}^k 的计算式(6)中,信息素启发因子 μ 、剩余能量启发因子 λ 和蚂蚁数量 m 的取值缺乏理论指导,很难按照一定的方法来计算参数 μ 、 λ 和 m 最优组合值. μ 、 λ 和 m 的取值直接关系到算法的全局收敛性和求解效率.一般而言,参数 μ 、 λ 和 m 可以利用实验的方法确定其优化组合值.在本文实验场景下通过反复实验和统计分析确定 μ 、 λ 和 m 优化组合值为 $\mu = 1$, $\lambda = 1$ 和 $m = 1$.

4.3 仿真结果

为了具有一般意义,每个算法的同一评价指标在相同的网络拓扑下重复做 50 次实验,然后取实验结果的平均值.图 6 是使用不同算法成功发送 100 个数据包时节点能量消耗仿真结果.从图 10 可以看出,使用 LARDAR、ELACO、LAR 和 DREAM 算法时节点能量消耗

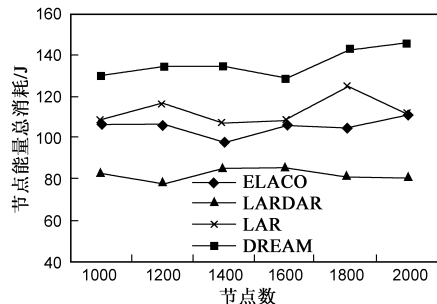


图6 使用不同算法时节点能量消耗

依次增大.

图 7 是使用不同算法成功发送 100 个数据包时节点能量效率仿真结果.从图 7 可以看出,使用 LARDAR、DREAM、LAR 和 ELACO 算法时节点能量效率依次增大.

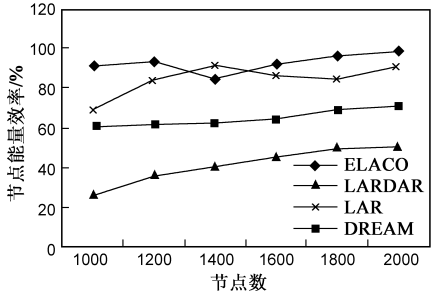


图7 使用不同算法时节点能量效率

图 8 是使用不同算法成功发送 100 个数据包时节点能量均衡情况(节点能量标准方差).从图 8 可以看出,使用 LARDAR、DREAM、LAR 和 ELACO 算法时节点能量方差依次减小,意味着节点能量均衡程度依次增高.

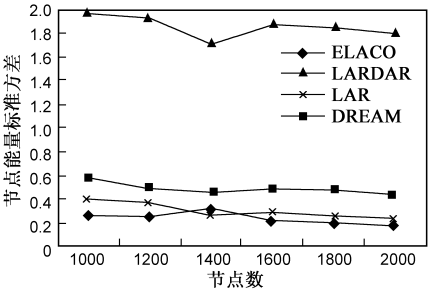


图8 使用不同算法时节点能量标准方差

图 9 是使用不同算法在传感器节点数量不同的网络中分别发送 100 个数据包时路由路径包含的平均节点个数(跳数).从图 9 可以看出,使用 DREAM、LARDAR、ELACO 和 LAR 算法时路由路径包含的平均跳数依次增大.

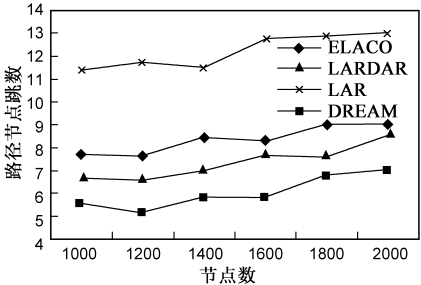


图9 不同算法搜索的路由路径包含的节点跳数

图 10 是使用不同算法在不同传感器节点数量的网络中分别发送 100 个数据包时的传输成功率仿真结果.从图 10 可以看出,DREAM 和 LARDAR 算法的数据包传输成功率较低,而 ELACO 算法的数据包传输成功率最高.

图 11 是在预先确定网络数据传输成功率前提下,在同一网络中使用不同算法能够成功传输的数据包的最大个数.从图 11 可以看出,使用 ELACO、LAR、DREAM 和 LARDAR 算法时网络寿命依次减小.

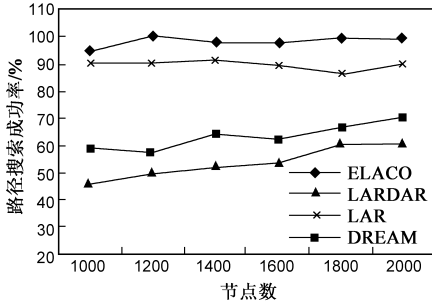


图10 使用不同算法时的路由成功率

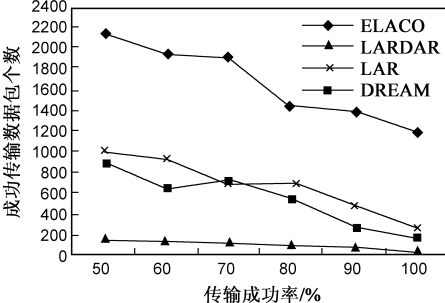


图11 网络的寿命

综上所述,ELACO 算法综合考虑了传感器节点剩余能量、地理位置信息,设置了比较合理的前向区域范围和前向邻居节点集合,使用蚁群优化方法能够智能地搜索和优化路由路径,有效降低了传感器节点能量消耗,并且使传感器节点能量消耗尽可能均衡,从而能够有效延长网络使用寿命.

5 结束语

本文提出了一种具有传感器节点能量和位置信息意识的基于蚁群优化方法的 WSN 路由算法 ELACO. ELACO 算法利用传感器节点的地理位置信息确定了适当大小的传感器节点前向区域,路由选择被限制在传感器节点前向区域中进行.利用蚁群优化方法在前向区域内概率地选择当前传感器的一个邻居节点作为下一跳节点,同时综合考虑了传感器节点的剩余能量和地理位置信息.仿真实验结果表明,ELACO 算法能够有效降低传感器节点能量消耗,使传感器节点能量消耗尽可能均衡,从而有效延长网络使用寿命.

参考文献:

[1] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey [J]. Computer Networks, 2008, 52(12): 2292 – 2330.
[2] Shih T F, Yen H C. Location-aware routing protocol with dynamic adaptation of request zone for mobile Ad Hoc networks

- [J]. Wireless Networks, 2008, 14(3): 321 – 333.
- [3] Chen D Z, Varshney P K. On-demand geographic forwarding for data delivery in wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2007, 30(14 – 15): 2954 – 2967.
- [4] Shih T F, Yen H C. Location-aware routing protocol with dynamic adaptation of request zone for mobile Ad Hoc networks[J]. Wireless Networks, 2008, 14(3): 321 – 333.
- [5] 林恺, 赵海, 尹震宇, 罗玓玓. 一种基于能量预测的无线传感器网络分簇算法[J]. 电子学报, 2008, 36(4): 824 – 828.
Lin K, Zhao H, Yin Z Y. A clustering hierarchy arithmetic Based on energy prediction for wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(4): 824 – 828. (in Chinese)
- [6] 刘林峰, 刘业, 庄艳艳. 高效能耗传感器网络的模型分析与路由算法设计[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 459 – 462.
Liu L F, Liu Y, Zhuang Y Y. Analysis of model and design of routing algorithm in energy efficient wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 459 – 462. (in Chinese)
- [7] Conti M, Francesco M D, Passarella A, Anastasi G. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey[J]. Ad Hoc Networks, 2009, (7): 537 – 568.
- [8] 王睿, 梁彦, 潘泉. 无线传感器网络的蚁群自组织算法[J]. 电子学报, 2007, 35(9): 1691 – 1695.
Wang R, Liang Y, Pan Q. Ant colony for wireless sensor networks self-organization[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(9): 1691 – 1695. (in Chinese)
- [9] Okdem S, Karaboga D. Routing in wireless sensor networks using ant colony optimization [A]. Proceedings of the first NASA/ESA conference on Adaptive Hardware and Systems [C]. Washington, DC, USA, IEEE Computer Society, 2006, 15(18): 401 – 404.
- [10] Ko Y B, Vaidya N H. Location-aided routing in mobile Ad hoc networks[J]. Wireless Networks, 2000, 6(4): 307 – 321.
- [11] Conti M, Francesco M D, Passarella A, Anastasi G. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey[J]. Ad Hoc Networks, 2009, (7): 537 – 568.
- [12] Wang Xiaoming, Li Yingshu. An improved SIR model for analyzing the dynamics of worm propagation in wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Electronics, 2009, 18(1): 8 – 12.
- [13] Neumann F, Witt C. Runtime analysis of a simple ant colony optimization algorithm[J]. Algorithmica, 2009, 54(2): 243 – 255.
- [14] Attiratanasunthorn N, Fakcharoenphol J. A running time analysis of an ant colony optimization algorithm for shortest paths in directed acyclic graphs[J]. Information Processing Letters, 2008, 105(3): 88 – 92.

作者简介:



王小明 男, 1964 年出生, 甘肃天水市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向包括无线传感器网络, 安全普适计算技术, 复杂系统计算机建模与仿真, workflow 安全模型等。

E-mail: wangxm@snnu.edu.cn



安小明 男, 1983 年出生, 陕西延安人, 硕士, 主要研究方向包括无线传感器网络, 安全普适计算技术, 复杂系统计算机建模与仿真等。

E-mail: axmyc@hotmail.com