第37卷 第14期 计 算 机 工 程 2011年7月
Vol.37 No.14 Computer Engineering July 2011

• 专栏 • 文章编号：1000—3428(2011)14—0001—04 文献标识码：A 中图分类号：TP393

# 基于蚁群算法的WSN多路径负载均衡路由

王 敏，李士宁，李志刚

(西北工业大学计算机学院，西安 710129)

**摘 要：**为使无线传感器网络节点能量消耗相对均衡，在定向扩散路由算法的基础上，结合蚁群算法，提出一种多路径负载均衡路由算法。该算法利用蚁群的自适应和动态寻优能力，在源节点和目的节点之间搜索建立多条传输路径，并将节点剩余能量引入启发因子，均衡节点能量消耗。同时，运用层次分析法，赋予每条路径一定的负载分配比例，使数据总能在链路性能较优的多路径中均衡传输，延长整个网络的生命期。仿真结果表明，与定向扩散路由算法相比，该算法能够均衡节点能耗，有效延长网络寿命。

**关键词：**无线传感器网络；多路径路由；蚁群算法；负载均衡

# Multipath Routing with Load Balancing Based on Ant Colony Algorithm in WSN

**WANG Min, LI Shi-ning, LI Zhi-gang**

(School of Computer, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

**【Abstract】**Due to the characteristic of energy constrained, it is vital to balance the energy of nodes in Wireless Sensor Network(WSN). Multipath Routing with Load Balancing(MRLB) based on Ant Colony Algorithm(ACA) is proposed. The algorithm utilizes self-adaptability and dynamic optimization capabilities of the ant colony to establish multiple paths from the source node to the destination node. It takes residual energy of the node into heuristic factor, balancing energy consumption of the nodes. A load balancing scheme is proposed to distribute the traffic over the multiple paths discovered. The scheme applies Analytical Hierarchy Process(AHP), which gives each path a certain percentage of load distribution. It makes transmission on multiple paths equilibrium, which extends lifetime of the entire network. Simulation results show the algorithm balances energy consumption of nodes and extends network lifetime effectively.

**【Key words】**Wireless Sensor Network(WSN); multipath routing; Ant Colony Algorithm(ACA); load balancing

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.14.001

## 1 概述

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)由大量密集部署在监测环境中或靠近监测环境的传感器节点组成，具有随机布设、网络自组织、协同工作的特点[1]。由于节点能量有限且一般没有能量补充，无线传感器网络面临着节省能耗和延长网络寿命的问题[2]，同时单个节点的失效将导致网络分割，这就要求路由协议能够高效并均衡利用节点能量。

基于查询的定向扩散(Directed Diffusion, DD)协议[3]是无线传感器网络中讨论较多的一种路由机制。DD仅利用一条路径进行数据的传输，且路由建立过程没有考虑节点能量消耗，这样往往造成某些节点过早死亡，最终导致网络分割。多路径路由协议[4]在源节点和目的节点间维护了多条传输路径，较单路径路由在有效利用带宽、延长网络生命期、提高传输可靠性和容错性方面有显著优势。但目前大多数多路径路由协议[5-6]只是维护多条备选路径，仅利用一条主干路径进行数据传输，当主干路径失效时，再从备选路径中选择较优路径替换，这样往往增加了路由维护和切换的开销。文献[7]在多路径建立过程中利用网络链路的多重特性，根据能量消耗、延时和带宽，赋予每条路径一定的选择概率。文献[8]将改进的蚁群算法应用在无线传感器网络路由选择中，很好地权衡了节点的能量消耗，避免了原蚁群算法陷入局部最优解，产生过早收敛的问题，但路由建立过程需要蚁群迭代，开销较大。文献[9]在定向扩散协议中利用改进的蚁群算法，梯度值建立在蚁群的信息素与网络节点剩余能量基础上，使节点能量得到均衡消耗，但仍采用单路径路由机制。

本文在定向扩散路由算法的基础上，结合蚁群算法提出一种负载均衡的多路径路由算法MRLB。该算法基于蚁群的自适应和动态寻优能力，在源节点和目的节点之间搜索建立多条传输路径，将节点剩余能量作为启发因子之一，均衡各节点的能量消耗；并提出一种负载均衡策略，利用层次分析法(Analytical Hierarchy Process, AHP)[10]平衡网络的通信负载，防止个别节点过早死亡造成的网络分割，延长网络生命期。

## 2 网络模型及问题描述

### 2.1 网络模型

在研究路由问题时，网络往往被抽象为无向加权连通图$G(V, E)$，其中，$V$为节点集，元素$v$是图的节点；$E$为节点之间的通信链路集，元素$e(i,j)\in E$为节点$n_i$到节点$n_j$的链路弧；权值是弧的某种度量，对于任意元素$e(i,j)\in E$，定义$delay(e(i,j))\in R$为该链路传输延迟，$bandwidth(e(i,j))\in R$为链路带宽。源节点$n_s\in V$，目的节点$n_d\in\{V-\{n_s\}\}$，$p_i$表示从源节点到目的节点的有效路径$n_s\to n_d$，$P_{sd}$为源节点到目

**基金项目：**国家科技支撑计划基金资助项目(2007BAD79B03, 2007BAD79B02)；陕西省自然科学基金资助项目(2007F29)；陕西省科技厅科技攻关计划基金资助项目(2007K04-01)

**作者简介：**王 敏(1984－)，女，硕士研究生，主研方向：无线传感器网络；李士宁，教授、博士生导师；李志刚，副教授

**收稿日期：**2011-02-25 **E-mail：**wangmin_nwpu@163.com

的节点的有效路径集，则 $p_i \in P_{sd}$。假设所有有效路径集 $P_{sd}$ 中，除目的节点外的任一节点 $n_j \in \{V-\{n_d\}\}$，有 $K$ 个节点作为路由下一跳备选节点。MRLB 算法在路由建立过程中运用蚁群算法构造多条有效路径。

### 2.2 蚁群算法模型

蚁群算法[11-13]是由 Dorigo M 等人提出的一种基于种群的启发式仿生优化算法，已成功用于解决 TSP、JSP 等许多组合优化问题。蚁群算法的主要特点是：利用正反馈迅速找到好的解决方案；分布式计算避免算法过早收敛，陷入局部优化；强启发有助于在早期寻优过程中找到合适的解决方案。

假设无线传感器网络中有 $N$ 个节点，$I$ 只蚂蚁，任意两邻居节点 $s$ 和 $u$ 之间的信息素量为 $\tau(s,u)$，$\eta_{su}$ 是启发因子。在蚂蚁的移动过程中，设蚂蚁 $k$ 现位于节点 $s$，$Z_k(s)$ 表示节点 $s$ 的邻居中未被访问的节点的集合。

**定义 1**(选择策略) 蚂蚁 $k$ 按照下面的转移规则选择下一跳节点 $u$：

$$P_k(s,u)=\begin{cases}\arg\max\limits_{(s,v)\in E\text{且}v\in Z_k(s)}\{[\tau(s,v)]^{\alpha}[\eta(s,v)]^{\beta}\} & q\leqslant q_0\\ J & \text{其他}\end{cases} \tag{1}$$

$$J=\begin{cases}\dfrac{[\tau(s,u)]^{\alpha}[\eta(s,u)]^{\beta}}{\sum\limits_{v\in Z_k(s)\text{且}(s,v)\in E}[\tau(s,v)]^{\alpha}[\eta(s,v)]^{\beta}} & u\in Z_k\text{且}(s,v)\in E\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{2}$$

其中，$q$ 是区间[0-1]上的一个随机数；$\alpha$ 表示信息素浓度的重要程度；$\beta$ 表示启发因子的重要程度。前向蚂蚁在选择下一跳节点前先获得一个随机值 $q$。若 $q\leqslant q_0$，则按照先验信息，选择令表达式 $[\tau(s,v)]^{\alpha}[\eta(s,v)]^{\beta}$ 值最大的节点；若 $q>q_0$，则按照随机方法进行新路径探索。$q_0$ 是设定的阈值，决定了利用先验知识与探索新路径之间的相对重要性，在加快收敛速度的同时，加强蚁群算法的全局搜索能力，避免陷入局部最优解。

一般蚁群算法没有考虑节点的剩余能量，容易导致所有蚂蚁都通过信息素浓度最高的路径到达目的地，造成个别节点过早死亡，降低网络的生存期。为了解决这个问题，本文在启发因子中引入节点的剩余能量，均衡节点能量消耗。

$$\eta_{su}=\frac{e_u}{d_{su}} \tag{3}$$

其中，$e_u$ 表示节点 $u$ 的剩余能量；$d_{su}$ 代表节点 $s$ 到节点 $u$ 的距离。由此，访问概率 $P_k(s,u)$ 除了由路径上的信息素浓度决定外，还受蚂蚁要访问的节点的剩余能量影响。蚁群对于路径的选择会随着节点剩余能量的变化而发生变化。

**定义 2**(全局更新信息量) 信息量 $\tau_{su}$ 按以下公式更新：

$$\tau(s,u)_{\text{new}}\leftarrow(1-\delta)\cdot\tau(s,u)_{\text{old}}+\delta\cdot\left(\Delta\tau(s,u)+\gamma\cdot\max_{v\in Z_k(s)\text{且}(s,v)\in E}\tau(s,v)\right) \tag{4}$$

其中，$\delta$ 为信息素挥发程度；$\gamma$ 为算法中引入的一个参数，信息素增量 $\Delta\tau(s,u)$ 表示第 $k$ 只蚂蚁访问过支路 $(s,u)$ 后释放的信息素量，其值由式(5)决定：

$$\Delta\tau(s,u)=\begin{cases}Q/L_k & \text{若}(s,u)\in T\\ 0 & \text{若}(s,u)\notin T\end{cases} \tag{5}$$

其中，$Q$ 为一个常数，表示蚂蚁完成一次完整的路径搜索后释放的信息素的总量；$T$ 为搜索路径构成的搜索树；$L_k$ 表示路径分支总数。

## 3 基于蚁群算法的多路径负载均衡路由算法

### 3.1 兴趣扩散

目的节点 $n_d$ 周期性地向全网广播兴趣消息。兴趣消息包洪泛到达各节点时收集各节点的剩余能量信息。兴趣消息包采用下面的格式：*interest*=(*type*, *interval*, *rect*, *timestamp*, *expiresat*, *energy*)，前 5 个参数和 DD 协议相同，MRLB 增加了 *energy* 域，标识该节点的剩余能量。当节点 $n_j$ 从邻居节点 $n_i$ 收到兴趣消息时，首先添加 $n_i$ 到自己的梯度表，然后从消息包中获取 $n_i$ 的剩余能量，依式(3)计算启发因子 $\eta_{ji}$ 添加到相应的梯度表项中。节点 $n_j$ 以自身剩余能量更新兴趣消息的 *energy* 域，然后继续广播该消息包到邻居节点，直到兴趣消息洪泛到源节点 $n_s$。通过兴趣消息的洪泛，除 $n_d$ 外，任一节点 $n_j$ 的梯度表中存储了与所有邻居节点链路对应的启发因子值。

### 3.2 多路径建立

采集到与兴趣匹配的数据的节点成为源节点，$M$ 只带有探测数据包的前向蚂蚁从源节点出发，各自依据转移概率，从相邻的下一跳节点集合中选择一个节点进行转发，探测数据包定义如下：*probe*=(*type*, *instance*, *location*, *intensity*, *confidence*, *timestamp*, *minband*, *minenergy*)。其中，前 6 个参数和 DD 协议相同，MRLB 添加了 *minband* 和 *minenergy* 域记录这条传输路径中的带宽瓶颈和能量瓶颈，源节点用与邻居的带宽和自己的能量值初始化这 2 个域。蚂蚁到达任一中继节点 $n_i$，依据下面的规则进行探测包的转发：

(1)检查自己是否来过该节点，如果来过，则终止蚂蚁，否则，检查该节点是否比前一个节点距离目的节点更近，且距离源节点更远。若是，则前向蚂蚁记录被访问节点标识。

(2)依据选择策略，从邻居节点中选择节点 $n_j$ 作为数据包转发的下一跳。取节点 $n_i$ 的能量 $e_i$，及链路 $e(i,j)$ 的带宽 $b_{ij}$，用 min( $e_i$ , *minenergy*)和 min( $b_{ij}$ , *minband*)分别更新探测包中的 *minenergy* 和 *minband* 域。

(3)如果邻居节点拒绝转发探测包，则转至(2)选择新的邻居节点转发。

(4)如果梯度表中所有的邻居节点都拒绝转发探测包，则节点 $n_i$ 将丢弃该探测包并删除该节点的梯度表。

依据以上规则，当所有前向蚂蚁完成搜索后，从数据源节点到目的节点的多路径将被建立。

### 3.3 基于层次分析法的路径加强和负载均衡策略

多路径建立后，以前向蚂蚁搜索的路径和其他信息为基础，由后向蚂蚁按原路径返回源节点时，利用式(4)进行路径的全局信息素更新和路径加强。为了实现多路径的负载均衡，MRLB 路径加强采用层次分析法，得到 $M$ 条路径的负载分配权重，并依据权重给予 $M$ 条路径不同的加强比重。该权重的确定，用路径能量瓶颈、传输延迟和带宽瓶颈作为决策因子，构造层次结构如图 1 所示。

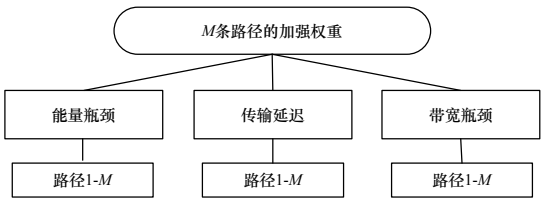



**图 1 计算加强权重的层次结构**

(1)目的节点收到从 $M$ 条路径传输过来的探测数据包。得到 $M$ 条路径的能量瓶颈、传输延迟和带宽瓶颈向量如下：

$$\boldsymbol{E}=(e_1,e_2,\cdots,e_M)^{\mathrm{T}},\ \boldsymbol{D}=(d_1,d_2,\cdots,d_M)^{\mathrm{T}},\ \boldsymbol{B}=(b_1,b_2,\cdots,b_M)^{\mathrm{T}}$$

(2)确定能量瓶颈、传输延迟、带宽瓶颈3个决策因子对负载分配影响程度的比较矩阵。按能量瓶颈 $\theta_1$、传输延迟 $\theta_2$、带宽瓶颈 $\theta_3$ 从大到小排列，且认为任意两项的影响程度之差基本相等。确定比较矩阵 $\boldsymbol{A}$：

$$\boldsymbol{A}=\begin{array}{c}\\ \theta_1\\ \theta_2\\ \theta_3\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccc}\theta_1 & \theta_2 & \theta_3\end{array}\\ \begin{pmatrix}\theta_1/\theta_1 & \theta_1/\theta_2 & \theta_1/\theta_3\\ \theta_2/\theta_1 & \theta_2/\theta_2 & \theta_2/\theta_3\\ \theta_3/\theta_1 & \theta_3/\theta_2 & \theta_3/\theta_3\end{pmatrix}\end{array}=\begin{pmatrix}1 & 2 & 3\\ \frac{1}{2} & 1 & 2\\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1\end{pmatrix}$$

求得 $\boldsymbol{A}$ 的最大特征值为 $\lambda_{\max}\approx3.009\,2$，相应的归一化特征向量 $\boldsymbol{W}_0=(0.539\,6,\ 0.297\,0,\ 0.163\,4)^{\mathrm{T}}$；一致性比例指标 $CR\approx0.007\,9<0.1$。因此，比较矩阵 $\boldsymbol{A}$ 是合理的。决策因子对节点选取的影响程度可以根据具体应用做修改，但一定要保证矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的合理性[6-7]。

(3)利用 $M$ 条路径的能量瓶颈、传输延迟和带宽瓶颈向量各分量的比值构造相应的比较矩阵。例如 $\boldsymbol{E}=(e_1,e_2,\cdots,e_M)^{\mathrm{T}}$，记 $a_{ij}=e_i/e_j\,(i,j=1,2,\cdots,M)$，得到 $\boldsymbol{A}_e=(a_{ij})_{M\times M}$ 为 $M$ 条路径能量瓶颈的比较矩阵。由此可计算 $A_e$ 的非零特征值 $\lambda$、特征向量 $\boldsymbol{W}_e$，将 $\boldsymbol{W}_e$ 进行归一化处理，得到节点对应能量度量的有效权重。同理构造 $M$ 条路径的带宽瓶颈比较矩阵 $\boldsymbol{A}_b$，传输延迟比较矩阵 $\boldsymbol{A}_b$ 的元素 $a_{ij}=d_j/d_i\,(i,j=1,2,\cdots,M)$，计算可得 $W_d$、$W_b$ 为节点对应链路延迟及带宽度量的有效权重。利用 $\boldsymbol{W}=\left(w_1,w_2,\cdots,w_M\right)^{\mathrm{T}}=\left[W_e,W_d,W_b\right]_{M\times3}\cdot\boldsymbol{W}_0$，计算 $M$ 条路径的归一化加强权重。

MRLB依据 $M$ 条路径的加强权重，按该权重比例分配网络负载，加强值大的路径分配的网络负载也较大。这种按比例负载均衡策略，利用了节点和链路的性能信息，有效地避免了因网络负载失衡导致的部分节点过早死亡。

## 4 算法的描述

该算法主要是为了在网络中从源节点到目的节点之间建立多条路径进行数据传输。当从目的节点向源节点发送“兴趣”消息时，根据邻居节点剩余能量，更新节点的梯度表(记录与所有邻居节点链路对应的启发因子值)。当从源节点向目的节点发送探测数据包时，中继节点依据蚁群算法选择策略，找到数据转发的下一跳节点，直到达到目的节点为止。最后，目的节点向源节点发送不同权重的加强信号，从而建立起了从源节点到目的节点的多条路径，使得数据传输过程总能根据链路性能，均衡节点能耗。该算法根据网络链路性能，自适应建立多条传输路径并调节网络负载，避免了因节点能耗不均衡导致的网络分割，从而延长了网络生命期。

算法的详细步骤如下：

(1)算法基于无线传感器网络的拓扑结构进行初始化，所有的路径初始化时都被赋予相等数量的信息素。

(2)目的节点构造一个“兴趣”数据包，并将该数据包广播给所有邻居节点，数据包中包含 *energy* 域，表示节点剩余能量。目的节点用自身剩余能量初始化 *energy* 域。

(3)兴趣消息在中间节点转发，当节点 $n_j$ 从邻居节点 $n_i$ 收到兴趣消息时，首先添加 $n_i$ 到自己的梯度表，然后从消息包中获取 $n_i$ 的剩余能量，依式(3)计算启发因子 $\eta_{ji}$ 添加到相应的梯度表项中。

(4)节点 $n_j$ 以自身剩余能量更新兴趣消息的 *energy* 域，然后继续广播该消息包到邻居节点，直到兴趣消息洪泛到源节点 $n_s$。

(5)源节点收到兴趣消息包，带着探测数据包的前向蚂蚁从源节点出发，开始多路径的建立。探测数据包中包含 *minband* 和 *minenergy* 域记录这条传输路径中的带宽瓶颈和能量瓶颈。源节点用与邻居带宽和自己的能量值初始化这2个域。

(6)前向蚂蚁依据选择策略选择邻居节点作为下一跳节点，如果邻居节点拒绝转发探测包，则依据选择策略选择新的邻居节点转发。当蚂蚁到达中间节点 $n_i$，检查自己是否来过该节点，如果来过，则终止蚂蚁，否则，检查该节点是否比前一个节点距离目的节点更近，且距离源节点更远。若是，则前向蚂蚁记录被访问节点标识。取节点 $n_i$ 的能量 $e_i$，用 $\min(e_i, minenergy)$ 更新探测包中的 *minenergy* 域。

(7)当前向蚂蚁从节点 $n_i$ 到达节点 $n_j$ 时，取链路 $e(i,j)$ 的带宽 $b_{ij}$，用 $\min(b_{ij}, minband)$ 更新探测包中的 *minband* 域。

(8)重复(6)、(7)，直到探测数据包到达目的节点。

(9)目的节点从 $M$ 条路径获得探测数据包，得到 $M$ 条路径的能量瓶颈、传输延迟、带宽瓶颈，利用层次分析法，采用不同的加强权重来加强这 $M$ 条路径，带着加强权重信息的后向蚂蚁按原路返回源节点，根据式(4)的更新规则进行沿途各节点的信息更新。从而从源节点到目的节点就有 $M$ 条路径被建立进行数据传输。

## 5 仿真实验与结果分析

为了测试MRLB的性能，本文通过NS2网络仿真平台将其性能与定向扩散路由算法进行比较。

### 5.1 仿真环境

节点随机抛洒在矩形仿真区域内，网络节点数分别为50、100、150、200、250，实验中根据网络规模设置网络场景面积以保证网络密度不变(50个节点/160 m×160 m)，每个节点的初始能量为 3 J，最大传输距离为 40 m，节点采用802.11MAC层协议，带宽1.6 Mb/s。传感器节点兴趣匹配后每秒钟产生1个数据包，数据包负载为64 Byte。兴趣消息产生周期为5 s，负载量为32 Byte。仿真能耗模型，空闲时间节点能耗为35 mW，接收数据的能耗为395 mW，传输数据的能耗为 660 mW。设置蚁群算法参数 $q_0=0.9,\alpha=1,\beta=2,\gamma=0.3,Q=10,\delta=0.1$。

### 5.2 仿真结果分析

网络仿真性能评价指标包括节点平均能耗、网络生命期、平均传输延迟。

(1)节点平均能耗。计算所有节点在数据包传输过程中的平均能耗，计算公式为：

$$E_{\text{consumption}}=\frac{\sum_{i=1}^{m}(e_{i,init}-e_{i,rest})}{m\times n}\tag{6}$$

其中，$e_{i,init}$、$e_{i,rest}$ 分别为节点 $n_i$ 的初始能量和剩余能量；$m$ 为网络节点个数；$n$ 为目的节点收到的数据包个数。该指标表明算法的路由代价，平均能耗越小，性能越好，网络寿命越长。

(2)平均传输延迟。计算数据包从源节点到目的节点的平均传输时间，反映了数据传输路径的质量。

(3)网络生命期。考查不同网络规模情况下，出现第1个失效节点的时间。时间越早，表明网络生命期越短。

图2反映了2种算法的节点平均能耗在不同网络规模下

的变化情况。

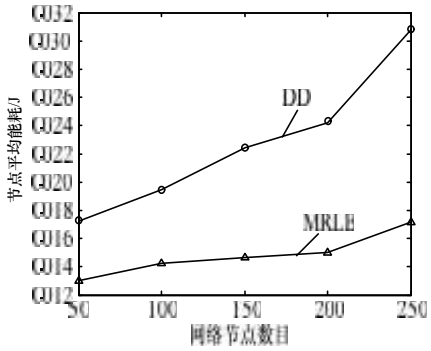



**图 2 节点平均能量消耗**

可以看到，MRLB 的节点平均能耗小于 DD，而且随着节点数目的增多，2 种算法的节点平均能耗差距越来越大，这是因为 DD 中所有的节点参与兴趣和探测数据的洪泛，随着节点数目的增加，消耗更多的能量；而 MRLB 算法的探测数据转发是基于蚁群算法的多路径传输，利用信息素和启发因子信息指导蚁群的前进路径，特别是启发因子中加入了节点剩余能量，从而均衡了节点的能量消耗，而且不需要所有节点参与，这样就减少了大量数据的重复扩散，从而减少非主干路径上的节点能耗。

图 3 反映了在不同网络规模下平均传输延迟的变化。

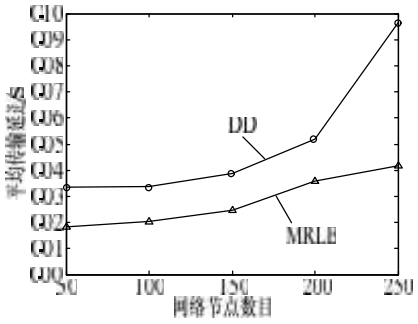



**图 3 平均传输延迟**

从图中可以看出，DD 算法延迟较大，这是因为 DD 算法采用的是单路径传输；而 MRLB 算法采用多路径传输，且采用了基于层次分析法的负载均衡策略，根据多条路径的传输性能(能量瓶颈、传输延迟、带宽瓶颈)进行负载分配，充分考虑了网络链路性能。从图中还可以看出，随着网络规模的扩大，平均延迟也在增大，这主要是因为随着网络节点的增多，网络拓扑和链路变得复杂，源节点和目的节点之间通信跳数也相应增加，所以平均传输延迟增大。

图 4 反映了不同网络规模下网络生命期的变化情况。

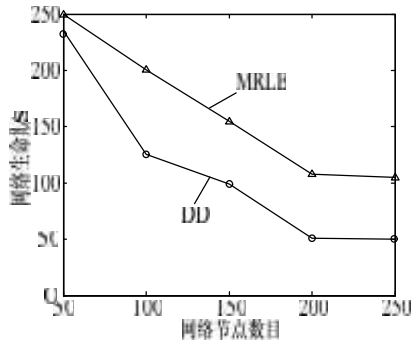



**图 4 网络生命期**

可以看出，在网络规模一定的情况下，DD 的网络生命期短，这是因为在 DD 中，探测分组采用的是洪泛扩散方式，无论最终路径上是否会选择这些节点，节点均要进行数据转发，且单路径传输也造成节点能量消耗过快，过早死亡；而 MRLB 算法，利用蚁群的信息素和节点剩余能量确定转发策略，并且利用多路径的能量瓶颈信息，确定负载分配策略，充分考虑到网络节点能耗的均衡，有效延长了网络生命期。

## 6 结束语

本文在定向扩散路由算法的基础上结合蚁群算法提出一种多路径负载均衡路由算法 MRLB。该算法利用蚁群的自适应和动态寻优能力，在源节点和目的节点之间搜索建立多条传输路径，并将节点剩余能量引入启发因子，均衡节点能量消耗。运用层次分析法，赋予每条路径一定的负载分配比例，使数据总能在链路性能较优的多路径中均衡传输。仿真结果表明，该算法可以均衡节点能耗，延长网络寿命。

## 参考文献

[1] Ian F. A Survey on Sensor Networks[EB/OL]. (2002-11-07). http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1024422.

[2] Hasan C, Suat O, Prashant N, et al. Energy-efficient Secure Pattern Based Data Aggregation for Wireless Sensor Networks[EB/OL]. (2004-04-05). http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1279038.

[3] Chalermek I, Ramesh G, Deborah E. Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks[C]//Proc. of ACM MobiCom'00. Boston, USA: [s. n.], 2000.

[4] Jamal N. Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey[EB/OL]. (2004-12-20). http://www.citeulike.org/user/ejones/article/560773.

[5] Deepak G, Ramesh G, Scott S. Highly-resilient, Energy-efficient Multipath Routing in Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of ACM MobiHoc'01. Long Beach, USA: [s. n.], 2001.

[6] Rabaey J. Energy-aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks[C]//Proc. of IEEE WCNC'02. Orlando, USA: [s. n.], 2002.

[7] Li Yaqing, Li Layuan, Wang Chunyan. A Multipath Routing Algorithm Based on Link Multi-metrics for Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of IEEE CCCM'08. Guangzhou, China: [s. n.], 2008.

[8] 任秀丽, 梁红伟, 汪 宇. 基于多路径蚁群算法的无线传感器网络的路由[J]. 计算机科学, 2009, 36(4): 116-118.

[9] 张小庆, 李腊元. 基于蚁群算法的定向扩散算法研究[J]. 传感技术学报, 2008, 21(7): 1226-1230.

[10] Saaty T L. Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process[M]. [S. l.]: RWS Publication, 2000.

[11] Dorigo M, Maniezzo V, Colorni A. The Ant System: Optimaization by a Colony of Cooperating Agents[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1996, 26(1): 29-41.

[12] Dorigo M, Gambardella L M. Ant Colony System: Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53-66.

[13] Zhang Ying, Lukas D. Improvements on Ant Routing for Sensor Networks[EB/OL]. (2004-05-10). http://www.parc.com/content/attachments/improvements-ant-routing.pdf.

编辑 陈 文