

双信道无线传感器网络移动代理路由算法

刘逵, 刘三阳, 冯海林

(西安电子科技大学理学院, 710071, 西安)

摘要: 针对移动代理在信道竞争过程中的相互碰撞及相互抑制问题,提出了一种移动代理联合优化路由算法(MACORA). 首先利用双层图模型将双信道无线传感器网络中的信道变换问题转化成双层图中的路由问题,进而可将寻路业务和数据传输业务分别放在双层图的控制层和数据层中同步传输,然后将双层图的控制层和数据层融合成一个双层网络,并在这个双层网络中为每个业务实时选路,最后充分利用不同网络层间的空闲信道资源来减少移动代理在信道竞争过程中的相互碰撞及相互抑制概率,达到降低网络堵塞率及数据包传递失误率 2 个目标. 仿真结果表明,与动态传感器网络移动代理路由算法及无线传感器网络移动代理路由算法相比,MACORA 算法能将数据包的传递成功率提高 15%,并能有效降低网络的平均通信延迟.

关键词: 无线传感器网络; 联合优化; 移动代理; 路径修复

中图分类号: TN393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)02-0113-06

A Mobile Agent Combination Optimization Routing Algorithm in Dual-Channel Wireless Sensor Networks

LIU Kui, LIU Sanyang, FENG Hailin

(School of Science, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A mobile agent combinatorial optimization routing algorithm (MACORA) is presented to solve the problems of collision and multicast suppression between mobile agents in channel competitive process. The channel converter problem in the dual-channel wireless sensor networks is simplified into a routing problem over the two-layer graph in terms of a two-layer graph model, and then searches for routes in the control plane and for transport traffic in the data plane are performed synchronously. Then, the control plane and the data plane are integrated into a two-layer network, and the route for each traffic is searched in the two-layer networks synchronously. The MACORA can make full use of the idle resource in different layers. This strategy deals with the collision between mobile agents and the multicast suppression in channel competitive process well, so the blocking probability of networks and the error rate of packet transmission can be cut down. Simulation results and comparisons with other algorithms like ADEEMA and MAWSN show that the MACORA performs better in improving success rate of packet transmission and putting down the delay of communication. The success rate of packet transmission is improved about 15%, compared with the ADEEMA and MAWSN.

Keywords: wireless sensor networks; combination optimization; mobile agent; route restoring

在无线传感器网络中,影响网络传输性能的因素主要有两方面:一是数据包与控制包之间的报文

冲突;二是冗余信息.为了保证对监控区域的监控效果,管理者通常会布置一些冗余节点以确保对监控区域的覆盖^[1].这些冗余节点在监控过程中通常会生成大量的冗余数据流,这些数据流在网络中传输将会极大的占用有限的通信带宽,进而引起信道堵塞^[2].文献[3-4]采用双信道通信模式将数据包和控制包隔离传输,彻底解决了二者之间的报文冲突,优化了网络的传输性能.这种层间调度策略能有效提高数据包的传递成功率,进而降低数据包的重传率,但该类文献提出的局部转发模式不能均衡考虑所选路由上各节点的剩余能量,可能使某些节点被过多使用,进而导致其过早死亡.文献[5-9]提出的移动代理(mobile agent, MA)模式在信息融合方面得到了成功应用.在该模式中,处理节点作为网络查询的控制者和感知数据的接收者,通过派出 MA 来完成对数据的采集.这种查寻模式具有以下优点:①降低传输带宽需求;②根据网络负载动态决定迁移策略和数据处理方法,进而优化网络的传输性能.文献[8]提出了基于蚁群优化^[10]策略的移动代理能量有效路由算法,该算法赋予网络中原有的查询信息以蚂蚁的特性,从而加强了算法在路由建立和维护方面的自适应能力.同时,基于蚂蚁具有自组织、自动寻优的特点,蚁群算法还能有效地减少网络中原有查询信息的工作量,进而降低网络中路由建立及维护方面的费用.然而,由于该算法采用的是单信道通信模式,因此由数据包与控制包引发的通信冲突将不可避免.针对上述算法存在的问题,本文提出了一种移动代理联合优化路由算法(MACORA),设计了一种双层网络联合调度策略,将容量较小的控制层中被堵塞的寻路业务有条件的下放到容量较大的数据层中传输,有效利用不同网络层的信道资源来降低网络堵塞率.针对动态传感器网络^[11-12],本文还设计了一种局部路由修复策略,该策略能在保留原有最优路径大部分信息的基础上快速修复最优路径,进而减少网络重新寻路的能耗及通信延迟.

1 MACORA 算法模型

1.1 通信能耗模型及 MA 的属性

本文采用文献[11]的通信能耗模型来分析无线传感器节点之间的通信能耗,当父节点要发送大小为 k 的信息给相距为 d 的子节点时,两节点的发射模型和接收模型能耗分别为

$$E_T(k, d) = \begin{cases} Ek + akd^2, & d \leq d_0 \\ Ek + bkd^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_R(k) = Ek \quad (2)$$

式中: E 为系统功耗; a 为传输距离小于阈值 d_0 、功率放大损耗采用自由能量模型功率放大所需的功耗; b 为传输距离大于阈值 d_0 、功率放大损耗采用多路径衰减模型的功率放大所需的功耗.

移动代理算法中的 MA 具有如下属性:①存储 PN 节点、目标节点和途经各节点的身份信息;②完成数据融合的代码;③处理并采集各目标节点监测到的数据信息. MA 在数据层中按 MACORA 算法搜寻到的最优路径遍历所有目标节点后再返回 PN 节点,从而完成对数据的采集.

1.2 分层传输模型

用图论中的分层图模型将双信道无线传感器网络中的信道转换问题转化成路由问题,从而将信道转换和数据传输问题整合在分层图中同时进行.分层传输模型将用于传送控制包的控制层和用于传送数据包的数据层融合成一个网络(如图1所示),然后在这个双层网络中联合调度.将容量较小的控制层中被堵塞的寻路业务有条件的下放到容量较大的数据层中进行传输,有效利用不同层的信道资源来降低网络的堵塞率,从而实现双层网络的联合优化.

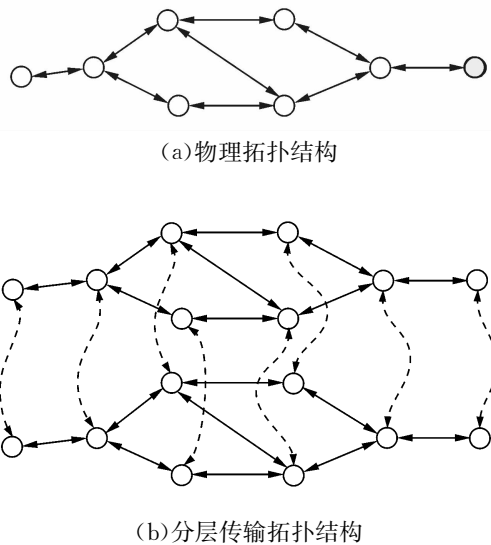


图1 双信道传感器网络的拓扑结构

1.3 邻居列表与最优路径评定准则

假设传感器网络中各节点的接收和发射天线均是全向的,网络中所有节点都是同构、能量有限的,且每个节点均有唯一的 ID 和 2 个独立的信道.网络中各节点均要建立各自的邻居列表,邻居列表中存储以下内容:①邻居节点的 ID 号及相对位置;②本地节点与其邻居节点之间的信息素浓度;③本地节点及其邻居节点的剩余能量.同时,为了均衡各节点

的剩余能量和路由能量总消耗,本文提出了一种最优路径评定标准

$$d = \left(\lambda_1 \sigma^2 + \left(\frac{\lambda_2 E_1}{\lambda_3 E_2 + \lambda_4 E_3} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

式中: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 为非负偏向参数; σ 为路径上各节点剩余能量的标准差; E_1 是路径上传输一条信息时总的能量消耗; E_2 是路径上所有节点的平均剩余能量; E_3 是路径上所有节点中剩余能量的最小值。 d 越小,则对应的路径就越优。

2 MACORA 算法

在双信道无线传感器网络中,为了避免数据包与控制包二者之间的报文冲突,本文提出一种隔离传输策略:将控制包和数据包分别放在控制层和数据层上传输,进而彻底避免二者之间的报文冲突;MACORA 算法寻找源节点到目标节点间的最优路径,而在数据层上,待传数据从源节点出发沿着 MACORA 算法在控制层寻找到的最优路径向目标节点传送;当数据层有足够的空闲资源时,可以将控制层被堵塞的寻路业务实时下放到数据层中传输,从而实现双层网络的联合优化。

模式 1 MACORA 算法在控制层上的寻路流程。

(1)在控制层上放 m 个种群的蚂蚁,每个种群有 n 只,每隔一段时间,从源节点 v 派出蚂蚁去寻找目标集 $u = \{u_i | i = 1, 2, \dots, m\}$ 的最优路径。节点 v 利用各目标节点的位置信息,求出距其最近的目标节点 u_i ,并将其存储在寻路蚂蚁携带的信息中,同时蚂蚁还携带源节点和路由上途经各节点的 ID 号及途经各节点的剩余能量信息。

(2)位于节点 i 的蚂蚁 k 首先利用携带的信息修改节点 i 的邻居列表:将邻居列表中蚂蚁 k 访问过的节点去掉;将节点 i 的邻居列表中比 i 距目标节点 u_i 更远的节点移除;如果目标节点 u_i 在节点 i 的邻居列表中,则将目标节点 u_i 以外的所有节点移除。然后采用伪随机比例规则^[10]在修正过的邻居列表中选择下一跳访问节点,到达下一跳节点 j 后,更新蚂蚁 k 携带的信息,然后按下式更新局部信息素

$$h_{ij} \leftarrow (1 - \xi)h_{ij} + \xi h_0 \quad (4)$$

式中: $0 < \xi < 1$; h_0 是信息素的初始值。

(3)当蚂蚁 k 到达目标节点 u_i 后,判断目标节点 u_i 的位置信息是否与源节点 v 的位置信息相同,如果相同,执行步骤(5);否则更新目标节点集 u ,将 u_i 移除。如果更新后的目标节点集 u 不空,则利用各目标节点的位置信息,求出更新后的目标节点集

u 中距节点 u_i 最近的目标节点 u_j ,同时将 u_j 的位置信息赋值给 u_i ,然后转至步骤(2);否则执行步骤(4)。

(4)将源节点 v 的位置信息放在目标节点表 u 中,令目标节点 u_i 为起始节点,源节点 v 为目标节点,转至步骤(2)。

(5)按式(3)计算路径最优度 d 。当一个种群的蚂蚁到达目标节点后,选出路径最优度最小的路由,放在最优路径集中,并按下式进行全局信息素更新

$$h_{ij} \leftarrow (1 - \rho)h_{ij} + \rho \Delta h_{ij}, \quad \forall (i, j) \in T_{v,u} \quad (5)$$

式中: $T_{v,u}$ 为最优路径; $\Delta h_{ij} = 1/C_{v,u}$ 是信息素增量, $C_{v,u}$ 是最优路径的费用; ρ 是信息素蒸发速率。然后开始下一个种群的寻路,依次类推,直到所有的蚂蚁均走完,从中选出 d 最小的路径作为 MA 遍历目标节点后再返回源节点的最优路径,然后 MA 在数据层中沿着上述路径完成对数据的采集及传输。

模式 2 MACORA 算法在双层网络联合优化下的寻路流程。

(1)蚂蚁 k 在控制层为每一个实时到达的业务寻路。当控制层有足够的网络资源时,则蚂蚁 k 按模式 1 在控制层寻找该业务的最优路径;否则,执行步骤(2)。

(2)位于节点 i 的蚂蚁 k 首先侦察在数据传输层中节点 i 与其邻居列表中允许蚂蚁 k 访问的节点之间有无足够的信道资源供蚂蚁寻路,如果没有,则蚂蚁 k 停止执行该寻路业务;否则执行步骤(3)。

(3)蚂蚁 k 在数据传输层按模式 1 寻找下一跳节点 j 传送该寻路业务。到达节点 j 后,蚂蚁 k 首先侦察控制层中节点 j 与其邻居节点之间是否有足够的信道资源供其执行该寻路业务,如果没有,则蚂蚁 k 继续在数据传输层执行该寻路业务;否则蚂蚁 k 返回控制层,并控制层中按模式 1 寻找该业务的最优路径。

3 最优路径局部修复策略

假设节点 v 是节点 u 的父节点,两节点间传输单位比特信息的能耗为 $E_{v,u}$ 。以线段 vu 为直径做圆,如果节点 w 在圆内,则在路由 wvu 上传输单位比特信息的能耗小于 $E_{v,u}$ 。因为节点 w 在以 vu 为直径的圆内,从而可得 $\angle wvu$ 为钝角,由余弦定理可推出 $d_{v,w}^2 + d_{w,u}^2 < d_{v,u}^2$ 。由通信能耗公式可知在路由 wvu 上传输单位比特信息消耗的能量小于 $E_{v,u}$ 。如果 w 在此圆上,则在路由 wvu 上传输单位信息的

能耗等于 $E_{v,u}$. 因为节点 w 在以 vu 为直径的圆上, 从而得 $\angle vwu$ 为直角, 由勾股定理可得 $d_{v,w}^2 + d_{w,u}^2 = d_{v,u}^2$. 进而由通信能耗公式可得在路由 vwu 上传输单位比特信息的能耗等于 $E_{v,u}$. 因为在路由 vwu 上传输单位比特信息的能耗不大于 $E_{v,u}$, 所以称节点 w 为感染捷径节点. 在此圆中, 直径 vu 将其平分成 2 个半圆, 从节点 v 出发沿着半圆上的感染捷径节点到节点 u 的路由有如下性质.

定理 1 从父节点 v 出发, 沿着任意半圆上的感染捷径节点到子节点 u 的路由设为 $vw_1w_2\cdots w_hu$, 则在此路由上传输单位比特信息的能耗小于 $E_{v,u}$.

证明 因为节点 $w_1, w_2, \dots, w_h$ 均在半圆的圆周上, 所以 $\Delta vw_1w_2, \Delta vw_2w_3, \dots, \Delta vw_{h-1}w_h$ 均为钝角三角形. 由于 Δvw_1w_2 为钝角三角形, 由余弦定理可得

$$d_{v,w_1}^2 + d_{w_1,w_2}^2 < d_{v,w_2}^2 \quad (6)$$

由于 Δvw_2w_3 也为钝角三角形, 同理可得

$$d_{v,w_2}^2 + d_{w_2,w_3}^2 < d_{v,w_3}^2 \quad (7)$$

将式(7)代入式(6), 化简得

$$d_{v,w_1}^2 + d_{w_1,w_2}^2 + d_{w_2,w_3}^2 < d_{v,w_3}^2 \quad (8)$$

递推得

$$d_{v,w_1}^2 + d_{w_1,w_2}^2 + \cdots + d_{w_{h-1},w_h}^2 < d_{v,w_h}^2 \quad (9)$$

因为 $\angle vw_hu$ 为半圆对应的圆周角, 所以 Δvw_hu 为直角三角形, 由勾股定理得

$$d_{v,w_h}^2 + d_{w_h,u}^2 = d_{v,u}^2 \quad (10)$$

将式(10)代入式(9), 化简可得

$$d_{v,w_1}^2 + d_{w_1,w_2}^2 + \cdots + d_{w_{h-1},w_h}^2 + d_{w_h,u}^2 < d_{v,u}^2$$

所以在路由 $vw_1w_2\cdots w_hu$ 上传输单位比特信息所消耗的总能量小于 $E_{v,u}$.

定理 1 给出了一种最优路径修复策略, 即当路径上某节点失效后, 以失效节点的父节点和子节点为直径做圆, 然后在此圆内运用本文算法做快速局部修复, 从而可在保留原有路径大部分信息的基础上, 在失效节点附近找新的感染捷径节点来快速修复最优路径, 减少网络重新寻路的能耗.

图 2 为无线传感器网络中源节点到目标节点之间最优路径中的某一段, 在这段路径上节点 c 因故失效, 则以失效节点的父节点 b 和失效节点的子节点 e 之间的连线为直径作圆, 然后在圆中找代替节点对这段路径进行局部修复. 因为节点 d 在圆内, 且节点 b 和节点 e 均在 d 的邻居列表中, 所以可用路由 bde 来代替故障路由 bce , 从而在保留原有路径大部分信息的前提下, 完成局部路由修复.

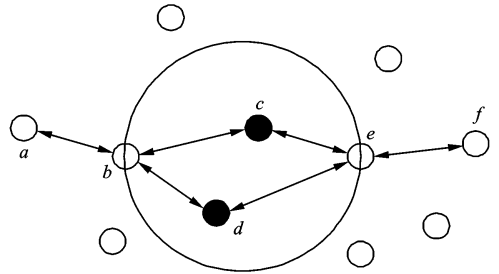


图 2 局部路由修复

4 仿真实验

将本文算法与文献[7]的 MAWSN 算法以及文献[8]的 ADEEMA 算法进行了仿真比较. 仿真条件为: 在 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的正方形区域内随机部署 150 个节点, 且节点的初始能量为 10 J , 各节点的发送功耗为 15 mW , 接收和空闲功耗均为 12 mW ; 总信道带宽为 2 Mb/s , 其中控制信道带宽为 0.4 Mb/s , 数据信道带宽为 1.6 Mb/s ; 令最优路径公式中偏向参数为 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.3, \lambda_3 = \lambda_4 = 0.2$; 假定请求帧、清除帧、应答帧的大小均为 40 B , 数据包的大小为 400 B ; 将源节点固定在该区域的左下角, 目标节点固定在该区域的右上角.

图 3 描述了各算法的数据包传送成功率之间的关系. 由图 3 可知, 当网络负载较高时, 数据包的产生速率对各算法的传递成功率有较大影响. 其原因是随着网络负载的加大, 数据包与控制包的报文冲突将不断加剧, 但由于 MACORA 算法采用了双信道通信模式, 避免了二者之间的报文冲突, 进而加大了数据包的传送成功率.

图 4 描述了各算法数据包传送过程中的平均通信延迟之间的关系. 由图 4 可知, 当网络负载较高时, MACORA 算法的通信延迟最低. 这是因为本文算法设计了一种双层网络联合调度策略, 将容量较小的控制层中被堵塞的寻路业务实时下放到容量较

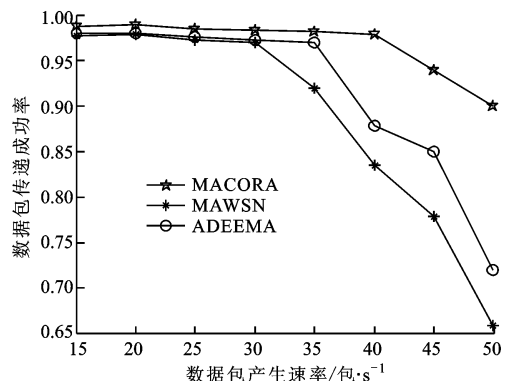


图 3 数据包传递成功率

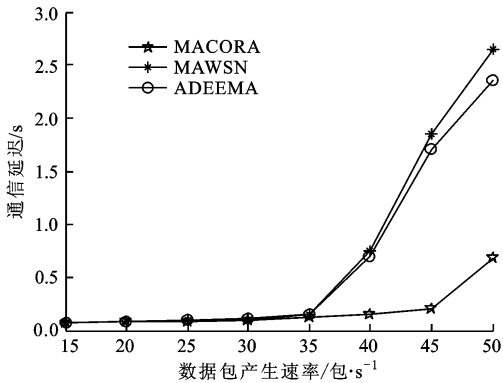


图 4 平均通信延迟

大的数据层中传输,从而有效利用了不同网络层的信道资源来降低网络的通信延迟。

为了进一步比较 3 种算法的性能,进行了如下仿真实验. 固定源节点的位置,然后不断移动目标节点的位置,当目标节点处在不同的位置上时,分别运用这 3 种算法在网络中寻找各自对应的最优路径,然后在各自所选的最优路径上传送 400 B 的信息. 图 5 比较了 3 种算法的信号传输距离与节点最小剩余能量之间的关系. 从图 5 可看出,本文算法找到的最优路径上剩余能量最少的节点有最高的剩余能量. 这是因为本文算法设计了一种最优路径评定标准,该标准能促使蚂蚁在寻路的过程中避开剩余能量小的节点,因而使最优路径上剩余能量最小那个节点的剩余能量最高. 由于 ADEEMA 算法也采用了一种策略来避开剩余能量小的节点,从而该算法寻找到的最优路径上剩余能量最小那个节点的剩余能量也相对较高,而 MAWSN 算法则是基于贪婪策略设计的最短路由算法,该算法在选择下一跳节点时不考虑节点的剩余能量,因此找到的路径上剩余能量最小节点的剩余能量明显偏低。

图 6 比较了 3 种算法的信号传输距离与网络总能耗之间的关系. 由图 6 可知,利用 MACORA 算法

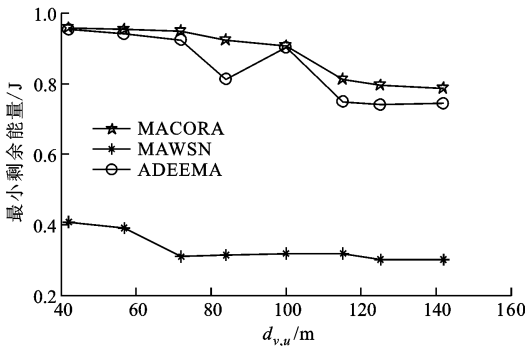


图 5 3 种算法的信号传输距离与节点最小剩余能量之间的关系曲线

传输时,网络的总能耗最低. 这主要有两方面原因: 首先是由于 MACORA 算法采用了双信道通信模式,提高了数据包传送的成功率,进而降低了网络的通信能耗;其次由于 MACORA 算法利用查询信息获得从源节点出发遍历目标节点后再返回源节点的最优路径,然后令 MA 在数据层中沿着上述路径完成对数据的采集,因而减少了数据传输量,节省了通信能耗. 另外两种算法则是利用 MA 参与寻找从源节点出发遍历目标节点后再返回源节点的最优路径,MA 本身包含的数据量明显大于查询信息的数据量,进而加大了数据传输量,增加了网络的通信能耗。

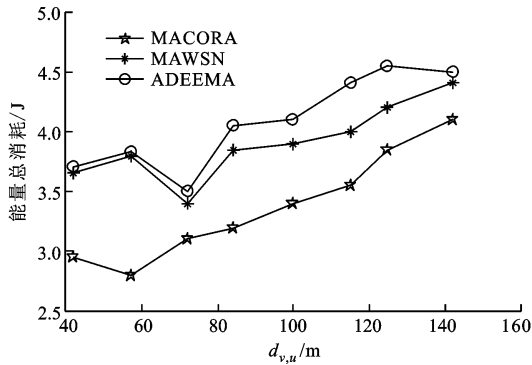


图 6 3 种算法的信号传输距离与网络总能耗之间的关系曲线

5 结 论

本文基于双信道传输策略提出了一种移动代理联合优化算法,在算法中设计了一种双层网络联合调度策略,将控制层中被堵塞的寻路业务实时下放到数据层中传输,有效利用不同网络层的信道资源来降低网络的堵塞率,并且还采用了移动代理数据融合模式,因而成功降低了网络的数据传输量,减少了通信能耗. 最后,本文设计了一种局部路由修复策略,该策略能在保留原有最优路径大部分信息的基础上快速修复最优路径,从而减少了网络的通信延迟和重新寻路的能耗。

参考文献:

[1] GALLAIS A, CARLE J, STOJIMENOVIC I. Localized sensor area coverage with low communication overhead [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(5): 661-672.

[2] ANASTASI G, CONTI M, PASSARELLA A, et al. Energy conservation in wireless sensor networks: a survey [J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(3): 537-568.

- [3] CORMIO C, CHOWDHURY K R. A survey on MAC protocol for cognitive radio networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2009, 7(7): 1315-1329.
- [4] 李连, 蒋文涛. 移动传感器网络中一种基于接受者的跨层传输协议[J]. *计算机研究与发展*, 2009, 46(1): 120-128.
LI Lian, JIANG Wentao. A receiver-based cross-layer forwarding protocol for mobile sensor networks[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2009, 46(1): 120-128.
- [5] FOK C L, ROMAN G C, LU Chenyang. Agilla: a mobile agent middleware for self-adaptive wireless sensor networks [J]. *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems*, 2009, 4 (3): 4-29.
- [6] LI Zhiyu, SHI Haoshan. A data aggregation algorithm based on grid and mobile agent in WSN [J]. *Chinese Journal of Sensor and Actuators*, 2008, 21(7): 624-628.
- [7] CHEN Min, KWON T, YUAN Yong, et al. Mobile agent based wireless sensor networks [J]. *Journal of Computers*, 2006, 1(1): 14-21.
- [8] 郑巍, 刘三阳, 寇晓丽. 动态传感器网络移动代理路由算法[J]. *控制与决策*, 2010, 25(7): 1035-1039.
ZHENG Wei, LIU Sanyang, KOU Xiaoli. Dynamic mobile agent routing algorithm in sensors network [J]. *Control and Decision*, 2010, 25(7): 1035-1039.
- [9] 李志宇, 史浩山. 基于最小 Steiner 树的无线传感器网络数据融合法[J]. *西北工业大学学报*, 2009, 27(4): 558-564.
LI Zhiyu, SHI Haoshan. A data-aggregation algorithm based on minimum Steiner tree in wireless sensor networks [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2009, 27(4): 558-564.
- [10] MARCO D, THOMAS S. Ant colony optimization [M]. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2006.
- [11] 郑巍, 刘三阳, 寇晓丽. 一种面向传感器网络的蚁群优化路径恢复算法[J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(1): 83-86.
ZHENG Wei, LIU Sanyang, KOU Xiaoli. A route restoration algorithm for sensor network via ant colony optimization [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(1): 83-86.
- [12] BOHACEK S. Performance improvements provided by route discovery in multihop wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(3): 372-384.

(编辑 刘杨)