

ACO-Based Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks(ARAWSN) *

LIANG Hua-wei^{1,2,3*}, CHEN Wan-ming^{1,2}, LI Shuai^{1,2}, MEI Tao¹, MENG Qing-hu^{1,3}

1. Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;
3. Department of Electronic Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Sha Tian, Hong Kong

Abstract: How to get high efficient data routing for the limited energy resource networks is an important problem in the study of the wireless sensor networks. Applying the Ant Colony Optimization Algorithm (ACO) on the routing of wireless sensor networks, we proposed an ACO-based routing algorithm for wireless sensor networks called ARAWSN. The algorithm utilized the self-organization, self-adaptability and dynamic optimization capabilities of the Ant Colony to build and maintain the optimal network path. It adopted the conception of Stigmergy to minimize the flow number of the control information and achieve high efficient data transitions for the network. In our experiment, the average time delay using the ACO-based routing algorithm is comparative to that of Directed Diffusion (DD) algorithm but has notable effect in the energy cost of routing compared to DD algorithm. In addition, this algorithm also has good dependability and high adaptability. And it can also achieve congestion control and energy balance for wireless sensor networks if needed.

Key words: wireless sensor network; network route; ant colony optimization; routing algorithm

EEACC:6150P

一种无线传感器网络蚁群优化路由算法 *

梁华为^{1,2,3*}, 陈万明^{1,2}, 李 帅^{1,2}, 梅 涛¹, 孟庆虎^{1,3}

1. 中国科学院合肥智能机械研究所, 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学 自动化系, 合肥 230027;
3. 香港中文大学电子工程系, 香港 沙田

摘 要: 如何在资源受限的无线传感器网络中进行高效的数据路由是无线传感器网络研究的热点之一。将蚁群优化算法(ACO)应用于无线传感器网络的路由, 提出一种无线传感器网络蚁群优化路由算法。该算法利用蚁群的自组织、自适应和动态寻优能力进行网络优化路径的建立与维护, 采用 Stigmergy 的概念来减少控制信息的流量, 以实现网络数据的高效传输。仿真分析表明, 该算法和 DD 算法相比在传输延时方面性能相当, 在路由代价方面效果显著。另外, 该算法还具有可靠性高、适应性强等优点, 并能够根据需要进行网络的拥堵控制和能量均衡等综合优化。

关键词: 无线传感器网络; 网络路由; 蚁群优化; 路由算法

中图分类号: TP393; TP212.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2007)11-2450-06

无线通讯技术、电子技术、传感技术和微机电系统(MEMS)的进步推动了无线传感器网络应用和研究的发展。无线传感器网络由众多具有感知、通信和计算能力的传感器节点, 以无线的方式连接而

成, 因为无需基础设施, 布置容易、使用灵活、成本低廉, 在军事、环境监测、灾难救援、医疗健康、家庭监护以及其他众多的领域有着广泛的应用前景^[1], 网络路由由承担着将信息从源节点穿过网路传送到目的

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(60535010); 国家自然科学基金项目资助(60475027)

收稿日期: 2007-04-05 修改日期: 2007-06-15

节点的任务,是实现网络高效通信的基础.然而,无线传感器网络的多跳路由、动态拓扑等特点使路由的探测和管理开销很大,严重影响网络的使用效率.此外,和传统网络相比,无线传感器网络具有能源、计算能力和带宽等资源限制.这使得无线传感器网络路由成为一个非常具有挑战性的问题.

为了应对路由的挑战,国内外众多学者对此进行了大量的研究,提出了许多很好的无线传感器网络路由机制^[2].DD(定向扩散)协议是一种经典的无线传感器网络路由协议,被认为是无线传感器网络路由协议研究中的一个里程碑,目前许多无线传感器网络路由协议都是在 DD 协议的基础上提出的^[2-3].DD 协议是一种以数据为中心的,基于查询的路由机制.汇聚节点通过兴趣消息(interest)发出查询任务,采用洪泛的方式(flooding)在网络中传播.在兴趣消息传播过程中,协议在每个传感器节点上建立从数据源到汇聚节点的数据传输梯度(gradient).数据源将采集到的数据沿梯度方向传送到汇聚节点^[4].DD 协议采用以数据为中心的思想,使用基于属性的数据命名机制,减小了数据冗余;通过路径加强机制,选择优化路径进行数据传输,提高了网络数据传输与能量使用效率.然而,DD 协议使用专门的路径加强消息的路径加强机制增加了路由开销;为了适应节点失效、拓扑变化等情况,DD 协议需要周期性的执行兴趣扩散、数据传播和路径加强操作,来进行路径的维护,影响了路由效率.

蚁群优化方法是一种新的群智能方法,最初由 M. Dorigo 等于 1991 年提出,用于解决 TSP 问题.1997 年以后蚁群算法得到了较快的发展,2000 年 M. Dorigo 等在《Nature》上发表了蚁群算法的研究综述^[5],将这一领域的研究推到了国际学术的最前沿.现在,蚁群算法已从最初的仅用于解决旅行商问题(TSP)问题,发展到用于解决 TSP、路径规划和任务调度等众多复杂问题的优化,并取得了非常好的应用效果^[5-7].目前,已有多种形式的蚁群优化算法应用于网络的路由,并在路由质量、路由代价、拥堵控制和网络适应性等方面具有良好的效果^[8].文献^[9-12]中给出了多种蚁群优化方法收敛到最优解的证明.

蚁群优化方法因其具有的自组织、自动寻优和动态特性,特别适合应用于同样具有动态、自组织特性的 Ad-Hoc 网络、无线传感器网络等. M. Gunes 等提出了一种基于蚁群优化思想的路由算法(ARA)^[13],将蚁群算法应用于 Ad-Hoc 网络的最短路径优化,该算法需要两个扩散过程,且没有启发控制功能. Z. Liu 和 M. Z. Kwiatkowska 等在文献^[14-15]中基于

蚁群算法提出了一种用于移动 Ad-Hoc 网络(MANETs)的路径优化算法及其拥堵控制改进,该算法路由维护比较复杂,若用于无线传感器网络,对节点的运算能力要求较高,且复杂的运算增加了路由开销和节点的能量消耗;O. Hussein 等在文献^[16]中提出了一种用于 MANETs 的蚁群路由算法,并对该算法在能量的均衡使用和网络动态适应性方面进行了仿真和分析,但该算法路径建立时间较长,影响了算法的性能,且该算法使用集中的路径评价机制,路由数据包较大,增加了路由开销.

本文在 DD 算法的基础上提出一种无线传感器网络蚁群优化路由算法(ArawSN).该算法利用蚁群的自组织和自适应寻优机制进行网络优化路径的建立与维护,采用 Stigmergy 的概念来减少控制信息的流量,进一步降低路由开销,实现网络信息的高效传输.该算法还能够根据需要进行网络的拥堵控制和能量均衡等综合优化.

本文下面第 1 部分简要介绍蚁群优化的机制和蚁群优化算法;第 2 部分介绍基于蚁群优化的无线传感器网络路由算法(ArawSN)及其具体实现;第 3 部分介绍算法仿真和结果分析;第 4 部分给出结论.

1 蚁群优化

蚁群算法的基本思想来自真实蚁群的觅食行为.一只蚂蚁只是一个简单的动物,但聚集在一起的一个蚁群能够完成复杂的任务.生物学研究表明蚁群总能发现从巢穴通往食物的最短路径,它们使用一种叫做 stigmergy 的机制,通过沿途施放信息素(pheromone)来实现分布式记忆,并通过间接通讯和其他蚂蚁共享信息.

1.1 蚁群的寻优机制

这里给出一个蚁群优化方法解决寻找最优路径问题的示例,该示例是文献^[8]的中示例的一个改版.假设,有两只蚂蚁: A_1 、 A_2 , 两条通往食物源的路径: R_1 和 R_2 ($R_1 > R_2$), 路径的两端是蚁巢 N_c 和食物源 F_o . 如图 1 所示.

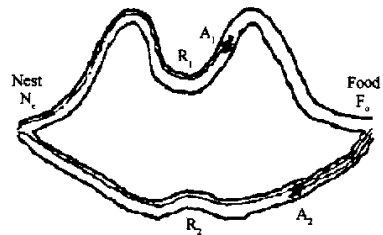


图 1 ACO 解决寻找最优路径问题的示例
最初,所有的蚂蚁(A_1 和 A_2)都在起始点 N_c ,

它们必须在 R_1 或 R_2 中选择路径以到达食物源 F_0 。

① 在 N_c , 所有的蚂蚁都没有食物位置 (F_0) 的先验知识。因此, 它们从路径 R_1 和 R_2 中随机选择。假定 A_1 选择 R_1 , A_2 选择 R_2 。

② 当 A_1 沿着 R_1 前进, A_2 沿着 R_2 前进时, 它们分别沿着路径 R_1 和 R_2 留下一定量的信息素, T_{R_1} 、 T_{R_2} 分别表示路径 R_1 和 R_2 上的信息素浓度。

③ 因为 $R_2 < R_1$, 所以 A_2 先于 A_1 和到达 F_0 。当 A_2 通过 R_2 到达 F_0 时, 为了从 F_0 返回 N_c , 它需要在 R_1 和 R_2 中再次做出选择。在 F_0 , A_2 发觉 $T_{R_2} = 1, T_{R_1} = 0$ (因为 A_1 还未到达 F_0), $T_{R_2} > T_{R_1}$, 因此, A_2 选择 R_2 作为返回路径, 并在返回途中继续施放信息素。 A_2 选择了最短路径。 R_2 作为最短路径得到了加强。

④ 当 A_1 到达 F_0 时, 他发现 $T_{R_2} = 2, T_{R_1} = 1, T_{R_2} > T_{R_1}$ 。因此, A_1 也选择 R_2 返回 N_c 。 A_1 也选择了最短路径。

在这个例子中, 一旦有蚂蚁到达 F_0 (N_c), 在 F_0 (N_c) 的任一只蚂蚁就都能够确定最优路径。如果一只蚂蚁在没有信息素的选择点 (如: 最初的 N_c), 它会作出一个随意的决定, 选择 R_1 和 R_2 的可能性均为 0.5。然而, 当信息素出现时 (如: 当蚂蚁在 F_0 时), 它更可能选择具有更高信息素浓度的路径。而且, 随着 R_2 使用次数的增加, 其信息素浓度会逐渐增高。

1.2 具有启发功能的蚁群算法

设, $G = (V, E)$ 是一个连通的无向图, V 是顶点的集合, E 是边的集合。 $v_i, v_j \in V$, 是图 G 中的顶点; $e(i, j) \in E$, 表示顶点 v_i 和 v_j 之间的边; μ_{ij} 是边 $e(i, j)$ 上的信息素浓度, 其值可由经过 $e(i, j)$ 的蚂蚁修改; η_{ij} 是 $e(i, j)$ 上的预先知道的局部启发值, 可以是任何形式的代价, 如距离、费用等。引入局部启发值是为了增加蚂蚁探寻新路径、适应路径变化的能力。

在顶点 v_i 的蚂蚁使用信息浓度 μ_{ij} 和局部启发值 η_{ij} 来计算选择下一个顶点 v_j 的概率 p_{ij} , 这里 $v_j \in N_i$, N_i 是顶点 v_i 的所有相距一步的相邻顶点集合, 则 p_{ij} 可由下式给出^[8]:

$$p_{ij}(t) = \frac{[\mu_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum [\mu_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta} \quad (1)$$

其中, α 和 β 分别表示 μ_{ij} 和 η_{ij} 的可调权重, t 表示 t 时刻。因此, 蚂蚁的路由倾向可以通过选择不同的 α 和 β 值来调整。如果 $\alpha > \beta$, 蚂蚁偏爱具有高信息素浓度的路径; 而较大的 β 值则使蚂蚁选择具有更大启发值的路径。

在觅食的过程中, 蚂蚁在经过的边 $e(i, j)$ 上施放信息素。当蚂蚁从 v_i 经过 $e(i, j)$ 到 v_j 时, $e(i, j)$ 上的信息素浓度 μ_{ij} 按下式修改:

$$\mu_{ij}(t) = \mu_{ij}(t) + \Delta\mu \quad (2)$$

其中, $\Delta\mu$ 是蚂蚁施放的信息素量。

和真实的信息素一样, 信息素浓度随着时间的推移被逐渐蒸发, 设执行一次蒸发的时间间隔为 τ , $e(i, j)$ 上的信息素浓度按下式蒸发:

$$\mu_{ij}(t + \tau) = \mu_{ij}(t) \times \rho, \rho \in (0, 1] \quad (3)$$

这里, ρ 是蒸发系数。

2 无线传感器网络蚁群优化路由算法

蚁群优化方法的自组织、动态和多路径的特性使其特别适合应用于无线传感器网络的路由。这一部分我们详细介绍无线传感器网络蚁群优化路由算法 (ARAWSN) 及其具体实现。该算法包括两个基本过程: ① 路径搜寻; ② 数据传输和路由维护。

2.1 路径搜寻

这个过程类似于 DD 协议的兴趣扩散。兴趣消息就是我们的路径搜寻蚂蚁, 路径搜寻在兴趣扩散过程中实现, 在兴趣扩散过程中采用定向机制。在这个过程中, 所有从源节点到目的节点的有效路径均被发现。网络中每个节点维护一个简单的路由表, 路由表由蚂蚁在路径搜寻过程中建立, 路由表的结构为: 邻居节点, 信息素浓度。

具体的路径搜寻过程如下:

① 当目的节点 v_d 需要获得源节点 v_s 的数据时, 从 v_d 派出路径搜寻蚂蚁 A_s , 蚂蚁 A_s 以广播的方式在网络中扩散。为了建立从源节点 v_s 到目的节点 v_d 的路径, 蚂蚁 A_s 携带当前节点地址 v_i 、源节点地址 v_s 和跳数信息, 其结构为: 源节点, 当前节点, 跳数。在目的节点 v_d 时, $v_i = v_d$, 跳数 = 0;

② 当中间节点 v_j 收到来自邻居节点 v_i 的蚂蚁 A_s 时,

(a) 首先检查自己 (v_j) 是否比节点 v_i 距离源节点 v_s 更近, 且距离目的节点 v_d 更远, 若是, 转入下一步; 否则, 简单丢弃;

(b) 然后检查是否已收到来自 v_i 的蚂蚁 A_s ; 若是, 则简单丢弃; 否则, 将跳数 + 1, 并在本地路由表中创建一个表项, 记录 v_i 和与跳数相关的信息素浓度, 转入下一步;

(c) 最后再检查之前是否收到来自其他邻居节点的蚂蚁 A_s , 若是, 说明 v_j 已转发过蚂蚁 A_s , 为了避免消息循环和重复发送, 则简单丢弃; 否则, 将用 v_j 代替蚂蚁 A_s 中的 v_i , 并向它的邻居转发蚂蚁 A_s ;

③ 重复 2 中蚂蚁的扩散过程,直至蚂蚁 A_s 到达源节点 v_s ,从而建立从 v_s 到 v_d 的路径和各节点的初始信息素值。

路径搜寻过程为各节点建立了从源节点 v_s 到目的节点 v_d 的数据传输路由表。节点 v_i 的路由表结构如表 1 所示。

表 1 节点 v_i 的路由表

邻居节点	信息浓度
v_j	μ_{ij}
v_k	μ_{ik}
...	...

这里,节点 v_i 到邻居节点 v_j 的信息浓度 μ_{ij} 取决于搜寻蚂蚁的跳数。

$$\mu_{ij} = 1 - \frac{h_{ij}}{\sum h_{ij}} \quad (4)$$

h_{ij} 是路径搜寻时从目的节点 v_d 经 v_j 到 v_i 的跳数。

2.2 数据传输和路由维护

建立了从源节点 v_s 到目的节点 v_d 的路径后就可以进行从 v_s 到 v_d 的数据传输了。在网络中传输的数据,根据信息素浓度选择下一跳节点。

在节点 v_i 的数据包按式(1)计算选择下一跳节点 v_j 的概率,其中, μ_{ij} 取路由表中节点 v_i 到邻居节点 v_j 的信息浓度;在这里,我们忽略局部启发值 η_{ij} 对路径选择的影响,即,令 $\beta=0$ 。我们可以通过使局部启发值 η_{ij} 反应网络流量、能量等信息,实现网络的拥堵控制和能量均衡等网络 QoS (Quality of Service) 优化。

该算法不需要使用额外的数据包和数据的传输过程来进行路由的维护。路由的维护工作在正常的数据传输过程中同步进行。

每个从源节点 v_s 向目的节点 v_d 传输的数据包,相当于一个路径增强蚂蚁,路径的增强通过蚂蚁施放信息素的机制实现,即在数据传输的过程中通过路径增强蚂蚁对所经过节点的信息素的修改来实现。优化路径在这个过程中会自动出现。蚂蚁的自动寻优机会保证在数据传输时自动选择优化路径。

和真实蚁群一样,所建立的信息素浓度,并不是永久不变的。信息素浓度的变化通过两种机制实现:信息素增强和信息素蒸发。

信息素增强:当从节点 v_i 转发数据到邻居节点 v_j 时,从 v_i 到 v_j 的路径被加强, v_i 路由表中对应 v_j 的表项的信息素值按式(2)增加,从而实现优势路径增强。

如:当节点 v_i 选择邻居节点 v_j 作为下一跳节点

时, v_i 的路由表作如表 2 所示修改。

表 2 节点 v_i 执行信息素增强后的路由表

邻居节点	信息浓度
v_j	$\mu_{ij} + \Delta\mu$
v_k	μ_{ik}
...	...

$\Delta\mu$ 是蚂蚁一次释放信息素的量

信息素蒸发包括两种情况:为了避免统治地位路径的产生,网络中所有的信息素浓度按式(3)进行周期性蒸发,以减小过去的信息素的影响。

网络中的节点 v_i 执行信息素蒸发后的路由表如表 3 所示。

表 3 节点 v_i 执行信息素蒸发后的路由表

邻居节点	信息浓度
v_j	$(\mu_{ij} + \Delta\mu) \times \rho_1$
v_k	$\mu_{ik} \times \rho_1$
...	...

ρ_1 是蒸发系数

无线传感器网络的连通性可能会因为环境变化、信号干扰等因素的影响而发生变化。为了适应由此引起的网络拓扑的变化,当 MAC 层检测到两节点间通讯失败时,按式(3)对该两节点间的信息素进行针对性地蒸发,以减小该路径在随后的通讯中被选中的概率,促进新路径的使用。当干扰因素消失,节点恢复连通时,由于路径选择的随机性,该路径仍会在数据传输中得到加强,从而实现算法对网络拓扑变化的自适应。

设节点 v_i 向节点 v_j 传送数据失败,节点 v_i 执行针对性蒸发后的路由表如表 4 所示。

表 4 节点 v_i 执行针对性蒸发后的路由表

邻居节点	信息浓度
v_j	$\mu_{ij} \times \rho_2$
v_k	μ_{ik}
...	...

ρ_2 是蒸发系数

2.3 算法特点

和 DD 算法相比,ARAWSN 算法具有以下一些特点:

① 算法简单、路由代价低:ARAWSN 算法无需专门的路径加强过程,无需通过周期性的兴趣扩散,来进行路径的维护。路径的加强和维护在数据传输过程中自动进行,不需要使用额外的数据包和数据的传输过程来进行优化路径的建立和维护。

② 自适应性好:蚁群算法的自组织、自适应和动态寻优特性使该算法能自动适应网络状态的动态

变化,算法鲁棒性强.

③ 支持多路径:每个节点有多个通向目标的路径,路径的选择取决于路径的质量;多路径提高了路由的可靠性.

3 仿真与分析

DD算法是一种经典的无线传感器网络路由协议,目前许多路由协议都是在DD的基础上提出的^[2],并和DD进行性能对比.为了研究ARAWSN算法的性能,我们采用与文献[4]中DD算法相类似的仿真条件对ARAWSN算法和DD算法进行了仿真和对比分析.

具体的仿真条件为:在160 m×160 m的正方形区域内随机布撒200个节点;一个数据源,位于(0,0);1个sink节点,位于(160,160);节点的通信距离是40 m;节点的发送能耗660 mW,接收能耗395 mW. sink节点要求数据源以每秒2帧的速度发送数据;为了简化,设网络中传输的所有数据帧(包括探测蚂蚁、兴趣消息等)大小均相同,为64 kbyte;数据传输速率为1.6 Mbit/s. ARAWSN算法中, $\alpha=2, \beta=0, \Delta\mu=0.02$,网络中的信息素每5 s蒸发一次, $\rho_1=\rho_2=0.5$;DD算法中,每60 s执行一次周期性的路由维护.

我们对ARAWSN算法和DD算法在平均能量消耗和平均传输延时两个方面进行比较.平均能量消耗定义为整个网络的能量消耗与所传输的数据量之比,它反映了算法的路由代价,也间接地反映了网络的寿命.平均传输延时定义为传输有效数据所用的总跳数与所传输的数据量之比,它反映了数据传输路径的质量.

图2是ARAWSN算法和DD算法的平均能量消耗图.它反映了在两种不同的算法下,网络的平均能量消耗随时间的变化关系.从图中我们看到,开始时,因为都要进行消息的扩散传播,网络能量消耗较大.优化路径建立后,网络的能量消耗趋于稳定,这时DD算法的能量消耗大于ARAWSN算法.这里,DD算法多余的能量消耗和能量消耗曲线的波动是由周期性的消息扩散引起的.如果按文献[4]所说采用每5 s进行一次兴趣扩散,网络的能量消耗还会大幅增加.而ARAWSN算法因为维持多路径和蚂蚁动态寻优的特性,避免了周期性的蚂蚁扩散,节省了网络的能量消耗.从图中我们也看到,DD算法很快就达到它的最小能量消耗,而ARAWSN算法所用的时间较长.这一点在平均延时的图中也有反映.这是因为ARAWSN算法在初始阶段,由蚂蚁在多条

路径中进行搜寻,非最优路径的使用增加了初始阶段的能量消耗.

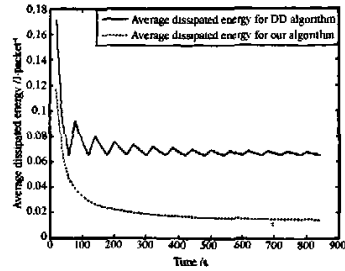


图2 ARAWSN算法和DD算法的平均能量消耗

图3是ARAWSN算法和DD算法的平均延时图.它反映了在两种不同的算法下,网络传输有效数据所用的跳数随时间的变化关系.从图中我们看到,两种算法最终传输一个数据包,均需7跳,两者的路由质量相当.但ARAWSN算法收敛到7跳的时间较长.这同样是因为ARAWSN算法在初始阶段,由蚂蚁在多条路径中进行搜寻,使用了非最优的路径增加了跳数.

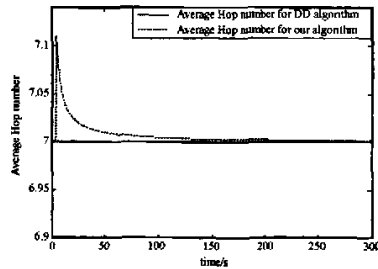


图3 ARAWSN算法和DD算法的平均延时

通过ARAWSN算法和DD算法在平均能量消耗和平均传输延时两个方面的对比,我们看到ARAWSN算法和DD算法的路由质量相当,ARAWSN算法使用动态搜索,用初始阶段较慢的收敛,换取了路由代价的降低,达到了节能的目的.

4 结论

蚁群优化方法的自组织、动态和多路径的特性使其特别适合应用于无线传感器网络的路由.本文在DD算法的基础上提出一种无线传感器网络蚁群优化路由算法(ARAWSN).该算法具有路由代价低、自适应性好、支持多路径等特点.仿真分析表明,该算法与DD算法相比,在平均传输延时方面基本相近,但在网络平均能量消耗方面有显著的改善.此外,ARAWSN算法还具有可靠性高适应性等优点.另外,该算法能够通过调整信息素浓度和局部启发值的权重,对路由质量进行综合优化,实现网络的

拥堵控制和能量均衡等, 以满足各种不同应用的需要。

参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramanian Y, Cayirci E, A Survey on Sensor Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.
- [2] Akkaya K, Younis M, A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks[J], Ad Hoc Networks. 2005, 3(3), 325-349.
- [3] 于海滨等, 智能无线传感器网络系统[M], 科学出版社, 2006, 1, 124-125.
- [4] Intanagonwiwat C, Govindan R and Estrin D, Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks[C]// The Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom00), Boston, MA, August 2000.
- [5] Bonabeau E, Dorigo M, and Theraulaz G, Inspiration for Optimization from Social Insect Behavior[J], Nature, July 2000, 406: 39-42.
- [6] Dorigo M, and Gambardella L M, Ant Colony System: a Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem[J], IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1), 53-66.
- [7] Bullnheimer B, Hartl R F and Strauss C, Applying the Ant System to the Vehicle Routing problem[C]// The 2nd Metaheuristic International Conference, Sophia-Antipolis, France (1997).
- [8] Sim K M, Sun W H, Ant Colony Optimization for Routing and Load-Balancing: Survey and New Directions[J], IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A 33(5): 560-572 (2003).
- [9] Gutjahr W J, A Generalized Convergence Result for the Graph-Based ant System Metaheuristic[R], Manuscript, University of Vienna, 2000.
- [10] Gutjahr W J, A Graph-Based Ant System and Its Convergence[J], Future Generation Computer Systems, 2000, 16(8), 873-888.
- [11] Gutjahr W J, ACO Algorithms with Guaranteed Convergence to the Optimal Solution[R], Technical Report, University of Vienna, ISDS 2001-02.
- [12] Stutzle T and Dorigo M, A Short Convergence Proof for a Class of ACO Algorithms[R], Technical Report, IRIDIA, 2000-35.
- [13] Gunes M and Spaniol O. Routing Algorithms for Mobile Multi-Hop Ad-Hoc Networks[C], Proc. International Workshop on Next Generation Network Technologies, Oct. 2002, 20-24.
- [14] Liu Z, Kwiatkowska M Z, and Constantinou C, A Swarm Intelligence Routing Algorithm for Manets[C]// Proceedings of the IASTED International Conference on Communications Internet and Information Technology, St. Thomas, USA, 2004.
- [15] Liu Z, Kwiatkowska M Z, and Constantinou C, A Biologically Inspired Congestion Control Routing Algorithm for MANETS[C]// Pervasive Computing and Communications Workshops. Third IEEE International Conference on 8-12 March 2005, 226-231.
- [16] Hussein O, Saadawi T, Ant Routing Algorithm for Mobile Ad-Hoc Networks (ARAMA) [C]// Proc. of the 2003 IEEE International Conference on Performance, Computing, and Communications Conference, April 2003, 281-290.



梁华为(1966-), 男, 中国科学院合肥智能机械研究所, 副研究员, 主要从事无线传感器网络、检测技术和自动化装置等方面的研究, hwliang@iirn.ac.cn