

无线 Ad hoc 网络中干扰感知的拓扑管理

郭 静¹, 禹继国¹, 王光辉²

(1. 曲阜师范大学 计算机科学学院, 山东 日照 276826;

2. 山东大学 数学学院, 山东 济南 250100)

摘 要: 干扰问题是无线网络中的一个普遍现象。干扰影响网络总能耗、吞吐量、网络寿命等, 减少干扰可以优化网络性能。同时利用连通控制集(CDS)作为虚拟骨干网也可以提高网络性能, 达到简化路由、节省能量的目的。文中提出了一个干扰感知的基于优先级排序的拓扑管理算法(I-TMPO), 该算法考虑了每个节点的干扰值, 同时加入速度因素为每个节点分配一个优先级。通过该算法, 每个节点根据它的邻居信息决定其是否在最小控制集(MDS)中, 然后将 MDS 中的节点连通成一个 CDS。理论上证明了算法的正确性, 仿真结果表明文中的算法具有更好的性能。

关键词: 无线 Ad hoc 网络; 分簇; 连通控制集; 虚拟骨干网; 干扰

中图分类号: TP301.6

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2012)01-0133-04

Interference-Aware Topology Management in Wireless Ad hoc Networks

GUO Jing¹, YU Ji-guo¹, WANG Guang-hui²

(1. School of Computer Science, Qufu Normal University, Rizhao 276826, China;

2. School of Mathematics, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: Interference is very common in wireless networks. It plays an important role in energy consumption, throughout, network lifetime and so on. Reducing interference can optimize the performance of networks. Meanwhile by constructing a connected dominating set as a virtual backbone network, also improve the efficiency of network to simplify routing and save energy. In this paper, propose an interference-aware topology management algorithm based on node priority (I-TMPO). Both the node interference and node speed were taken into account in this algorithm. Every node is assigned a priority, and it decides whether it is in the MDS based on two-hop neighbor information. The nodes in MDS constitute a connected dominating set through intermediate nodes. The correctness of the algorithm is proved. Simulation results show that the algorithm has better performance.

Key words: wireless Ad hoc networks; clustering; CDS; VBN; interference

1 概述

无线 ad hoc 网络^[1]可以灵活、快速地分布并应用到许多领域中, 像军事、传感器网络、紧急和临时场合、个人通信以及移动通信系统的结合等。在无线 ad hoc 网络中没有任何已存在或预定义的网络架构, 它是由一些静态或移动的节点动态地形成的一个暂时的网络。通信时, 如果通信双方足够接近, 那么通过一跳传输实现通信, 否则就要通过中间节点来传播。由于 ad hoc 网络是一个动态的网络, 网络节点可以随处移

动, 也可以随时开机和关机, 因此网络的拓扑结构随时发生变化。在许多情况下, 通信时并不是所有的网络链路都是必需的, 即需要网络拓扑简单化。因此为显著提高 ad hoc 网络的性能且延长网络寿命, 通常通过构建虚拟骨干网来去除冗余和不必要的拓扑信息。

为实现无线网络的扩展性和高效性, 必须通过构造一个虚拟骨干网(Virtual Backbone Network, VBN)。一个 VBN 可作为网络的一个脊柱在路由中起非常重要的作用, 负责路由的节点被限制在骨干网中的节点上, 极大地减少了路由开销。一般将网络模型化为一个几何图, 那么可以通过构建相对应几何图的一个连通控制集(CDS)作为原始网络的虚拟骨干网^[2]。

给定一个图 $G = (V, E)$, 其中 V 是 G 中节点的集合, E 是边的集合, 那么图 G 的一个控制集是子集 $V' \subseteq V$, 使得 V 中的节点要么属于 V' , 要么是 V' 中节点的一跳邻居。图的 CDS 是指由控制集 V' 所导出的子

收稿日期: 2011-06-19; 修回日期: 2011-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(60373012, 10871119); 山东省自然科学基金(ZR2009GM009, ZR2009AM013); 山东省科技攻关计划(2009GG10001014); 山东省高校科技计划(J10LG09)

作者简介: 郭 静(1988-), 女, 山东济宁人, 硕士, 研究方向为无线网络; 禹继国, 博士, 教授, CCF 高级会员, 研究方向为无线网络。

图是连通的。为了尽可能地减小通信开销,增加覆盖速度,简化连通管理,希望能找到一个最小的 CDS (MCDS)。但是构建 MCDS 问题是 NP-难的^[3]。

基于 CDS 构建 VBN 的方法构建的是层次网络拓扑。构建层次拓扑还可以基于分簇技术。在分簇的网络中,节点被分为簇,每个簇由一个簇头和若干个簇成员组成。本算法采用的是单层分簇,并将分簇技术与 CDS 技术结合起来构建虚拟骨干网,因此最后构建的 CDS 中的控制节点可以有效地达到负载均衡、延长网络寿命的目的。

先前的算法在设计时每次只单纯考虑节点负载均衡、节点移动性以及算法收敛性等方面中的一方面,忽略了最重要的一个因素:干扰。干扰是无线网络中存在的一个普遍现象。一般地,干扰是不同信号源的信号,经过信道衰落后,在同一接收端进行叠加,这将严重影响接收端区分有效信息的能力,导致冲突和重传的增加,致使网络的吞吐量下降,延迟增加,节点能量利用率急剧下降。文中提出了一种新的求解 CDS 的方法,它综合考虑了节点的干扰值和移动速度,将两者合二为一,采用一个度量标准来进行控制节点的选取。这个度量标准称之为优先级,它是周期性变化的。

2 相关工作

在大多数的 CDS 构造算法中都采用了一种染色机制。文献[4]中基于染色思想提出一种新的极小连支配集构造算法 CB-MCDS。

第二种常见的方法是用极大独立集 MIS 去构建 CDS:首先构建一个 MIS,然后将 MIS 中的节点连通形成一个 CDS。文献[5]中介绍了简单图极大独立集的一种求解算法。Thai 等^[6]提出了算法 S-MIS,并给出了算法的分布式版本:首先构建一个 MIS,然后借助 Steiner 树连通 MIS 中的节点。

另外,还可利用一些数据结构进行 CDS 的构建,如^[7]利用堆结构选出支配节点,将支配节点加入由之前已确定节点组成的树中,完成支配树的构造。

文献[8]中将分簇技术与连通控制集技术结合在一起,提出了构建 CDS 的一个启发式算法 TMPO,并利用概率方法证明了使用的分簇方法得到的控制节点数目比其他启发式算法得到的要小得多,最后通过仿真结果显示了 TMPO 算法具有很好的性能。

但是,上述的算法都没有直接地对干扰进行研究,而是假设网络越稀疏产生的干扰越少。文献[9]中假设一个图具有一个低节点度就意味着它具有低干扰值。但文献[10]中指出:即使对一个最大度为 2 的图,在求解最优解时也会得到一个很高的干扰值。文献[11]中的干扰模型是基于当前的网络流量。但由

于网络流量受到具体应用的限制而且一般情况下网络流量的先验信息不可得,这就需要仅基于节点分布的静态干扰模型。文献[12]中对已存在干扰模型进行了分类并分别进行了几何化。

3 网络模型

文中假设一个 ad hoc 网络由一组移动节点组成,这些节点具有相同传输范围 R 。那么就用一个无向连通图 $G = (V, E)$ 来表示该网络的拓扑,其中 V 是网络节点的集合, $E \subseteq V \times V$ 是节点间链接的集合。由于节点干扰半径是传输半径的 k 倍,为了简单,文中假设 $k = 1$,即都为 R 。在后面的仿真实验中也采用 $k = 1$ 这种情况。链接 $(u, v) \in E$ 存在意味着 $(v, u) \in E$ 存在。如果节点 u 和 v 都在彼此的包接受范围内,就称它们为彼此的一跳邻居。这里用 N_i^1 表示节点 i 的一跳邻居集合。如果两个节点间不是直接相连的,但是它们至少有一个共同的一跳邻居,那么称这两个节点为彼此的两跳邻居。

每个节点有一个唯一的标识符 i ,并且所有的传播都是全向的并具有相同的传播范围。也就是单位圆盘图。在网络中时间是同步的,且假定每个节点具有其两跳邻居的最新消息,这个消息是通过每个节点广播它的一跳邻居的任一更新消息得到的。

现今已存在多种干扰模型,文中采用的干扰模型描述如下:在模型中,用 $I(e)$ 表示对任意边 e 造成干扰的边的集合。如果边 e_1 的两个顶点是 u 和 v ,边 e_2 的两个顶点是 x 和 y ,那么定义一个节点 u 的干扰圆盘 $D(u, R)$ 就是以 u 为中心, R 为半径的圆盘。如果节点 u 或 v 被节点 x 和 y 的干扰圆盘中的一个所覆盖,就说边 e_1 干扰边 e_2 。根据上述定义,将每条边 e 的链路干扰值表示为 $|I(e)|$,节点 u 的干扰值定义为链接到该节点的所有链路的最大干扰值,记为 I_u 。最后,定义网络的干扰值为算法得到的 CDS 中最大的 $|I(e)|$ 。那么,边 $e = (u, v)$ 的干扰值 $I(e)$ 表示如下:

$$|I(e)| = |\{(x, y) \in E \mid x, y \notin \{u, v\} \text{ and } x \in D(u, R) \text{ or } x \in D(v, R)\} \cup \{(x, y) \in E \mid x, y \notin \{u, v\} \text{ and } y \in D(u, R) \text{ or } y \in D(v, R)\}|$$

节点 u 的干扰值 $I_u = \max |I(u, v)|$, 其中 $(u, v) \in D(u, R)$ 。

算法结束后网络的干扰值 $I(G) = \max |I(e)|$, $e \in E'$, E' 是 CDS 中边的集合。

4 I-TMPO 算法描述

4.1 MDS 的选取

这个阶段是基于文献[8]中的 MDS 构建方法,将

选出的簇头作为控制者,簇成员作为被控制者。而且已经证明这种构建方法得到的 MDS 大小相较于其他方法来说较小。为了网络的负载均衡,需要周期性地对簇头的重选取,周期间隔为 T 。

在网络初始状态时,即 $t = 0$ 时,需要对网络进行初始化:为节点定义一个 workfor 属性和类型属性并计算每一个节点及其一跳邻居和两跳邻居的优先级,然后再根据下面的原则来进行簇头的选举:

- 1) 一个节点在其一跳邻居中具有最高的优先级;
- 2) 一个节点在它的某一个一跳邻居的一跳邻居中具有最高的优先级。

在进行簇头选举时用到了节点的优先级,它是根据节点的两跳邻居信息来分配的。节点的两跳邻居信息包括:节点邻居的标识符 i ,当前时间 t 以及分配给该节点的意愿值 W_i 。 W_i 是节点干扰值 I_i 和节点移动速度 s_i 表示的一个函数,表示为

$$W_i = 2^{-\log(c_1 + I_i) \log(c_1 + s_i)}$$

其中 c_1 是大于等于 2 的一个正常数,这样使得节点干扰越少且移动速度越慢时该节点成为簇头的意愿值越大。如前面所说,存在一个节点优先级重计算间隔 T 以及节点在 T 内的偏移量 $i.off$,因此一个节点要进行优先级重计算的时刻 $t = kT + i.off$ 。其中, $i.off$ 计算公式如下:

$$i.off = \lfloor Hash(i) \oplus T \rfloor$$

那么节点 i 的优先级计算公式为

$$i.prio = Hash(k \oplus i) \oplus W_i \oplus i$$

一个节点一旦计算了它的优先级,那么在整个重计算周期内该节点的优先级都不变。节点优先级的改变只在一个新的重计算周期开始后执行。

若一个节点经过上述过程后被选为簇头,它就需要向它的所有两跳邻居广播它的节点属性为簇头。

4.2 CDS 的构建

经过簇选举阶段后,得到了网络的控制节点,而且保留了在初始网络中互为一跳邻居的簇头间的链接。此时网络呈现多个连通分支的状态,为达到目标,下一步就是要将这多个连通分支连通成一个。

因为在 MDS 中的簇头与距它最近的簇头之间的最大距离是 $3^{[8]}$,且原始网络是连通的,可以根据每个簇头的两跳邻居信息向 MDS 中添加一些节点 (doorway 和网关) 形成网络的 CDS。

首先,如果两个簇头相距三跳,那么就将两者最短路径上具有最高优先级的中间节点保存下来作为 doorway,并将该 doorway 的 workfor 属性更新为这两个簇中其所属的簇头。Doorway 节点的选取使得原本相距三跳的两个簇头之间的距离减少了一跳,相当于延伸了簇头的覆盖范围。

其次,如果是两个簇头或者是一个 doorway 与一个簇头相距两跳,那么就将两者多条 (如果有的话,有可能是一条) 两跳路径中最短的路径上优先级最高的中间节点作为网关节点。并且更新该网关节点的 workfor 属性为该节点所在路径的两个端点。经过这两步之后就得到了 CDS。

经过上面的选取过程,其实已经间接地给出了网络主干拓扑中的链接:原始网络中互为一跳邻居的簇头之间的链接;doorway 和网关节点与它们 workfor 属性中节点间的一跳链接。一般 doorway 与簇头和网关相连。网关与簇头或者 doorway 相连。

5 理论分析

引理 1^[8]: 经过簇头选取算法得到的簇头集合是一个控制集。

引理 2^[8]: 执行文献[8]中算法得到的 CDS 与原始图具有相同数目的连通分支。

定理 1: I-TMPO 算法得到一个干扰感知的 CDS。
证明:经过算法第一阶段,根据引理 1,得到的簇头集合是一个控制集。同时第一阶段得到的网络拓扑中保留了簇头之间的原始链接。由于 I-TMPO 算法第二阶段的过程跟文献[8]中的相同,因此由引理 2 可知,I-TMPO 算法得到一个 CDS。

由算法簇头选取部分可知,在进行簇头选取时每个节点是根据节点优先级来竞争簇头的。而节点优先级在计算时考虑了节点干扰值,干扰值较小的节点优先级越高,从而该节点成为簇头的可能越大。因此,算法第一阶段结束后得到的 MDS 与已存在算法相比干扰较少。且算法第二阶段选取的中间节点也是根据节点优先级选取的,同理具有较小的干扰值,那么最终网络的干扰值是 CDS 中节点的最小干扰值。因此,构建的 CDS 有效地减少了实际通信中存在的干扰。

定理 2: I-TMPO 算法的信息复杂度是 $O(n)$,时间复杂度是 $O(n)$,其中 n 是网络节点数目。

证明: I-TMPO 算法是局部的,每个节点仅向其邻居发送常数数目的信息,因此算法总信息复杂度是 $O(n)$ 。

算法分为两阶段。在第一阶段中,算法有两步:节点初始化和簇头选取过程。由于算法是分布式的,因此该阶段的时间复杂度是 $O(n)$ 。假设网络中可选取的最小簇头数目是 D ,那么执行算法第二阶段的节点数 $M < n - D$,即本阶段的时间复杂度为 $O(M)$ 。那么,算法 I-TMPO 的总时间复杂度是 $O(n)$ 。

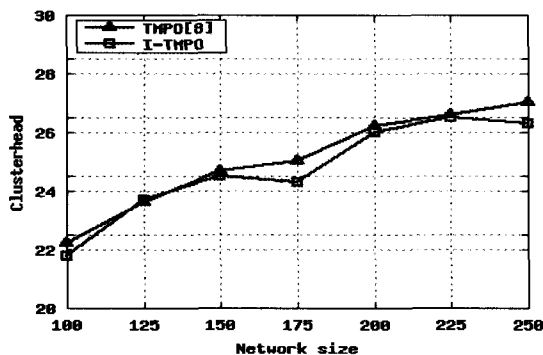
6 仿真结果

仿真中参数配置见表 1。

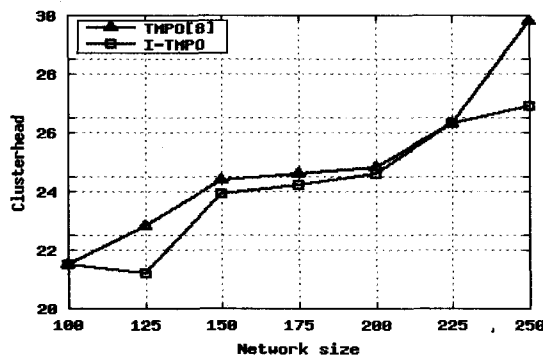
表 1 仿真参数设置

参数	取值
区域大小/m ²	650×450
节点数目	100 ~ 250
节点传输半径/m	100
节点干扰半径/m	100
低速环境/m/s	5
高速环境/m/s	50

在上述场景中执行 I-TMPO 算法和文献[8]中算法,从网络 MDS 大小和干扰值两方面进行了性能比较。这里所给出的数据是不同节点密度下多个不同拓扑的平均值。



(a) 低速环境下簇头数目

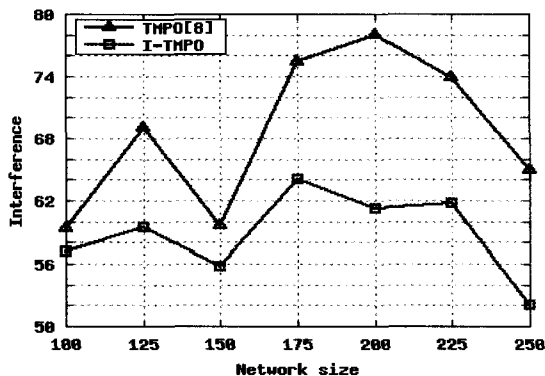


(b) 高速环境下簇头数目

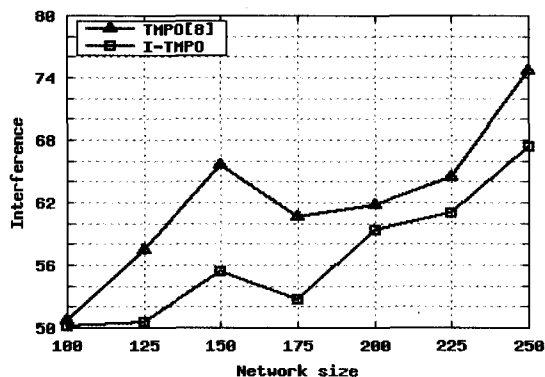
图 1 MDS 大小的比较结果

图 1(a) 和 (b) 分别是低速和高速环境下两个算法产生的 MDS 大小的比较结果。由图可以看出,无论是高速还是低速,I-TMPO 算法得到的控制集大小比原算法的都小。

图 2(a) 和 (b) 分别是低速和高速环境下两个算法分别结束后网络所产生的干扰值的比较结果。由图可以看出,排除移动速度的考虑,干扰感知算法结束后网络中的干扰要比未考虑干扰的算法得到的网络中的干扰值要少得多。而且如果加入节点移动速度这一因素的话,比较图 2 中的两个图,可以得到在低移动速度下使用 I-TMPO 算法具有更好的减少干扰的效果。这说明了干扰在无线网络中的重要地位。



(a) 低速环境下网络的干扰值



(b) 高速环境下网络的干扰值

图 2 干扰值的比较结果

7 结束语

文中针对复杂的连通网络提出了 ad hoc 网络中一种新的基于节点优先级的干扰感知的主干网构造算法 I-TMPO。算法主要分为 MDS 选取和 CDS 构建。主要是在 MDS 选取部分中考虑节点的干扰,利用节点干扰值计算其优先级。由于减少干扰可以优化网络能耗、吞吐量等性能,因此,I-TMPO 算法相较于 TMPO 算法拥有较好的性能。

参考文献:

- [1] 陈林星,曾 曦,曹 毅.移动 AdHoc 网络—自组织分组无线网络技术[M].北京:电子工业出版社,2006.
- [2] Ephremides A, Wieselthier J, Baker D J. A design concept for reliable mobile radio networks with frequency hopping signaling[J]. Proceedings of IEEE, 1987, 75(1): 56-73.
- [3] Garey M R, Johnson D S. Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness[M]. San Francisco: Freeman, 1978.
- [4] 郭晓莲,林志伟,许 力.一种新的自组网极小连通支配集生成算法[J].计算机技术与发展,2007,17(7):17-20.
- [5] 李 云,傅秀芬,何杰光,等.求极大独立集的程序实现研究[J].计算机技术与发展,2008,18(9):64-67.
- [6] Li Y S, Zhu S W, Thai M, et al. On greedy construction of con-

(下转第 151 页)

和为 4681 分钟,较优化前的 5066 分钟缩短 385 分钟,节约时间 7.60%,优化效果显著。

4 结束语

仿真结果表明:

(1)在改进信息素更新机制并采用精英策略和变异特征后的改进蚁群算法有效弥补了基本蚁群算法搜索时间长、容易早熟的不足;

(2)使用改进蚁群算法优化后的飞机定检原位工作完成时间为 6542 分钟一项工作的实施时间与下一项工作准备时间时间差绝对值之和为 4681 分钟,提高了飞机定检原位工作效率,验证了蚁群算法在原位工作流程优化问题上的适用性;

(3)文中的方法可直接推广到飞机定检离位工作及其他工作流程优化中。

参考文献:

- [1] 朱清新,杨凡,钟黔川. 计算机算法设计与分析导论[M]. 北京:人民邮电出版社,2008.
- [2] Dorigo M, Caro G D. Ant Algorithms for Discrete Optimization[J]. Artificial Life, 1999, 5(3): 137-172.
- [3] Dorigo M, Gambardella L M. Ant Colonies for the Traveling Salesman Problem[J]. BioSystems, 1997, 43: 73-81.
- [4] Colomni A. Ant System for Job-shop Scheduling[J]. JOR-BEL, 1994, 34(1): 39-53.
- [5] Dorigo M, 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.
- [6] 王娟,王建. 一种求解 TSP 问题的改进蚁群算法[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(12): 50-52.
- [7] Stutzle T, Hoos H. The MAX-MIN ant system and local search for the traveling salesman problem[C]//IEEE International Conference on Evolutionary Computation and Evolutionary Programming. Indianapolis, USA: IEEE Press, 1997: 309-314.
- [8] 吴斌,史忠植. 一种基于蚁群算法的 TSP 问题分段求解算法[J]. 计算机学报, 2001, 24(12): 1328-1333.
- [9] 张华,王秀坤,孙焱. 蚁群算法在考试安排中的应用[J]. 计算机工程与设计, 2003, 24(12): 62-64.
- [10] 杨彦明,陈卓,魏振钢. 基于粗糙集的智能群体文本挖掘聚类算法[J]. 海军航空工程学院学报, 2005, 20(2): 269-271.
- [11] 傅鹏,张得运,马兆丰,等. Ad Hoc 网络中基于模拟退火-蚁群算法的 QoS 路由发现方法[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(2): 179-182.
- [12] 黄贵玲,高西全,靳松杰,等. 基于蚁群算法的最短路径问题的研究与应用[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(13): 233-235.
- [13] 李文勇,王炜,陈学武. 公交出行路径蚂蚁算法[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(4): 102-105.
- [14] 王秀宏,赵胜敏. 利用蚂蚁算法求解图的着色问题[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2005, 26(3): 79-82.
- [15] 梅昊,田彦涛,祖丽楠. 动态环境下机器人路径规划的混合蚁群算法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2006, 24(2): 148-152.
- [16] 朱庆保. 复杂环境下的机器人路径规划蚂蚁算法[J]. 自动化学报, 2006, 32(4): 586-593.
- [17] 朱庆保. 动态复杂环境下的机器人路径规划蚂蚁预测算法[J]. 计算机学报, 2005, 28(11): 1898-1906.
- [18] 朱庆保. 全局未知环境下多机器人运动蚂蚁导航算法[J]. 软件学报, 2006, 17(9): 1890-1898.
- [19] 朱庆保,张玉兰. 基于栅格法的机器人路径规划蚁群算法[J]. 机器人, 2005, 27(2): 132-136.
- [20] 李果,刘少军. 基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划[J]. 控制工程, 2005, 12(5): 473-476.
- [21] 陈永强. 人工蚁群算法及其在组合优化中的应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2003.
- [22] Dorigo M, Maniezzo V, Colomni A. The ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part B, 1996, 26(1): 29-41.
- [23] 吴庆洪. 具有变异特征的蚁群算法[J]. 计算机研究与发展, 1999, 36(10): 1240-1245.

(上接第 136 页)

- nected dominating sets in wireless networks[J]. WCMC, 2005, 5(8): 927-932.
- [7] 赵学锋,杨海斌,张贵仓. 基于堆的最小连通支配集高效近似算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(2): 54-56.
- [8] Bao L C, Garcia-Luna-Aceves J J. Stable energy-aware topology management in ad hoc networks[J]. Ad Hoc Networks, 2010, 8(3): 313-327.
- [9] Wang Y, Li X. Localized construction of bounded degree and planar spanner for wireless ad hoc networks[J]. Mobile Networks and Applications, 2006, 11(2): 161-175.
- [10] Burkhart M, Rickenbach P V, Wattenhofer R. Does topology control reduce interference? [C]//ACM Mobihoc'04. [s. l.]: [s. n.], 2004: 9-19.
- [11] 张信明,刘琼,代仕芳,等. 移动 Ad Hoc 网络通信量相关干扰感知路由协议[J]. 软件学报, 2009, 20(10): 2721-2728.
- [12] 刘永振. 无线自组织网络干扰模型和控制的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2009.