

移动自组网电力及负荷感知的构造 最小连通支配集算法

朱艺华^{1,2}, 沈毅俊³, 吴小燕³, 汪加才⁴

(1. 浙江工业大学信息工程学院, 浙江杭州 310032; 2. 浙江省光纤通信重点研究实验室, 浙江杭州 310032;
3. 浙江工业大学经贸管理学院, 浙江杭州 310023; 4. 南京审计学院计算机系, 江苏南京 210029)

摘 要: 在移动自组网络 MANET (Mobile Ad hoc Networks) 中, 移动节点之间的通信是多跳 (Multi-hop) 的, 即需要网络中其他节点的参与得以进行, 因此, 节点之间的通信路径会因为节点的电力耗竭或节点的移动而中断. 本文提出了根据移动节点当前电力及通信负荷来选择支配节点的最小连通支配集 CDS (Connected Dominating Set) 构造算法, 这种算法可以减小由移动节点电力耗竭所致的通信路径失效的概率, 也可以减少数据包通过各移动节点的延误时间, 对设计 MANET 的高效稳定的路由策略有着重要的应用价值.

关键词: 移动自组网; 支配集; 路由策略

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 11-2200-04

A Power and Load-Aware Algorithm for Constructing Minimal Connected Dominating Sets in Mobile Ad Hoc Networks

ZHU Yi-hua^{1,2}, SHEN Yi-jun³, WU Xiao-yan³, WANG Jia-cai⁴

(1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310032, China;
2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Fiber Optic Communication Technology, Hangzhou, Zhejiang 310032, China;
3. College of Business Administration, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;
4. Department of Computer, Nanjing Audit University, Nanjing, Jiangsu 210029, China)

Abstract: Communication among mobile nodes in a MANET (mobile ad hoc network) is multi-hop, i. e., it is performed via a chain of mobile nodes. It suffers from break due to power exhaustion or movement of the mobile nodes staying in the chain. An algorithm for constructing a minimal CDS (Connected Dominating Set) is proposed to solve the problem. Being aware of power and load of mobile nodes, the proposed algorithm can reduce both the probability of communication route breakage resulting from exhaustion of mobile nodes' power and the delay time of packets to be forwarded in intermediate nodes of a communication route. Additionally, it is significant for designing robust and effective routing strategies in MANETs.

Key words: mobile ad hoc networks; dominating sets; routing strategy

1 引言

移动自组网 MANET (mobile ad hoc networks) 是由一组带有无线收发装置的移动节点组成的多跳的临时性无中心网络^[1], 可以在任何时刻、任何地点快速构建起一个移动通信网络, 并且不需要现有信息基础网络设施的支持. MANET 既可以单独成网, 也可以由各个小的 MANET 组成较大的 MANET, 同样, 也可以通过不同连接或通信方式与现有的 Internet 互连^[2].

如果一个 MANET 的某些节点是传感器, 就形成传感器网络 (Sensor Networks)^[3]. 值得指出的是: 美国加州大学研究人员

几年前就已经开始研究集传感、通信、移动等多种技术于一身的电子器件, 取名为/智尘0 (SmartDust))) 将传感器与通信系统集成到 1mm^3 空间中的电子器件, 而且已经做出样品^[4]. 在军事上, 让一些移动传感器或/智尘0 游动在敌方阵地, 组成一个 MANET, 就可以搜集敌方的军事情报, 而且不易被敌方发觉与摧毁; 在民用上, MANET 可以用于公安、消防、灾难预防与抢险救灾 (如利用移动传感器, 实时收集矿井中的瓦斯数据, 及时报告瓦斯异常位置, 以避免矿难的发生; 实时探测林区的火险苗头, 以控制森林火灾; 等等).

MANET 的网络层所涉及到的难题包括: 拓扑控制, 数据通信和服务访问. 路由是 MANET 数据通信的难题之一, 主要

收稿日期: 20051031; 修回日期: 20060516

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60473097, 60673177); 浙江省自然科学基金重点项目 (No. Z105185); 教育部留学回国人员科研启动基金; 浙江省留学回国基金

涉及路径发现和包转发^[5]. 国内外已有许多学者致力于这一研究领域, 并取得了可喜的研究成果, 例如, 用指针推进方法跟踪在漫游簇(roaming cluster)中移动台的准确位置的路由策略^[6], 多路径路由策略(multipath routing)^[7,8], 模糊路由策略^[9], 基于遗传算法的路由策略^[10], 动态资源路由、距离向量路由、连接状态路由、混合路由策略^[11], 等等.

此外, 基于连通支配集 CDS(Connected Dominating Sets) 的路由策略, 是一个分层路由方法, 由于 CDS 是 MANET 的节点集合的子集, 因此, 基于 CDS 的路由策略将 MANET 的路由简化到 CDS 生成的较小的子网中, 从而减少通信路径上的节点数目, 提高路由效率并降低路径失效的概率, 目前它已经成为国际上的研究热点^[12,13].

在 MANET 中, 以下两个问题具有挑战性: (1) 移动节点的电力耗竭导致网络拓扑结构变化无常, 使通信路径失效; (2) 通信路径上中继节点的通信负荷太大导致在该节点的数据包队列太长, 增大了数据包转发的延误时间, 加上通信路径中各移动台的不断移动, 导致在移动节点上等待的数据包在被转发出去之前通信路径就已经失效了. 为了克服上述弊端, 本文提出了根据移动节点当前电力及负荷来选择支配节点的最小连通支配集构造算法, 这种算法可以减小由移动节点电力耗竭所致的通信路径失效的概率, 均衡各节点的通信负荷, 缩短数据包通过各节点的延误时间, 对 MANET 的稳定路由策略的设计有着重要的应用价值.

2 基本术语及符号

在 MANET 中, 如果两个节点之间存在一条直接或间接的(即通过其他节点中转的)通信路径, 则称这两个节点是连通的. 如果一个 MANET 的任意两个节点连通, 则称这个 MANET 是连通的. 设各节点的通信是双向的, 且所有节点所组成的网络是连通的无向图 $G=(V, E)$, 其中 V 是节点的集合, E 是直接通信的相邻节点之间的连线组成的集合. 用 (u, v) 表示两个节点 u 与 v 之间的连线, 它也表示 u 与 v 可直接通信, 也称 u 与 v 是邻居. 此外, 我们引入以下基本术语及符号:

- (1) 设 D 是 V 的一个子集, 如果集合 $V \setminus D$ 中的任何一个节点与 D 中的某个节点可直接通信, 则称 D 是 V 的一个支配集, D 中的节点称为 V 的支配节点.
- (2) 对任意一个节点 $u \in V$, 其状态用 $s(u)$ 表示, 并作如下规定: $s(u) = 1$ 表示节点 u 是支配节点; $s(u) = 0$ 表示节点 u 是非支配节点; $s(u) = -1$ 表示节点 u 的状态待确定.
- (3) 对于任一节点 $u \in V$, 其邻居节点的集合记为 $N_u = \{v \mid v \in V, (u, v) \in E\}$.
- (4) $R_u = \{v \mid v \in N_u, s(v) = -1\}$ 表示节点 u 的邻居节点中未确定状态的节点的集合.
- (5) R_u 的节点中还有邻居待确定状态的节点集合记为 $NOT_u = \{v \mid v \in R_u, v \in V, s(v) = -1\}$.
- (6) $D = \{u \mid s(u) = 1, u \in V\}$ 表示所有支配节点组成的集合.
- (7) $|A|$ 表示集合 A 的元素的个数. 例如, N_u 的元素个数记为 $|N_u|$.

(8) 各移动节点的优先级按表 1 所示的/ 优先级规则0 设置(优先级分为 9 级, 数字小者优先级高).

表 1 节点的优先级

优先级	1	2	3	4	5	6	7	8	9
电力	高	中	低	高	中	低	高	中	低
负荷	低	低	低	中	中	中	高	高	高

各节点的电力级别规定如下: 如果移动节点的电力不小于其电力储存能力的 70%, 则称之电力为/ 高0; 如果移动节点的电力介于其电力储存能力的 30% 与 70% 之间, 则称之电力为/ 中0; 如果移动节点的电力小于其电力储存能力的 30%, 则称之电力为/ 低0.

各节点的负荷级别的定义与电力级别的定义类似.

(9) 对于 V 的任意一个子集 V_1 , 以 $sort(V_1)$ 表示按照表 1 所述的/ 优先级规则0 对 V_1 的节点按优先级从高到低的顺序排列所得的集合. $sort(V_1)$ 的第一个元素优先级最大, 第二个元素的优先级次之, 最后一个元素优先级最小.

例 1 在图 1 所示的 MANET 中, 涂黑的实心圆圈表示支配节点(如节点 2), 空心圆圈表示非支配节点(如节点 6、7、8、9), 带横线的圆圈表示待确定状态节点(如节点 1、3、4、5、10), 则 $D = \{2\}$, $N_2 = \{1, 3, 4, 5, 6, 7\}$, $R_2 = \{1, 3, 4, 5\}$, $NOT_2 = \{4, 5\}$. 由于 R_2 的四个节点中, 节点 1 的邻居只有节点 2 且已经确定状态(是支配节点), 节点 3 的两个邻居即节点 2 与节点 9 均已确定状态(分别是支配节点及非支配节点), 因此, 节点 1、3 不属于 NOT_2 . 节点 4 有两个邻居, 即节点 2 与节点 5, 但节点 5 的状态未定; 同样, 在节点 5 的四个邻居中, 节点 10(或节点 4)的状态未定, 因此, 节点 4 与节点 5 属于 NOT_2 .

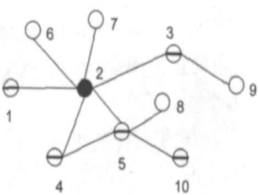


图 1 节点及其状态

3 构造电力及负荷感知的最小连通支配集算法

设置两个队列: Node.parent 与 Node.children, 其中 Node.parent 用于存放当前待确定状态的节点, Node.children 用于存放 Node.parent 中被确定为支配节点的邻居节点. 电力及负荷感知的连通支配集算法(Powe2and Load2Aware Connected Dominating Set, 简称 PLA2CDS 算法)如下:

- Step1: 对任意节点 $v \in V$, 令 $s(v) = -1$; $D = \emptyset$.
- Step2: 随机取一个节点 v , 由图 G 的连通性知 $|N_v| \geq 1$. 如果 $|N_v| \geq 2$, 则 Node.parent = {v}, 转到 Step5. 否则, $|N_v| = 1$, 不妨设 $j \in N_v$, 令 $D = \{j\}$, $s(j) = 1$, Node.parent = {j}, $s(v) = 0$, 转到 Step5.
- Step3: 如果 Node.parent X 5, 转到 Step5.
- Step4: 如果 Node.children = 5, 转到 Step9, 否则 Node.parent = Node.children, Node.children = 5.
- Step5: 取队列 Node.parent 的首节点 i 并将 i 移出队列 Node.parent.
- Step6: 如果 R_i 中任意一个节点是 D 中某个节点的邻居,

则 $s(i) = 0$, 转到 Step3.

Step7: 将 i 取为支配节点, 即令 $s(i) = 1$, $D = D + \{i\}$; $\text{Node.children} = \text{Node.children} + \text{sort}(\text{NOT}_i)$ (注: 不加入重复的节点, 也就是说, 只将 $\text{sort}(\text{NOT}_i)$ 中 Node.parent 及 Node.children 队列中都没有的节点加入到 Node.children 队列).

Step8: 对于任意的 $v \in R_i - \text{NOT}_i$, 令 $s(v) = 0$ (如果节点 v 出现在队列 Node.parent 或 Node.children 中, 则在相应的队列中去掉 v), 转到 Step3.

Step9: End

定理 1 对于任意一个 MANET, 由 PLA2CDS 算法所得的节点集合 D 是这个 MANET 的连通支配集.

证明 (D 的连通性) 在 PLA2CDS 算法中, 队列 Node.parent 存放着待确定状态的节点, 由 Step 2 可知: 起先 Node.parent 只有一个支配节点. 由于 Step7 在节点 i 已经被确定为支配节点的前提下, 总是将节点 i 的邻居节点集合 N_i 的子集 $\text{sort}(\text{NOT}_i)$ 加入到 Node.parent 队列中, 而且在处理完 Node.parent 的所有节点之后, 将 Node.children 队列的所有节点移动到 Node.parent 队列中进行下一轮处理 (Step4), 直到所有节点的状态被确定, 因此, PLA2CDS 算法所得的集合 D 是连通的.

(D 的支配性) PLA2CDS 算法将图 G 的所有节点分为两类: 支配节点及非支配节点, 只有 Step6 及 Step8 中设置非支配节点. 在 Step6 中, 节点 i 是支配集 D 中某个节点的邻居; 在 Step8 中, 满足 $v \in R_i - \text{NOT}_i$ 的节点 v 被取作非支配节点, 此时 v 是节点 i 的邻居且节点 i 是支配节点. 因此, PLA2CDS 算法中所有非支配节点均为集合 D 中某个节点的邻居.

综上所述, 集合 D 是图 $G = (V, E)$ 的连通支配集.

PLA2CDS 算法是采取广度优先 (BreadthFirst) 搜索策略. 我们也可以采取深度优先 (DepthFirst) 的搜索策略, 此处就不赘述了. 应该注意到: PLA2CDS 所得的连通支配集 D 未必是最小支配集. 以下将给出将 D 化简为最小连通支配集的方法.

精简规则: 对集合 D 的一个节点 v , 如果它满足以下两个条件, 就将节点 v 标记为非支配节点, 也就是将节点 v 从集合 D 中去掉, 从而把 D 简化为 $D - \{v\}$:

- (1) 如果 v 的邻居节点中所有非支配节点均是集合 $D - \{v\}$ 中某个节点的邻居, 或者 v 不存在非支配节点的邻居;
- (2) 集合 $D - \{v\}$ 连通.

定理 2 如果由 PLA2CDS 算法所得到的 MANET 的支配集为 D , 那么在对集合 D 的所有节点施行/精简规则0 之后, 最终得到的集合 D 是这个 MANET 的最小连通支配集.

证明 / 精简规则0 中, 只在集合 $D - \{v\}$ 是连通的情形下, 才将节点 v 从集合 D 中去掉, 因此, /精简规则0 将一个连通集简化为连通集, 因而最终集合 D 是连通的.

下面证明 D 是最小的. 假设不然, 即存在一个连通支配集 D^* , 使 $D^* < D$, 则可取一个节点 $v \in D$, 但 $v \notin D^*$. 因为 D^* 是支配集, 所以节点 v 的所有邻居均为 D^* 中某个节点的邻居. 考虑到 $D^* \not\supset D - \{v\}$, 因而节点 v 的所有邻居均为 $D - \{v\}$ 的某个节点的邻居, 这说明 /精简规则0 的第(1)个条件满

足. 由于 D^* 是连通支配集, 所以 $D - \{v\}$ 中的所有节点经过 D^* 可以连通, 即 $D - \{v\}$ 也是连通集, /精简规则0 的第(2)个条件满足. 这样, 由/精简规则0 知: D 可以简化为 $D - \{v\}$, 即 $v \notin D$, 这与 $v \in D$ 矛盾. 因此, D 是最小的连通支配集, 于是定理 2 获证.

例 2 对于图 2 所示的 MANET, 由 PLA2CDS 算法可以得到图 3 (其中涂黑的实心圆圈表示支配节点, 空心圆圈表示非支配节点), 其连通支配集 $D = \{1, 2, 5, 6, 8\}$.

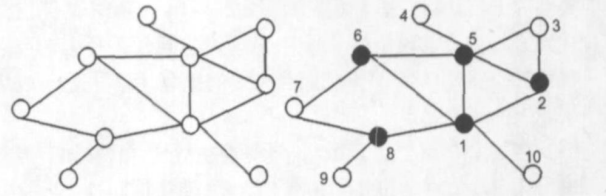


图 2 MANET

图 3 MANET 的连通支配集

例 2 是从节点 1 开始搜索的, 并且在考虑某个节点时, 序号小的表示优先级高 (例如, 在确定节点 1 为支配节点后, 将节点 2、5、6、8 加入到 Node.children 队列).

事实上, 在图 3 中, 支配集 $D = \{1, 2, 5, 6, 8\}$ 虽然连通, 但不是最小的. 对图 3 的支配集 D 施行/精简规则0, 可以发现: 节点 1 有一个非支配邻居节点 10, 它不是集合 $D - \{1\}$ 的节点, 即节点 1 不符合/精简规则0 的条件(1), 故保留下来; 节点 2 只有一个非支配邻居节点 3, 但节点 3 是集合 $D - \{2\}$ 中节点 5 的邻居, 即/精简规则0 的条件(1)满足, 同时 $D - \{2\}$ 是连通的, 即/精简规则0 的条件(2)也满足, 于是, 支配集简化为 $D - \{2\} = \{1, 5, 6, 8\}$. 依此类推, 节点 5 保留, 节点 6 从 D 中去掉, 节点 8 保留, 最终得到最小连通支配集 $D = \{1, 5, 8\}$ (如图 4).

值得指出的是, 如果读者假定节点的优先级与图 3 不同, 或者 PLA2CDS 从不同的节点开始搜索, 则所得的连通支配集可能是不同的. 图 5 所示的连通支配集是从右上角的节点开始搜索的, 其连通支配集由 6 个节点构成, 比图 3 的支配集多出一个节点. 但对图 5 的支配集实施/精简规则0, 所得的最小连通支配集不变, 仍然由图 4 所示的 3 个节点组成.

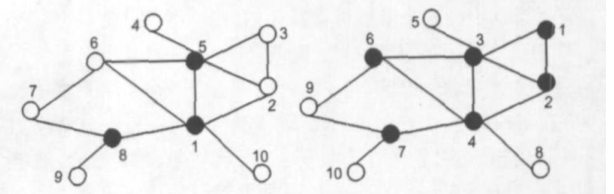


图 4 MANET 的最小连通支配集

图 5 不同搜索起点的连通支配集

4 结论

MANET 是一个崭新的研究领域, 它的网络特性))) 自组性、多跳性、节点的随机移动性、分布式控制、无线带宽等的资源受限等, 给 MANET 路由问题的研究带来了极大的挑战. 对 MANET 实施 PLA2CDS 算法及/精简规则0, 可以将它的路由问题简化到它的最小连通支配集. 此外, 本文所提出的方法可以感知移动节点的电力及负荷, 可以降低数据包的延误时间, 提

高通信路径的稳定性,从而提高路由的效率.

参考文献:

- [1] 英春, 史美林. 自组网体系结构研究[J]. 通信学报, 1999, 20(9): 47- 54.
Chun Ying, Meilin Shi. The architecture of the self-organized network[J]. Journal of China Institute of Communications, 1999, 20(9): 47- 54. (in Chinese)
- [2] 冯永新, 刘治国, 姜月秋. 一个应用于移动 Ad Hoc 网络管理的簇生成算法[J]. 软件学报, 2003, 14(1): 132- 138.
Yongxin Feng, Zhiguo Liu, Yueqiu Jiang. A clustering algorithm applied to the management of mobile ad hoc network[J]. Journal of Software, 2003, 14(1): 132- 138. (in Chinese)
- [3] Jean Carle, David Simplot-Ryl. Energy-efficient area monitoring for sensor networks[J]. IEEE Computer, 2004, 37(2): 40- 46.
- [4] Kris Pister. Smart Dust[EB/OL]. <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/>, 2006-02-22.
- [5] Jie Wu, Ivan Stojmenovic. Ad hoc networks[J]. IEEE Computer, 2004, 37(2): 29- 31.
- [6] Liang Wang, Naotong Zhang. A location management scheme based on pointers strategy in the roaming cluster for the ad hoc networks[A]. 2002 IEEE International Conference on Personal Wireless Communications[C]. New Delhi, India, 2002. 275- 279.
- [7] Fan Wu, Leping Chou, Chirchi Hsu. A reliable multipath routing protocol for ad hoc network[A]. 10th IEEE International Conference on Networks[C]. Singapore, 2002. 305- 310.
- [8] Sungju Lee, Mario Gerla. Split multipath routing with maximally disjoint paths in Ad Hoc networks[A]. 2001 IEEE International Conference on Communications[C]. Helsinki, Finland, 2001. 3201- 3205.
- [9] Gasim Alandjani, Eric E. Johnson. Fuzzy routing in Ad Hoc networks[A]. 2003 IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference[C]. Phoenix Arizona, USA, 2003. 525- 530.
- [10] Leonard Barolli, Akio Koyama, Norio Shiratori. A QoS routing method for ad hoc networks based on genetic algorithm[A].

14th Int. l Workshop on Database and Expert Systems Applications[C]. Prague, Czech Republic, 2003. 175- 179.

- [11] Nikola Milanovic, Miroslaw Malek, Anthony Davidson, Veljko. Routing and security in mobile ad hoc networks[J]. IEEE Computer, 2004, 37(2): 61- 65.
- [12] J Wu. Extended dominating set-based routing in ad hoc wireless networks with unidirectional links[J]. IEEE Transaction on Parallel and Distributed Systems, 2002, 13(9): 866- 881.
- [13] 阎新芳, 孙雨耕, 胡华东. 基于极大权的最小连通支配集启发式算法[J]. 电子学报, 2004, 32(11): 1774- 1777.
Xinfang Yan, Yugen Sun, Huadong Hu. A heuristic algorithm for minimum connected dominating set with maximal weight in ad hoc networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(11): 1774- 1777. (in Chinese)

作者简介:



朱艺华 男, 1961 年生于浙江玉环, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为移动计算、智能控制与决策优化, 在 IEEE Transactions on Wireless Communications、Journal of Computer Science & Technology、电子学报、通信学报、计算机研究与发展、模式识别与人工智能及 IEEE 国际会议论文集上发表学术论文 50 余篇.

E-mail: yhzhu@zjut.edu.cn



沈毅俊 男, 1976 年生于浙江杭州, 硕士, 讲师, 主要研究方向为电子商务.

吴小燕 女, 1981 年生于浙江义乌, 硕士, 助教, 主要研究方向为移动计算、移动商务.

汪加才 男, 1962 年生于江苏南京, 博士, 教授, 主要研究方向为数据挖掘、神经网络.