

文章编号: 1000-5862(2016)02-0149-04

基于 k 边连通最小生成子图的网络拓扑管理算法

孙延维¹, 周 谦²

(1. 湖北第二师范学院基础教育信息技术服务湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430205;

2. 江苏电力信息技术有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 可移动社区依托于移动自组网, 其特征决定了社区网络的临时性通信范围的有限性以及网络拓扑结构的高度动态性. 利用图论的理论和方法, 提出了一种基于 k 边连通最小生成子图的网络拓扑管理算法, 算法以能量消耗等因素衡量链路的代价值, 通过减少高代价的冗余链路来优化拓扑结构, 能够较好地适应可移动社区拓扑管理的需求. 实验结果表明: 该拓扑管理算法有效地减少了网络整体能量损耗, 延长了网络的生命周期.

关键词: 可移动社区; k 边连通; 最小生成子图; 拓扑管理

中图分类号: TP 393 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2016.02.08

0 引言

近年来, 随着智能手机的异军突起, 无线通信技术也日趋成熟, 通信依赖于网络服务提供商的情况正逐渐地被改变. 可移动社区^[1], 即将多部智能手机(终端)通过 Wi-Fi/MANET 在一定范围内直接或间接地相互连接, 组建一个移动自组网络(MANET), 在无运营商支持的情况下, 为用户提供随时随地且无任何费用的理想通信服务. 可移动社区依托于 MANET 网络, 其网络拓扑结构的动态性、能量的有限性、网络带宽的局限性和物理上的不安全性使得可移动社区下的组网路由协议、安全接入协议和网络拓扑管理策略等的研究和应用都极具挑战性.

目前 MANET 下的研究主要包括以下几个方面: MANET 下的路由算法、网络拓扑管理策略、MAC 协议的研究和安全性的研究^[2]. MANET 下的网络管理是指针对网络的特殊性, 以网络的延长生存期和优化网络的拓扑结构为首要目标, 从能量控制等多个角度出发, 根据网络所满足的不同的需求而进行策略调整的拓扑控制管理技术. MANET 拓扑管理研究主要有如下几个方面:

1) 分布式算法中的分簇算法. 包括最小 ID 分簇算法^[3]、最大点连通度算法^[4]、加权分簇算法^[5].

Ning Xiangyan 等^[6]提出了一种对簇首节点选取的新算法, 并且引入了一种基于 MANET 的管理域分区方法, 这种方法包括簇的形成、簇的分裂和簇的维护阶段, 但该算法在考虑节点的移动速度是绝对速度而非节点间的相对速度, 可能导致适得其反的效果^[7]. Bao Lichun^[8]等利用图论中极小支配集的理论, 构建一个由 Clusterhead、Gateway 和 Doorway 构成的骨干网络, 通过仿真验证了基于骨干网络的分簇算法在平均能耗和端到端时延方面优于最小 ID 分簇算法.

2) 分布式算法下的基于位置的管理方案. 最典型的有 ANMP^[9], SLM (Scalable Location Management)^[10], LNS-SID MM (LNS-SID Mobility Management)^[11], LFLM (Locally Forwarding Location Management)^[12]等.

3) 致力于抗毁性拓扑控制的研究. 胡兴雨^[13]提出了一种基于优化 RWP (Random Waypoint Mobility Model, 随机路点模型) 模型的无线自组织网络模型, 通过控制发射功率并且保持网络的连通性, 以达到网络的抗毁性和能耗的最优. Sun Ruozi 等^[14]提出一种基于 k -Fault-Tolerant 1-Spanner 的无线自组织网络控制算法, 并证明了在 k 台终端机出现问题的情况下, 整个网络拓扑能保持连通(即能够容忍 k 个节点错误), 并且保留了最小能耗的路径. 王亚东^[15]提出的 ELSS _{k} 算法能够有效地减少网络冗余

收稿日期: 2015-10-18

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61402155)资助项目.

作者简介: 孙延维(1979-), 男, 湖北潜江人, 讲师, 主要从事无线网络与通信和数据挖掘的研究.

产生的能量消耗,但是该算法是建立在网络中节点稳态分布在网络场景的基础上的,在实际的可移动社区系统中,节点的位置会灵活变化,这导致其算法有一定的局限性。

现有的拓扑管理算法从整体上来讲,存在诸多问题:(i)对于分布式算法中的分簇算法,虽然能对节点进行适当的分簇处理,并有效减少了端到端时延,但是在能耗性能方面表现不尽如人意,且对于网络整体性能和生存期方面的提升效果不显著;(ii)对于分布式算法下的基于位置的管理方案属于高精度信息的网络管理算法,这意味着信息的获取需要借助智能终端的定位功能。在可移动社区下,网络拓扑虽然动态性强,覆盖范围相对比较有限,在这种情况下为了获取并不重要地理位置信息而增加能量消耗,是得不偿失的;(iii)对于致力于避免网络分割的管理算法,如 k -Fault-Tolerant 1-Spanner 算法,主要是考虑节点失效的网络,该算法在允许 k 个节点失效的前提下,能有效保持网络的连通性,避免网络分割。但是可移动社区中,点失效可能比较频繁,且链路的有效性才是网络管理重点考量的对象,因此从这个方面来说, k -Fault-Tolerant 1-Spanner 并不能有效满足可移动社区网络拓扑管理的需求。类似地, $ELSS_k$ 根据链路能量消耗,最小端 ID 和最大端 ID 依次判断链路的权值,并以该权值为基础删除冗余链路,但是该算法主要是面向节点活动性不强的网络,在拓扑高度动态性变化的可移动社区下,实用价值也比较有限。

针对上述问题,本文提出了一种基于 k 边连通最小生成子图的网络拓扑管理算法,该算法以能量消耗等因素衡量链路的代价值,通过减少高代价的冗余链路来优化拓扑结构,能够较好地适应可移动社区拓扑管理的需求。

1 相关定义

1) 边割和边连通度. 将网络 G 抽象成一个连通图 $E(G)$ 为 G 的边集,若 $\exists S \subseteq E(G)$ 使得 $G-S$ 不连通或者成为只有一个孤立节点的图,则 S 称为 G 的一个边割. 边连通度定义为

$$\lambda(G) = \min\{|S|: S \text{ 是 } G \text{ 的边割}\},$$

并当 $\lambda(G) \geq k$ ($k \geq 2$) 时称 G 是 k 边连通的^[16]。

2) 链路和内部点. 设 u, v 为网络中的不同 2 个节点,一条从 u 到 v 的链为由 u 出发,顶点和边交替的序列 $ue_1v_1e_2 \cdots u_{n-1}e_nv$, u, v 称为链路的端点,其

余的顶点称为内部点. 其中若没出现重复的内部点,则称其为路。

3) 极限邻接点集. 网络中的节点 u , 其极限邻接点集 ENS (Extreme Neighbor Set) 为其在最大发射功率的情况下,信号覆盖范围内的节点集合,定义为

$$ENS(u) = \{v \in V(G) \mid (u, v) \in E(G)\},$$

其中 $E(G)$, $V(G)$ 分别对应于网络的边集和节点集。

4) 极限邻接子图. 对于网络中的一个节点 u , 其极限邻接子图为

$$G_u = (V_u, E_u),$$

$$V_u = \{u\} \cup ENS(u),$$

$$E_u = \{(u, v) \in E(G) \mid u, v \in V_u\}, \quad (1)$$

极限邻接子图为算法主要优化的对象,通过一定的约束条件删除冗余链路而产生优化的网络拓扑结构。

5) 链路消耗. 对于链路中的一条边 e_i , 与其关联的顶点为 v_{i-1} 以及 v_i , 则这条边的消耗为

$$c_{ost}(v_{i-1}, v_i) = A(v_{i-1}, v_i) (P(v_{i-1}, v_i) t_d)^x, \quad (2)$$

其中 $A(v_{i-1}, v_i)$ 为能量消耗系数,和节点当前能耗值有关; $P(v_{i-1}, v_i)$ 代表节点间信息交换的最小功率; x 为权重系数. 一般地 $A(v_{i-1}, v_i)$ 和 $A(v_i, v_{i-1})$ 不同,所以 $c_{ost}(v_{i-1}, v_i)$ 与 $c_{ost}(v_i, v_{i-1})$ 不同. t_d 代表发送分组所需的时延。

根据上面的定义,一条路 $p(u, v): ue_1v_1e_2 \cdots u_{n-1}e_nv$ 的消耗的定义为

$$c_{ost}(p) = \sum_{i=1}^N c_{ost}(v_{i-1}, v_i), \quad (3)$$

其中 $v_0 = u, v_N = v, N \geq 1$, 即链路代价为链路中每条边的消耗和,它反映了该链路所需能耗的多少。

6) 链路权值. 在考虑每条链路的消耗后,针对可能出现链路代价近似的情况,为了不影响算法在删除冗余链路时的决策,引入链路权值的概念. 链路权值实质上是链路代价,链路长度和终端点设定一个决定优先级,算法根据优先级高低来判断链路权值. 将链路的消耗优先级设置为最高,其次是链路内部点个数 N , 最后根据链路端节点 i_d 在 2 条链路前 2 个因素相同的情况下,选择链路两端最小 i_d 较小的一条。

7) 可访问邻接点集 ANS . 可访问邻接点集 (Accessible Neighbor Set) 是指在经过算法优化拓扑结构后,节点 u 调整了发射功率,在当前无线信号发射功率下在信号覆盖范围内的节点集合。

8) 关联邻接点集 INS . 在节点 u 可访问邻接点集的基础上,利用一定的算法删除极限邻接子图中出现的冗余边使得网络拓扑保持 k 边连通,在经过

优化后,网络中 u 的邻居点集合称为关联邻接点集 (Incident Neighbor Set). 根据定义可知, INS 包含于 ANS , 而 ANS 是 ENS 的子集.

2 算法描述

2.1 发现极限邻接点集

在网络的初始化阶段,每个节点要通过定时的广播分组以标志自身的存在同时将彼此的信息进行同步. 在这里的信息是指节点的 i_d 以及终端能耗情况. 对于节点 u ,以最大发射功率发送 Hello 分组,分组中包含节点 i_d 和能耗情况,其极限邻接点集中的节点就会收到携带了信息的分组,以同样的方式向它反馈. 通过一定长时间的交互后, u 就能保存所有 ENS 内的节点信息了.

2.2 计算链路权值

根据 (2) ~ (3) 式并采用上文提到的链路权重值比较原则,可以计算任意一条链路的权值. 一条链路权值高于另一条,就意味着代价值比后者高,或者在代价值相等的情况下,链路长度大于后者,抑或在代价和链路长度相同的情况下,前者端点 i_d 的最小值大于后者.

2.3 优化极限邻接子图

节点根据极限邻接子图 G_u ,采用下面的算法对其进行优化产生 G_u'

$$G_u' = (V_u', E_u'), V_u' = \{u\} \cup INS(u), \\ E_u' = \{(u, p) \in E(G) \mid u, p \in V_u'\}.$$

在优化极限邻接子图结构时,以类似于求最小生成树 (MCST) 的破圈法^[17]的思路进行拓扑优化,具体流程如下: (i) 以 (1) 式所描述的极限邻接子图为基础; (ii) 计算极限邻接子图的边集里边权值,对所有边按照权值降序排列,得到降序边集合 E_u ; (iii) 对 G_u 做如下调整: 判断图是否为 $k+1$ 边连通,若连通,则删除 E_u 中权值最大的边,否则直接退出. 若该边的一个端点是 u ,则在 u 的 ENS 中删除该边的另一个端点.

在经历上述 3 个步骤之后,得到的邻接点集即为 V_u' ,原边集删除若干条边后产生的边集即为 E_u' .

对上述过程的伪代码描述如下:

procedure u 的极限邻接子图的优化

$V_u = \{u\} \cup ENS(u)$ $E_u = \{(u, p) \in E(G)\}$
对 E_u 中的边以权值递减排序

while G_u 为 $k+1$ 边连通

begin

e : = E_u 中的第 1 个元素

v_i, v_j : = 与 e 关联的端点

从 E_u 中删除 e

if $v_i = u \parallel v_j = u$

if $v_i = u$ 在 V_u 中删除 v_j else 删除 v_i

end while

end 所得的 G_u 的导出子图即为 G_u' .

在经历了上述步骤的调整之后, u 节点调整发射功率,使之能够达到 INS 中最远的节点. 节点 u 以这个固定的发射功率进行通信直至下一轮极限邻接子图的优化算法结束.

3 拓扑管理算法仿真对比分析

3.1 仿真参数设定

利用 NS2 对算法进行仿真,设置网络的节点数为 200 个,并在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的方形区域内采用随机路点模型移动,并采用无线信道通信. 节点发送分组长度设置为 1 024 字节,节点发送分组的频率为 4 packet/s,媒体接入控制层协议采用 IEEE802.11 标准,发送速率为 10^6 bit/s .

3.2 仿真结果及分析

在 $k=2$,即保持网络边连通度为 2 的前提下,对 $ELSS_k$ 算法和基于 k 边连通最小生成子图的网络拓扑管理算法 ($NTMSS_k$),考察当网络的生存期和网络出现节点电量耗尽时平均剩余能量随网络节点数量的关系,进行仿真对比,仿真结果如图 1 所示.

由图 1 的仿真对比图可知,在仿真设定条件下,随着节点数目的逐渐增大,本文算法相比于 $ELSS_k$ 算法,在网络出现第 1 个节点电量耗尽的时间上更长,这是由于在拓扑优化阶段,选择删除了最小 i_d 较大的一条链路,而节点 i_d 较大意味着接入网络的较晚,节点能掌握的路由信息可能不如已加入节点.

由图 2 可知,当网络出现节点电量耗尽时,统计此时的网络内所有节点的占原有电量的比值的平均值,即平均剩余能量. 在节点数量约在 40 至 160 这个区间时,本文算法较 $ELSS_k$ 有比较明显的优势.

从上述 2 个对比仿真分析可知,在仿真设定条件下,基于 k 边连通最小生成子图的网络拓扑管理算法相比于 $ELSS_k$ 能够有效地降低网络整体能耗,并且延长网络的生存期.

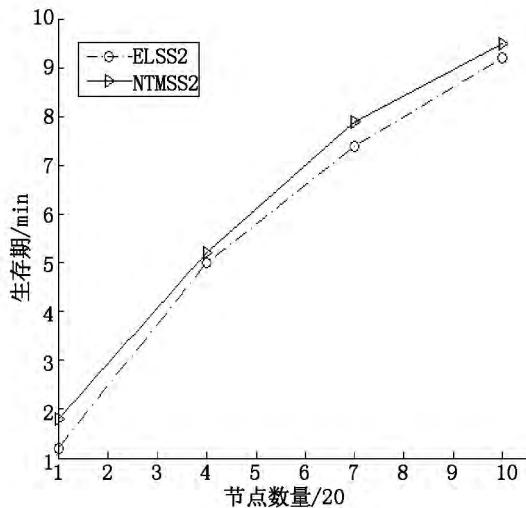


图1 网络生存期对比仿真图

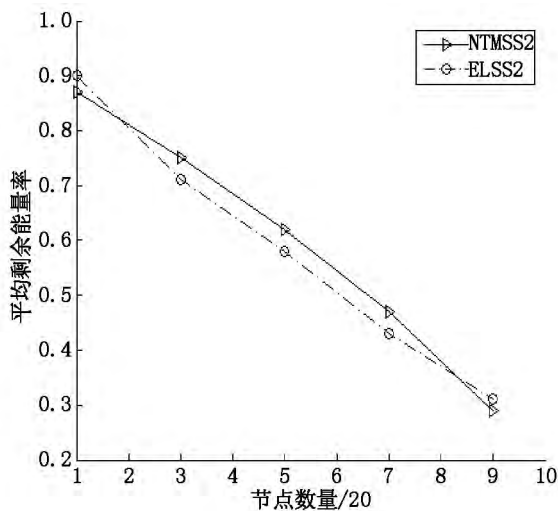


图2 平均剩余能量对比仿真图

4 结论

本文以可移动社区依托的移动自组网络为背景,针对可移动社区的功能需求,利用图论的理论和方法,设计了基于 k 边连通最小生成子图的网络拓扑管理算法,对节点的极限邻接子图进行优化,并根据仿真结果进行分析对比.实验结果表明:基于 k 边连通最小生成子图的网络拓扑管理算法优化了网络结构,减少了网络整体能量损耗,进而延长了网络的生命周期,能够较好地适应可移动社区拓扑管理的需求.本文研究成果对移动自组网路由算法设计具有一定的参考意义.

5 参考文献

[1] 李琦琦. 智能手机可移动社区组网技术研究及其应

- [D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2013: 23-42.
- [2] 方旭明. 移动 Ad Hoc 网络研究与发展现状 [J]. 数据通信, 2003(4): 15-18.
- [3] Gerla, Mario, Jack Tzu-Chieh Tsai. Multicenter, mobile, multimedia radio network [J]. *Wireless Networks*, 2010, 1(3): 255-265.
- [4] Ephremides, Anthony, Jeffrey E, et al. A design concept for reliable mobile radio networks with frequency hopping signaling [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1987, 75(1): 56-73.
- [5] An B, Papavassiliou S. A mobility-based clustering approach to support mobility management and multicast routing in mobile ad-hoc wireless networks [J]. *International Journal of Network Management* 2001, 11(6): 387-395.
- [6] Ning Xiangyan, Zhang Shunyi, Liang Wei. A novel way of MANET management domain partition [J]. *Education Technology and Computer Science* 2010(3): 221-232.
- [7] 郭胜召. 一种基于权值的 AdHoc 网络分簇算法 [J]. *信息技术与信息化* 2012(2): 41-43.
- [8] Bao Lichun, Jose Juaquin Garcia-Luna-Aceves. Topology management in ad hoc networks [EB/OL]. [2015-10-02]. <http://citeseer.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=706DE01B22FBC80EF405FD09AB4DE7CC?doi=10.1.1.12.8421&rep=rep1&type=pdf>.
- [9] Chen Wenli, Jain N, Singh S. ANMP: Ad hoc network management protocol [J]. *Selected Areas in Communications*, 1999, 17(8): 1506-1531.
- [10] Cheng C T, Lemberg H L, Philip S J, et al. SLALoM: a scalable location management scheme for large mobile ad-hoc networks [J]. *Wireless Communications and Networking Conference* 2002(2): 1123-1131.
- [11] McAuley, Anthony, Raquel Morera. LNS-SID mobility management in dynamic ad hoc networks [J]. *Vehicular Technology Conference* 2003(3): 1994-1998.
- [12] Wang Liang, Zhang Naitong. Locally forwarding location management in ad-hoc networks [J]. *Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions*, 2002(1): 768-779.
- [13] 胡兴雨. 移动 Ad hoc 网络拓扑结构抗毁性研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009: 34-47.
- [14] Sun Ruozi, Wang Yue, Yuan Jian, et al. Topology control algorithm using fault-tolerant 1-spanner for wireless ad hoc networks [J]. *Tsinghua Science and Technology* 2012, 17(2): 186-193.
- [15] 王亚东. MANET 网络拓扑控制技术 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012: 45-67.
- [16] 殷剑宏, 吴开亚. 图论及其算法 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003: 20-22.
- [17] 管梅谷. 求最小树的破圈法 [J]. *数学的实践与认识*, 1975, 5(4): 38-41.

(下转第 193 页)

- 1949 40: 132.
- [12] 张淑丽, 郑连斌, 陆舜华, 等. 布依族舌运动类型的遗传学研究 [J]. 沈阳师范大学学报: 自然科学版, 2004, 22 (3): 226-230.
- [13] 于会新, 郑连斌, 陆舜华, 等. 佤族舌运动类型的遗传学研究 [J]. 天津师范大学学报: 自然科学版, 2007, 27 (1): 43-46.
- [14] Hsu T C. Tongue unfolding [J]. Journal of Heredity, 1948, 39: 187-188.
- [15] 张兴华, 郑连斌, 陆舜华, 等. 独龙族舌运动类型的人类学研究 [J]. 南京师范大学学报: 自然科学版, 2008, 32 (1): 124-129.
- [16] Gahres E E. Tongue rolling and tongue folding [J]. Journal of Heredity, 1952, 43: 221-225.
- [17] 郑连斌, 陆舜华, 李晓卉, 等. 内蒙古 3 个民族舌运动类型的遗传学研究 [J]. 遗传, 1997, 19(3): 23-25.
- [18] Gahres E E. Tongue rolling and tongue folding [J]. Journal of Heredity, 1952, 43: 221-225.
- [19] Whitney D D. Clover-leaf tongues [J]. Journal of Heredity, 1950, 41(7): 176.
- [20] 孙岳枫, 郑连斌, 陆舜华. 内蒙古 18 个人群 7 项不对称行为特征的聚类分析与主成分分析 [J]. 天津师范大学学报: 自然科学版, 2006, 26(1): 36-38.

The Anthropological Studies of Five Tongue Moving Types of Ordos Mongols

LIU Lu, LI Yonglan*

(College of Life Sciences and Technology, Inner Mongolia Normal University, Hohhot, Neimenggu 010022, China)

Abstract: In September 2014 researched the index of population genetics of 5 tongue moving types (tongue rolling, tongue folding, tongue twisting, pointed tongue and clover-leaf tongue) of 224 Mongolian students (male 92, female 132) in Etoke Banner of Inner Mongolia. Results showed that: (1) The frequencies of tongue rolling, tongue folding, tongue twisting, pointed tongue and clover-leaf tongue were 53.57%, 6.70%, 28.57%, 56.25% and 2.68%, respectively. Significant sexual difference were found in the frequency of tongue rolling and pointed tongue ($P < 0.01$ or $0.01 < P < 0.05$). No significant sexual difference was found in the frequency of tongue folding, tongue twisting and clover-leaf tongue ($P > 0.05$). (2) Compared with other nationalities, the Ordos Mongolian had lower frequencies of rolling tongue, pointed tongue, clover-leaf tongue, and the frequencies of tongue folding, tongue twisting were in the medium level. (3) The results of cluster analysis showed that Ordos Mongolian was close to that of Alxa Mongolian and Urad Mongolian.

Key words: tongue rolling; tongue folding; Mongolian; Ordos

(责任编辑: 刘显亮)

(上接第 152 页)

The Algorithm of Network Topology Management Using k -Edge Connected Minimal Spanning Sub-Graph

SUN Yanwei¹, ZHOU Qian²

(1. Collaborative Innovation Center in Hubei Province on Fundamental Education and IT Services, Hubei University of Education, Wuhan, Hubei 430205, China; 2. Jiangsu Electric Power Information Technology Co., Ltd, Nanjing, Jiangsu 210000, China)

Abstract: The mobile community is based on the mobile ad hoc network, which determines the temporary, the limited communication range and the high dynamic of the network topology. Using the theory and method of graph theory, a new algorithm is proposed, which uses the k -edge connected minimum spanning sub-graph. The algorithm uses energy consumption and other factors to measure the value of the link, and can adapt to the requirements of the mobile community topology management by reducing the high cost of redundant links. Experimental results show that the topology management algorithm can effectively reduce the energy loss of the network, and prolong the life cycle of the network.

Key words: mobile community; k -edge connected; minimum spanning sub-graph; topology management

(责任编辑: 冉小晓)