

移动 Ad Hoc 网络动力学同步能力的研究*

戴存礼[†] 赵艳艳 吴 威 曾伦武

(南京农业大学工学院, 南京 210031)

(2009 年 10 月 28 日收到; 2010 年 3 月 1 日收到修改稿)

研究了移动 Ad Hoc 网络的动力学同步行为. 用特征值比 R 来衡量网络的同步能力, 特征值比 R 越小, 同步能力越强. 结果表明最初该网络的特征值比 R 随聚类系数 C 的增加而增加, 继续增大聚类系数, 特征值比反而减小. 特征值比随聚类系数并不是普遍的正比关系也不是反比关系, 而是先增大后减小, 明显存在一个极值.

关键词: 移动 Ad Hoc 网络, 同步, 极值

PACC: 0590, 0200

1. 引 言

移动 Ad Hoc 网络是由一系列移动节点组成, 是一种自组织的网络. 由于自组织网络可以广泛应用于战场通信指挥与控制、警察与医疗部门抢险救灾、传感器网络、疾病预防与控制等众多领域, 有非常重要的意义. 上世纪 90 年代中期, 随着一些技术的公开, 移动 Ad Hoc 网络开始成为移动通信领域一个公开的研究热点. 目前移动 Ad Hoc 网络尚未达到完全实用阶段, 大部分工作仍处在仿真和实验阶段, 仿真规模在数百至数千节点, 实验规模在几十个节点左右. 因为这一无线领域缺乏一种系统而有效的指导思想, 从而协调网络中的各节点同时达到一种最佳通讯状态, 而各节点同时达到最佳通讯状态就是达到同步状态. 所以对移动 Ad Hoc 网络动力学同步的研究对设计网络结构和通讯模式具重要的指导意义. 目前关于复杂网络同步的研究主要集中在网络结构与同步能力间的关系. 例如一些研究表明复杂网络的同步和度分布的同质性^[1,2]、聚类系数^[3-5]、度的相关性^[6]、平均度、度分布^[7]等有关. 近期关于复杂网络同步研究的热点是聚类系数与同步能力间的关系. 许多研究人员在不改变网络度分布的情况下研究了聚类系数与同步能力间的关系. 戴存礼等^[8]就在这种情况下研究了推广的失活网络的聚类系数与同步能力间的关系, 发现大的

聚类系数会阻碍网络的同步. 关于复杂网络^[9-16]的研究已应用到众多领域. 本文研究了移动 Ad Hoc 网络的同步行为, 发现这种网络的同步能力与一般研究结果完全不同, 大部分研究结果表明复杂网络的同步能力与聚类系数成反比例关系, 聚类系数越大同步能力越弱, 而移动 Ad Hoc 网络的同步能力却先随聚类系数的增加而减小, 当超过极值点时随聚类系数的增加而增加.

2. 模 型

移动 Ad Hoc 网络是由一系列移动节点组成, 是一种自组织的网络, 它不依赖于任何已有的网络基础设施, 网络中的节点动态且任意分布, 节点之间通过无线方式互连.

2.1. 移动 Ad Hoc 网络的特征

由于移动 Ad Hoc 网络是一种移动、多跳、自律式系统, 因此它具有以下一些主要特征.

动态拓扑 即网络中的节点可以任意移动, 因此, 网络的拓扑结构会变化.

动力受限 由于网络节点的移动特征, 其中大多数节点只能以电池作为动力, 因而, 在进行系统设计时节能就成为一个非常重要的指标.

物理上安全有限 移动网络比固定网络(有线和无线)更易受到安全威胁. 需要克服无线链路的

* 南京农业大学青年科技创新基金(批准号: KJ08031), 江苏省农机基金(批准号: gxs08002)资助的课题.

[†] E-mail: daicunli@163.com

安全弱点及移动拓扑所带来的新的安全隐患.

2.2. 模型的构建

为了研究方便,我们按照以下步骤构建了简化的移动 Ad Hoc 网络,如图 1 所示.

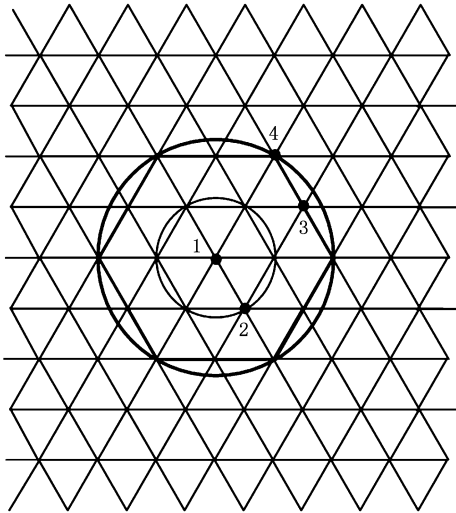


图 1 移动 Ad Hoc 网络示意图^[17]

1) 构建一个二维的三角形网格,网络规模 $N = L^2$ ($L = 30, 40, 50$), 该网格满足周期性边界条件.

2) 将 n_0 个节点放入任意选择的三角形网格中, 这样每一个位置被占据的概率 σ 为 $\sigma = \frac{n_0}{N}$, 当网络规模一定时可以根据放入节点的不同来改变被占有率 σ . 该网络中任意位置的节点在目标位置没有被占据的情况下都可以沿着边朝六个方向自由自动. 如图 1 中的第 1 个节点可以移动到以该节点为中心的六边形其余五个顶点上(有一个顶点已被 2 节点占据). 因为 n_0 个节点本身是随机放入网格中的, 所以节点的移动仅改变 n_0 个节点的相对位置, 对被占有率 σ 、连接半径 r 、甚至聚类系数 C 都没有明显的影响, 所以本文的所有数据点都是在节点不移动的情况下得到的, 但节点移动时结果仍相同. 即该模型中对移动节点的数目及移动次数均没有限制, 这样模型更加接近真实网络.

3) 选择适当的连接半径 $r = z r_0$ (其中 z 是任意正整数, r_0 是网络中最小三角形的边长). 选定连接半径后就意味着任何一个节点与其距离小于等于 r 的所有节点都属于近邻关系, 而不是物理上看到的近邻关系. 如图 1 所示, 当连接半径 $r = 1 r_0$ 时, 第 1 个节点只与第 2 个节点属于近邻关系, 而当 $r = 2 r_0$

时, 第 1 个节点与第 2, 3, 4 节点都属于近邻关系, 而且 2 节点与 3, 4 节点平等, 并没有像看到的那样具有物理空间上近距离的优越性. 即最终的网络是直接连接半径内的节点连接起来所构成的网络.

3. 数值模拟

3.1. 网络的同步

研究复杂网络的动力学同步一般是采取研究节点与节点间耦合矩阵特征值比的办法. 如果在网络的每个节点上加上一个动力学系统, 这个动力学系统既可以是极限环也可以是混沌的, 而让有边相连的两个节点的 dynamics 系统之间存在相互的耦合作用, 就形成了一个动力学网络. 严格地说, 设网络有 N 个节点, 第 i 个节点在 n 时刻的 m 维状态变量是 $x_i(n)$, 单个节点在不考虑耦合作用时满足的状态方程是 $x_i(n+1) = F(x_i(n))$. 设 H 是每个节点状态变量的函数, 用于对其它节点进行耦合. 这样, 存在耦合作用的情况下, 第 i 个节点所满足的状态方程表示为

$$x_i(n+1) = F(x_i(n)) + \eta \sum_{j=1}^N G_{ij} H(x_j).$$

对于连续系统, 第 i 个节点所满足的状态方程为

$$\dot{x}_i = F(x_i) + \eta \sum_{j=1}^N G_{ij} H(x_j).$$

这里 η 是耦合强度, G_{ij} 表示耦合矩阵 G 的矩阵元,

$$G_{ij} = \begin{cases} k_i & (i = j), \\ -1 & (j \in \Lambda_i), \\ 0 & (\text{其他}). \end{cases}$$

式中 k_i 是节点 i 的度, Λ_i 是与节点 i 相邻节点的集合. 耦合矩阵 G 包含了网络结构的全部信息. 在耦合作用下, 经过一段时间的演化, 使得 $x_1 = x_2 = \dots = x_N = s$, 网络就进入了同步状态. 由于移动 Ad Hoc 网络的耦合矩阵是实对称拉普拉斯矩阵, 它有且仅有一个重数为 1 的零特征根 θ_0 , 而其余的特征值均为非负实数, 因此特征值按大小可排列为 $\theta_0 \leq \theta_1 \leq \dots \leq \theta_{N-1}$. 最大特征值 θ_{N-1} 与最小非零特征值 θ_1 的比值经常用来衡量网络的同步能力, 如果耦合矩阵的特征值比 $R = \theta_{N-1}/\theta_1$ 满足

$$R < \alpha_2/\alpha_1, \quad (1)$$

网络就达到同步状态. (1) 式右边 α_2/α_1 是由单个节

点的状态方程和变量的耦合方式决定的^[18], 左边是特征值比 R , R 仅依赖于拉普拉斯矩阵. 由(1)式可知, 在 α_2/α_1 一定的情况下, 特征值比可以描述网络的同步能力, 其值越小, (1)式越容易成立, 它能使更多的动力学系统同步, 我们说这样的网络同步能力强. 在本文中, 我们不讨论具体的动力学系统, 而是重点研究网络结构与同步能力间的关系, 所以只研究 R 的大小, R 越小网络的同步能力越强.

3.2. 数值模拟结果

图2—6 是研究移动 Ad Hoc 网络同步能力的数值模拟结果, 图中所有数据点都是 100 次独立运行结果的平均值.

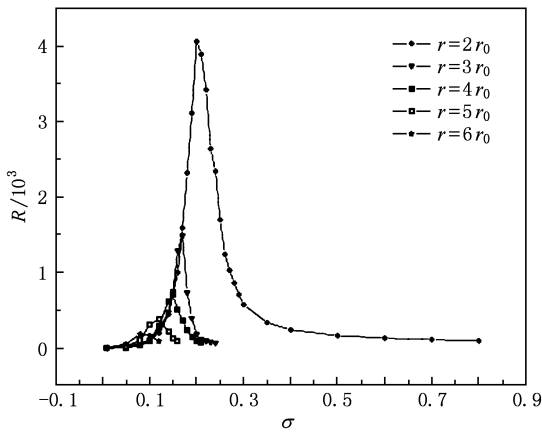


图2 不同连接半径下特征值比 R 与被占有率 σ 间的关系 $N = 1600$

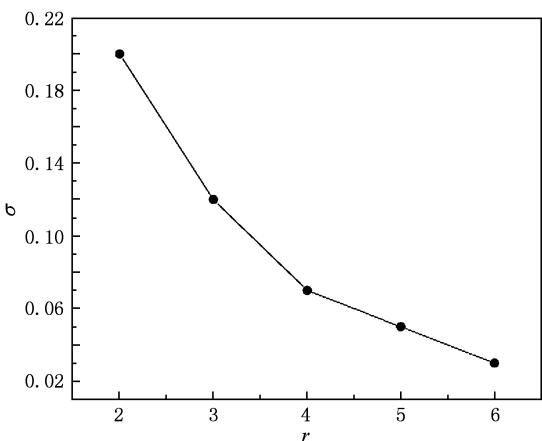


图3 被占有率 σ 的极值点与连接半径 r 间的关系 $N = 1600$

图2 是在网络规模 $N = 1600$ 时, 不同连接半径 r 下, 特征值比 R 与被占有率 σ 之间的关系图. 从图中可以看出无论 r 取何值, R 与 σ 之间都存在一个

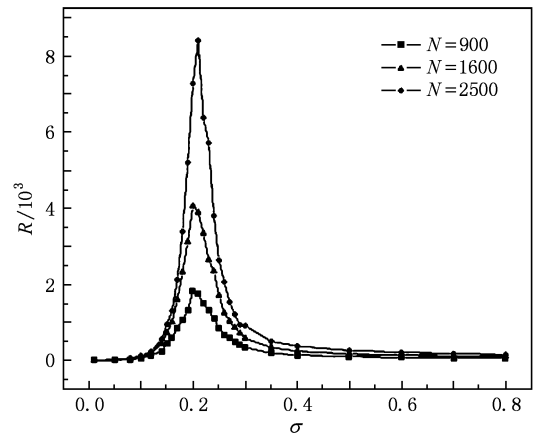


图4 不同网络规模时特征值比 R 与被占有率 σ 间的关系 $r = 2r_0$

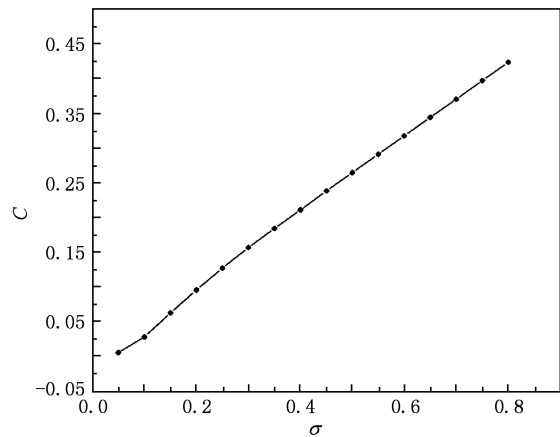


图5 聚类系数 C 与被占有率 σ 间的关系 $r = 2r_0, N = 1600$

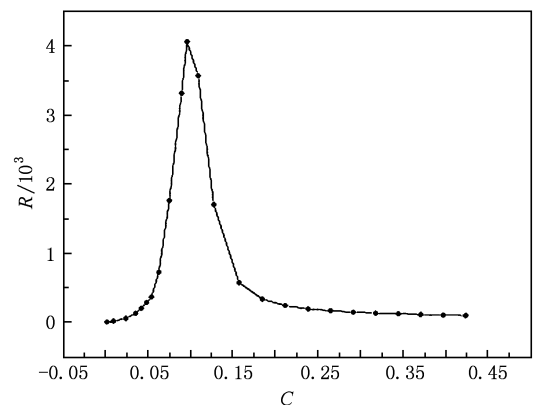


图6 特征值比 R 与聚类系数 C 之间的关系 $r = 2r_0, N = 1600$

极值点, 当 σ 由零慢慢增加时, R 随 σ 的增加而增加, 但当 σ 大于极值点时, R 随 σ 的增加而减小, 不同的仅仅是 r 值越大, R 的变化越缓慢值越小, σ 的

极值点也越小. 图 3 是被占有率 σ 的极值点随连接半径变化的曲线. 该图表明连接半径越大被占有率 σ 的极值点越小. 图 4 是当 $r = 2r_0$ 恒定, 不同网络规模时特征值比 R 与被占有率 σ 之间的关系图. 从图中可以看出网络规模 N 越大, 特征值在极值点附近变化越迅速, 其值也相应越大, 当 σ 偏离极值点较大时, 不同网络规模几乎相差不大. 从图中还可以看出, 网络规模对 σ 的极值点没有太大影响, 不管 N 取 900, 1600 还是 2500, 只要 $r = 2r_0$ 恒定, σ 的极值点基本都在 0.2 附近.

图 5 是网络规模 $N = 1600, r = 2r_0$ 时, 聚类系数 C 与被占有率 σ 之间的关系图. 该图表明 C 与 σ 正相关, 随着 σ 的增加 C 也会相应的增加. 因为随着被占有率的增加, 网络中加入的节点数目会增多, 对于某个节点, 它的聚类系数被定义为它所有相邻节点之间连边数目占可能最大连边数目的比例, 所以聚类系数必然随着节点数目的增大而增大. 图 6 是网络规模 $N = 1600, r = 2r_0$ 时, 特征值比 R 与聚类系数 C 之间的关系图. 该图表明虽然 C 与 σ 之间成正比例关系, 但是 R 与 C 之间并非如此, 而是在 $C = 0.1$ 附近存在极大值, 这与现有的研究结果^[6,8] 有明显的不同, 也说明移动 Ad Hoc 网络的同步能力与其他网络不同.

移动 Ad Hoc 网络同步能力之所以存在极值, 是

因为随着被占有率的增加, 网络中加入的节点数目越来越多, 而此时全局连通性还没有达到较好的状态, 节点数目越多各节点同时达到最佳状态就越困难, 所以同步能力越小. 但随着被占有率、节点数目的继续增加, 在一定的连接半径下, 全局连通性反而越来越好, 同步能力就会变得越来越强. 所以在网络规模一定的条件下, 连接半径越大同步能力越强, 被占有率 σ 的极值点也越来越小. 而在连接半径一定的情况下, 全局连通性受网络规模的影响较小, 所以被占有率 σ 的极值点受网络规模的影响也较小.

4. 结 论

通过对简化移动 Ad Hoc 网络同步能力的研究发现该网络的同步能力随聚类系数并不成正比关系也不成反比关系, 而是存在一个明显的极值. 这个结论在设计网络结构和通讯协议中有很多参考价值. 例如在设计移动 Ad Hoc 网络结构时, 在网络规模一定的情况下可以选择适当的连接半径和被占有率, 使得该网络具有最强的同步能力而保证网络中的各节点均处于最佳通讯状态. 但本文的结果是在简化的二维三角形网格中得到的, 这与实际的移动 Ad Hoc 网络还有很多差距, 所以本文的结果存在一定的局限性, 还有待进一步研究.

-
- [1] Nishikawa T, Motter A E, Lai Y C, Hoppensteadt F C 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 014101
- [2] Motter A E, Zhou C, Kurths K 2005 *Phys. Rev. E* **71** 016116
- [3] Wu X, Wang B H, Zhou T, Wang W, Zhao M, Yang H 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 1046
- [4] McGraw P N, Menzinger M 2005 *Phys. Rev. E* **72** 015101
- [5] Zhou T, Zhao M, Wang B H 2006 *Phys. Rev. E* **73** 037101
- [6] Zhao M, Zhou T, Wang B H, Yan G, Yang H J, Bai W J 2006 *Physica A* **371** 773
- [7] di Bernardo M, Garofalo F, Sorrentino F 2007 *Int. J. Bifur. Chaos* **17** 2419
- [8] Dai C L, Liu S E, Tian L, Shi D N 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4800 (in Chinese) [戴存礼、刘曙娥、田亮、施大宁 2008 物理学报 **57** 4800]
- [9] Luo X S, Wu L, Zheng H Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3380 (in Chinese) [罗晓曙、吴雷、郑鸿宇 2008 物理学报 **57** 3380]
- [10] Luo X S, Zhou X R 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2849 (in Chinese) [罗晓曙、周小荣 2008 物理学报 **57** 2849]
- [11] He Y, Zhang P P, Xu T, Jiang Y M, He D R 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1710 (in Chinese) [何阅、张培培、许田、姜玉梅、何大韧 2004 物理学报 **53** 1710]
- [12] Gao L F, Guan S, Shi J J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 010512
- [13] Shen Y, Wang G X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 842 (in Chinese) [沈轶、王高峡 2010 物理学报 **59** 842]
- [14] Cui D, Gao Z Y, Zheng J F 2009 *Chin. Phys. B* **18** 992
- [15] Wang M S, Yan X Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 851 (in Chinese) [王明生、闫小勇 2010 物理学报 **59** 851]
- [16] Han D D, Qian J H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3028 (in Chinese) [韩定定、钱江海 2009 物理学报 **58** 3028]
- [17] Wang L, Zhu C P, Gu Z M, Xiong S J, He D R, Wang B H arXiv: 0806.2351v1
- [18] Pecora L M, Barahona M 2005 *Chaos Compl. Lett.* **1** 61

Synchronizability of mobile Ad Hoc networks^{*}

Dai Cun-Li[†] Zhao Yan-Yan Wu Wei Zeng Lun-Wu

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

(Received 28 October 2009; revised manuscript received 1 March 2010)

Abstract

The synchronizability of mobile Ad Hoc networks is investigated in this paper. The synchronizability is measured by eigenratio R . A smaller value of eigenratio R leads to a better synchronizability. The results indicate that with the increase of clustering coefficient C , eigenratio R increases in interval, but with the process going on, eigenratio R decreases. The eigenratio varies with clustering coefficient neither in direct proportion nor in inverse proportion, but rises first and reduces later, so there appears a clear maximum value in between.

Keywords: mobile Ad Hoc networks, synchronization, extremum value

PACC: 0590, 0200

^{*} Project supported by the Technological Innovation Fund for youths of Nanjing Agricultural University (Grant No. KJ08031), Agricultural Mechanical Fund Jiangsu Province, China (Grant No. gxs08002).

[†] E-mail: daicunli@163.com