

# 移动通信网络中人类行为动力学的研究

顾亦然,谢鸿飞,李金发

(南京邮电大学 自动化学院,江苏 南京 210003)

**摘要:**为深入理解基于复杂网络和人类行为动力学的移动通信网络中的规律,文中分析了移动通信网络中人与人之间联系次数和规律的特点。基于复杂网络基础知识,结合人类行为动力学的特性,提出了一个“活跃度”的新概念,构建一个基于人类行为动力学的移动通信复杂网络模型。最后,根据复杂网络统计属性—自然演化和数据来预测和验证通话网络的发展趋势,抽象出一个通话网络节点拓扑稳定连接图,为网络未来的发展的预测奠定了基础,促进了对移动通信网络的演化的进一步研究。

**关键词:**移动通信网络;复杂网络;人类行为动力学;活跃度

**中图分类号:**TP31

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2010)09-0057-04

## Studies Based on Complex Network and Dynamics of Human Behavior in MC Network

GU Yi-ran, XIE Hong-fei, LI Jin-fa

(College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Analyze the characteristics of frequency and regularity of contacts between people in MC(Mobile Communications) network to understand the law of MC network based on complex network and dynamics of human behavior. Putting forward a new conception of “liveness”, building a complex MC network model based on dynamics of human behavior, which is based on the basic knowledge of complex network with properties of dynamics of human behavior. Finally, according to statistical properties—the natural evolution of complex networks and data collected to predict and verify the development trend of network for calls in the MC network, abstract a map of steady topology connections of nodes in the network for calls, paving the way for forecasting the development of the network, and promoting the further study of the evolution of the MC network.

**Key words:** MC network; complex network; dynamics of human behavior; degree of activity

### 0 引言

移动通信技术的发展和移动业务的不断创新,促进了包括信息在内的各种资源的整合利用,改变了人们传统的思维观念和生活工作方式。移动通信技术帮助人们实现了跨越时空、便捷沟通的梦想,任何时间、任何地点与任何人的沟通和交流成为现实,手机通话与人们的生活息息相关。完善移动通信手段,为繁荣社会经济和文化生活、提高公共管理水平起到了重要作用。

行为是主体的活动或者对环境的反应,行为的主体可以是个人,也可以是集体和组织<sup>[1]</sup>。人类行为具

有高度的复杂性。人类行为涉及到社会学、心理学、经济学、管理学和运筹学等众多学科<sup>[2]</sup>。研究人类行为中的规律,对于社会学、心理学、经济学、管理学和运筹学等众多学科的研究和应用有着极为重要的价值。人类许多活动都强烈地依赖人类行为的特征。人类行为具有高度的复杂性。一些有关方面的研究者提出可从以下四方面着手:收集人类活动行为的经验数据;挖掘人类活动行为数据的统计规律;建立人类活动行为的定量模型;分析人类活动行为对网络的影响<sup>[3,4]</sup>。文中研究工作体现在第四个方面,即分析人类活动行为对网络的影响;而复杂网络与人类行为相结合的网络社会动力学今后将可能成为一个新的重要研究方向。

研究表明,在自然界与社会生活中,众多的复杂系统可以用复杂网络加以描述,所谓复杂网络就是具有复杂拓扑结构和动力行为的大规模网络,它是由大量的节点通过边的相互连接而构成的图<sup>[5,6]</sup>。复杂网络

收稿日期:2010-01-04;修回日期:2010-04-03

基金项目:国家自然科学基金项目(60874091)

作者简介:顾亦然(1972-),女,江苏金坛人,副教授,CCF高级会员,研究方向为通信网络的性能分析与控制、复杂网络理论在通信中的应用、嵌入式系统开发等。

已经广泛应用于各个科学技术领域。复杂网络揭示了大量的真实系统所表现出的小世界效应、无尺度特性以及聚集性等一系列特有性质。

研究移动通信网络的演化机制以及网络的拓扑特性,是实现移动通信复杂网络管理与控制的基础。文中的主要贡献在以人类行为动力学和复杂网络的基本知识来研究移动通信网络中的人与人之间的规律,从本质上揭示移动通信复杂网络的发展与演化规律。为方便后面的分析和理解,下面介绍复杂网络的一个基本定义<sup>[6]</sup>:

度(degree):节点  $i$  的度  $k_i$  定义为与该节点连接的其他节点的数目。

## 1 理论分析

移动通信通话网络不是一个单纯连续增长的过程,在增长过程中,不但会有新节点的加入,也会有旧节点的退出,通话网络模型表现出有增有减的动态演化过程。在移动通信通话业务发展初期,只有少量用户之间存在通话往来,这是移动通信通话网络的起始状态。随着通话业务的推广和发展,人们越来越多地使用手机通话进行通话交流,即越来越多的用户(节点)加入到移动通信通话网络中,移动通信通话网络的规模不断发展壮大。

一些现实网络的研究表明,复杂网络虽然表现出非常复杂的特性,但大部分却是由一些简单的规则生长起来的<sup>[6~8]</sup>;并且简单的规则可以进化出更高层次的复杂规则以及由这些复杂规则决定的更加复杂的系统,这些复杂系统可以用复杂网络来描述。根据复杂网络自然演化的规则,文中从简单到复杂建立移动通信网络模型。

根据实际的移动通信通话网络交互过程,以手机号码为节点、以用户之间的通话关系为边,建立移动通信通话网络。选取少量节点的简单网络进行分析,并假定网络中每个节点之间都是连接的,即每个用户都和其他用户进行连接。

网络中的每个节点都是连接的,新增加的节点和原有的节点以相同的规律进行连接,网络规模逐渐发展,网络的复杂度逐渐增大。当然图 1 中的网络模型只是本次通话网络模型的初始化物理模型,并且没有把人类行为动力学的因素考虑进去。事实上,随着移动通信技术飞速的发展,通过手机,人们几乎可以随时随地和世界上任何一个人进行通话,即在物理上移动通信网络的节点都是连接的。然而现实生活中,人们很少与陌生人通话,通话的对象一般局限于熟人<sup>[9]</sup>。这是人类行为动力学中的人类行为因素所决定的,因

此建模时不仅要按照简单网络生成规则还需综合考虑人类行为动力学中的一些因素。抽象人类行为特征并进行量化是研究人类行为动力学的关键。人类行为不仅与优先权有关,而且个人的兴趣爱好、人情世故、适应能力和风险意识等都会影响决策次序从而改变网络性能。建立一个恰当的模型成为复杂网络中人类行为动力学研究的一个关键点。

网络中每一个用户(节点)都可以认识新用户,从而使网络中的用户之间建立了通话关系,导致了移动通信通话网络的内部演化<sup>[10,11]</sup>。此外,移动通信通话网络是建立在网络运营服务之上的,运营商之间存在着竞争,用户可能会因此变换服务商,如用户因资费问题更换网络运营商等,在移动通信通话网络中则表现为用户退出网络,这是外界对人的行为的影响,这使得移动通信通话网络中有节点退出。人与人之间交往,人们会通过朋友来认识新的朋友,这些新朋友往往是老朋友的朋友。在通话网络中表现为,新的连接在用户(节点)之间的建立,网络中某些节点的度增大。同时,人与人之间的关系疏远或者断交也会导致通话网络中某些对应节点的度相应减小。

由此可知,实际的移动通信通话网络应该是一种节点动态增减的复杂网络,从而建立如下的网络模型生长机制:

(1) 假定初始时刻,网络中有  $n_0$  个节点、 $m_0$  条边,节点之间已有一定的连接。

(2) 一定的时间段,产生一定数量  $p$  的新节点,新节点根据原有节点度的大小与不同的概率和旧节点建立连接,概率与度成正比。一个新增节点加入到网络中,并与  $n$  ( $n \leq n_0$ ) 个已经存在的节点建立连接。新节点与第  $i$  个节点连接的概率为  $\lambda_i \propto \frac{k_i}{\sum_{i=1}^n k_i}$ , 其中,  $\lambda_i$

为新节点与第  $i$  个节点连接的概率,  $k_i$  为第  $i$  个节点的度。

(3) 新节点连接旧节点和其他新节点的概率与该新节点本身的性质相关,可以大致认为是一个与节点所代表用户的活跃度的函数,  $\gamma_i \propto h_i$ , 其中,  $\gamma_i$  为第  $i$  个新节点与原有节点和其他新节点连接的概率,  $h_i$  为  $i$  个节点的活跃度。

(4) 同样,在每一个时间步,有一定数量  $q$  的旧节点随机退出,与退出旧节点相连的节点的度相应减小,每个节点的度减小量与退出节点中与之连接的数目成正比,即第  $j$  个节点度减小的概率为  $\eta_j \propto \frac{k_j}{\sum_{j=1}^n k_j}$ , 其中,  $\eta_j$  为第  $j$  个节点度减小的概率,  $k_j$  为第  $j$  个节点的度。

该理论建模分析主要基于复杂网络的基础知识,模型生长机制与复杂网络的生长机制基本一致。此外还加入了一些人类行为动力学的因素,对理论模型进行了进一步的补充和完善。此外提出了一个新的概念:活跃度(degree of activity),活跃度是由节点本身属性所决定的一种性质,对于节点与其它节点是否进行连接起着关键性的作用。

2 实际模型

由于大量全面的数据难以获取,所以根据参考文献[12]的收集数据的方法,以较简单数据进行模型分析。本次研究选取 8 名学生为研究对象,构建一个小型的移动通信通话网络,并对其按照前面的理论生长机制进行处理分析。第一学年只有 4 名同学,第 2 学年又有 4 名新同学的加入。首先选取第一学年的通话数据并画出节点拓扑连接图;根据第 2 部分的理论分析,对网络发展趋势进行分析并预测出第二学年的网络节点的拓扑连接图;再选取第二学年的一个月的数据画出节点拓扑连接图。

2.1 第一学年移动通话节点连接图

第一学年,C 和 D 加入了校园 V 网套餐,每个月具有一定的免费通话时间;A 由于号码受限,未能加入校园 V 网套餐;B 由于个人原因未加入校园 V 网套餐。收集第一学年同学之间的通话数据,根据数据画出一个移动通信网络节点拓扑连接图,如图 1 所示。

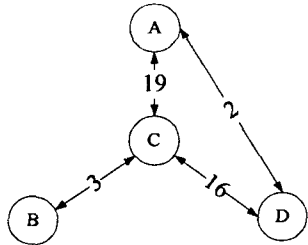


图 1 第一学年移动通话节点拓扑连接图

图 1 为第一学年移动通话节点拓扑连接图,图中的数字代表节点之间连接的次数,结合各个节点所代表同学的特点和图 2 所示的节点拓扑进行分析说明,A 的活跃度比较高;C 开朗活泼,具有较高的活跃度;B 和 D 的活跃度相对较小。C 节点的度较大,A 节点和 D 节点次之,B 的度最小。

2.2 第二学年移动通话节点连接推理演化图

首先,对第二学年新加入的节点所代表的同学的特点进行分析,E 外向活泼,具有较高的活跃度,G 的活跃度相对较高,F 和 H 的活跃度相对较低。

根据第 2 部分的网络生长模型,提出一个节点连接判据如下,定义一个连接可能性系数  $L_{ij}$ 。将连接分

为两类:新节点与旧节点的连接和新节点之间的连接。

对于新旧节点的连接:

$$L_{ij} = k[ah_i + \beta h_j + \gamma(n-1)\lambda_i] + l \sum X_i \quad (1)$$

式(1)中, $\alpha, \beta, \gamma, k, l$  为比例系数调节因子, $\alpha, \beta, \gamma, k, l \in (0, 1)$  且  $\alpha + \beta + \gamma = 1, k + l = 1$ ,此外当  $(n-1)\lambda_i \geq 1$  时,则令之为 1,  $X_i$  为其它影响因子,当  $L_{ij} \geq s$  时( $s$  为判决门限值,  $s \in (0.5, 1)$ ),判定节点  $i$  和节点  $j$  连接;

对于新节点的连接:

$$L_{ij} = ah_i + bh_j \quad (2)$$

式(2)中, $a, b$  为比例系数调节因子, $a, b \in (0, 1)$  且  $a + b = 1$ ,当  $L_{ij} \geq t$  时( $t$  为判决门限值,  $t \in (0.5, 1)$ ),判定节点  $i$  和节点  $j$  连接。

结合前面旧节点 A、B、C 和 D 的特点与新节点 E、F、G 和 H 的特点,采用问卷调查评分标准对 8 个节点的活跃度进行评估量化,每个节点的活跃度具体量化值如表 1 所示(取百分制)。

表 1 每个节点活跃度问卷评估分值表

节点	A	B	C	D	E	F	G	H
分值	90	41	92	39	90	62	84	54

由表 1 可得各个节点的活跃度具体值,如下:

$$h_A = 0.9, h_B = 0.41, h_C = 0.92, h_D = 0.39, h_E = 0.9, h_F = 0.62, h_G = 0.84, h_H = 0.54.$$

结合实际经验,本次研究的网络模型涉及到人类行为动力学中的社会关系和经济影响很小,所以不考虑其它影响因子的作用,选取适当系数  $\alpha, \beta, \gamma, a$  和  $b$ ,对移动通信网络节点拓扑连接图进行计算推演,选取节点 A 和 E 为例通过公式(1)和(2)进行计算分析,令  $k = 0.5, \alpha = \beta = 0.5, L_{AE} = 0.825, L_{AF} = 0.7, L_{AG} = 0.8, L_{AH} = 0.7$ ;令  $a = b = 0.5, L_{EF} = 0.65, L_{EG} = 0.85, L_{EH} = 0.65$ 。由前面的判据(取  $s = t = 0.6$ )可得:节点 A 与所有新节点都连接,同样节点 E 也与其它所有新节点连接。同理计算可得到其他新旧节点的连接和新节点间的连接,具体的节点连接如图 2 所示。

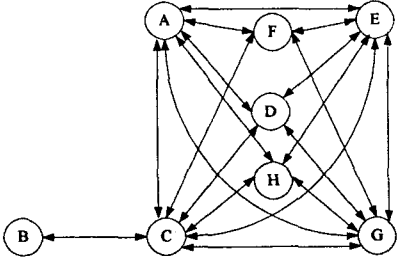


图 2 推理演化的通话网络节点拓扑连接图

如图 2 所示,活跃度较高的节点 A、C、E 和 G 的度数比较大,分别为 6、7、6 和 6。其中节点 B 只与节点 C

连接。

### 2.3 第二学年移动通话节点实际连接图

根据收集的实际数据,画出第二学年的实际的移动通话网络节点拓扑连接图,如图 3 所示。

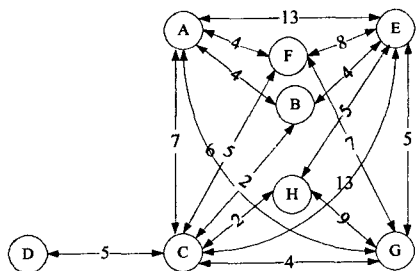


图 3 实际通话网络节点拓扑连接图

图 3 是根据收集的实际数据画出的通话网络节点拓扑连接图,图中的数字代表节点间的连接次数。活跃度较高的节点分别是 A、C、E 和 G,它们的度数依次为 5、7、6 和 5。

对图 2 和图 3 进行比较可知,推理演化的网络拓扑结构与实际网络拓扑结构基本一致,只是有一些细微的区别。例如,节点 B 和 D 相对置换了位置,这表明了这两个节点具有相同的一些性质,例如活跃度相近、所处相同的宿舍等。除了节点 C 全连接,和理论推理的连接度一致外,其它节点的连接度都比推理值稍小,这是由于所收集的数据为刚刚开学的那个月,网络还未达到完全生成状态所致。本次实际通话网络拓扑结构与推理演化的网络结构基本符合,说明理论推理和理论计算部分具有一定的实际意义。

### 2.4 网络演化发展的进一步预测

移动通信通话网络中节点连接拓扑图大致代表了人与人之间的关系,一般情况下,关系密切的同学联系多,反之则少。

为了进一步用通话网络的节点连接拓扑图来体现同学之间的关系网络,并对网络的最终趋势进行预测,进行如下的处理:经过一定的综合分析并结合实际通话网络节点拓扑连接图,对实际通话网络进行如下处理,通过计算可知每个连接的平均通话次数为 6,因此把连接次数在 6 次以上的连接定义为稳定性连接,其余的则为不稳定连接,由此可得如图 4 所示的通话网络稳定连接拓扑图。

得到了网络中节点稳定,可以对未来通话网络的分布进行预测:未来通话网络节点的实际拓扑连接图应该在通话网络节点拓扑稳定连接图基础之上增加一些不稳定连接,未来通话网络节点的实际拓扑连接图在通话网络节点拓扑稳定连接和全耦合网络连接(如图 5 所示)之间上下波动,其中稳定连接和全连接为上下极限。

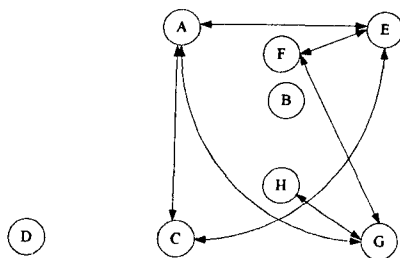


图 4 通话网络节点拓扑稳定连接图

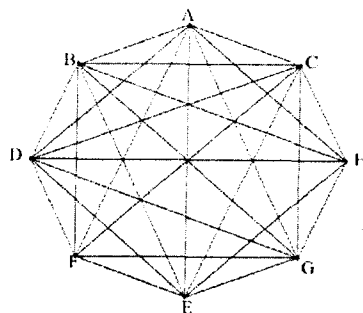


图 5 通话网络节点拓扑全耦合图

## 3 结束语

文中将人类动力学和复杂网络结合起来对移动通信网络中的人与人之间的通话进行研究和分析,在此基础上分析得到的理论知识得出了一个移动通信通话网络模型生长机制。在理论分析的过程中提出了一个“活跃度”的新概念,为理论建模奠定了一定的基础。然后根据收集的数据画出网络的初步节点连接图,并对网络发展进行了预测,结合理论分析中得到的规律通过计算得到了网络的演化节点拓扑连接图,最后根据实际收集的数据画出了实际网络节点连接图,再对两者进行比较分析。验证了网络生长机制的理论基本与实际网络生长的规律相符。

文中还从实际网络模型中抽象提出了一个通话网络节点稳定连接模型,该模型大致反映了网络稳定发展演化的规律,为进一步对移动通话网络进行分析奠定了一定的基础。另外移动通话网络中节点拓扑结构大致体现了人与人之间的关系,是抽象人际关系网络模型的一种具体表现形式。即人类行为能够对移动通话网络产生影响,同时移动通话网络也反映了人际关系网络,这为以后研究人类行为动力学提供了一种参考方法。

由于收集数据量较小,故文中的研究具有一定的局限性。但根据理论分析得出通话网络生长机制与实际数据基本一致,该网络模型基本符合实际要求。为了更进一步获取移动通信复杂网络中人类行为动力学的信息,在此基础上有待进一步学习和研究。

(下转第 65 页)

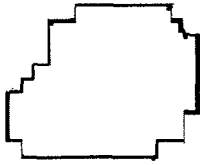


图 2 鱼群算法主动轮廓模型结果图

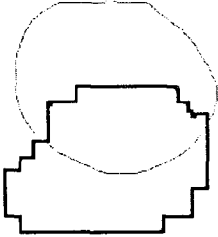


图 3 采用原始主动轮廓模型初始化图

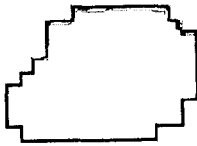


图 4 采用主动轮廓模型的结构图

## 5 结束语

主动轮廓模是图像边缘检测中重要的研究成果,文中给出了主动轮廓模型的鱼群算法,使主动轮廓方法克服了陷入局部极值,可以准确地找出全局极值,数学证明和实验表明该算法是有效的。同时该算法也克服了主动轮廓模型的与初始位置有关的缺点,对初始轮廓位置没有要求。该算法在时间复杂度方面还有不尽人意的地方,有待以后改进。

### 参考文献:

[1] Terzopoulos D, Fleischer K. Deformable model[J]. The Visual Computer, 1988, 4(6): 306 - 331.

(上接第 60 页)

### 参考文献:

[1] 库少雄. 人类行为与社会环境[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.

[2] Vázquez A. Exact results for the Barabási model of human dynamics[J]. Physical Review Letters, 2005, 95(24): 248701.

[3] 汪秉宏, 周涛, 王文旭, 等. 当前复杂系统研究的几个方向[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2008, 5(4): 21 - 28.

[4] 韩筱璞, 周涛, 汪秉宏. 基于自适应调节的人类动力学模型[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2007, 4(4): 1 - 5.

[5] 郭雷, 许晓鸣. 复杂网络[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2006.

[6] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

[2] Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snake: active contour models[J]. International Journal of Computer Vision, 1988, 1: 321 - 331.

[3] Cohen L D. On active contour models and balloons[C]//Proc. IEEE Conf. on Computer Visual Patten. Recognize(CVPR). [s. l.]: [s. n.], 1991: 211 - 218.

[4] Xu C, Prince J L. Snake, shape, and gradient vector flow[J]. Proc. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(3): 359 - 369.

[5] Park J, Keller J M. Snake on the watershed[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(10): 1201 - 1205.

[6] 李晓磊, 路飞, 田国会, 等. 组合优化问题的人工鱼算法应用[J]. 山东大学学报, 2004(10): 12 - 18.

[7] Feynman R P, Hibbs A R. Quantum Mechanics and Path Integrals[M]. New York: McGraw - Hill Inc., 1965: 365 - 369.

[8] 李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(11): 32 - 38.

[9] 李晓磊, 薛云灿, 路飞, 等. 基于人工鱼群算法的参数估计方法[J]. 山东大学学报, 2004(6): 22 - 28.

[10] Zhao Yanwei, Wu Bin, Wang Wanliang, et al. Particle Swarm Optimization for Open Vehicle Routing Problem with Time Dependent Travel Time[M]. Seoul: The International Federation of Automatic Control, 2008: 12843 - 12848.

[11] 马建伟, 张国立. 利用人工鱼群算法优化前向神经网络[J]. 计算机应用, 2004(10): 21 - 23.

[12] 曹会志, 王晨, 罗述谦. 结合蚁群算法的 Snake 模型的医学图像分割方法[J]. 北京生物医学工程, 2007(6): 245 - 248.

[13] Seneta E. Non - negative Matrices and Markov Chains[M]. Sydney: Springer, 2006: 233 - 245.

[7] Li Xiang, Chen Guanrong. A local - world evolving network model[J]. Physica A, 2003, 328: 274 - 286.

[8] 陈晓, 张纪会. 复杂供需网络的局域演化生长模型[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2008, 5(1): 54 - 60.

[9] Tam W M, Lau F C M. Complex - Network Modeling of a Call Network[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2009, 56(2): 416 - 429.

[10] 孙钦东, 孙亚红, 管晓宏, 等. 动态短信通信复杂网络演化模型研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(6): 5 - 9.

[11] 韦洛霞. 复杂网络模型和方法[J]. 东莞理工学院学报, 2004, 11(4): 17 - 20.

[12] 洪伟, 韩筱璞, 周涛, 等. Heavy - Tailed Statistics in Short - Message Communication[J]. 中国物理快报, 2009, 26(2): 028902.