

## 一种评估机会社会网络中节点消息传播能力的方法\*

蔡青松<sup>1,2</sup>, 牛建伟<sup>2+</sup>, 刘明珠<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(北京工商大学 计算机与信息工程学院, 北京 100048)

<sup>2</sup>(北京航空航天大学 计算机学院, 北京 100191)

### Method for Identifying Node Dissemination Capability in Opportunistic Social Networks

CAI Qing-Song<sup>1,2</sup>, NIU Jian-Wei<sup>2+</sup>, LIU Ming-Zhu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(School of Computer Science and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

<sup>2</sup>(School of Computer Science and Engineering, BeiHang University, Beijing 100191, China)

+ Corresponding author: E-mail: niujianwei@buaa.edu.cn, http://www.buaa.edu.cn

Cai QS, Niu JW, Liu MZ. Method for identifying node dissemination capability in opportunistic social networks. *Journal of Software*, 2012, 23(Suppl. (1)): 49-58 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/12006.htm>

**Abstract:** Although socially aware opportunistic communication paradigms are considered to have broad potential applications, very little is known about how the dynamic networks evolve and which nodes are more important both in sustaining the network topology and in forwarding or disseminating messages. Through the concept of walk and the adjacent matrix product of static graph theory, this paper extends a measurement, Katz Centrality (KC) that originated from Social Networks Analysis (SNA), to dynamic evolving opportunistic mobile networks. This is done in effort to examine the dissemination capabilities of different mobile nodes. The cornerstone of this method is the dynamics of an opportunistic contact network can be expressed through time-split observations, which result in a sequence of snapshots. By simply multiplying the adjacent matrix of each snapshot along the direction of time, the resulting matrix, in which the spatial and temporal dependency of the network are fully captured, can be obtained, so as to evaluate the relative information dissemination capability of each mobile node. The research uses two typical contact trace datasets for validation and the results show that several mobile nodes with the highest communicability identified by this method are more efficient in information dissemination than others in the whole network and can be chosen as good candidates when some interventions, such as accelerating or suppressing the speed of message dissemination in network, are required to be made on network.

**Key words:** opportunistic social network; evolving graph; dissemination capability; walk; contact trace

**摘要:** 评估不同节点的消息分发能力是研究机会社会网络拓扑演化、消息传播与抑制的基本问题。通过将静态图中邻接矩阵乘积及通路(walk)的概念扩展到动态演化网络中,结合不同时间邻接距离对节点具有不同影响这一特性,提出了一种利用演化过程快速计算节点在网络中消息传播能力的方法。对实际用户移动性轨迹数据

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61170296, 60873241); 航空科学基金(20091951020); 软件开发环境国家重点实验室基金(BUAA SKLSDE-2012ZX-17); 新世纪优秀人才支持计划(NECT-09-0028)

收稿时间: 2012-05-05; 定稿时间: 2012-08-17

的计算结果表明,该方法能够准确刻画不同节点的消息传播能力,当利用少数具有较高消息传播能力较强的节点进行消息扩散时,网络的传播效率显著提升.为网络干预,如加速或者抑制网络的消息传播,提供了一种有效的节点传播能力评估方法.

**关键词:** 机会社会网络;演化图;分发能力;通路;相遇记录

机会网络<sup>[1]</sup>组网技术因成本低、容量大、自组织和无需基础设施等诸多优点使其具有潜在的广泛应用而日益受到研究领域的关注.随着移动设备计算和存储能力的不断增强,机会网络技术的信息感知、处理和传播等领域将具有广阔的应用前景,有学者预言,机会计算(opportunistic computing)<sup>[2]</sup>的时代即将来临.

移动设备通常由人携带并通过人类的社会性移动和相遇进行通信,因此这类通信模式具有典型的社会性特征,本文将这类机会网络称为机会社会网络(opportunistic mobile social network,简称 OMSNNet).由于人的社会性移动决定了节点之间的相遇模式,网络的动态性不仅与人类的移动规律有关,而且也接受人类的社会性及社会关系演化的影响.OMSNNet 可广泛应用于城市规划、舆情传播与控制、社会关系挖掘与预测、生物传染病或手机“蓝牙病毒”传播与控制等领域.在机会社会网络中,不同的移动个体因具有不同的社会属性而具备不同的消息分发和传播能力,研究如何评估网络中节点的消息传播能力对于区分网络中节点的社会属性并进一步挖掘节点之间的社会关系,以及对于网络中的消息传播与控制等,均具有重要意义.

不同于静态网络,机会社会网络中的消息传递路径既受空间影响同时又具有典型的时向性.从网络拓扑的角度看,这类网络的拓扑是随时间动态演化的,因此需要准确抓住这类网络的动态演化特征进而建立分析模型以分析移动节点在社会环境中的消息分发和传播能力.图 1 给出了具有 8 个移动节点的 OMSNNet 中节点 A 向节点 F 传递消息的过程示例.为了进行比较,图 1 的右侧给出忽略时间特性后该 8 个节点相遇过程的叠加图.

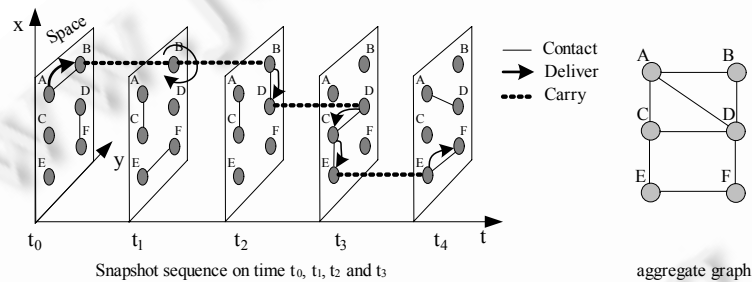


Fig.1 A 8-node evolving graph in which a message is delivered from node A to node F ( $x, y$  are spatial dimension and  $t$  is temporal dimension; the right side is the aggregate graph)

图 1 具有 8 节点的演化网络中节点 A 向节点 F 传递消息的过程 ( $x-y$  为空间方向,  $t$  为时间方向;右侧为忽略时间演化的叠加图)

由于移动节点易受通信环境干扰、自身资源有限(计算能力,缓冲区大小,电池能量)等条件制约,当利用相遇机会进行通信时,消息的传输并非沿着路径(path)或者最短路径(shortest path)进行传递.例如,当消息在某节点的生存期即将结束时,节点必须利用最近的一次相遇机会将消息传递出去以达到最大的传输率,消息的传递方向上可能出现重复的节点或重复的边(即节点相遇),这类消息传递轨迹称为通路(walk).在利用演化图模型为机会社会网络建模基础上,本文将静态图中的邻接矩阵乘积和通路(walk)的定义扩展到这类动态网络中,借助社会网络分析(social network analysis,简称 SNA)方法中 Katz 中心度(Katz centrality,简称 KC)<sup>[3]</sup>理论提出了一种快速计算和评估这类动态网络中节点消息分发能力的方法.本文通过对真实 Trace 数据的计算验证了该方法的有效性.结果表明,少数节点的消息分发能力对网络的传播效率具有重要影响,本文所提出的方法可快速准确计算并辨识出不同节点的消息传播能力.当利用那些具有较高消息传播能力的节点进行消息分发时,网络的消息传播效率显著提高.本文的分析和实验结果同时也指出,利用本文所提出的方法可以有效监控网络中的消息传播过

程.当需要网络干预时,可选择消息传播能力强的节点通过内容注入或节点删除的方法加速或抑制消息的传播.

本文第 1 节介绍相关工作和当前研究现状.第 2 节首先介绍利用 Katz 中心度计算静态网络的节点影响度方法,并将该方法扩展到动态演化的机会社会网络中,提出计算网络节点消息分发能力的方法.第 3 节利用真实 Trace 数据验证本文所提出方法的有效性,并对所提出的应用模型进行数据仿真.第 4 节给出结论与下一步工作.

## 1 相关工作与现状

机会网络是一类具有显著拓扑动态性和演化性的复杂网络.虽然随机图(random graph)理论在近些年随着复杂网络研究的兴起得到了迅速发展,然而随机样本图之间的时间无关性和节点对之间连边的独立性使得这类网络模型不能直接用于机会社会网络的分析.当前,分析这类动态网络的一种常用方法是在图论模型中引入时间因素,即基于演化图(evolving graph,简称 EG)<sup>[4]</sup>或时变图(time varying graph,简称 TVG)<sup>[8]</sup>模型的方法进行研究.其核心思想是通过将时间离散化的方法将动态网络划分为连续的快照序列(snapshot),对相邻快照间采用时间相关的分析方法而在快照内则分析节点之间的空间关系.由于动态网络的内在复杂性,当前大多数研究工作关注于利用演化图模型分析网络的特定属性并用实际 Trace 数据进行验证.例如,其中文献[4]定义了演化图模型,并通过随机游走方法分析了网络的覆盖时间(covering time);文献[5]利用演化图的观点将动态网络描述为连续的快照序列,并利用 Trace 数据分析了网络演化的一些性质,通过对实际 Trace 数据的分析认为节点对之间的连边建立与拆除独立于网络的其他属性;文献[6]则基于演化图为动态网络建模,分析了网络中的消息传播问题;文献[7]提出了类似的概念—时变图,给出其进行形式化定义和描述,并对大多数可用时变网络进行了分类.文献[8]利用时变图研究了节点之间的时间可达性,并基于两个常用的动态随机图模型分析了随机间歇连通的路径上路由延迟的概率分布.文献[9]利用非线性动态系统为动态网络建模,研究了网络中的病毒传播与免疫问题,得到了 SIS(susceptible-infected-susceptible)模型下病毒传播阈值的理论结果.文献[10]则通过计算相邻快照的时间相关系数衡量网络演化过程中的快照重叠程度,指出节点之间具有相对小的时间路径长度,即小世界效应.

动态网络中的消息传播是另外一类基本问题.研究工作<sup>[11]</sup>通过分析现实世界的 trace 数据,研究了由人所携带的移动设备组成的机会网络中基于传染模式的消息传播特性,揭示了不同类型的节点对于在社会网络中的消息传播具有不同的作用.然而,该研究工作主要基于 Trace 的经验分析,并未提出一种通用的有效计算方法.研究工作<sup>[12]</sup>将社会网络中的分析节点之间影响度的方法扩展到演化网络,利用 Katz 中心度提出了一种分析节点之间影响力的方法,并利用 E-mail 网络和电话呼叫网络的实验数据进行了验证.然而这类网络与依赖于节点移动和相遇机会的社会机会网络有着显著的不同.文献[13]研究了大规模移动间歇性连通的 DTN(delay tolerant network)中消息传播的速度,在给定消息传播延迟的条件下,该研究工作给出了其性能上界的一般性结果.研究工作<sup>[14]</sup>利用时间近邻中心度(temporal closeness centrality)研究了在人类相遇网络中对关键节点免疫以阻止网络中有害信息的传播问题.不同于该方法,本文利用将 Katz 中心度概念推广到动态演化网络中的方法研究节点的消息传播能力.

本文工作专注于研究机会社会网络中节点的不同节点的消息传播能力.不同于其他演化网络(如 E-mail 网络),机会社会网络中的节点移动和相遇受节点的社会性影响,人类的社会活动使得节点之间的连接关系呈现更为显著的动态性.本文利用演化图对机会社会网络建模,将静态网络中的 Katz 中心度概念推广到机会社会网络中,提出了一种有效的计算和评估网络中节点消息传播能力的方法.同时,由于洪泛法固有的分布式传播和冗余传播特性使其对拓扑动态变化的网络具有高度的适应能力,因此本文利用有限消息泛洪的方法验证机会社会网络中不同消息传播能力的节点对网络传播效率的影响.

## 2 模型

### 2.1 静态图中的邻接矩阵积、通路(walk)和Katz中心度

一个静态无向图表示为  $G=(V,E)$ , 其中  $|V|=n$  表示节点集合,  $E$  为定义在节点集合上的无向边集. 图  $G$  对应一个  $n \times n$  邻接矩阵  $A=(a_{i,j})(i,j \in V)$ , 若节点  $i$  与节点  $j$  之间有连边, 则  $(a_{i,j})=1$ , 否则  $(a_{i,j})=0$ , 同时定义  $(a_{i,i})=0$ . 为描述邻接矩阵乘积中各元素的含义, 下面给出通路(walk)的定义.

**定义 1(通路).** 无向图  $G=(V,E)$ ,  $V=\{v_0, v_1, \dots, v_n\}$  为节点集,  $E=\{e_1, e_2, \dots, e_m\}$  为定义在  $V$  上的边集, 一个节点与边的交替序列  $v_0 e_1 v_1 e_2 v_2 \dots e_k v_k$  称为从节点  $v_0$  到节点  $v_k$  的长度为  $k$  的一条通路, 其中  $e_i=(v_{i-1}, v_i)$ .

若邻接矩阵的  $m$  阶幂

$$\underbrace{A \times A \times \dots \times A}_m = (A^m)_{i,j} = k \quad (m, k \in \mathbf{Z}^+) \quad (1)$$

则表示节点  $i$  与节点  $j$  的长度为  $m$  的通路数为  $k$ . 对于任意节点对节点  $i$  与节点  $j$ , 它们之间的通路长度  $w=1, 2, 3, \dots$  为的通路数分别为

$$(A^1)_{i,j}, (A^2)_{i,j}, (A^3)_{i,j}, \dots \quad (2)$$

由节点  $i$  出发, 到达网络中任意其他节点的长度不大于  $w$  的通路数为

$$\sum_{k=1}^w \sum_{j=1}^n (A^k)_{i,j} = \sum_j \left( \sum_{k=1}^w A^k \right)_{i,j} \quad (3)$$

通常, 与节点  $i$  不同距离的近邻对节点  $i$  具有不同的相互影响, 节点  $i$  的一度近邻对节点  $i$  相互影响最大, 二度近邻次之, 以此类推. 为此设定影响因子  $0 < \alpha < 1$ , 若节点  $j$  为节点  $i$  的第  $m$  度近邻, 则节点  $i$  对节点  $j$  的影响力因子为  $\alpha^m$ .

令  $\bar{C}_{katz}(i)$  表示节点  $i$  的 Katz 中心度 ( $\bar{C}_{katz}(i)$  为列向量):

$$\bar{C}_{katz}(i) = \sum_{j=1}^n \left( \sum_{k=1}^w \alpha^k A^k \right)_{i,j} \quad (4)$$

显然, Katz 中心度表示了节点  $i$  对其他节点的影响程度. 当  $\alpha < 1/\rho(A)$  ( $\rho(A)$  为矩阵  $A$  的最大特征值) 时,

$$\lim_{w \rightarrow \infty} \left( \sum_{k=1}^w \alpha^k A^k \right) = (I - \alpha A)^{-1} - I \quad (5)$$

其中,  $I$  为单位矩阵. 因此有:

$$\bar{C}_{katz}(i) = ((I - \alpha A)^{-1} - I) \bar{\mathbf{1}}^T \quad (6)$$

其中,  $\bar{\mathbf{1}}^T$  为单位行向量  $(1, 1, 1, \dots, 1)$  的转置. 公式(6)提供了在静态图中利用邻接矩阵计算节点 Katz 中心度的方法.

### 2.2 演化图(evolution graph)模型

为考虑动态网络拓扑随时间变化的特性, 需要将时间因素引入基本网络模型中. 从抽象的层面看, 一个动态演化网络可被看作为在一系列连续时间步上观察到的子图(快照)序列. 研究工作<sup>[4]</sup>给出了演化图的基本定义, 然而却未明确定义时间特性. 最近的研究工作<sup>[15]</sup>采用时间相关的快照序列的方式对动态网络建模, 然而与上述研究不同的是, 本文旨在研究动态网络中相邻快照之间与时间相关的消息传递路径的特性, 并通过该特性进一步研究节点对消息的传播能力. 为此本文利用定义 2 给出了演化图的一般化定义. 为便于使用图的基本性质, 一般假定在每个时间步上观察到的网络快照具有稳定的拓扑.

**定义 2(演化图).** 对于任意节点集  $|V|=n$ , 若  $T \subseteq \mathbf{Z}^+ = [t_1, t_k](k \in \mathbf{Z}^+)$  为一有限离散时间序列,  $t_1$  与  $t_k$  分别为时间序列的最小与最大值,  $G_i=(V, E_i)(i \in [1, k-1])$  为时间间隔  $[t_i, t_{i+1})$  内定义在节点集  $V$  上的子图, 则  $S_g = \{G_i\}$  为一个演化图.

按照上述定义, 一个动态演化网络可以刻画为定义在相同节点集合上的静态图序列  $G_1, G_2, G_3, \dots, G_k$ , 其对应的邻接矩阵序列为  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_k$ .

### 2.3 演化网络中的动态通路(dynamic walk)及节点的消息分发能力

为利用静态图中的 Katz 中心度的概念,需要将静态网络中的 walk 的概念推广到演化图中,为此给出演化网络中的动态通路的定义.

**定义 3(动态通路).** 定义在一个非递减的时间序列  $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_r \leq \dots \leq t_k$  上的一系列边  $i \rightarrow v_1, v_1 \rightarrow v_2, \dots, v_m \rightarrow v_{m+1}, \dots, v_k \rightarrow j$  构成节点  $i$  到节点  $j$  的长度为  $k$  动态通路,当且仅当第  $r$  个快照的邻接矩阵满足  $(A_r)_{i_m, i_{m+1}} \neq 0$ .

根据上述定义,在动态网络中节点对之间的动态通路是跟时间相关的,即按照时间方向“拼接”形成的通路,具有典型的时向性.直观上,在演化图中节点  $i$  与节点  $j$  存在长度为  $k$  的动态通路条数为

$$(A)_{i,j} = (A_1 A_2 A_3 \dots A_k)_{i,j} \quad (7)$$

然而,式(7)并不适用于计算动态演化网络中节点的动态通路数.一种情况是,节点  $i$  与节点  $j$  可能在某个快照中存在连通的空间通路(spatial walk),如图 1 中节点 D,C 和 E 在  $t_3$  时刻的快照中连通.实际上,节点  $i$  与节点  $j$  之间长度为  $w$  的通路是由空间通路和时间通路(temporal walk)连接而成的.如图 1 中,虚线部分即为时间通路.另外一种情况是,如果存在快照  $A_r = \mathbf{0}$  (即不存在边,  $\mathbf{0}$  表示零矩阵),则会导致式(7)计算出零矩阵的情况.一般情况下,某些节点可能在连续的若干个快照中都不存在与其他节点的连边.如图 1,在  $t_1$  对应的快照中节点 B 无与其他节点的连边.由于机会网络中节点传递消息的基本方法是“存储-携带-转发”,因此需要使这些节点对消息维持“携带”状态.为此,只需对公式(5)加上一个单位矩阵  $I$  以表示当节点无法在当前快照将消息转发时保持“携带”状态(即节点将消息传递给自身,通路长度此时增加 1).为适应动态网络,公式(5)中节点  $i$  在静态快照中的 Katz 中心度重新计算为

$$\bar{C}_{katz}(i) = (I - \alpha A)^{-1} \bar{\mathbf{1}}^T \quad (8)$$

因此,在快照序列  $G_1, G_2, G_3, \dots, G_k$  中,动态通路长度为  $w$  的对各节点的影响力为

$$\alpha^w (A_1)^{m_1} (A_2)^{m_2} \dots (A_k)^{m_k} \quad (9)$$

其中,  $m_1 + m_2 + \dots + m_k = w$ ,  $(A_p)^{m_p}$  表示长度为  $w$  的动态通路位于第  $p$  个快照中且长度等于  $m_p$  的“一段”( $p=1,2,\dots,k; m_p \in \mathbf{Z}^+$ ),即空间通路.

令  $\bar{A}(i)$  为网络中其他节点对节点  $i$  的影响力列向量,令  $w \rightarrow \infty$ ,则有:

$$\bar{A}(i) = A \bar{\mathbf{1}}^T \quad (10)$$

其中,

$$\begin{aligned} A &= \sum_{w=0}^{\infty} \alpha^{m_1+m_2+\dots+m_k} (A_1)^{m_1} (A_2)^{m_2} \dots (A_k)^{m_k} \\ &= \sum_{m_1=0}^{\infty} \dots \sum_{m_k=0}^{\infty} \alpha^{m_1} (A_1)^{m_1} \dots \alpha^{m_k} (A_k)^{m_k} \\ &= \sum_{m_1=0}^{\infty} \alpha^{m_1} (A_1)^{m_1} \dots \sum_{m_k=0}^{\infty} \alpha^{m_k} (A_k)^{m_k} \\ &= (I - \alpha A_1)^{-1} \cdot (I - \alpha A_2)^{-1} \dots (I - \alpha A_k)^{-1} \end{aligned} \quad (11)$$

$\bar{A}(i)$  表示动态网络环境下,从节点  $i$  出发,沿动态通路到达其他节点的能力.

为了避免计算  $A$  时由于快照数量  $k$  过大而导致计算溢出,需要通过下式将式(11)进行归一化处理.

$$\hat{A}_p = \frac{\hat{A}_{p-1} \cdot (I - \alpha A_{p-1})^{-1}}{\|\hat{A}_{p-1} \cdot (I - \alpha A_{p-1})^{-1}\|} \quad (p=2,3,\dots,k) \quad (12)$$

其中,  $\hat{A}_1 = I$  为单位矩阵,  $\|\cdot\|$  为取欧氏范数.

### 3 Trace 数据验证

#### 3.1 Trace 数据

为验证本文提出的计算节点消息分发能力方法的有效性,我们从 CRAWAD<sup>[16]</sup>获取了两个典型的实验 Trace 数据进行分析,分别是:(1) MIT Reality 项目.该实验数据记录了 100 个携带 Nokia 6600 智能手机的用户在 2004 年 7 月~2005 年 5 月间通过 Bluetooth 通信的记录;(2) UCSD Topology Discovery 项目.该实验记录了约 11 周内 275 个携带 802.11b WiFi 接口 PDA 设备的用户与部署的 AP 之间通信的数据.Trace 数据(1)记录了 Bluetooth 设备直接的相遇信息;Trace 数据(2)中本文将连接到同一 AP 的两个移动设备处理为相遇.表 1 列出了经过预处理以后的两个数据集的相关信息.

Table 1 Trace datasets

表 1 Trace 数据

Dataset description	MIT reality	UCSD
Device	Nokia 6600	PDA
Network type	Bluetooth	WiFi
Duration (day)	309	77
Valid users (total user)	96 (100)	257 (275)
Valid records	47 109	101 471
Contact type	Directed	Undirected

#### 3.2 基于 $k$ -copy 的动态网络消息传播效率

为考察网络的消息传播效率,首先考察基于泛洪算法时上述两个网络中节点的消息传播速度.本文在传统 flooding 方法的“相遇即传输”的基础上,以  $k$ -copy 的方式进行泛洪,即任意节点在持有消息时,向其他节点传播消息的拷贝数不超过  $k$ .

图 2 是以每个节点为消息源向整个网络以  $k$ -copy 的方式 flooding 后取均值的结果.结果表明,当  $k$  分别取 1,2,4 和不限制拷贝数时,消息将迅速覆盖到整个网络.从实验结果可以看出,当取  $k=2$  时,网络中消息的传播速度接近于不限制拷贝数时的传播速度.为避免基本 flooding 方法导致的网络负载,在下面的数据验证中,本文均采用  $k=2$  的方法对节点的消息传播能力进行比较.

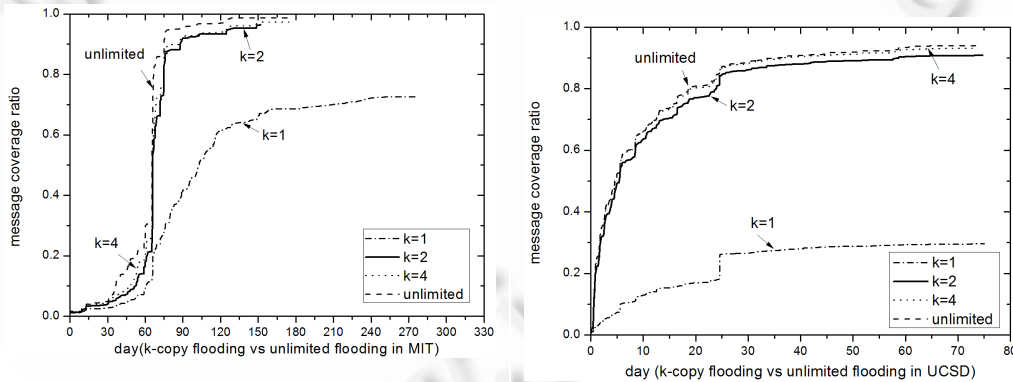


Fig.2  $k$ -Copy based message dissemination speed in MIT and UCSD

图 2 MIT 和 UCSD 中的  $k$ -copy 消息扩散速度

#### 3.3 动态网络中节点的消息传播能力

为了考察网络中不同节点传播消息能力的强弱,可基于公式(10)和公式(11)计算任意节点在网络中的消息传播能力.由于本文利用演化图的方式获得动态网络演化快照序列,影响因子  $0 < \alpha < 1$  的选取必须满足  $\alpha < 1/\rho(A)$ ,即  $\alpha$  必须小于序列中所有快照的最大特征值的倒数.在本文所采用的 Trace 数据基础上,为降低计

算的复杂程度并尽可能准确分析节点的消息传播能力,本文工作参照文献[17]中作者的分析结果取相邻快照之间的时间窗口大小为  $\Delta t = 4.08$  小时.当  $\alpha$  取值较小时,

$$\sum_{m_1=0}^{\infty} \alpha^{m_1} (A_1)^{m_1} = I + \alpha A_1 + \alpha^2 A_1^2 + O(\alpha^3) \quad (13)$$

因此,  $A$  的计算可简化为

$$A = (I + \alpha A_1 + \alpha^2 A_1^2)(I + \alpha A_2 + \alpha^2 A_2^2) \cdots (I + \alpha A_k + \alpha^2 A_k^2) \quad (14)$$

为此本文工作分别取  $\alpha = \{0.01, 0.05, 0.1, 0.2\}$  计算网络中节点的消息传播能力.从图 3 看出,大量的节点的消息分发能力很小,而只有少量的节点具有较大的分发能力,呈现出极不均衡的特征.随着  $\alpha$  的取值从 0.01 增大到 0.2,消息分发能力强的节点逐渐减少,而消息分发能力弱的节点逐渐增加.

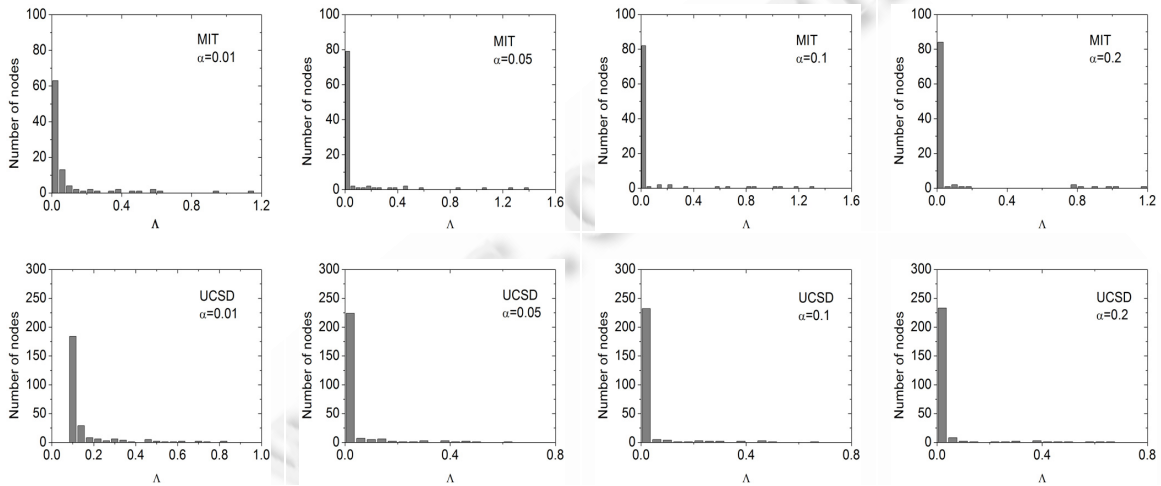


Fig.3 Distributions of node dissemination capability in MIT and UCSD with  $\alpha = \{0.01, 0.05, 0.1, 0.2\}$

图 3  $\alpha = \{0.01, 0.05, 0.1, 0.2\}$  时 MIT 和 UCSD 中节点消息分发能力的分布

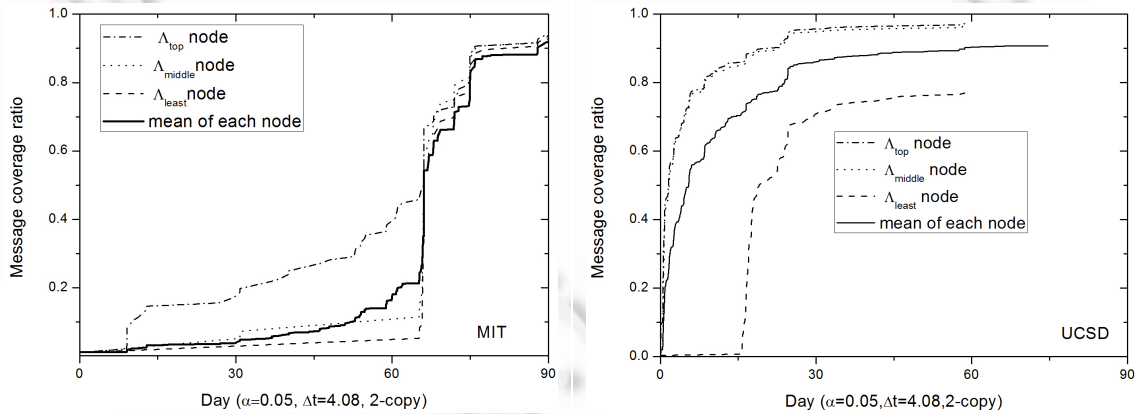


Fig.4 2-Copy dissemination capability of nodes with the highest, middle and least value in  $\bar{A}(i)$  vs. the mean speed of each node

图 4 具有不同的分发能力的节点以 2-copy 方式在网络中分发消息的速度与网络的平均效率对比

为考察具有不同消息分发能力节点的消息传播效率,本文将 MIT 和 UCSD 的实验数据中计算出的  $\bar{A}(i)$  按照传播能力排序,选取传播能力值最大、最小和中间值的节点,以 2-copy 的方式分别与以网络中每个节点为源



节点的 2-copy 方式传播的均值进行比较,考察从实验开始的 90 天内消息在网络中的覆盖情况.影响因子取  $\alpha = 0.05$  的实验结果如图 4 所示.可以看出,  $\bar{A}(i)$  中值最大的节点的传播速率明显高于中间值和 2-copy 的平均值,意味着这类节点具有最强的消息传播能力.

### 3.4 节点相遇速率与消息分发能力的关系

相遇速率(contact rate)表示节点与其他节点相遇的频繁程度,一定程度上刻画了节点在社会环境中的活跃程度.为考察频繁与其他节点相遇的节点对消息的分发能力,本文计算了 MIT 相遇记录中每个节点与其他节点的相遇次数,也称总连接度(total degree),并进而考察其与  $\bar{A}(i)$  中对应应的关系.结果如图 5 所示,一些节点具有相对较高的总连接度,但其消息传播能力却相对较小;另外一些节点虽然具有较小的总连接度,但却有较大的消息传播能力.这说明节点与网络中其他节点的相遇速率与节点的消息传播能力无明显相关性.

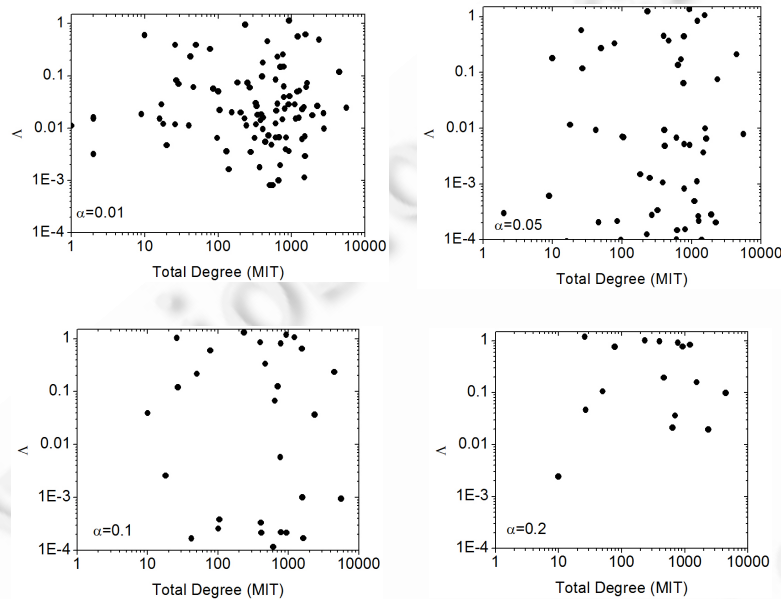


Fig.5 Node total contacts are not correlated with  $\bar{A}(i)$

图 5 节点相遇频率与  $\bar{A}(i)$  的相关性

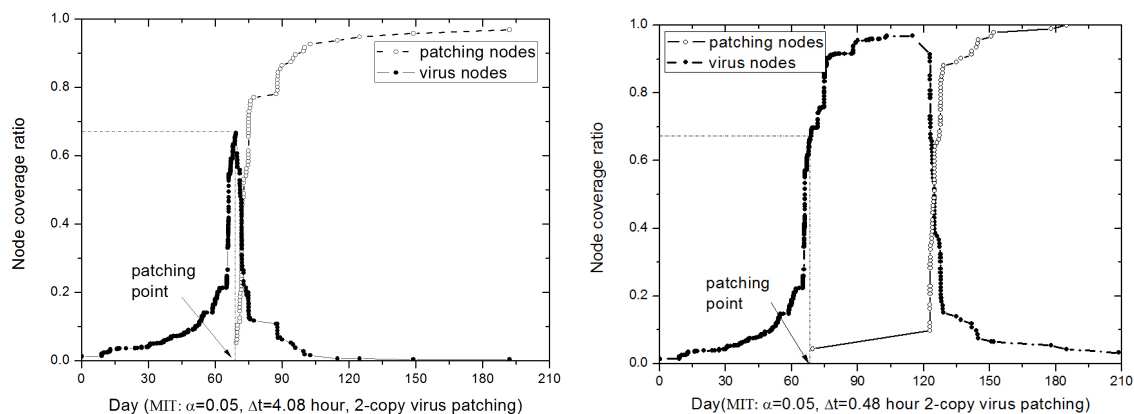
### 3.5 利用节点传播能力进行网络干预

前面本文通过计算向量  $\bar{A}(i)$  得到了每个节点的消息传播能力,在很多实际应用中(如定向广告,社会舆情传播)可借助传播能力强的节点进行有效的网络干预.

例如考虑以下情况:初始网络中一些移动节点上存在可通过 Bluetooth 接口进行传播的病毒,基本的传播模式假定为若节点 A 携带病毒代码且与节点 B 相遇,B 节点无病毒代码时,节点 A 即将病毒代码传染给节点 B.经过一段时间,网络中感染了病毒代码的节点达到一定密度(超过 60%).此时需要对网络进行干预,例如为向量  $\bar{A}(i)$  中值最大的若干个节点进行程序漏洞修补(patching)处理,使之具有清除病毒代码的能力,同时利用这些节点的消息扩散传播能力为网络中其他节点进行补丁处理.这一过程假定为:若节点 A 携带病毒代码,与携带 patch 的节点 B 相遇,则节点 B 将 patch 发送给节点 A,节点 A 运行 patch 代码将自身的病毒清除,在这个过程中节点 B 因具有 patch 而不会受到节点 A 的病毒代码的影响.本文通过实验的方法模拟了网络中病毒代码的传播和利用 patch 进行抑制的过程.

图 6 为在 MIT 实验中,某节点携带的病毒从实验开始即开始传播.当携带病毒代码的节点数在网络中超过 60%时,在第 70 天通过对 MIT 实验中  $\bar{A}(i)$  最大的 4 个节点和最小 4 个节点的进行 patch 的结果.



Fig.6 Patching the 4 Max and Min value nodes of  $\bar{A}(t)$  in MIT图 6 在 MIT 数据中模拟对  $\bar{A}(t)$  中 4 个最大值和最小值节点 patching 的过程

#### 4 结论与下一步工作

本文借助静态图中邻接矩阵乘积以及通路的概念,将社会网络分析中的 Katz 中心度概念扩展到动态演化网络中,通过利用演化图有机会社会网络建模,提出了一种快速计算网络中节点消息传播能力的方法.利用该方法对 MIT 和 UCSD 的实际 Trace 数据的计算和分析结果表明:(1) 具有社会性特征的机会社会网络中节点的消息传播能力极不均衡,少数节点具有在网络中较强的消息传播与分发能力;(2) 具有较强传播能力的节点对消息传播明显优于网络的平均效率;(3) 基于本文所提出的方法可有效计算和评估网络节点的消息传播能力,从而可对特定节点进行干预,以加速或抑制网络中消息传播的速度.

下一步,我们拟利用本文提出的方法,重点研究机会社会网络中的消息定向传播机制和算法,以及基于节点的时空相遇模式与消息传播特征挖掘人与人之间的社会关系.

#### References:

- [1] Xiong YP, Sun LM, Niu JW, Liu Y. Opportunistic networks. *Journal of Software*, 2009,20(1):124–137 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3467.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03476]
- [2] Conti M, Giordano S, May M, Passarella A. From opportunistic networks to opportunistic computing. *IEEE Communications Magazine*, 2010,48(9):126–139 [doi: 10.1109/MCOM.2010.5560597]
- [3] Newman MEJ. *Networks: An Introduction*. New York: Oxford University Press, 2010.
- [4] Avin C, Koucky M, Lotker Z. How to explore a fast-changing world. In: *Proc. of the 35th Int'l Colloquium on Automata, Languages and Programming (ICALP)*. Reykjavik: ICE-TCS, 2008. 121–132 [doi: 10.1007/978-3-540-70575-8\_11]
- [5] Scherrer A, Borgnat P, Fleury E, Guillaume JL, Robardet C. Description and simulation of dynamic mobility Networks. *Computer Networks*, 2008,52(15):2842–2858 [doi: 10.1016/j.comnet.2008.06.007]
- [6] Grindrod P, Higham DJ. Evolving graphs: Dynamical models, inverse problems and propagation. *Proc. of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2010,466(2115): 753–770 [doi: 10.1061/j.comnet.2008.06.077]
- [7] Casteigts A, Flocchini P, Quattrociocchi W, Santoro N. Time-Varying graphs and dynamic networks. In: *Proc. of the 10th Int'l Conf. on Adhoc Networks and Wireless (ADHOC-NOW)*. Paderborn, 2011. 346–359 [doi: 10.1080/17445760.2012.668546]
- [8] Santoro N, Quattrociocchi W, Flocchini P, Casteigts A, Amblard F. Time-Varying graphs and social network analysis: Temporal indicators and metrics. In: *Proc. of the 3rd AISB Social Networks and Multiagent Systems Symp. (SNAMAS)*. York, 2011. 32–38.
- [9] Prakash BA, Tong H, Valler N, Faloutsos M, Faloutsos C. Virus propagation on time-varying networks: Theory and immunization algorithms. In: *Proc. of the European Conf. on Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases (ECML/PKDD), PART III*. Barcelona: Springer-Verlag, 2010. 99–114.

- [10] Tang J, Scellato S, Musolesi M, Mascolo C, Latora V. Small-World behavior in time-varying graphs. *Physical Review E*, 2010, 81(5).
- [11] Yoneki E, Hui P, Crowcroft J. Wireless epidemic spread in dynamic human networks. In: *Bio-Inspired Computing and Communication*. Springer-Verlag, 2008. 116–132. [doi: 10.1007/978-3-540-92191-2\_11]
- [12] Grindrod P, Parson MC, Higham DJ, Parsons MC, Estrada E. Communicability across evolving networks. *Physical Review E*, 2011, 83. [doi: 10.1103/PhysRevE.83.046120]
- [13] Jacquet P, Mans B, Rodolakis G. Information propagation speed in mobile and delay tolerant networks. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2010, 56(10):5001–5015. [doi:10.1109/TIT.2010.2059830]
- [14] Tang J, Mascolo C, Musolesi M, Latora V. Exploiting temporal complex network metrics in mobile malware containment. In: *Proc. of the 12th IEEE Int'l Symp. on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM 2011)*. Lucca: IEEE, 2011. 1–9. [doi: 10.1109/WoWMoM.2011.5986463]
- [15] Nguyen NP, Dinh TN, Tokala S, Thai MT. Overlapping communities in dynamic networks: Their detection and mobile applications. In: *Proc. of the 17th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2011)*. Las Vegas: ACM, 2011. 85–96. [doi: 10.1145/2030613.2030624]
- [16] A community resource for archiving wireless data. <http://crawdad.cs.dartmouth.edu/>
- [17] Clauset A, Eagle N. Persistence and periodicity in a dynamic proximity network. In: *Proc. of the DIMACS Workshop on Computational Methods for Dynamic Interaction Network*. 2007.

#### 附中文参考文献:

- [1] 熊永平,孙利民,牛建伟,刘燕.机会网络.软件学报,2009,21(1):124–137. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3467.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03476]



蔡青松(1973—),男,河南唐河人,博士,副教授,主要研究领域为移动计算,传感器网络,移动 P2P 社会网络.



刘明珠(1988—),男,硕士生,主要研究领域为移动计算.



牛建伟(1969—),男,博士,教授,主要研究领域为嵌入式与移动计算,移动流媒体.