

银行账户交易复杂网络特性分析

吕芳, 张新琳, 王巍, 黄俊恒, 王佰玲

(哈尔滨工业大学(威海), 山东 威海 264200)

摘要: 首先基于银行账户交易的特点, 建立了一个有向加权的银行账户交易网络通用模型。进而, 根据复杂网络的定义, 从网络结构和节点 2 个层面, 验证了交易网络的复杂网络特性。其中, 网络结构特性包括静态特性(即无标度特性和小世界特性)和动态演化特性(即自组织特性)。此外, 使用吸引子特性验证了复杂网络节点的动力学特征。分析包含非法传销交易的真实银行交易数据, 得出如下结论: 该网络具有无标度特性、小世界特性、部分自组织特性和奇异吸引子。

关键词: 银行账户交易网络; 复杂网络; 无标度特性; 小世界特性; 自组织特性; 吸引子

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-109x.2019043

Analyzing the complex properties of bank account transaction network

LYU Fang, ZHANG Xinlin, WANG Wei, HUANG Junheng, WANG Bailing

Harbin Institute of Technology at Wei Hai, Weihai 264200, China

Abstract: Firstly, a general directed and weighted transaction network model is built on the basis of the transaction characteristics of bank accounts. Secondly, referring to the definition of complex network, the complex network properties of the transaction network are verified from two levels of network structure and node. The network structure properties includes static properties, named scale-free property and small-world property, and dynamic evolu-

收稿日期: 2018-12-15; 修回日期: 2019-02-12

通信作者: 王佰玲, wbl@hit.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2018YFB2004201, No.2017YFB0801804); 国家前沿科技创新专项基金资助项目 (No.2016QY05X10002-2); 国家区域创新中心科技专项基金资助项目 (No.2017QYCX14); 山东省重点研发计划基金资助项目 (No.2017CXGC0706); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目 (No.HIT.NSRIF.2020098); 2018 威海市大学共建基金资助项目

Foundation Items: National Key Research and Development Program of China (No.2018YFB2004201, No.2017YFB0801804), Frontier Science and Technology Innovation of China (No.2016QY05X10002-2), National Regional Innovation Center Science and Technology Special Project of China(No.2017QYCX14), Key Research and Development Program of Shandong Province (No.2017CXGC0706), The Fundamental Research Funds for Central Universities(No.HIT.NSRIF.2020098), 2018 University Co-construction Project in Weihai City

论文引用格式: 吕芳, 张新琳, 王巍, 等. 银行账户交易复杂网络特性分析[J]. 网络与信息安全学报, 2019, 5(4): 99-107.

LYU F, ZHANG X L, WANG W, et al. Analyzing the complex properties of bank account transaction network[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2019, 5(4): 99-107.

tion property, that is self-organization property. In addition, the attractor property is utilized for verifying the dynamical characteristic of complex network nodes. Finally, on the real bank account transaction data contains illegal pyramid marketing activities, the following conclusions were drawn: the network has scale-free property, small-world property, partially self-organization property and strange attractors.

Key words: transaction network of bank accounts, complex network, scale-free property, small-world property, self-organization property, attractor

1 引言

金融业作为国家经济的指示牌,关系到一个国家未来发展的前途与命运。而银行作为金融业的核⼼,其能否稳定运行对于国家经济安全至关重要。目前,非法传销、非法集资和洗钱等非法金融活动屡禁不止,这些非法活动一方面给国家经济安全带来了极大的隐患,另一方面其非法的资金运作严重影响了银行的正常运行秩序,因此打击非法金融活动势在必行。随着全球经济一体化进程的加速,非法金融活动逐渐呈现出形式多样、传播迅速、影响范围广等特点;而银行交易网络也呈现出交易群体众多、交易类型繁杂、交易量大等特点。因此,如何从海量的银行交易数据中识别异常情况,进而保障银行交易网络的正常运行具有重要意义。

银行交易网络涉及众多的银行账户及账户间的交易,其是否构成复杂网络(即是否具有复杂网络的特性)值得研究。在复杂网络建立的初期,研究者普遍认为网络是随机形成的,并把这些网络称为随机网络。直到小世界和无标度特性被提出以后,研究者开始尝试使用复杂网络这一新的理论来研究现实世界中各种大型复杂系统。对于银行系统而言,银行账户间通过资金周转形成了包含交易金额、交易时间、交易次数、交易形式等信息的交易关系网,信息的多样性、交易的时序性使上述网络具有复杂网络的特性。应用复杂网络理论来研究银行账户交易网络可以有效分析账户间的关系以及关系的变化、探讨交易网络的

特征及演变,进而有助于监管银行交易环境、预防非法金融活动在网络中蔓延。

2 相关工作

在过去几十年的研究中,世界各地学者运用复杂网络理论对不同国家的银行网络进行了探讨,大部分学者假设银行间具有一定的网络结构,但网络结构究竟如何目前仍没有定论。例如,Upper 等^[1]提出德国银行间网络呈现上下两层的双层网络结构;Cassar 等^[2]认为银行网络结构为局域网络和全局网络;Allen 等^[3]假定银行网络结构为完全网络结构与不完全网络结构;万阳松^[4]则提出银行网络是有向的无标度网络;Solorzano-Margain 等^[5]则假定墨西哥的金融系统网络为随机网络。

事实上,银行网络的实际结构特征并不完全如学者假设的那样。针对国外银行网络,一些学者展开了如下研究。Boss 等^[6]对奥地利银行间的网络结构进行了分析,实验表明该网络中交易金额分布及节点度分布均符合幂律分布。此外,该银行网络还具有明显的小世界特性,即具有较小的平均最短路径和较大的聚集系数。Souma 等^[7]对日本银行及金融公司两种类型的复杂网络特性进行研究,实验证明这两种银行网络具有无标度特性,且节点度分布符合幂律分布。Iori 等^[8]对意大利银行网络的研究表明,如果以度分布来衡量网络结构特征,则意大利银行网络结构是随机网络而不是无标度网络。

近年来,国内一部分学者基于复杂网络理论对我国银行网络结构及特性进行了实证研究。万阳

松^[4]通过建立银行间交易网络提出了双幂律银行网络结构模型; 侯明扬^[9]通过研究银行网络与复杂网络理论构建了一个与实际银行网络结构较为接近的无标度银行网络; 高鹏程^[10]利用银行交易系统中交易金额较大的数据记录建立一个带权复杂网络, 并验证了边权值分布、网络聚集系数等拓扑性质。

以往研究表明, 银行网络中节点、路径及局部拓扑结构等方面均具有复杂的关系, 使银行网络具有复杂网络的一些典型特征, 如节点度的幂律分布、无标度特性、小世界特性、层次结构、聚集结构等。此外, 一个国家的银行网络结构与实际经济发展状况、国家实时政策等因素密切相关。因此, 本文依据复杂网络理论对真实的银行交易网络特性进行分析, 包括账户节点度的概率分布、交易金额的概率分布、网络聚集系数等特性。

3 交易网络典型复杂网络特性分析

3.1 银行账户交易网络的数学模型

在银行账户交易中, 根据银行账户的交易数据, 可将账户间的关系构建成一个有向加权网络图结构, 其中银行账户被视为网络节点, 账户间的有向交易关系被视为节点间的有向边, 两账户间的交易时间、交易金额、交易频次等信息被视为有向边的权重。银行账户交易网络 G 的定义如下。

定义 1 将银行账户交易网络表示为 $G = (V, E, W)$, 其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为银行账户集合, $E = \{e_{ij}\}, E \subseteq V \times V, 1 \leq i, j \leq n$ 为有向边集合, $e_{ij} = \langle v_i, v_j \rangle$ 表示 v_i 到 v_j 的有向边, $e_{ij} \neq \emptyset$ 表示当且仅当 v_i 到 v_j 产生过至少一次交易。 $W = \{w_{ij}\}, W \subseteq (R^+)^{Nt}$, $w_{ij} = (r_{ij}^{(1)}, r_{ij}^{(2)}, \dots, r_{ij}^{(Nt)})$, 其中, $r_{ij}^{(k)}$ 和 Nt 分别表示节点 v_i 到 v_j 的第 k 次交易金额和总交易次数。

3.2 电信复杂网络特性分析

钱学森曾针对复杂网络给出一种严格的定

义: 具有自组织、自相似、吸引子、小世界、无标度中部分或全部性质的网络称为复杂网络。对复杂网络特性的分析主要包括 3 个方面: 网络拓扑结构复杂性、节点动力学复杂性、复杂性解释。无标度特性是一种对网络的异质性进行评价的指标。小世界特性从局部和全局两方面对网络拓扑结构进行描述。自组织特性是对网络结构异构性的刻画。吸引子是对网络中节点动力学行为复杂性的描述。自相似特性用来对网络为什么复杂进行解释。本文从无标度特性、小世界特性、自组织特性及吸引子特性 4 个方面, 分析账户交易网络的复杂网络特性。

3.2.1 无标度特性

随机网络中节点度分布服从泊松分布, 即节点度比平均值高很多或低很多的节点都十分少见。然而, 现实世界的大部分网络不属于随机网络范畴, 只有少数节点拥有大量的连接, 其余大部分节点连接很少, 其中节点度数甚至相差几个数量级。无标度特性用来表示上述网络中节点度数的异质性。

在复杂网络中, 节点的度是指和该节点相关联的节点个数, 又称为关联度。在有向图 $G' = (V', E')$ 中, 节点的度通常包含两种类型: 入度和出度; 节点 $v_i \in V'$ 的入度为集合 $V_{ji} = \{v_j | v_j \in V', e_{ji} \in E'\}$ 的大小; 节点 v_i 的出度为集合 $V_{ij} = \{v_j | v_j \in V', e_{ij} \in E'\}$ 的大小。根据定义, 在银行账户交易网络 G 中, 账户节点 v_i 的转入节点个数为 v_i 的入度, v_i 转出交易目标账户节点的个数为 v_i 的出度。

网络具有无标度特性的判断依据为: 网络中节点度数服从幂律分布。其幂律分布表达式为 $P(k) = ck^{-r}$, 其中, $P(k)$ 为网络中度为 k 的节点在整个网络中所占的比例, c 为幂律分布系数, r 为幂律分布指数。因此, 可以通过验证网络中节点度分布是否符合幂律分布, 验证网络是否具有无标度特征, 即验证 $P(k) \sim k^{-r}$ 。

3.2.2 小世界特性

小世界特性是评价复杂网络结构特性的重要指标。通常使用 2 个特征来衡量：平均最短路径长度和聚集系数。

(1) 网络平均最短路径长度

在网络结构中，将连通任意两节点的最少边数定义为节点对的最短路径长度。平均最短路径长度定义为网络中所有节点对之间最短路径的算术平均值。其数学公式表达为

$$L = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad (1)$$

其中， n 为网络中节点个数， d_{ij} 为节点对 i, j 之间的最短路径长度。由式(1)可知， L 表示全局网络结构特征。

(2) 聚集系数

聚集系数为网络中任意两节点间相连的概率，代表网络中节点连接的紧密程度。聚集系数越大，说明网络中越倾向于含有群体结构。

聚集系数分为全局聚集系数、局部聚集系数和平均聚集系数。全局聚集系数评估的是网络整体集聚程度，描述整个网络节点邻居之间的亲密程度。计算方法常采用基于 triplet 算法，其算法思想为：一个图中所有闭三点组占所有连通三点组（包括开/闭）的比例，数学表达式为 $C_w = \frac{G_{\Delta}}{G_{\Delta} + G_{\Delta}}$ ，其中 C_w 为全局聚集系数， G_{Δ} 表示图中闭三点组的个数， G_{Δ} 表示图中开三点组的个数。局部聚集系数 C_i 用来评估网络中单个节点的集聚程度，评价标准为节点与其相连节点的联通程度。局部聚集系数计算方法为，首先计算出所有与指定节点 v 相连的顶点之间所连边的总数量，然后计算其与这些顶点之间（不含指定点 v ）可以连出的最大边数的比值，即可得到局部聚集系数。网络平均聚集系数定义为节点局部聚集程度的等权平均，表示为 $C_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$ 。显然，平均

聚集系数在一定程度下可以刻画整个网络节点邻居之间的亲密关系。

复杂网络具有小世界特性的判断依据为具有较小的平均最短路径长度和较大的聚集系数。本文采用 Sporns 提出的小世界系数转换不等式进行验证。如果一个网络的聚集系数 C_a 与平均最短路径长度 L 满足不等式 $\frac{C_a}{C_{\text{ran}}} > \frac{L}{L_{\text{ran}}}$ ，那么该网络具有小世界特性，其中 C_{ran} 和 L_{ran} 分别代表同等规模的随机网络的聚集系数和平均最短路径长度。

3.2.3 自组织特性

随着节点的加入、连接的重建等因素，网络中节点的度分布会发生变化，这种网络拓扑结构的变化称为网络的异构性，可以用网络的熵来衡量。

网络的熵最早由文献[11]提出，用于测量网络结构复杂性。在此基础上，大量学者从不同角度对复杂网络中的熵概念进行了定义，包括 Wu 结构熵^[12]，DD 度分布熵^[13]等。Wu 结构熵根据节点拥有边的相对数量的概率分布的不稳定性来反应网络的异构性。定义为

$$H_{w_u} = - \sum_{k=1}^N \frac{d_k}{\sum_{i=1}^N d_i} \log \left(\frac{d_k}{\sum_{i=1}^N d_i} \right) \quad (2)$$

其中， d_k 为节点 k 的度数， N 为网络规模，Wu 结构熵的最小值为在同等网络规模下，星形网络结构的熵值： $H_{w_u}^{\min} = \frac{1}{2} \log 4(N-1)$ ；最大值对应于最近邻耦合网络： $H_{w_u}^{\max} = \log N$ 。

本文采用 Wu 结构熵来衡量网络无序程度的变化趋势。如果随着网络规模增大，熵值变小且取值介于 $\frac{1}{2} \log 4(N-1) \sim \log N$ 之间，则说明该网络具有自组织特性。

3.2.4 吸引子特性

网络的构建基础是节点及节点间的交互关系。复杂网络的研究，除了从宏观角度分析网络

结构的动静态特性, 还包括对节点动力学行为复杂性的分析。节点的信息是由背后一个不可观测的非线性系统产生的, 因此, 可将节点本身视为一个动力学系统。吸引子可用来表示系统的收敛状态, 不同的收敛状态对应不同类型的吸引子。吸引子可分为3种: 不动点吸引子、极限环吸引子和奇异吸引子。不动点吸引子和极限环吸引子的维数都是一个正数, 奇异吸引子具有分形维, 也就是空间维度为小数。收敛到奇异吸引子的系统具有混沌属性。最大 Lyapunov 指数和关联维数可用来判断吸引子的类型, 进而检测系统是否为混沌的。

相空间重构技术, 通过节点时序信息反向构造出原系统的相空间结构, 将原系统的收敛规律嵌入可计算的等价空间中。Takens^[14]提出一种延迟坐标向量, 由一维观测序列得到相空间的延迟坐标法。

对于账户交易网络中任意节点, 若其观测序列可表示为 $X = \{x(1), x(2), \dots, x(N)\}$, $t = 1, 2, \dots, N$ 。利用延迟坐标法得到 X 的嵌入维为 m , 时延为 τ , 则节点的相空间可由状态向量 $y(t)$ 构成, 如式(3)所示。

$$y(t) = [x(t), x(t+\tau), \dots, x(t+(m-1)\tau)] \quad (3)$$

$$Y = [y_1, y_2, \dots, y_{N'}]_{m \times N'} \quad (4)$$

其中, Y 为相空间中状态分量的转移矩阵, 包含了 X 中的所有信息。

本文利用轨迹跟踪法和 G-P 算法^[15]计算相空间中的最大 Lyapunov 指数和关联维。如果最大 Lyapunov 指数为正且关联维为小数, 则说明系统具有混沌属性, 系统收敛到奇异吸引子。

4 交易网络典型复杂网络特性实验

不同于常规金融交易网络, 当资金交易网络中包含大型非法金融活动时, 其网络特性会发生显著变化, 本节对包含非法传销组织的真实资金

交易网络进行实例分析。

4.1 实验数据

数据源于某经侦部门提供的资金交易记录数据, 其中包含大量参与非法传销产生的资金交易。数据中涉及多个传销团伙, 每个团伙的资金独立运作。该传销属于线下聚集型传销, 即会员通过拉人头的形式发展下线, 并实现升级; 下线以缴纳会员费的形式称为会员, 具有唯一上线; 团伙的顶层会员为主要资金获利者, 底层会员按照层级从下线的会员费中获得返利。资金交易数据为账户集合从 2014 年到 2018 年 4 月的银行卡交易记录, 每条记录包括交易账号、交易时间、交易方式、交易金额、交易次数等信息。真实数据中含有大量支付宝、服务费等交易, 本文将其被视为构建账户交易网络的噪声数据清洗掉。以年为单位, 账户交易网络的规模如表 1 所示。

表 1 账户交易网络规模年增长情况

年份	网络节点数	网络边数
2014	860	921
2015	35 842	100 944
2016	107 253	314 813
2017	173 333	426 343
2018	176 133	429 528

表 1 为截至 2018 年 4 月, 账户交易网络中节点数量、边数量的增长情况。最终用于实验的有效银行交易数据为 5 659 264 条, 交易网络的有效节点为 176 133 个, 有效边数为 429 528 条。

4.2 无标度特性实验

本节分别对交易网络中节点和交易金额的分布进行分析。

4.2.1 节点度分布

根据节点度的定义, 本文利用实验数据对上述网络中节点的入度和出度分别进行统计分布实验, 并绘制了度分布散点图以及双对数散点图。实验结果如图 1~图 4 所示。从图 2 和图 4 中可以看出, 节点的入度及出度在对数刻度下呈现出一

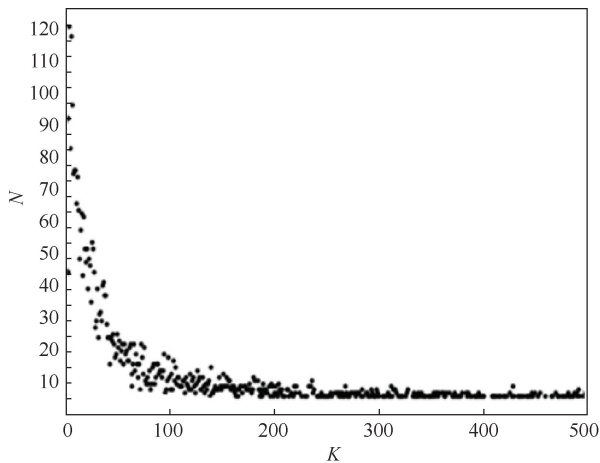


图1 节点入度分布图

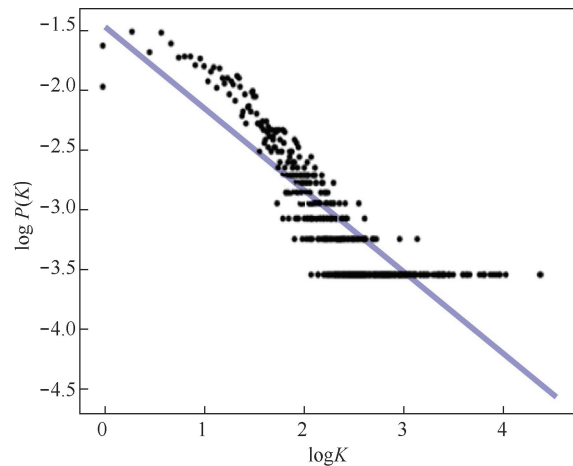


图2 节点入度分布双对数图

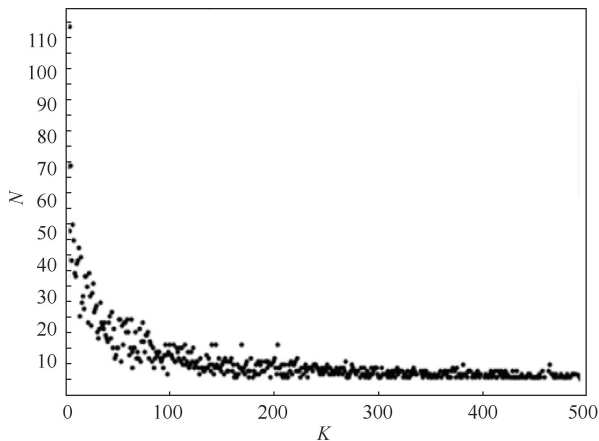


图3 节点出度分布图

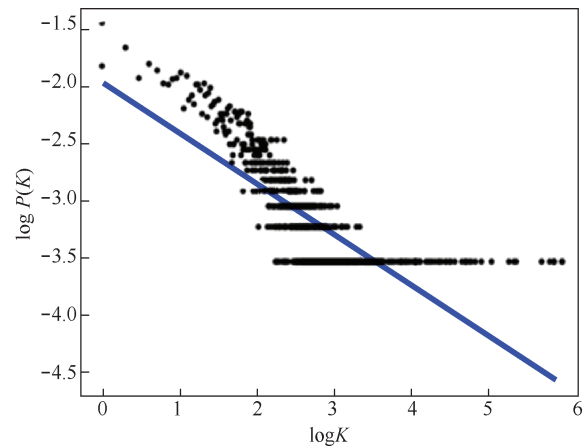


图4 节点出度分布双对数图

定的线性衰减趋势,表明该银行账户交易网络在一定程度上服从幂律分布。

对节点度的统计分布进行分析,得到节点入度、出度分布的回归系数分别为 $r_1=0.680\ 296\ 84$, $r_2=0.441\ 612\ 39$ 。理论上,当网络中节点度分布函数的幂律指数满足(回归系数)在 2~3 之间时,可认为其节点度分布符合幂律分布。传销组织的组织架构呈金字塔形,相应地,其账户间的资金交易呈现类树形结构。由于数据集中的交易数据大部分由传销账户产生,因此从节点的度分布角度来看,其不符合幂律分布。然而,依据双对数散点图可以拟合为一条直线,仍然可以认为该网络中节点度的分布符合幂律分布。

综上,该网络的度分布部分服从幂律分布,即该网络具有无标度特性。说明在账户交易网络

中,节点的连接状况具有不均匀分布性,即存在少数对整个复杂网络的运行起主导作用的度数较大的节点。这一特性说明,账户交易网络中,存在少数交易活动比较活跃的账户,其与其他账户交易频繁且交易范围广泛。因此,这类节点在网络中起着重要的枢纽作用,能够提高整个网络的连通性。在后续的研究中,将以这些具有较高节点度的节点为中心展开对网络具体内容的研究。

4.2.2 交易金额分布

在节点度分布实验后,本文对每一条交易记录的交易金额进行统计,得到该银行账户交易网络中交易金额的分布。由于数据量大、交易金额种类繁多,需要将交易金额划分区间后再进行分析,几次实验后本文选择以 1 000 为额度划分区间,进行交易金额的分布情况分析。银行交易网络的

交易金额分布如图5所示。

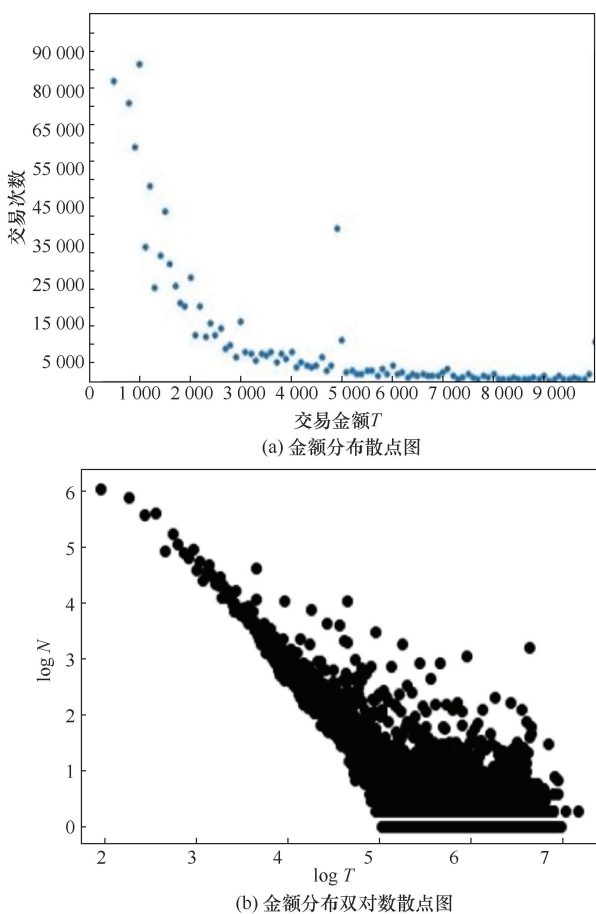


图5 银行交易网络的交易金额分布

由图5(a)可得交易金额在1000以内的交易次数达到了90000多次,而交易金额大于5000的交易次数极少。基于以上统计分析,可以得到交易网络中交易金额基本符合幂律分布。交易金额在双对数坐标系下的分布如图5(b)所示,交易金额的双对数分布散点图可以拟合为直线,进一步验证了交易金额服从幂律分布。

4.3 小世界特性

本节分别对账户交易网络中的平均最短路径长度和聚集系数进行实验,进而分析该网络的小世界特性。

根据平均最短路径长度的定义,本文利用弗洛伊德算法计算网络的平均最短路径长度,得到网络的平均最短路径长度为4.066 666 67。通过对

网络平均最短路径长度的计算可知,在该银行账户交易网络中,一个账户平均需要经过4个账户即可与网络中任意一个账户进行交易,以上分析表明,该银行账户交易网络具有典型的小世界网络特性。

按照聚集系数的定义,使用上述实验数据计算得到全局聚集系数为 $1.279\ 9 \times 10^{-5}$,平均聚集系数为0.047 7。由于传销组织交易关系的类树形结构,导致网络的聚集系数偏小。此外,从实际计算结果可以了解到,该银行账户交易网络的特点是局部聚集系数远高于全局聚集系数,表明由所有有效的经济侦查数据构成的交易网络中的单节点的聚集程度高于整体聚集程度。

在同等网络规模下,随机网络的聚集系数为 $C_{\text{ran}} = 6.636\ 8 \times 10^{-5}$,平均最短路径长度为 $L_{\text{ran}} = 3.814\ 5$,由平均最短路径和聚集系数的计算结果,可以得到该银行账户交易网络的平均最短路径与聚集系数满足关系式 $\frac{C_a}{C_{\text{ran}}} > \frac{L}{L_{\text{ran}}}$,因此该银行账户交易网络具有小世界网络特性。

4.4 自组织特性

账户交易网络的规模,从2015年初的1024个节点、1152条边扩大到2017年底的173333个节点、426343条边。为了研究网络结构的演化,本文首先以3个月为时间窗口对网络生长的时间轴进行切分,研究网络生长到每个时间片时的Wu结构熵。2015年到2017年的Wu结构熵如图6所示。

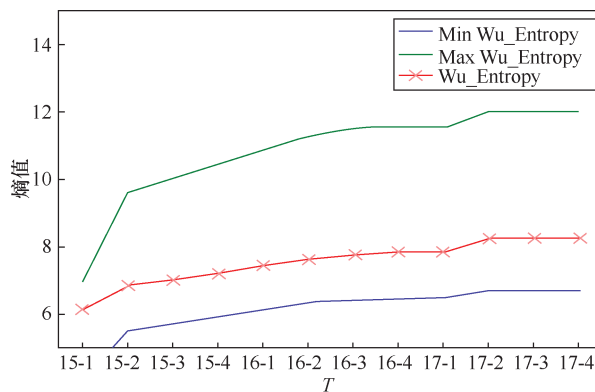


图6 账户交易网络演化Wu结构熵

由图 6 可知, 横坐标表示从 2015~2017 年的时间片划分, 纵坐标表示当前时间片下网络规模的熵值。图中绿色和蓝色曲线分别表示随网络演化最大熵值 $H_{Wu}^{\max}$ 和最小熵值 $H_{Wu}^{\min}$ 的变化趋势。红色虚线表示真实账户交易网络的 Wu 结构熵值的变化趋势。可见, Wu 结构熵值呈现递增的趋势, 意味着网络在朝着更无序的方向发展, 表示当前网络不符合自组织特性。结合数据中的实际情况, 本数据中包含的传销组织类型为线下的聚集型传销, 此种传销类型具有当一个传销组织发展到一定规模后, 会衍生出一个新传销组织的现象。这种现象不同于传统网络中, 组织内部的联系随时间演化持续增强的趋势。笔者认为, 这种新组织的衍生和原组织的裂变, 导致该涉及传销组织的账户交易网络的 Wu 结构熵增大。此外, Wu 结构熵值一直在最大和最小熵值之间波动, 这一现象符合网络的自组织特性。总体来说, 当前网络具有部分自组织特性。

4.5 吸引子特性

在账户交易网络中任意选择一个节点 v , 得到其一维观测数据 X_v 。 X_v 由节点 v 的交易金额按照交易发生时间排列得到, 其中, 进交易表示为正金额, 出交易表示为负金额。首先, 利用平均位移法得到最佳延迟时间间隔 $\tau=5$; 然后, 利用 G-P 算法, 绘制 $\tau=5$ 时, 嵌入维数等于 35~85 时, $\ln(C(r))-\ln(r)$ 曲线如图 7 所示。

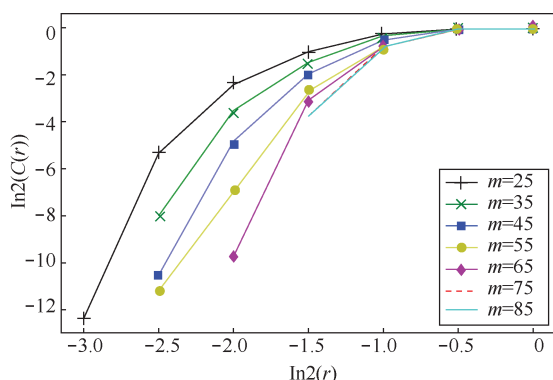


图 7 账户交易时间序列的关联积分

由图 7 可知, 当 $m>35$ 时, 曲线的斜率变化开始趋向于稳定; 当 $m>55$ 时, 曲线几乎重叠, 说明斜率 $D(m)$ 趋于收敛, 由此得到重构相空间的嵌入维数 $m=55$ 。进一步对 $m=55$ 时的 $\ln(C(r))-\ln(r)$ 曲线做线性回归分析, 得到饱和关联维 $D(m=55, \tau=5)$ 为 2.830 4 是一个分数维, 最大 Lyapunov 指数曲线的斜率为正 (正最大指数), 两者符合混沌属性的特征, 说明节点系统收敛到奇异吸引子, 即交易网络中的账户节点具有动力学特征。

5 结束语

本文借助复杂网络分析技术验证了具有特定性质的银行账户交易网络的复杂网络特性。首先, 建立银行账户交易的有向加权网络; 然后, 分别从动静态网络特性和节点动力学特性 2 个层面展开复杂网络特性分析。本文主要分析了账户交易网络的无标度特性、小世界特性、自组织特性及吸引子特性。对真实的包含大型非法传销账户的交易网络进行实例分析, 得到以下结论: 该网络具有无标度特性、小世界特性、部分自组织特性及奇异吸引子类型。

本文从宏观角度对账户交易网络进行定性分析, 证实了银行交易网络属于复杂网络的研究范畴, 为后续细粒度的定量研究网络中的异常行为奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] UPPER C, WORMS A. Estimating bilateral exposures in the German interbank market: is there a danger of contagion[J]. Discussion Paper, 2002, 48(4): 827-849.
- [2] CASSAR A, DUFFY N. Contagion of financial crises under local and global networks[M]. Agent-Based Methods in Economics and Finance. 2002: 111-131.
- [3] ALLEN F, GALE D. Financial contagion[J]. Journal of Political Economy, 2000, 108(1): 1-33.
- [4] 万阳松, 陈忠, 陈晓荣. 复杂银行网络的宏观结构模型及其分析[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(7): 1161-1164.

- WAN Y S, CHEN Z, CHEN X R. Analysis of macro-structure model of complex banking networks[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(7): 1161-1164.
- [5] MARTINEZ-JARAMILLO S, ALEXANDROVA-KABADJOVA B, BRAVO-BENITEZ B, et al. An empirical study of the Mexican banking system's network and its implications for systemic risk[J]. Journal of Economic Dynamics and Control, 2014, 40(Complete): 242-265.
- [6] BOSS M, ELSINGER H, SUMMER M, THURNER S. Network topology of the interbank market[J]. Quantitative finance, 2004, 4(6): 677-684.
- [7] SOUMA W, FUJIWARA Y, AOYAMA H. Complex networks and economics[J]. Physica A, 2003, 324(1-2): 396-401.
- [8] IORI G, MASI G D, PRECUP O V, et al. A network analysis of the Italian overnight money market[J]. Journal of Economic Dynamics and Control, 2008, 32(1): 259-278.
- [9] 侯明扬. 基于复杂网络的银行危机传染研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2008.
- HOU M Y. Research on the contagious of banking crisis based on complex network[D]. Qingdao: Qingdao University, 2008.
- [10] 高鹏程. 大额支付系统地区间资金流网络拓扑性质研究[D]. 成都: 西南财经大学, 2011.
- GAO P C. The topology of payment flows between provinces over HPVS[D]. Chengdu: Southwestern University of Finance And Economics, 2011.
- [11] RASHEVSKY N. Life, information theory, and topology[J]. The Bulletin of Mathematical Biophysics, 1955, 17(3): 229-235.
- [12] 吴俊, 谭跃进, 邓宏钟, 等. 无标度网络拓扑结构非均匀性研究[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(5): 101-105.
- WU J, TAN Y J, DENG H Z, et al. Heterogeneity of scale-free network topology[J]. System Engineering Theory and Practice, 2007, 27(5): 101-105.
- [13] SOLE R V, VALVERDE S. Information theory of complex networks on evolution and architectural constraints[M]. Complex Networks. 2004: 189-207.
- [14] TAKENS F. Detecting strange attractors in turbulence[J]. Dynamical Systems and Turbulence. 1981: 366-381.
- [15] 程代展. 非线性系统的几何理论[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- CHENG D Z. Geometric theory of nonlinear system[M]. Beijing: Science Press, 1988.

[作者简介]



吕芳 (1990-), 女, 山东阳谷人, 哈尔滨工业大学(威海)博士生, 主要研究方向为复杂网络、信息内容安全、数据挖掘。



张新琳 (1996-), 女, 山东临朐人, 主要研究方向为信息内容安全。



王巍 (1975-), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士, 哈尔滨工业大学(威海)讲师、硕士生导师, 主要研究方向为金融安全、数据挖掘、自然语言处理。



黄俊恒 (1966-), 男, 河南新乡人, 哈尔滨工业大学(威海)副教授, 主要研究方向为数据挖掘、人工智能。



王佰玲 (1978-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工业大学(威海)教授、博士生导师, 主要研究方向为信息对抗、信息安全、信息搜索、移动网络、金融安全。