



计算机科学

COMPUTER SCIENCE

一种启发式的互联网多层网络模型构建方法

程秋云, 刘京菊, 杨国正, 罗智昊

引用本文

程秋云, 刘京菊, 杨国正, 罗智昊. 一种启发式的互联网多层网络模型构建方法[J]. 计算机科学, 2022, 49(11A): 210800249-6.

CHENG Qiu-yun, LIU Jing-ju, YANG Guo-zheng, LUO Zhi-hao. [Heuristic Method for Building Internet Multilayer Network Model](#) [J]. Computer Science, 2022, 49(11A): 210800249-6.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于启发式搜索特征选择的加密流量恶意行为检测技术](#)

Detection of Malicious Behavior in Encrypted Traffic Based on Heuristic Search Feature Selection
计算机科学, 2022, 49(11A): 210800237-6. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210800237>

[具有突触规则的脉冲神经网络系统综述](#)

Survey on Spiking Neural P Systems with Rules on Synapses

计算机科学, 2022, 49(8): 217-224. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220300078>

[企业内部工业互联网现状与发展对策研究](#)

Study on Development Status and Countermeasures of Industrial Intranet in Enterprises

计算机科学, 2022, 49(7): 1-9. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210900029>

[基于混合软件定义网络的单节点故障保护方法](#)

Single Node Failure Routing Protection Algorithm Based on Hybrid Software Defined Networks

计算机科学, 2022, 49(2): 329-335. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210100051>

[基于改进鲸鱼算法的无人机三维路径规划](#)

Three-dimensional Path Planning of UAV Based on Improved Whale Optimization Algorithm

计算机科学, 2021, 48(12): 304-311. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.201000021>

一种启发式的互联网多层网络模型构建方法

程秋云 刘京菊 杨国正 罗智昊

国防科技大学电子对抗学院 合肥 230037

网络空间安全态势感知与评估安徽省重点实验室 合肥 230037

(cqycheng45@nudt.edu.cn)

摘要 随着网络规模不断扩大,网络结构层次化、模块化的特征日益凸显,传统单层网络研究范式在表征各类网络系统之间的复杂关系时存在一定的局限性,针对多层网络的特性分析和模型构建逐渐成为了复杂网络研究的重要方向。文中针对互联网在应用过程中呈现出的多层网络结构特点,提出了面向互联网的多层网络模型以及在互联网领域构建多层网络模型的意义。通过分析互联网数据特点,设计了涵盖互联网基础设施层、业务应用层和用户账号层的3种类型网络的多层网络模型。文中从单层网络入手,针对当前基于节点度数的网络生成模型无法刻画网络核数分布情况的不足,提出了一种启发式的单层网络生成模型;在单层网络生成模型的基础上,设计了多层网络的层间关联方法,实现了多层网络的模型构建。

关键词: 互联网;启发式;核数分布;多层网络;模型构建

中图法分类号 TP393

Heuristic Method for Building Internet Multilayer Network Model

CHENG Qiu-yun, LIU Jing-ju, YANG Guo-zheng and LUO Zhi-hao

College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China

Anhui Province Key Laboratory of Cyberspace Security Situation Awareness and Evaluation, Hefei 230037, China

Abstract With the continuous expansion of network scale, the characteristics of hierarchical and modular network structures are increasingly prominent. Traditional single-layer network research paradigm has some limitations in representing the complex relationships among various network systems. The characteristic analysis and model construction of multilayer networks have gradually become an important direction of complex network research. Aiming at the characteristics of multilayer network structure presented in the application of Internet, this paper puts forward the multilayer network model for the Internet and the significance of constructing a multilayer network model in the field of Internet. By analyzing the characteristics of Internet data, this paper designs a multilayer network model covering three types of networks, namely, the Internet infrastructure layer, the business application layer, and the user account layer. This paper proposes a heuristic single-layer network generation model to solve the problem that the current network generation model based on node degree cannot describe the distribution of network cores. Based on the generation model of a single-layer network, the interlayer association method of a multilayer network is designed to realize the model construction of a multilayer network.

Keywords Internet, Heuristic, Core distribution, Multilayer network, Model construction

1 引言

复杂网络自18世纪被提出之后,一直是网络科学研究的热点,从最初的简单图,到随后的规则图、ER随机图、WS小世界网络、BA无标度网络模型,再发展到如今各式各样的模型,利用复杂网络建模方法来研究实际系统已经在各领域得到了广泛应用。

近年来,随着对网络建模研究的不断深入,人们逐渐发现单层网络在刻画客观复杂事物特性中存在一定不足,于是开拓了针对多层网络^[1-4]的研究。目前关于多层网络的研究主要从两个方面入手。一方面主要探索多层网络的概念结构和规律特性等^[1-7]。Boccaletti等^[1]对多层网络的概念、结构特性和测度指标进行了阐述。Kivela等^[2]在单层网络衡量参数的基础上,扩展了多层网络的衡量参数体系,并提出了社团结

构、连接组件和张量分解等新概念。Zhang^[3]从多层复杂网络的概念、理论模型和应用等3个方面梳理了近期研究比较有代表性的研究成果。另一方面是倾向于研究多层网络的模型构建方法。已有的多层网络模型主要针对社交关系网络、基础设施网络、生物网络^[8-12]等,而针对人造规模最大的计算机互联网络,对其多层结构特性和建模方法的研究还较少。

因此,本文针对互联网多层网络架构特性,从单层网络入手,设计了一种符合实际互联网特征的启发式单层网络生成模型,基于单层网络的建模策略,结合计算机互联网的多维结构特征构建3层网络模型,设计了多层网络生成算法。本文的主要工作如下:

(1)提出了一种启发式的基于核数生成的网络模型(CGN模型),相比之前的模型^[13],在核数分布与实际网络

一致的基础上,能够有效提高分布和其他常见网络特征指标的符合度。

(2)首次提出了面向网络空间的多层网络概念,针对互联网多维结构特征,构建网络空间领域三层网络模型。以路由网络、邮件地址网络、用户社交网络实例为原型,构建了典型互联网三层网络模型,为网络安全态势展现、开展网络安全领域脆弱性分析评估提供了模型支持。

2 多层网络建模研究现状

2.1 多层网络生成模型

目前,多层网络建模仍然处于起步阶段,Magnani等^[8]基于微博数据建立了多层复杂网络模型,分析了用户的归属以及在同一时间内不同网络间的交互。Bi^[9]建立了铁路航空多层复杂网络的拓扑模型,并分析其拓扑性质以及脆弱性变化,识别网络中的关键组件,对当前的交通网络提出了相应的保护策略。多层网络生成模型可以分为两类。一类是增长的多层网络模型,这类模型中节点数量按照广义的优先连接规则逐步增长^[5,10-13]。这些模型从简单的、基本的动力学规律出发,解释了多层网络的演化过程。这类模型的构成过程如下:1)增长,在每一个时间步长内,在多层网络中的每层中同时添加一个新的节点,各层中新节点通过 m 条链接连接到同一层的其他节点;2)广义优先连接,新节点按照层内、层间的连接概率选择网络中的已有节点进行连接。另外一类是多层网络复合模型,即将多层网络看作是层间满足一定的结构约束^[14-16]的单层网络的集合。这些集合能够产生具有度相关和重叠性可控的多层网络。这类模型的思想是先考虑每一个网络层的生成再考虑层与层之间的连接,其中每一层按照传统单层网络的静态模型生成;给定每一层的节点度序列,使用配置模型来获得给定连接集的特定网络实现。层与层之间的连接有两种方式:一种是任意添加层间连接的方式^[17-18],另一种是通过给定联合度分布的方式来指定层间连边。虽然文献中通常使用术语“联合度序列”“联合度矩阵”和“联合度分布”来表示与简单网络中链路末端节点度数相关的数量,但这里它们明确地指层间的连接^[19]。

在构建多层网络的过程中,任何一种网络模型的选择都会给现有的研究施加某些约束条件,每一种网络模型都对应一类网络的集合,即满足模型隐式施加约束的一组网络。计算机互联网是一个典型的复杂网络系统,多源数据往往具有多种类型关联,使得计算机网络系统具有多层网络特征。因此,研究符合实际网络特征的网络安全多层网络的生成模型是非常重要的。

2.2 典型网络模型衡量指标

(1)节点度、度分布、平均度

复杂网络中节点 i 的度 k_i 定义为与该节点连接的所有边的数量,所有节点度数总和的平均值称为平均度。 $p(k)$ 表示网络中度数为 k 的节点占有所有节点的比例,用于表示网络中节点度的分布情况,如果网络中有 N 个节点,度数为 k 的节点有 n_k 个,则:

$$p(k) = \frac{n_k}{N} \quad (1)$$

(2)核数、核分布

复杂网络的 k 核定义为依次移除网络中度数 $k-1$ 的

节点后剩下的子图,如果一个节点在网络的 k 核中,而不在 $k+1$ 核的图中,则该节点为 k 核。 $g(k)$ 表示网络中核数为 k 的节点占有所有节点的比例,用于表示网络中节点核分布情况,如果网络中有 N 个节点,核数为 k 的节点有 n_k 个,则:

$$g(k) = \frac{n_k}{N} \quad (2)$$

(3)平均路径长度

复杂网络的平均路径长度 L 定义为网络中任意两点 i 和 j 之间最短路径长度 d_{ij} 的平均值,通常用这一指标来衡量网络的效率,网络的平均路径长度越小,通常认为网络的效率越高。其具体表达式为:

$$L = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad (3)$$

(4)网络直径

复杂网络中网络直径 D 定义为网络中所有节点间距离的最大值。

$$D = \max_{i,j \in N} d_{ij} \quad (4)$$

3 互联网的多层网络结构分析

随着网络规模的不断扩大,互联网中形成了各式各样的网络,除了底层的网络设备形成互联网,在应用层形成了多种业务系统关联的网络,在用户层形成了各种网络帐号关联网络,整个互联网呈现多元、异构和分层的特点。传统单层网络无法刻画出互联网数据的多维特征,因此有必要建立互联网领域多层网络模型。本文从基础设施层、业务应用层、用户角色层这3层提出了针对互联网的多层网络结构,如图1所示。

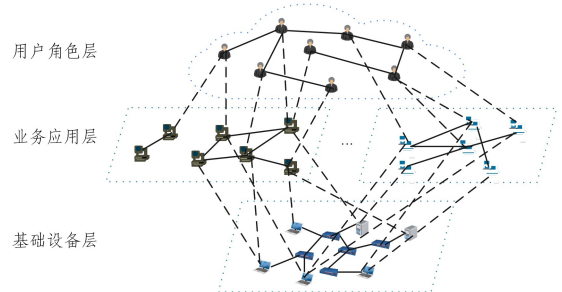


图1 模型结构

Fig.1 Model architecture

基础设施层是由各种网络设备通过物理链路互联建立的实体网络,其节点主要包括路由器、交换机、服务器等;业务应用层主要是由各种应用系统在进行各种业务应用通信过程中形成的逻辑网络。其节点主要包括,由于互联网中运营的业务系统很多,因此不同类型的业务系统可能会形成各自的网络。当这些应用系统布局在相同的服务器设备上时,可能存在不同业务系统网络之间的关联关系。虚拟实体构成,如各种站点、应用系统和业务软件等,包括各种类型的网站、邮箱等。用户角色层的节点主要包括人在使用互联网过程中注册使用的各种帐号等。每一层的实体及属性要素如表1所列。

整个互联网在应用过程中,每一层可以依据不同的联系形成不同类型的网络,如在基础设施层中,节点按照光缆、地缆关系形成通信网络;在业务应用层中,依据不同的业务类型形成不同的业务关系网络,如邮件地址网络、网页超链网络等;在用户角色层,依据不同的社交关系形成不同类型的社交网络,如朋友关系网络、微博账号关注网络等。纵向来看,

下层网络节点是上层网络节点存在的基础,例如各个应用系统都是运营在底层网络的服务器上,各个账号也是在应用软件上注册,层与层之间存在强依赖关系。

这种针对互联网的多层网络结构表征,对于刻画网络空间态势、分析网络脆弱性和进行网络溯源取证等方面具有重要的支撑作用。

表1 三层网络模型要素列表

Table 1 Elements of three-layer network model

网络层次	实体	属性
基础设备层	服务器、计算机、路由器、接入设备	所属城市、IP地址、自治域号、端口、厂商
业务应用层	软件、各种类型的数据	系统软件:Windows,Ubuntu,Centos 应用软件:微信、邮箱、网站 数据:账号及口令、文本、视频
用户角色层	账号	注册时间、注册单位等

从网络态势展现的角度,通过构建互联网领域多层网络可以将互联网数据以多层次多尺度的形式展现给网络用户,以便于了解网络的结构特征,为后续的网络决策部署提供模型支撑。从分析网络脆弱性的角度,基于多层网络结构的网络关键节点分析会对分析过程产生较大的影响,可能使原本单层网络路径不可达的情况在多层网络中可以实现跨层攻击路径可达的效果,为开展网络脆弱性分析评估提供了新的研究思路。在网络溯源方面,多层网络模型可以更加高效的实现这一功能。例如,某一公司收到了钓鱼邮件,利用多层网络分析溯源不法分子的过程如下:首先通过日志匹配邮箱得到发送者的邮箱地址,向上定位邮件发送人,向下定位邮件发送方的IP,如果该IP不是攻击源,则通过邮件地址的关联关系找到与邮件发送方有邮件往来的地址,进一步可以向上定位用户,向下定位位置,实现目标多路径的溯源。

4 互联网多层网络模型设计

4.1 模型设计思想

针对互联网的多层网络结构特点,本模型的设计思想是:首先分析针对互联网不同层面的网络实例数据,然后在当前单层网络建模方法基础上,改进、设计满足互联网特定层次特性的单层网络模型生成算法,接下来根据层间网络的关联规则启发式生成不同层网络之间的关联关系,最终形成多层网络模型。

当前,在对网络建模方法的研究中,许多网络演化模型都是以节点度的大小来衡量节点连接的概率,但从实际互联网应用中形成的网络来看,这种方法存在一定局限性,例如某个公司为推销其产品,可能会向外发送多条产品推送邮件,但在业务网络中,该公司却不一定为网络中的关键节点。

相比度的局限性,核数考虑了节点在整个网络的重要程度,在对网络进行 k -核分解时,一个节点的核数越大,越是最后被剥离,说明它越处于网络中的中心位置,也就越重要。文献[20]通过实验验证了实际互联网网络拓扑结构不仅度数符合幂律分布,而且核数分布也符合幂律分布,具有长尾效应,绝大部分节点都位于网络的边缘位置,只是极少部分位于网络的核心处。而现有网络生成模型(BA无标度网络模型、ER随机网络模型、WS小世界网络模型)不能描述实际网络的核数分布情况。综上所述,需要研究核数分布符合实际互联网

特征的网络生成模型。

针对基于度分布建模的网络模型不能满足上述两点条件的问题,本文从节点的核数出发,受到 k -核分解思想的影响,借鉴文献[13]中的方法,按照 k -核分解的逆过程增加网络新节点,同时控制新节点连入网络的方式,设计了一种启发式的基于核数生成的网络生成模型(CGN模型)。

k -核最初是由 Seidman 于 1983 年在论文《Network Structure and Minimum Degree》中提出的。图 G 的 k -核指反复地移去网络图中度数小于 k 的节点及与其连接的边,直到网络图中所有节点的度值都大于或等于 k 。图 G 中所有节点核数的最大值称为该图的核数。基于核数的计算方法,可以考虑按照分解过程的逆过程生成网络。文献[13]提出了一种核数可控网络模型(CTN模型),按照 k -核分解的逆过程得到网络的核数分布,按照由内到外的过程构造网络结构。实验结果证明,CTN模型生成的网络与实际网络的核分布一致。

实际互联网的中心部分呈现较为聚集的特性,越往外网络越稀疏,呈现出“树状”特点,对于某些网络,网络的边缘出现“簇”的特点,如由路由器、服务器、终端主机构成的路由网络中,服务器节点上往往连接多个终端主机。本文在CTN模型的基础上,结合实际网络的拓扑特点,设计网络不同生成阶段新节点的加入方式。利用CGN模型生成的网络与实际网络对比,在核分布与实际网络一致的基础上,模型生成网络的度分布与实际网络度分布相符,并且在平均路径长度等统计指标上也有较好的模拟效果,对互联网网络建模具有一定的适用性。

4.2 单层网络模型生成算法

考虑实际网络的拓扑特点,本文提出的单层网络生成模型将节点的加入分为3个阶段。第一个阶段形成较为聚集的网络核心部分,第二个阶段形成网络的“树状”结构,第三个阶段形成网络的“簇状”结构,通过调整模型中的参数 t_1, t_2, t_3 来控制各部分节点在网络中的占比,因此针对不同的网络 t_1, t_2, t_3 的值也不同,需要不断地调整。模型的具体生成算法如算法1所示。

算法1 CGN模型生成算法

输入:网络核序列 $corelist = \{c_1 = c_{max} \geq c_2 \geq \dots \geq c_{n-1} \geq c_n\}$, 参数 $t_1, t_2, t_3 (t_1 + t_2 + t_3 = 1)$

输出:满足核数分布的生成网络 $c_1 = c_{max} \geq c_2 \geq c_3 \dots \geq c_{n-1} \geq c_n$

- totalnodes=0//计算网络规模
- for nodes in corelist do:
- totalnodes += nodes
- for(i=1; i<=len(corelist); i++)do://生成节点序列
- core=len(corelist)-i
- nodes=corelist[i]
- nodelist.extend[core] * nodes
- stage₁ = totalnodes * t₁
- completegraph(c₁+1)/生成节点数为(c₁+1)的完全图,保证每一个节点核数为c₁
- for(i=c₁+1; i<=stage₁; i++)do:
- core=Nodelist[i]
- targets=random(network,core)//从现有网络中选择core个节点作为目标节点
- add_edges=(i,targets)//节点i与目标节点连边

```

14. stage2 = totalnodes * t2 //形成树形结构
15. for(i=stage1; i<=stage2; i++)do:
16.   targets=random(node_core1,1)//从现有网络中挑选度为1的
    节点作为目标节点
17.   add_edges=(i, targets)
18. stage3 = totalnodes * t3 //形成簇状结构
19. addnodes=random_int(n1, n2)
20. target=random(ntetwork,1)
21. for nodes in addnodes do:
22.   add_edge(nodes, target)
23. end

```

4.3 多层网络模型构建方法

本文多层网络的构建方法采用前文所描述的多层网络复合模型的构建方式,首先利用单层网络生成模型构建符合互联网特征的各个单层网络,确定各层可能存在层间连边的节点比例 α (α_{12} 表示第一层中与第二层中可能存在连边的节点比例),再根据层间连边概率 β 连接层间节点。算法的具体步骤如算法 2 所示。

算法 2 多层网络模型生成算法

输入:层间连边比例 $\alpha_{12}, \alpha_{21}, \alpha_{23}, \alpha_{32}$; 层间连边概率 β_{12}, β_{23}

输出:多层网络 G

```

1. CGN(G1), CGN(G2), CGN(G3) //利用单层网络生成模型生成符合
   实际互联网特征的各单层网络
2. for(layer=1; layer<=l; layer++)do:
3.   linknodes=nodes *  $\alpha$  //根据比例计算每一层可能存在层间连边
   的节点数目
4. for nodes in linknodes do: //生成节点序列
5.   link layers(按层间连边概率连接层)
6. end

```

5 实验与分析

5.1 单层网络建模实验

本文采用 Python 及其中的 NetworkX 模块进行网络的建模及相关特征参数统计实验。为了更好地证明本文构建的 CGN 模型的实用性,本节首先获得了实际网络拓扑数据,然后利用 CGN 模型生成了同等规模的网络,对比、分析了 CGN 模型生成网络 and 实际网络的相关统计参数。

(1) 数据来源

本文模型验证数据来源为开源数据集网站 CAIDA¹⁾。

(2) 网络的基本特征参数统计

在复杂网络理论中,一般借助于网络的节点数、边数、度及度分布、核数及核数分布等统计特点来描绘网络拓扑。经计算,实际网络的相关特征参数的统计情况如表 2 所列。

表 2 实际网络特征参数统计

Table 2 Characteristic parameters of actual network

编号	项目	路由网络
1	节点数	192244
2	边数	609066
3	平均路径长度	4.61
4	平均度	6.34
5	最大度	1071
6	网络直径	12
7	网络核数	31

(3) 特征参数对比

本文拟通过对实际网络与本文提出模型构建的网络相关参数的对比来验证模型的适用性。为保证实验结果的可靠性,针对同等规模的网络,利用 CGN 模型反复进行了 10 次生成网络的实验,各特征参数取这 10 次统计结果的平均值作为对比参数。

(1) 静态指标对比

从表 3 中可以看出,实际网络与生成网络节点数与网络核数完全一致,节点边数相当,平均路径长度基本符合,平均度、最大度也相近,说明该模型具有较好的适用性。

表 3 静态统计特征对比

Table 3 Comparison of characteristic parameters

编号	项目	路由网络	CGN 网络
1	节点数	192244	192244
2	边数	609066	614526
3	平均路径长度	4.61	4.56
4	平均度	6.34	6.16
5	最大度	1071	1108
6	网络直径	12	11
7	网络核数	31	31

(2) 核数及核分布

CGN 模型能对网络中的节点的核数实现完全可控,这体现在核数分布这个指标上模型生成的网络与实际网络完全一致,如图 2 所示。

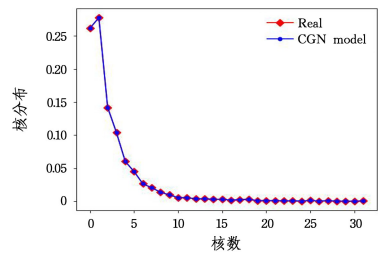
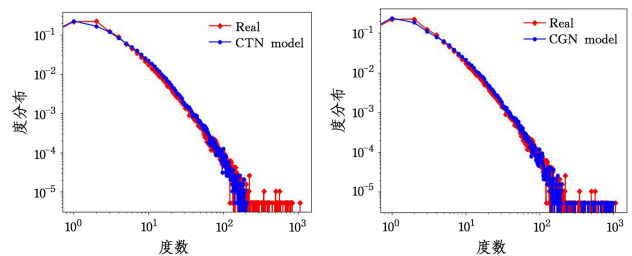


图 2 核数分布对比

Fig. 2 Comparison of core number distribution

(3) 度数及度分布

度分布往往能够反映出网络结构的特性,因此我们对比了 CGN 模型生成网络 and 实际网络的度分布,如图 3 所示,结果表明利用 CGN 模型与文献[13]中提出的 CTN 模型生成网络度分布曲线在前半段都贴合实际网络度分布曲线,但在曲线后半段,通过调节 CGN 中的参数,可以生成更加符合实际网络特点的网络。CGN 模型对网络的度分布拟合效果总体优于 CTN 模型,具有一定的适用性。



(a) CTN 模型度分布拟合图

(b) CGN 模型度分布拟合图

图 3 度分布拟合对比图

Fig. 3 Comparison diagram of degree distribution fitting

¹⁾ <https://www.caida.org>

5.2 互联网多层网络构建实验

(1) 数据来源

多层网络实验的三层分别为路由关系网络、网页超链网络、邮件地址网络。三层网络数据来源均为 Network Datasets 网络数据库网站¹⁾。

根据获得的实际网络数据,统计 3 种网络的核分布,如图 4 所示,3 种网络核数分布服从幂律分布,函数表示为:

$$P(K>k) = \alpha \cdot k^\beta + \lambda \quad (7)$$

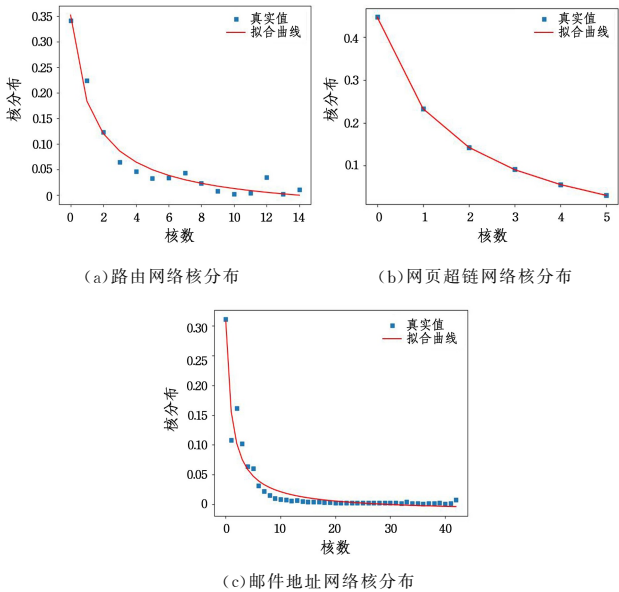


图 4 核分布拟合图

Fig. 4 Fitting diagram of core distribution

利用 Python 第三方提供的机器学习库 sklearn 拟合 3 种网络的核分布,得到 3 种网络对应的 α, β, λ , 如表 4 所列。

表 4 网络幂律参数

Table 4 Network power law parameters

网络类型	α	β	λ
路由网络	0.40	0.79	-0.04
网页超链网络	0.64	0.59	-0.19
邮件地址网络	0.32	0.93	-0.01

(2) 模型构建

根据获得的 3 种网络的核分布函数,可以获得指定网络规模下的网络核数序列。本文构建的三层网络路由关系网络、网页超链网络、邮件地址网络的节点规模分别为 $N_1 = 200, N_2 = 50, N_3 = 20$ 。再来考虑层间连边,在路由网络中,计算机与服务器都位于终端节点,其他节点为路由器节点,因为实际业务应用运行在计算机和服务器上,因此业务应用层中的节点只会与基础设备层中的终端节点存在连边,即业务应用层与基础设备层中度为 1 的节点存在连边。因此,这里的层间连边比 α_1 对应于路由网络层终端节点中与上层存在连边的比例。随机取层间节点比 $\alpha_{12} = 25\%, \alpha_{21} = 55\%, \alpha_{23} = 40\%, \alpha_3 = 100\%$, 对应的层间连边参数 $\beta_{12} = \beta_{23} = 50\%$ 。按照参数对三层网络实现关联。

(2) 多层网络特性情况分析

对路由关系网络、网页超链网络、邮件地址网络统计得到

的 3 种网络的平均最短路径长度分别为 3.8, 2.9, 1.7。由于多层网络中存在层间连边,使得节点除了层内可达外,节点之间还可以跨层到达,实验结果表明 3 种网络的平均最短路径长度都有一定的缩短,分别为 3.1, 2.7, 1.6。由于本文的实验数据规模不大,因此体现得不够明显。但总体都呈现减小的趋势,实验证明相对于单层网络,多层网络实现了节点的多路径可达,减小了节点之间的平均路径长度。

结束语 本文针对互联网的多层网络架构特征,设计了面向互联网多维数据的三层网络模型,定义了各单层网络的要素、属性及层内、层间连边的含义。基于 k -核分解的思想,提出了一种启发式的单层网络模生成算法,在此基础上设计了多层网络生成模型,最后提出了构建互联网络领域多层网络模型的意义。

多层网络作为近年来新兴的研究方向,在相关领域已经得到了一些应用,但是还存在许多科学问题值得挖掘。系统建立其理论框架,在丰富相关领域的数据库等方面还存在很长的路要走。在互联网领域建立多层网络模型,对于网络安全人员正确研判网络安全态势,掌握网络关键节点,决策部署具有重要意义,这是今后研究的重要方向。

参考文献

- [1] BOCCALETTI S, BIANCONI G, CRIADO R, et al. The structure and dynamics of multilayer networks[J]. Physics Reports, 2014, 544(1): 1-122.
- [2] KIVELA M, ARENAS A, BARTHELEMY M, et al. Multilayer Networks[J]. Journal of Complex Networks, 2014, 2(3): 203-271.
- [3] ZHANG X. Advances in Multi-layer Complex Network Theory: Concepts, Theories and Data [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2015, 12(2): 103-107.
- [4] MORENO Y, PERC M. Focus on multilayer networks [J]. New Journal of Physics, 2020, 22(1): 10-201.
- [5] DOMENICO M D, SOLÉ-RIBALTA A, COZZO E, et al. Mathematical Formulation of Multi-Layer Networks [J]. Physical Review X, 2014, 3(4): 4192-4195.
- [6] INTERDONATO R, MAGNANI M, PERNA D, et al. Multilayer network simplification: Approaches, models and methods[J]. Computer Science Review, 2020, 36: 100-246.
- [7] LU J N. From single-layer network to multi-layer network—Structure, Dynamics and Function [J]. Knowledge of Modern Physics, 2015, 1(4): 6-12.
- [8] MAGNANI M, ROSSI L. The ML-Model for Multi-layer Social Networks[C]// International Conference on Advances in Social Networks Analysis & Mining. IEEE, 2011.
- [9] DING R, UJANG N, HAMID H B, et al. Application of complex networks theory in urban traffic network researches[J]. Networks and Spatial Economics, 2019, 19(4): 1281-1317.
- [10] FAN D M, WANG J L. Research on the spread of rumors on multi-layer social networks [J]. Journal of Anhui Agricultural University, Social Science Edition, 2020, 29(4): 8-18.
- [11] WANG X L, ZHU L N, SHI Z B. Science Technology and Engi-

¹⁾ <http://networkrepository.com/>

neering, 2020, 20(3):1243-1249.

- [12] XU K J, WU J Y, YANG Y, et al. Multilayer Analysis of China's Airline Network Structure [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2020, 17(2):8.
- [13] WANG Y F. Research on The Characteristics of Chinese Aviation Network Based on Kernel Controllable Network Model [D]. Beijing, Beijing Jiaotong University.
- [14] NICOSIA V, BIANCONI G, LATORA V, et al. Growing Multiplex Networks [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(5):058701.
- [15] NICOSIA V, BIANCONI G, LATORA V, et al. Non-linear growth and condensation in multiplex networks [J]. *Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, 2014, 90(4):042807.
- [16] MAGNANI M, ROSSI L. Formation of multiple networks [C]// *International Conference on Social Computing, Behavioral-Cultural Modeling, and Prediction*. Berlin: Springer, 2013:257-264.
- [17] MIN B, DO YI S, LEE K M, et al. Network robustness of multiplex networks with interlayer degree correlations [J]. *Physical Review E*, 2014, 89(4):042811.
- [18] DE DOMENICO M, SOLÉ-RIBALTA A, OMODEI E, et al. Centrality in interconnected multilayer networks [J]. arXiv: 1311.2906, 2013.
- [19] PATRINOS A N, HAKIMI S L. Relations between graphs and integer-pair sequences [J]. *Discrete Mathematics*, 1976, 15(4):347-358.
- [20] BIANCONI G. Statistical Mechanics of Multiplex Ensembles: Entropy and Overlap [J]. *Physical Review E*, 2013, 87(6):062806.



CHENG Qiu-yun, born in 1998, post-graduate. Her main research interests include cyberspace security situation awareness and multilayer network.



YANG Guo-zheng, born in 1982, assistant professor. His main research interests include cyberspace security situation awareness and multilayer network.