

复杂网络的节点重要性综合评价

秦 李¹ 杨子龙¹ 黄曙光²

(电子工程学院研究生管理大队 合肥 230037)¹ (电子工程学院 合肥 230037)²

摘 要 复杂网络中的节点重要性研究在不同领域都具有重要意义。针对单一指标评价的局限性和片面性以及现有的一些综合评价方法不够准确等问题,提出了一种新的综合评价方法,该方法结合改进的主成分分析法和 TOPSIS 法计算节点重要性的排序结果。通过对 ARPA 网络和美国航空网络进行实验分析,验证了该方法的准确性和有效性,它为进一步完善节点重要性评价方法奠定了基础。

关键词 复杂网络,节点重要性,主成分分析,TOPSIS,综合评价

中图法分类号 TP393 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.2.013

Synthesis Evaluation Method for Node Importance in Complex Networks

QIN Li¹ YANG Zi-long¹ HUANG Shu-guang²

(Department of Graduate, The Institute of Electronic Engineering, Hefei 230037, China)¹

(The Institute of Electronic Engineering, Hefei 230037, China)²

Abstract In complex networks, how to rank the nodes according to their importance plays key roles in various kinds of fields. Against the problem that most of the existing single index are unilateralist and limited, and most of the current synthesis evaluation method is also inaccurate, we proposed a new synthesis evaluation method combining principal component analysis with TOPSIS. We used our method to analyse the ARPA and the USA airport network. The result suggests that our method should be effective and corrective, and also lays the foundation for further more evaluation of node importance.

Keywords Complex networks, Node importance, Principal component analysis, TOPSIS, Synthesis evaluation

1 引言

复杂网络是复杂系统的高度抽象,它往往有着大量的节点,节点之间有着复杂的连接关系^[1]。随着复杂网络特性的研究深入,节点重要性研究成为复杂网络中的一个重要课题,具有重要的实用价值,尤其是在各种具体网络中,更可以有针对性地分析其性质,然后制定正确的策略和措施。例如,在恐怖份子组织关系网络中,可以通过数据分析方法定位其关键人物,然后集中火力对其进行布控和打击^[2];在各种社会关系网络中,通过发掘最具有活力、最具有影响力的人物,可以有效地控制和传播信息^[3];在艾滋病等疾病传播网络中,找出最危险的人,进行有针对性的治疗,隔离病源,防止病毒的快速传播和扩散;在电力网络中,发掘重要的发电单元、断路器,有效防止由相继故障引起的大范围停电;在通信网络和交通网络中,找出承受流量最大的节点,以此来有效地解决拥塞问题;在大规模的路由网络中,根据路由节点的重要性进行保护,保证整个网络的鲁棒性,避免遭受恶意攻击时形成的毁灭性的破坏;在搜索引擎中输入一个关键词后,搜索引擎是如何对网页重要性排序的^[4]。由于大多数复杂网络具有无标度性,导致其也具有鲁棒性和脆弱性的双重特性^[5],而研究表

明,只要5%~10%的重要节点同时失效就将导致整个网络瘫痪^[6]。因此,准确评价节点的重要性已成为复杂网络研究中的一项具有重要意义的课题。

目前,国内外学者从不同角度提出了多种评价指标,如度数、介数、接近中心性、拉普拉斯算子中心性^[7]等。但这些方法都是针对具体问题提出的,分别从不同角度、不同用途来刻画节点的重要性,存在一定的片面性和局限性。在复杂网络中,节点的重要性往往与网络的整体结构相关,很难用单一指标就能准确判定出节点的重要程度。而已有的一些综合评价方法中,即便采用了多指标来评价,但在指标选取上依赖主观判断缺乏理论依据,且应用时也仅是多个指标的依次使用,忽略了指标间的关联信息^[8]。王力等人^[9]以节点连接度、节点介数和交叉口高峰小时交通流量为评价指标,应用FCM模糊聚类方法给出交叉口的重要性分类方法,从而实现了交通网络的关键节点选择。张琨等^[10]提出基于灰色关联分析法来评价节点的重要性,采用极大不相关法实现指标的筛选,利用改进的熵权法确定各指标的权重,最终以灰色关联分析方法确定各个节点的重要性排序,该方法具有较好的节点重要性区分能力,但对航空网络的实验结果表明,排序结果还不够准确。任卓明等人^[11]综合考虑了节点的邻居个数,以及其邻

到稿日期:2014-03-06 返修日期:2014-07-21 本文受安徽省自然科学基金(1208085QF107)资助。

秦 李(1990—),男,硕士生,主要研究方向为复杂网络,E-mail:qinli0836@qq.com;杨子龙(1988—),男,硕士生,主要研究方向为复杂网络、社会网络分析;黄曙光(1960—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为信息安全、复杂网络。

居之间的连接聚集程度,提出了一种基于邻居信息和聚集系数的节点重要性评价方法。通过对不同参数的 BA 理论模型网络、美国航空网络和美国西部电力网络等实际网络的实验结果表明,该指标较度指标、基于节点度和其邻居度的指标、 k_s 指标更能准确地度量节点的重要性。于会等^[12]提出基于多属性决策的方法来综合评价节点的重要性,该方法中虽然利用层次分析法较好地考虑和集成了综合评价过程中的各种定性与定量信息,但是在应用中仍摆脱不了评价过程中的随机性和评价专家主观上的不确定性及认识上的模糊性,评价结果不够客观。针对上述问题,本文在分析总结现有评价方法的基础上,结合改进的主成分分析来确定各指标权重,再利用“逼近理想排序法”得到重要性评价结果。由于考虑多个重要性指标对节点进行综合评价,涵盖了影响节点重要性的诸多因素,因此可以得到比使用单一指标评价更为准确和客观的重要性评价结果。在 ARPA 网络和美国航空网络上的实验结果表明,本文的方法可行有效,评价结果准确率高。

2 方法描述

对节点重要性的研究最早起源于社会网络学者,中心性是社会网络分析的研究重点之一,个人或者组织在其社会网络中具有怎样的权力,或者说居于什么样的重要地位,这是社会网络分析者最早探讨的问题之一。评估网络中节点重要性的方法本质上源于图论中的方法^[13],利用数据挖掘技术对网络拓扑图进行研究^[14]。社交网络等舆论传播网络中,对于节点重要性的评估,即是对舆论领袖或者最有影响力人物的分析,对于这类网络大多结合参与者的基本属性以及复杂网络的动力学模型来评估其重要性^[15,16]。而本文的重点在于网络拓扑结构的测度,通过已有的一些研究表明,以网络结构测度为基础的评价结果适用于交通网络、通信网络等网络拓扑的节点重要性评估。

本文的方法主要分为以下 3 个步骤:1)评价指标的选取;2)各指标权重的确定;3)计算各节点的重要性值。下面介绍各步骤的具体实现算法,并通过具体实验来验证本文方法的正确性和有效性。

2.1 评价指标的选取

进行综合评价时,首先要对可用的评价指标进行筛选。在选取评价指标时,要遵循目的性、全面性、合理性的原则,尽可能覆盖评价的内容,同时还要有较好的可操作性。

目前,对于节点重要性的单一评价指标研究已经取得了许多进展。已有的方法中,一般从社会网络分析法和系统科学两种角度来分析节点的重要性。在社会网络分析法中,节点的重要性等价于该节点与其他节点的连接而使其具有的显著性^[17],指标的研究不破坏网络的整体性。在系统科学的研究方法中,利用网络的连通性来反映系统某种功能的完整性,通过度量节点删除对网络连通的破坏程度来反映网络节点的重要性,即“破坏性等价于重要性”^[18]。

为满足指标选取的全面性要求,综合国内外的研究成果,列出了一些具有代表性的指标:度中心性(DC)、接近中心性(CC)、介数中心性^[19](BC)、聚类系数(C)、 k -壳分解^[20](KsD)、HITS 算法^[21](HITS 值)、PageRank 算法^[22](PR 值)、网络效率^[8](NE)、近距离威望^[23](PP)、拉普拉斯中心性^[7](LP)、结构洞^[24](SH)、最小生成树指标^[25]、互信息法^[26]、节点收缩法^[27]等。它们的定义如表 1 所列。

表 1 常用重要性指标定义

指标	定义
DC	节点 i 的连边数与节点 i 最大可能的连边数的比值
CC	节点 i 到其他所有节点的距离平均值的倒数
BC	经过节点 i 的最短路径数占所有最短路径数的比例
C	节点 i 相邻节点间的连边数与其最大可能连边数之比
KsD	基于 k -壳分解对网络中的节点重要性进行粗粒化划分
HITS 值	一个节点的权威性(Authority)和枢纽性(Hub)
PR 值	节点 i 的重要性取决于指向它的节点的数量和质量
NE	网络的节点间最短路径距离倒数的平均值
PP	节点 i 的指定距离内的邻居节点对其的提名加权值
LP	节点 i 被删除后,相应减少的拉普拉斯算子能量大小
SH	节点 i 与其他节点间的约束系数
最小生成树	节点 i 的重要性为去掉该节点及相关联的链路后,所得到的图的生成树数目
互信息法	计算与节点 i 相连的边的信息总量
节点收缩法	节点 i 的 k 个相邻节点与其融合后,网络的凝聚程度

从表 1 中可以看出,不同的指标分别从不同的角度探讨了节点在复杂网络中的重要程度。对于复杂网络,仅仅依赖于单一指标来判断节点在网络中的重要程度具有很大的片面性。

2.2 指标权重的确定

主成分分析法是通过恰当的数学变换,将新变量-主成分转化为原变量的线性组合,并选取少数几个在变差总信息量中比例较大的主成分来分析事物的一种方法。主成分在变差信息量中的比例越大,在综合评价中的作用就越大^[28]。用主成分分析法确定权重有以下优点^[28]:1)可消除评价指标之间的相关影响;2)可减少指标选择的工作量;3)主成分分析中各主成分按方差大小依次排列顺序,可减少计算工作量。

在利用主成分分析法将原始变量转变为主成分的过程中,形成了包含指标信息量的权数,用以计算综合评价值,这样在指标权重选择上既克服了主观因素的影响,也客观地反映了样本间的真实关系。下面介绍基于改进的主成分分析法确定权重的算法步骤:

步骤 1 建立评价指标矩阵。设有 m 个节点被评估,有

$$n \text{ 个评估指标,则评价指标矩阵 } Y = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{m1} & \cdots & y_{mn} \end{bmatrix}。$$

步骤 2 对矩阵 Y 进行预处理。对各指标进行同趋化处理,将所有指标化为效益型指标。然后对同趋化后的数据进行无量纲化处理,以解决指标的不可公问题^[29],用 Z-score 法

对数据进行标准化变换 $Z_{ij} = (y_{ij} - \bar{y}_j) / S_j$, 其中, $\bar{y}_j = \frac{\sum_{i=1}^n y_{ij}}{n}$,

$$S_j = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_j)^2}{n-1}。$$

步骤 3 对标准化矩阵 Z 求相关系数矩阵 $R = \frac{Z^T Z}{n-1} = (r_{ij})_{p \times p}。$

步骤 4 求特征值。用雅可比方法求相关系数矩阵 R 的特征值,得到 p 个特征值: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_p \geq 0。$

步骤 5 求特征向量和主成分个数 m 。按主成分贡献率 $\frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \geq 0.85$, 确定 m 的值,使信息利用率达 85% 以上。对每个 $\lambda_j (j=1, 2, \cdots, m)$ 求解方程组 $Rb = \lambda_j b$, 可得单位特征向量 $b_j^0 = \frac{b_j}{|b_j|}。$

步骤6 确定各指标权重 $\omega_j = \frac{\sum_{i=1}^m f_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i}$, 其中, f_i 为第 j

个指标所对应的第 i 个主成分的值。

2.3 运用 TOPSIS 法计算节点重要性综合值

利用逼近理想排序法求解多属性的决策问题是一种非常有效的方法,它概念比较简单,在使用时,需要在目标空间中定义一个测度,以度量某个解靠近正理想解和远离负理想解的程度。其中心思想是先选定一个正理想解和一个负理想解,然后找出与正理想解距离最近且与负理想解距离最远的方案,作为最优方案^[30-32],具体算法步骤如下:

步骤1 建立带权重的评价指标矩阵 $A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$,

其中, $a_{ij} = y_{ij} \times \omega_j, j=1, 2, \dots, n$ 。

步骤2 对数据进行归一化,得到归一化后的矩阵

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

其中, $x_{ij} = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, i=1, \dots, m, j=1, \dots, n$ 。

步骤3 确定指标的正理想解 Z^+ 和负理想解 Z^- , $Z^+ = \max_{i \in L} (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$, $Z^- = \min_{i \in L} (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$, 其中, $L = \{1, 2, \dots, m\}$ 。

步骤4 计算各指标值与正理想解和负理想解的距离

$$D_i^+ = [\sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_j^{\max})^2]^{1/2}, D_i^- = [\sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_j^{\min})^2]^{1/2}$$

步骤5 计算各指标与理想解的相对接近程度 $C_i =$

$\frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+}, 0 \leq C_i \leq 1$, 即可根据 C_i 值的大小对节点重要性进行排序。

3 实例验证

为了验证本文方法的准确性,我们选取了用来验证节点重要性方法正确性最常用的两个网络——ARPA 网络和美国航空网络^[33]进行实验分析。其网络拓扑图如图1和图2所示。

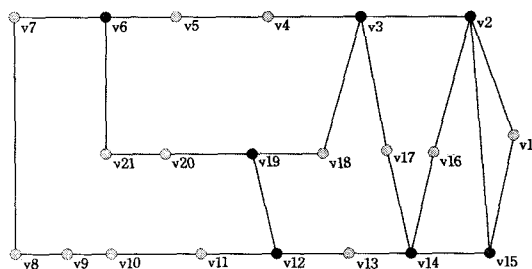


图1 ARPA网络拓扑结构图

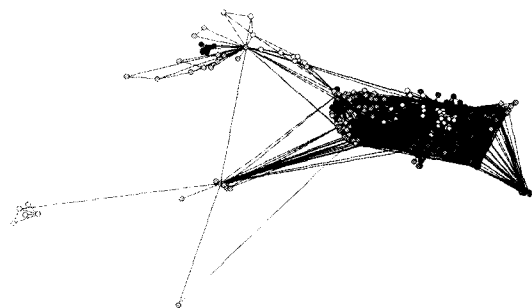


图2 美国航空网络拓扑图

3.1 评价指标的选取

由前面的讨论可知,目前的节点重要性评价指标较为繁多,进行综合评价时,我们需要考虑待评价网络图的相关特性,从众多指标中选取更符合实际意义的指标,从而提高评价结果的有效性和准确性。对于一个ARPA网络或航空网络来说,节点的重要性主要取决于节点间的流量(机场的吞吐量)等属性值,所以从表1中选取DC、BC、CC、HITS值、PP、LP和SH等7个指标。

3.2 实例验证与分析

按照前面所描述的算法步骤,对实际网络进行实验分析,并基于Matlab编程计算出最终结果。首先,以ARPA网络为例,它由21个节点和23条链路组成,其网络平均度值在2~3之间,大部分节点的度值为2。计算各个节点的中心性指标,并将本文方法与其他方法进行对比,排序结果如表2所列。

表2 ARPA网络节点重要性评估结果

名次	本文	文献[12]	文献[1]	文献[25]	文献[34]
1	3	3	2	3	3
2	14	12	3	14	12
3	2	19	15	6	19
4	15	6	14	12	6
5	12	14	17	2	4
6	19	4	16	19	5
7	16	13	18	11	11
8	17	2	19	10	14
9	6	5	13	7	13
10	1	11	12	9	18
11	13	18	4	8	10
12	18	10	1	15	7
13	4	7	6	4	2
14	5	20	20	5	20
15	11	21	5	20	21
16	20	9	11	21	17
17	7	8	21	13	8
18	10	17	7	18	9
19	21	15	10	17	15
20	9	16	8	16	16
21	8	1	9	1	1

表2中,给出了本文方法以及文献[12]、文献[1]、文献[25]、文献[34]中所述方法的排序结果。5种方法所得到的计算结果都略有差异,主要是因为各自的侧重点也有所不同。文献[1,12]都使用的是社会网络的分析方法,利用节点重要度评价矩阵来确定复杂网络中的重要节点;文献[25]使用的是系统科学方法,依据的是删除节点后,网络中生成树数目的变化来确定节点的重要程度;文献[12]采用的是基于多属性决策的综合评价方法,结合层次分析法和逼近理想法来得到评价结果。我们首先重点考察前5个重要节点可以发现,除文献[1]中的方法以外,其他方法都将3号节点排在最重要的位置,本文方法分别将14、2、15、12号节点排在了第2至第5位,它们都是组网之初最重要的4个主机之一;其次为了度量各方法的评价间的相关性,我们采用了Spearman系数来度量,其结果如表3所列。容易发现,本文方法与文献[25]的相关性较高,也发现本文的方法对于ARPA网络节点重要性的排序更具有实际意义的参考价值。

表3 不同方法间的Spearman相关性

方法	本文	文献[12]	文献[1]	文献[25]	文献[34]
本文	1.000	-0.082	-0.005	0.614	-0.045
文献[12]	-0.082	1.000	-0.074	0.229	0.618
文献[1]	-0.005	-0.074	1.000	-0.132	0.177
文献[25]	0.614	0.229	-0.132	1.000	0.373
文献[34]	-0.045	0.618	0.177	0.373	1.000

从 ARPA 网络的实验可以看出,运用本文所提出的方法对简单网络的评价可以取得良好的效果,说明了该方法的有效性。在此基础上,本文利用美国航空网络做进一步分析。

由于大多数复杂网络具有无标度性,导致其也具有鲁棒性和脆弱性的双重特性^[5]。研究表明,只要 5%~10% 的重要节点同时失效就将导致整个网络瘫痪^[6]。因此,下面的讨论中,只列出了网络中排名前 5% 的节点,并与文献^[10]中的方法做了对比。从实验结果来看,不同的评价方法对节点的重要性有不同的排序,为了准确地验证不同评价方法的准确性,我们采集了国际机场理事会(ACI)的数据库统计资料^[35],从中筛选出美国前 5% 重要机场排名,通过与 ACI 权威排名的一致性对比,可以很好地验证各个方法的准确性,具体结果如表 4 所列。

表 4 美国机场前 5% 重要性排名

排名	本文	文献 ^[10]	ACI 机场综合排名
1	Chicago O'hare Intl	Chicago O'hare Intl	Hartsfield Atlan
2	DFW, Intl	Anchorage Intl	Chicago O'hare Intl
3	Hartsfield Atlan	DFW, Intl	DFW, Intl
4	Lambert-St Louis Intl	Hartsfield Atlan	Stapleton Intl
5	Pittsburgh Intl	Honolulu Intl	Los Angeles Intl
6	MSP, Intl	Cleveland-Hopkins Intl	Mc Carran Intl
7	San Francisco Intl	General Edward	G. Bush Intl
8	Stapleton Intl	Lambert-St Louis Intl	CD, Intl
9	CD, Intl	Orlando Intl	PSH, Intl
10	Seattle-Tacoma Intl	MSP, Intl	Philadelphia Intl
11	Los Angeles Intl	DM, Intl	DM, Intl
12	DM, Intl	Pittsburgh Intl	MSP, Intl
13	PSH, Intl	San Francisco Intl	JFK, Intl
14	Newark Intl	Newark Intl	Newark Intl
15	G. Bush Intl	Cincinnati/Northern	San Francisco Intl
16	Salt Lake City Intl	Stapleton Intl	Salt Lake City Intl
17	Philadelphia Intl	Tampa Intl	VNY Intl

为了验证节点重要性的排序方法与真实统计数据之间的一致性,我们采用了由陈琳等人提出的 MRR 空间关系模型^[36],利用不一致但规则的 MRR 方法来判定一致性比对结果。在表 4 中,列出了前 5% 共 17 个机场的重要性排名。本文的方法将奥黑尔国际机场、达拉斯-沃思堡国际机场、哈茨菲尔德-杰克逊亚特兰大国际机场排在前三名,这与 ACI 的统计排名结果完全一致。而文献^[10]将安克雷奇国际机场排在了第 2 名,这与 ACI 的重要性排名明显不同。通过分析该机场可发现,其介数值很大,排在第 2。该机场位于美国阿拉斯加州最大城市安克雷奇市中心西南,是阿拉斯加州的枢纽中心,但是,该机场的综合排名不在全球前 30 的重要机场之列中,本文方法将其排在了第 20 名,更贴近其真实排名。其次,本文方法列出的前 10 名机场,除了排在第 4 名的匹兹堡机场外,其余的都是世界上最大、最繁忙的机场之一,仔细分析匹兹堡机场,发现其除了提供客运外,还提供空中加油、空中机动等美国国防部活动,拥有强大的货运设施。同样地,我们还验证了其余节点排序,与 ACI 全球重要机场排名的结果做比较得出,本文一致性为 75.2%,而文献^[10]仅为 54.3%。

综上所述,本文方法的排序结果与 ACI 的统计结果一致性高,更具有说服力。我们仅仅通过网络拓扑图的分析,得到了与 ACI 的统计资料相符的结果,也证明了通过网络拓扑结构测度来分析节点重要性的实用性与准确性,为进一步分析节点重要性奠定了基础。

结束语 节点重要性的评估具有重要的理论意义和实际应用意义。节点重要性的综合评价类似于多属性决策的思

想,目前针对交通网络、通信网络等提出的节点重要性评价指标,大多是基于对网络拓扑结构的测度得到排序结果,这样的评估结果具有很强的客观性,但同时因其各自的出发点不一而存在一定的片面性,而利用综合评估方法的思想,可以综合单一指标对每个节点赋予的不同属性,从而给出更加全面和客观的评价结果。因此,本文从分析网络的拓扑结构出发,对现有指标进行筛选和分类,结合改进的主成分分析法确定各指标的权重,最后利用“逼近理想排序法”对节点进行重要性排序。通过对 ARPA 网络和美国航空网络的实验分析,并与其他文献的排序结果进行对比,验证了本文方法评估结果的准确性和有效性,为完善综合评价方法提供了参考。同时,对向和加权网络节点重要性评价指标和方法的研究有待深入开展,以提高节点重要性评价的实用性和有效性。

参考文献

- [1] 周漩. 利用重要度评价矩阵确定复杂网络关键节点[J]. 物理学报, 2012, 61(5): 201-208
- [2] Carley K. Destabilization of convert networks[J]. Computational and Mathematical Organization Theory, 2006, 12(1): 51-66
- [3] Zanette D H. Dynamics of rumor propagation on small-world networks[J]. Phys Rev, E, 2002, 65: 41908
- [4] 汪小凡, 李翔, 陈关荣. 网络科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 158-160
- [5] Vespignani A. Complex networks: The fragility of interdependency[J]. Nature, 2010(464): 984-985
- [6] Lai Ying-cheng, Motter A E, Nishikawa T. Attacks and Cascades in Complex Networks[J]. Lecture Notes in Physics, 2004(650): 299-310
- [7] Qi Xing-qin, Duval R D, Christensen K, et al. Terrorist Networks, Network Energy and Node Removal A New Measure of Centrality Based on Laplacian Energy[J]. Scientific Research, 2013, 10(4236): 19-31
- [8] Anon. Evaluating Node Importance with Multi-criteria [C]// Ieee/acm International Conferences on Cyber. Hangzhou, China: iee, 2010: 792-797
- [9] 王力, 于欣宇, 李颖宏, 等. 基于 FCM 聚类的复杂交通网络节点重要性评估[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(6): 169-173
- [10] 张琨, 沈海波, 张宏, 等. 基于灰色关联分析的复杂网络节点重要性综合评价方法[J]. 南京理工大学学报, 2012, 36(4): 579-586
- [11] 任卓明, 邵凤, 刘建国, 等. 基于度与集聚系数的网络节点重要性度量方法研究[J]. 物理学报, 2013, 62(12): 1-5
- [12] 于会, 刘尊, 李勇军. 基于多属性决策的复杂网络节点重要性综合评价方法[J]. 物理学报, 2013, 62(2): 1-9
- [13] West D B. Introduction to Graph Theory[M]. Prentice Hall: Upper Saddle River, 2001
- [14] Washio T, Motoda H. State of the art of graph-based data mining[J]. SIGKDD Explor Newsl, 2003, 5(1): 59-68
- [15] 胡勇, 张翀斌, 王祯学, 等. 网络舆论形成过程中意见领袖形成模型研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2008, 45(2): 347-351
- [16] 胡朝浪, 吴荣军, 周安民. 基于主体观点度演变的网络舆论形成模型研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(4): 196-201
- [17] Knoke D, Burr R, Minor M J. Applied network analysis [M]. [S. I.]: Newbury Park, 1983: 195-222
- [18] 安世虎, 都艺兵, 曲吉林. 节点集重要性测度[J]. 中国管理科学, 2006, 14(1): 106-111
- [19] Mark N. Networks [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010

- [20] Carmi S, Havlin S, Kirkpatrick, et al. A Model of Internet Topology Using K-shell Decomposition[J]. Proc. natl. acad. sci, 2007, 104(27):11150-11154
- [21] Kleinberg J. Authoritative sources in a hyperlinked environment [J]. Journal of the ACM, 1999, 46(5):604-632
- [22] Page L, Brin S, Motwani R, et al. The Pagerank Citation Ranking, bringing Order to the Web [R]. Stanford Digital Library Technologies Project, 1998
- [23] Wouter D N, Andrej M, Vladimir B. Exploratory Social Network Analysis with Pajek [M]. New York: Cambridge University Press, 2005:196-197
- [24] Burt R S. Structural Holes-the Social Structure of Competition [M]. Cambridge Ma: Harvard University Press, 1992:54-55
- [25] 陈勇, 胡爱群, 胡啸. 通信网中节点重要性的评价方法[J]. 通信学报, 2004, 25(8):129-135
- [26] 张翼, 刘玉华, 许凯华, 等. 一种基于互信息的复杂网络节点重要性评估方法[J]. 计算机科学, 2011, 38(6):88-89
- [27] 谭跃进, 吴俊, 邓宏钟. 复杂网络中节点重要度评估的节点收缩方法[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 24(11):79-84
- [28] 李艳双, 曾珍香, 张阔, 等. 主成分分析法在多指标综合评价方法中的应用[J]. 河北工业大学学报, 1999, 28(1):94-97
- [29] Jackson J E. A User's Guide to Principle Components [M]. New York: Wiley-Inter-Science, 1991
- [30] 戴文战. 一种动态多目标决策模型及其应用[J]. 控制与决策, 2000, 15(2):197-200
- [31] 陈雷, 王延章. 基于熵权系数与 TOPSIS 集成评价决策方法的研究[J]. 控制与决策, 2003, 18(4):456-459
- [32] Tzeng Gwo-Hshiung, Opricovic S. Compromise solution by MC-DM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS [J]. European Journal of Operational Research, 2004, 156(2):445-455
- [33] Zhou Tao, Lü Lin-yuan. Role of Weak Ties in Link Prediction of Complex Networks [C]// Proceeding of the 1st Acm International Workshop on Complex Networks Meet Information & Knowledge Management, China: ACM, 2009:55-58
- [34] 赵毅寰, 王祖林, 郑晶, 等. 利用重要性贡献矩阵确定通信网中最重要节点[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(9):1076-1079
- [35] 国际机场理事会 (ACI) 数据库. 全球机场排名 [EB/OL]. 2013-10-25. http://www.airports.org/cda/aci/display/main/aci_content.jsp?zn=aci&cp=1_9_2_
- [36] 陈琳, 杜友福, 王元珍. MRR: 基于 MBR 的空间关系模型[J]. 计算机工程与应用, 2002, 8331(5):76-78

(上接第 45 页)

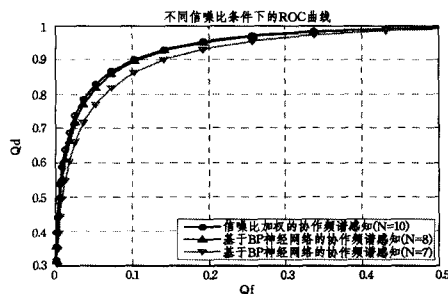


图 4 协作用户数不同时的性能对比 ($N=10, 8, 7$)

从图 4 中可以看出, 本文提出的基于 BP 神经网络的协作频谱感知由于参与协作的认知用户数目的减少, 使得系统的检测性能随之下降, 但性能仍可以满足系统的要求。在参与协作的用户个数 8 时, 本文提出的协作感知方法与参与协作的用户个数为 10 时的基于信噪比加权的协作感知方法的检测性能十分接近, 然而由于参与协作的用户数目减少, 使得系统的能量消耗降低。由此可见, 本文提出的协作感知方法在保证一定的检测准确性的基础上, 可以通过减少参与协作的认知用户数目, 提高系统的能效。

结束语 在频谱感知中, 能否提高系统的检测性能并尽可能地降低能量消耗十分重要。本文提出了一种基于 BP 神经网络的协作频谱感知算法。仿真结果表明, 该算法在同等协作用户数的条件下, 可以提高系统的检测准确性。并且该算法在保持一定的检测性能条件下, 可以通过减少参与协作的认知用户数目, 减少系统的能量消耗, 提高系统的能效。但是, 采用 BP 神经网络可能会使得系统的感知时间延长, 如何协调好感知时间与检测性能的关系需要进一步研究。同时系统所损耗的检测性能与提高的能量效率之间的关系问题也是下一步的研究重点。

参考文献

- [1] Mitola J, Maguire G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4):13-28
- [2] Haykin S. Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2):201-220
- [3] Zhang Wei, Mallik R K, Letaief K B. Optimization of Cooperative Spectrum Sensing with Energy Detection in Cognitive Radio Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(12):5761-5766
- [4] Gur G, Alagoz F. Green wireless communication via cognitive dimension: an overview[J]. IEEE Network, 2011, 25(2):50-56
- [5] Urkowitz H. Energy detection of unknown deterministic signals [C]//Proc. IEEE, vol. 55, 1967:523-531
- [6] Digham F F, Alouini M S, Simon M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC). 2003:3575-3579
- [7] Hu Hang, Zhang Hang, Yu Hong. Delay QoS guaranteed cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. International Journal of Electronics and Communications (AEÜ), 2013, 67:804-807
- [8] Atapattu S, Tellambura C, Jiang H. Energy detection based cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks [J]. IEEE Transaction Wireless Communications, 2011, 10(4):1232-1241
- [9] Ghasemi A, Sousa E S. Collaborative Spectrum Sensing for Opportunistic Access in Fading Environments [C]//Proc of IEEE DySPAN. 2005:131-136
- [10] 李玲远, 杨爽. 基于信噪比加权的协作频谱感知技术[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2010, 44(4):577-579
- [11] Huang Xiao-ge, Han Ning, Zheng Guan-bo, et al. Weighted-Collaborative Spectrum Sensing in Cognitive Radio [C]//Communications and Networking. 2007:110-114
- [12] 刘鹤. 基于人工神经网络的认知无线电频谱感知研究[J]. 电子测试, 2012(9):37-41
- [13] 韩力群. 人工神经网络理论、设计及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004