

基于介数影响矩阵的通信网络节点重要度评价方法

王小光¹, 王锋¹, 李森²

(1. 空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051; 2. 94221 部队, 山东泰安, 271200)

摘要 针对网络节点重要度受到多因素影响的问题, 提出了一种基于介数影响矩阵的重要度综合评价方法。该方法依据网络拓扑结构对传播重要度的影响, 采用节点介数作为基础重要度指标, 刻画了节点对最短路连通的控制能力, 然后综合考虑各节点间的节点度、距离、最短路径等因素的影响, 描述了节点度、位置和连通分支的差异; 通过引入距离衰减控制影响的强弱, 给出了直接与间接影响间的差异, 最后结合提出的基于贡献的介数计算, 实现了对节点重要度的客观评价。

关键词 通信网络; 节点重要度; 拓扑; 介数值

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.05.017

中图分类号 TN949 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)05-0080-05

节点拓扑位置的不同决定着它们对网络可靠性的影响程度不同^[1-4]。以具有无尺度特性的互联网为例, 5%的核心节点故障将导致整个网络的瘫痪^[2-3]。因此, 网络节点重要度的评价是一个十分有意义的课题。依据节点重要度评价结果, 为各节点合理分配有限的容错保护资源, 可以有效地提高网络可靠性。

依据研究思路的不同, 重要度评价可分为2类。第1类认为重要性为“节点参与网络连接而使其具有的显著性”, 利用节点与网络的某些属性来刻画重要度。主要指标有节点的度、介数、凝聚性等^[3-7]。第2类认为重要性为“节点被删除后对网络的破坏性”, 通过比较节点删除前后的网络某些指标变化程度来刻画重要度。主要指标有网络生成树、连通性的下降程度等^[1,8-9]。由于研究角度不同, 上述指标存在着各自的局限性。例如, 度指标仅反映了各邻接节点的直接影响, 忽视了节点的间接影响^[5]; 介数刻画了节点对网络最短路连通的控制能力, 却无法有效反映局部的连通细节; 凝聚性侧重于节点几何位置的差异, 未考虑层次关系。第2类方法的问题有: 删除导致拓扑改变, 无法区分网络割点的重要度^[3,5]; 忽视了最短路径等^[10]。为了平衡上述各指标自身的片面性, 文献[11]提出一种指标加权的方法。但此方法未考虑各指标间的耦合关系, 并且权重由评价者人为给定, 具有一定的主观性。基于上述分析, 本文提出一种利用介数影响矩阵计算节点重要度的方法。

1 相关概念与计算方法

本文对研究对象为无问、无自环网络, 在文献[10]最短路径数结论的基础上, 提出一种基于节点贡献的介数计算方法。

节点间距离为 K 的最短路径数矩阵为^[10]:

$$M_K = \begin{cases} H & , K=1 \\ \delta_K \left(\sum_{r=1}^{K-1} H^r \right) H^K & , 2 \leq K \leq N-1 \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2012-05-15

作者简介: 王小光(1982-), 男, 陕西咸阳市人, 博士生, 主要从事防空反导作战最优化理论与方法研究。

E-mail: wxg0108018@163.com

矩阵 M_k 的元素 $m_k(i, j)$ 表示 v_i 与 v_j 节点间最短路径长度为 K 的数目。其中, $\delta_k(\cdot)$ 为 Delt 函数, 当 $\cdot \neq 0$ 时, 取值 0; 反之, 取值 1; H 为网络的邻接矩阵。

下面以节点 v_i 的介数计算为例, 阐述介数贡献的思想。任意节点 v_s 与 v_t , 节点间最短路径长度 K 等于两者的距离 D_{st} (可通过 Floyd、Dijkstra 等算法获得), 进而根据式(3)计算出最短路条数 $m_k(s, t)$ 。并设这些路径经过节点 v_i 的条数为 $n_i(s, t)$, 则节点 v_s, v_t 对节点 v_i 介数贡献为 $\frac{n_i(s, t)}{m_k(s, t)}$ 。

若节点 v_i 被删除, 即将邻接矩阵 H 第 i 行和列元素全部置零。再利用式(1)计算 v_s 与 v_t 最短路条数, 记为 $m_k^{-i}(s, t)$ 。可得到:

$$n_i(s, t) = m_k(s, t) - m_k^{-i}(s, t) \tag{2}$$

若节点 v_s 与 v_t 的全部最短路径都经过节点 v_i 。则删除节点 v_i 后, v_s 与 v_t 间最短路径长度将大于 K , 即 $m_k^{-i}(s, t) = 0$ 。此时节点 v_s 与 v_t 对 v_i 的介数贡献为 1。

综上, 基于贡献的介数定义为:

$$B(i) = \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{s \neq t \neq i} \left(1 - \frac{m_k^{-i}(s, t)}{m_k(s, t)} \right) \tag{3}$$

需要注意的是: 即使被删除节点是网络的割点, 式(2)仍是可计算的, 其结果仍能区分被删除节点对网络的分割程度。因此, 与引言所述的第 2 类删除方法是不同的。

2 基于介数影响矩阵的重要度计算

网络邻接节点通过连接表现出一种依赖和路径备份关系, 并且通过间接连接传播这种拓扑依赖关系, 见图 1。

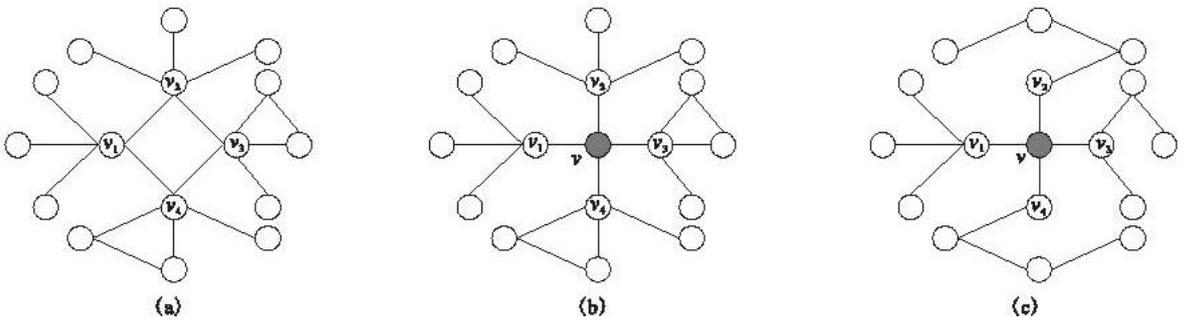


图 1 重要度变化对比示意

Fig. 1 Importance change comparison figure

图 1(b) 与(a) 比较, 由于 v_{1-4} 的断开和节点 v 的加入, 依赖关系变化, v_{1-4} 的重要度部分“贡献”给了 v ; 图 1(c) 与(b) 比较, 虽然 v 的介数并未改变, 但由于其邻接节点度和连通分支结构的改变, v 的重要度部分“贡献”给了 v_{1-4} 和它们的下游节点。介数仅体现出对最短路数目的占有程度, 并未反映出距离、拓扑结构等其它属性。因此仅通过介数描述重要度是片面的, 必须在拓扑结构的基础上加入重要度影响传播, 实现全面、客观的描述。

2.1 影响因子矩阵

为方便描述节点间重要度影响关系, 定义影响因子矩阵如下:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_{12} & \cdots & \alpha_{1N} \\ \alpha_{21} & 1 & \cdots & \alpha_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \alpha_{N1} & \alpha_{N2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中: 节点对自身的影响程度设置为 1, 即对角线元素为 1; α_{ij} 为节点 v_i 对节点 v_j 的重要度影响因子; A 中的第 i 行确定了节点 v_i 对其所有连通节点的影响程度。

同时, 节点若被删除, 对其邻接节点的连通性破坏最大, 对其间接连通节点的破坏较小。因此因子 α_{ij} 应是关于节点 v_i 与 v_j 之间距离 D_{ij} 的递减函数, 即具有衰减性。定义 α_{ij} 如下:

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{\left(D_{ij} \sum_{r=1, r \neq i}^N \frac{1}{D_{ir}} \right)}, \quad \sum_{j=1, j \neq i}^N \alpha_{ij} = 1 \quad (5)$$

此定义满足因子的归一化约束,它保证了将节点 v_i 的影响按照距离衰减原则全部分配到它所有连通节点上,进而保证了节点影响传播的对等性。

2.2 节点重要度的计算

介数不同的节点对其它节点的影响程度也不尽相同。节点介数越大,对网络路径资源的控制能力越大,即对其它节点的影响也越大。因此,将介数作为重要度基础指标是合理的。即将节点 v_i 对其它节点的总影响设定为其介数值 $B(i)$,则可得介数影响矩阵 I :

$$I = \begin{bmatrix} B(1) & B(1)\alpha_{12} & \cdots & B(1)\alpha_{1N} \\ B(2)\alpha_{21} & B(2) & \cdots & B(2)\alpha_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ B(N)\alpha_{N1} & B(N)\alpha_{N2} & \cdots & B(N) \end{bmatrix} \quad (6)$$

节点 v_i 重要度实际上是自身、其它节点对 v_i 重要度影响的叠加,所以节点 v_i 重要度为:

$$\text{IMC}(v_i) = \sum_{j=1}^N I_{ji} \quad (7)$$

以节点 v_i 为例,其邻接节点集合用 $\Lambda^{d_i}(v_i)$ 表示,它们对 v_i 的影响因子 α_{ji} ($v_j \in \Lambda^{d_i}(v_i)$) 的集合表示为 $\Phi^{d_i}(v_i)$,集合元素的个数等于节点度 d_i 。由于式(7)满足归一化条件,且 $D_{i\Lambda} = 1$ 最小,所以 Φ 包含的均是 Λ 中各节点影响的最大因子。 d_i 越大, Φ 占 v_i 所受影响的比重越大,通过式(9)的叠加重要度结果也越大,由此反映出节点度的影响。进而,网络拓扑影响可由各节点度和节点间的相互距离得到反映。因此,本文的评价方法兼顾了拓扑结构、节点度、距离、最短路径等因素对重要度的影响。

3 实验分析

以 ARPA(Advanced Research Project Agency, ARPA)网络为例展开讨论。ARPA 是重要度评价和网络可靠性研究中常用的拓扑结构,共 21 个节点、26 条链路(边),见图 2(a)。通过本文方法计算各节点重要度,并与介数法、文献[4]、[7]的评价结果作比较分析。

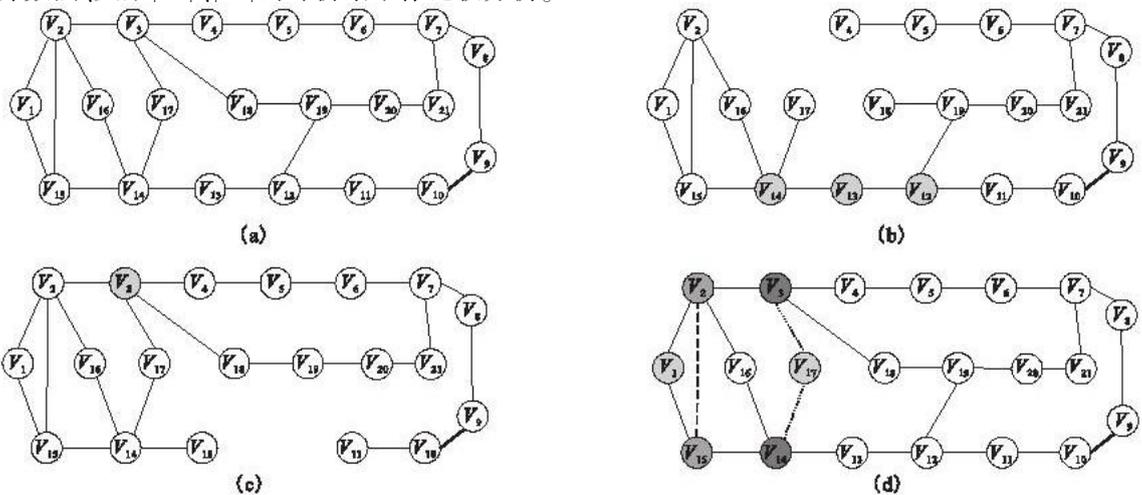


图2 ARPA网络拓扑与节点删除示意图

Fig. 2 ARPA network topology and node deletion figure

为便于对比分析,将各方法对 ARPA 网络节点重要度评价结果进行归一化,如表 1。

表1 ARPA 节点重要度评价结果

Tab. 1 Evaluation result of ARPA node importance

节点 序号	重要度				节点 序号	重要度			
	介数法	本文	文献[4]	文献[7]		介数法	本文	文献[4]	文献[7]
1	0	0.020 5	0.009 6	0.034 7	12	0.099 3	0.076 4	0.152 3	0.054 2
2	0.054 7	0.050 5	0.015 6	0.053 8	13	0.058 2	0.054 1	0.020 7	0.044 6
3	0.115 8	0.084 5	0.133 9	0.055 0	14	0.064 1	0.055 4	0.061 8	0.054 6
4	0.065 8	0.058 3	0.065 7	0.046 5	15	0.016 9	0.031 3	0.011 8	0.048 7
5	0.057 4	0.052 6	0.048 9	0.046 5	16	0.004 3	0.025 4	0.008 5	0.036 8
6	0.073 8	0.060 3	0.103 4	0.054 5	17	0.017 4	0.035 3	0.004 9	0.038 6
7	0.039 1	0.040 8	0.040 4	0.048 7	18	0.043 9	0.049 9	0.044 4	0.042 7
8	0.025 3	0.032 3	0.006 7	0.048 7	19	0.078 9	0.067 4	0.101 7	0.053 7
9	0.026 4	0.032 8	0.011 2	0.048 7	20	0.035 7	0.042 4	0.038 2	0.045 9
10	0.039 4	0.040 5	0.026 9	0.048 7	21	0.026 4	0.036 9	0.021 3	0.045 9
11	0.057 1	0.052 2	0.071 9	0.048 7					

从表1中可见,各方法对重要度的评价存在差异,排序也略有不同,评价指标选取的不同造成了这种差异。文献[4]以网络直径(节点平均最短距离)为评价指标,反映了最短路的长度,忽视了最短路条数和隐含于拓扑结构中可用路由;文献[7]以生成树作为指标,一定程度上反映了可用路由的数目,忽视了通信网络首选最短路的实际;本文方法综合考虑了这些因素,给出了较合理的评价。当然这并不否定别的结果,只是说明本文的方法考虑的因素更为全面和客观。直观上讲,图2(b)存在3个割点 v_{12-14} ,而图2(c)只有一个割点 v_3 。当各节点故障概率相同时,图2(b)更容易被分割。因此,判定 v_3 是最重要节点更客观一些、更贴合直观分析。

文献[7]也认为 v_3 最重要,但其重要度值小于本文结论,原因如下。从最短路的角度来看, v_3 仍具有较高的重要度(具有较大的介数),本文方法体现了此因素的影响,因此得到的重要度也相应增大。且文献[7]认为 v_{7-11} 的重要度相同,这并不符合位置引起重要度差异的事实。而本文方法能有效的区分出这5个节点差别,与文献[4]的结论一致。

介数法和本文认为 v_1 是最不重要节点,介数法认为其重要度为0。但实际上,任何网络节点都不是无用节点。虽然 v_1 不处于任何节点的最短路上,但它仍通过为其它节点提供可用路径而体现其重要性。例如图2(d),当 $v_2 \leftrightarrow v_{15}$ 的直连边故障, v_1 将是它们最短路的必经节点,故通过本文的重要度影响传播, v_1 获得了应有的重要度。再如文献[4]认为 v_{17} 是最不重要的,而 v_{17} 处于 $v_3 \leftrightarrow v_{14}$ 唯一最短路径上,此结论没有体现首选最短路所带来的重要性。

综上,本文方法以介数作为基础指标,依据拓扑结构传播重要度影响,获得对节点重要度的评价。方法考虑了最短路径的长度和条数、节点度、可用路径、节点间距离等因素对重要度的影响,体现了综合全面的评价原则,无需人为设定各因素权重,获得了较客观的结果。

4 结束语

通信网络节点的重要度描述了节点故障对网络性能的影响程度。客观的节点重要度评价是有效保护己方网络和攻击敌方网络的基础。本文结合网络首选最短路通信这一事实,采用介数作为基础指标,在综合分析各重要度影响因素的基础上,提出了介数影响传播的评价方法,并给出了一种基于贡献的介数计算方法。实验分析证明了该方法的客观性和有效性。

参考文献(References):

- [1] Yu Jiang, Hu Ai-qun, Ming He. Evaluation method for the network reliability based on the entropy measures [J]. IEEE trans inform theory, 2009, 10(12): 423-426.
- [2] Gallos L K, Cohen R, Argyrakis P. Stability and topology of scale-free networks under attack and defense strategies [J]. Phys rev lett, 2005, 94: 1-4.

- [3] 朱涛,张水平,郭戎潇,等. 改进的加权复杂网络节点重要度评估的收缩方法[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(8): 1902 - 1905.
ZHU Tao, ZHANG Shuiping, GUO Rongxiao, et al. Improved evaluation method for node importance based on node contraction in weighted complex networks[J]. Systems engineering and electronic, 2009,31(8):1902 - 1905. (in Chinese)
- [4] 余新,李艳和,郑小平,等. 基于网络性能变化梯度的通信网络节点重要程度评价方法[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2008, 48(4): 541 - 544.
YU Xin, LI Yanhe, ZHENG Xiaoping, et al. Node importance evaluation based on communication network performance grads [J]. Journal of tsinghua university: science and technology edition, 2008, 48(4): 541 - 544. (in Chinese)
- [5] 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,2006,79(11):80 - 83.
TAN Yuejin, WU Jun, DENG Hongzhong. Evaluation method for node importance based on node contraction in complex networks [J]. Systems engineering - theory & practice, 2006, 79(11):80 - 83. (in Chinese)
- [6] Newman M E J. A measure of betweenness centrality based on random walk [J]. Social networks, 2005, 27(1): 39 - 54.
- [7] 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 - 134.
CHEN Yong, HU Aiqun, HU Xiao. Evaluation method for node importance in communication networks [J]. Journal of communications, 2004, 25(8): 129 - 134. (in Chinese)
- [8] 赫南,李德毅,涂文燕,等. 复杂网络中重要性节点发掘综述[J]. 计算机科学,2007,34(12):1 - 6.
HE Nan, LI Deyi, GAN Wenya, et al. Mining vital nodes in complex networks [J]. Computer science, 2007, 34(12):1 - 6. (in Chinese)
- [9] Guimera R. Classes of complex networks defined by role - to - role connectivity profiles [J]. Nature physics, 2007(3):63 - 69.
- [10] 饶育萍,林竞羽,侯德亭. 基于最短路径数的网络抗毁评价方法[J]. 通信学报, 2009,30(4): 113 - 117.
RAO Yuping, LIN Jingyu, HOU Deting. Evaluation method for network invulnerability based on shortest route number [J]. Journal of communications, 2009, 30(4): 113 - 117. (in Chinese)
- [11] 王建伟,荣莉莉,郭天柱. 一种参数可调的网络节点重要性度量方法[J]. 科研管理,2009,30(4):74 - 79.
WANG Jianwei, RONG Lili, GUO Tianzhu. A method for measuring node importance in networks with the adjust parameters [J]. Science research management, 2009, 30(4):74 - 79. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

Node Importance Evaluation of Communication Network Based on Betweenness Influence Matrix

WANG Xiao - guang¹, WANG Feng¹, LI Sen²

(1. Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Unit 94221, Tai'an 271200, Shandong, China)

Abstract: Aimed at the problem that node importance evaluation of communication network is influenced by multi - factors, an evaluation method of node importance based on betweenness influencing matrix is proposed. In order to achieve an impersonal evaluation result, in the method, based on the influence of the topology structure of network on importance, the node betweenness is taken as a basic parameter to describe the controlling capacity of node to the shortest path. And then the influences of multi - factors such as degree, distance, min - path and other factors are put into the process of calculation to describe the difference in location and connecting branch between the nodes. Then, the difference between the direct and indirect influences by the distance attenuation is given. Finally, in combination with the proposed betweenness calculation based on contribution, the calculation of communication network node importance is done on the basis of the betweenness influencing matrix, thus an objective evaluation on node importance is achieved. The simulation result shows that the method is effective and objective without setting any factor weight.

Key words: communication network; node importance; topology; betweenness centrality