

doi: 10.7690/bgzd.2020.05.007

多属性决策分析在地域通信网络关键节点识别中的应用

刘 争, 祝 利, 安永旺

(国防科技大学, 合肥 230031)

摘要: 为解决传统地域通信网络节点识别存在的局限性, 采用 DS 证据组合方法融合不同节点属性对地域通信网络节点关键性进行综合评价。首先将地域通信网络关键节点影响因素划分为节点指挥层次、节点信息流量和节点拓扑特征等不同属性, 建立地域通信网络关键节点评价体系, 并以层次分析法为基础计算节点评价属性权重划分, 通过仿真验证与传统节点识别方法进行对比。结果表明: 该方法能克服单一属性评价的不足, 具有更细化的评价能力和更准确的评价结果排序。

关键词: 地域通信网; 关键节点识别; 证据理论

中图分类号: TP393.02 **文献标志码:** A

Application of Multi-attribute Decision Analysis in Key Nodes Identification of Regional Communication Networks

Liu Zheng, Zhu Li, An Yongwang

(National University of Defense Technology, Hefei 230031, China)

Abstract: To solve the limitations of traditional regional communication network node identification, we used DS evidence combination method to integrate different node attributes to overview the criticality of regional communication network nodes. First we divided influencing factors of key node evaluation into different attributes such as node command level, node information flow and node topology characteristics, so that the key node evaluation system of the regional communication network can be established, then we calculated node attribute weights by using analytic hierarchy process. Verification by simulation and compared with traditional methods, the results show that the method can overcome the shortcomings of single attribute evaluation, and it has more detailed evaluation ability and get more accurate evaluation results.

Keywords: regional communication network; key node identification; evidence theory

0 引言

地域通信网络是一种由骨干节点、入口节点和信息传输链路构成的地域栅格化通信网络^[1], 主要实现作战地域内作战单元之间的信息共享, 协助形成整体作战优势。地域通信网络内的关键节点则起到网络运行的支撑作用, 因此, 识别网络关键节点有助于引导对其干扰和打击, 从而有效破坏敌方通信网络组织结构^[2]。

将通信网络类比为由节点与边构成的图表示。文献[3]提出用情报、协同和指挥等 3 种信息流表示, 结合节点介数对网络关键节点进行评价; 文献[4]基于通信网内产生的报文/地址 IP 之间的关系构成关联矩阵, 基于流量计算节点介数并综合节点连接度对网络节点重要程度排序; 文献[5]提出节点之间功能链关系, 并依据功能区分关键节点; 文献[6]建立电力通信网络节点影响评价体系, 结合节点聚合度

识别电力通信网络关键节点。其中文献[3-5]关联流量和节点拓扑特征对节点综合评价, 但节点介数和节点连通度相对片面且只能表示节点相对于网络的局部信息。文献[6]则建立电力通信网关键节点的综合评价体系, 能够从多角度对节点关键性进行评价。

传统方法从多种不同角度对网络关键节点进行识别^[7], 如以与节点相连边的数量统计作为识别依据的节点的度; 以通过节点最短路径的数目作为依据的节点介数; 以表征节点和网络内其他节点之间距离的节点接近度等。这些评价方法存在一定局限性^[8], 如度的评价只能说明节点在局部网络内的影响力仅适用于规模交小的网络; 介数计算则不具备通用性, 容易产生网络内多个节点介数相等的情况; 接近度则对于网络拓扑过分依赖, 缺乏灵活性。

DS 证据理论是一种处理不确定信息的多属性决策分析方法, 具有表达对事物的“不确定”或“不

收稿日期: 2019-12-31; 修回日期: 2020-01-13

作者简介: 刘 争(1995—), 男, 湖北人, 硕士, 从事电子对抗情报分析与处理、信息与通信工程研究。E-mail: 985720530@qq.com。

知道”的能力，在信息融合、决策评价、模式识别等领域得到广泛应用。考虑到地域通信网络识别是一种非协作识别方式，具有认识和评价上的不确定性，笔者在建立通信网络评价体系的基础上，通过证据组合方法，融合不同节点属性对地域通信网络节点关键性综合评价。最后通过仿真验证对比传统节点识别方法，说明文中方法的有效性和实用价值。

1 地域通信网络关键节点评价体系

地域通信网络节点关键性评价要素包含通信节点属性和节点在网络中所表现出的拓扑特征^[9]。其中节点属性是节点自身所拥有的可区分特征，如该通信节点在作战建制中的层次级别，通过该节点信息流量的大小等，拓扑特征则表现为节点在网络拓扑中体现出的地位价值。具体构成地域通信网络关键节点评价体系如图 1 所示。

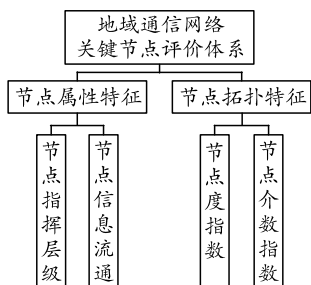


图 1 地域通信网络关键节点评价体系

地域通信网络关键节点评价体系中节点属性特征划分为节点指挥层级(C)和节点信息流量(I)，其中节点指挥层级依据作战部队建制级别划分可区分为旅、团、营、连、排 5 个层级。节点信息流量则表示为地域通信网内单位时间通过该节点信息统计量大小。

笔者引入节点度指数(K_c)和节点介数指数(T_c) 2 类节点拓扑特征。由于传统表示节点拓扑特征的介数不能够完全说明节点在全网中的重要性，为此文献[10]提出节点度指数的概念：

定义 1 设某网络内包含 N 个节点，第 i 个节点的度为 k_i ，其中 $i=1,2,\dots,N$ 。网络所有节点度的总和为 $k_w = \sum k_i$ ，设 m 节点的度指数为 k_{em} ，那么任意节点 i 的度指数 k_{ei} 定义为：

$$k_{ei} = k_w^{\frac{k_i - k_m}{k_w}} \quad (1)$$

作为节点之间权重比较， k_m 一般取节点度数最小值。度指数将节点度数之间差和节点度数总和作商，并将度数和与商分别作为底数和指数，形成了对全网节点拓扑的考量。

定义 2 设某一网络内包含 N 个节点，第 i 个节点介数为 t_i ，其中 $i=1,2,\dots,N$ 。网络所有节点介数总和为 $t_w = \sum t_i$ ，设 m 节点的度指数为 t_{em} ，那么任意节点 i 的度指数 t_{ei} 定义为：

$$t_{ei} = t_w^{\frac{t_i - t_m}{t_w}} \quad (2)$$

类似的， t_m 一般取节点度数的最小值，考虑全网节点拓扑将节点介数和与节点介数相对商分别作为底数和指数。

2 基于层次分析法的指标权重划分方法

在指标数据融合之前，通过层次分析方法对地域通信网络关键节点的 4 项影响因素进行评判，划分各类影响因素权重，从而修正参与融合前的证据^[11]。

层次分析法是一种结合定量和定性分析的评价方法，将评价目标划分为多层次，并比较每层指标相对于上一层指标影响，由下至上计算最底层指标的影响权重^[12]。

综合多个专家经验，对属性特征和拓扑特征进行评价，得到影响程度划分为(0.56,0.44)。笔者采用五分标度法对各层次指标权重比较分析，得到评价结果如表 1、表 2 所示。

表 1 节点属性特征权重比较值

指挥层次	1	3/5
信息流量	5/3	1

表 2 节点拓扑特征权重比较值

度指数	1	3/4
介数指数	4/3	1

对各层次因素权重比较值进行一致性检验，首先分别求取矩阵特征值为 2，对应的特征向量分别为：(0.857,0.514)，(0.800,0.600)。根据式(3)、式(4)分别计算一致性指标 $C_1=0$ ，一致性比率 $C_R=0$ 。满足 $C_R < 0.1$ 一致性检验条件(其中 q 为比较矩阵阶数)。

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - q}{q - 1} \quad (3)$$

$$C_R = C_1 / R_1 \quad (4)$$

以此计算地域通信网络关键节点，4 类影响因素指挥层次(C)、信息流量(I)、节点度指数(K_c)、节点介数指数(T_c)权重 Q 划分为：0.35, 0.21, 0.25, 0.19。

3 证据理论基础

DS 证据理论由哈佛大学数学家 Dempster 提

出, 并由其学生 Shafer 进一步发展完善, 可描述为一种获取证据并对证据进行组合的处理模糊问题的方法, 广泛用于多属性决策、信息融合和专家系统等领域。主要包括以下基本概念^[13]:

基本概率赋值函数。设识别框架为 U , 函数 $m:2^U \rightarrow [0,1]$ 满足条件: $\begin{cases} m(\Phi)=0 \\ \sum_{A \subset U} m(A)=1 \end{cases}$ 时, 称 m 为 U

上的基本概率赋值(BPA), $m(A)$ 表示为对 A 的信任程度。

信任函数。信任函数(blief function) $BEL(A)$ 表示对命题 A 信任程度的总和, 用以度量证据的不确定性。定义 $BEL:2^U \rightarrow [0,1]$ 为:

$$BEL(A) = \sum_{B \subset A} m(B) \quad (\forall A \subset U). \quad (5)$$

似然函数。似然函数(plausibility function) $Pl(A)$ 表示对命题 A 非假的信任度, 用以处理“不知道”引起的不确定性, 定义为

$$m(C) = \begin{cases} \frac{\sum_{\substack{\bigcap_{A_i=C} 1 \leq i \leq n}} \prod m_i(A_i)}{1 - \sum_{\substack{\bigcap_{A_i=\emptyset} 1 \leq i \leq n}} \prod m_i(A_i)} = \frac{\sum_{\substack{\bigcap_{A_i=C} 1 \leq i \leq n}} \prod m_i(A_i)}{\sum_{\substack{\bigcap_{A_i \neq \emptyset} 1 \leq i \leq n}} \prod m_i(A_i)} & \forall C \subset U, C \neq \emptyset \\ 0 & C = \emptyset \end{cases} \quad (9)$$

4 基于多属性决策评价的关键节点识别方法

建立地域通信网络节点识别框架^[14], 划分为重要和不重要 2 种, 具体表示为 $\Theta = \{H, L\}$, 其中 H 、 L 分别表示重要和不重要。为消除不同影响因素量纲之间差异, 需将不同影响因素侦测指标值进行转换, 换算成证据度量表达(以节点度指数为例):

$$m_{K_{ei}}(H) = (K_{ei} - K_{emin}) / (K_{emax} - K_{emin} + \omega); \quad (10)$$

$$m_{K_{ei}}(L) = |K_{ei} - K_{emax}| / (K_{emax} - K_{emin} + \omega); \quad (11)$$

$$m_{K_e}(\Theta) = 1 - m_{K_{ei}}(H) - m_{K_{ei}}(L). \quad (12)$$

其中: $m_{K_i}(H)$ 为依据度指数得出节点重要的证据; $m_{K_i}(L)$ 为节点不重要的证据; $m_{K_{ei}}(\Theta)$ 为不确定节点重要如何分配的证据; ω 是值为 1 的调节参数, 避免分母为 0 的情况发生。笔者将不确定分配的部分平分给 $m(H)$ 和 $m(L)$ 。

在计算关键节点影响因素权重基础上对获得的证据进行加权, 得到修正证据源表示如下:

$$m'_{K_{ei}}(H) = (m_{K_{ei}}(H) + m_{K_{ei}}(\Theta)/2)Q(K_e); \quad (13)$$

$$m'_{K_{ei}}(L) = (m_{K_{ei}}(L) + m_{K_{ei}}(\Theta)/2)Q(K_e). \quad (14)$$

融合修正证据源得到识别结果并据此进行排

$$Pl(A) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m(B) \quad (\forall A \subset U). \quad (6)$$

证据合成法则可对不完全冲突的证据进行合成, 得到新的信任分配函数, 反映出对不同证据之间的联合作用。设识别框架 U 上存在信任函数 $BEL1$ 和 $BEL2$, m_1 和 m_2 分别是其对应的基本概率函数 BPA, 焦元分别为 A_1, A_2, \dots, A_k 和 B_1, B_2, \dots, B_n , 若

$$K = \sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m_1(A_i)m_2(B_j) < 1, \quad (7)$$

那么, 由下式定义的函数 $m:2^U \rightarrow [0,1]$ 是 BPA:

$$m(C) = \begin{cases} \sum_{A_i \cap B_j = C} m(A_i)m_2(B_j) / (1 - K) & \forall C \subset U, C \neq \emptyset \\ 0 & C = \emptyset \end{cases} \quad (8)$$

式中 K 为 m_1 、 m_2 之间的矛盾程度。若 K 接近 1, 则认为 m_1 、 m_2 之间存在较大矛盾, 不宜对两者进行组合; 若 K 值较小, 则 m_1 、 m_2 可参与组合。类比得到多证据组合运算公式, 可表示为

序。整个识别模型构建如图 2 所示。

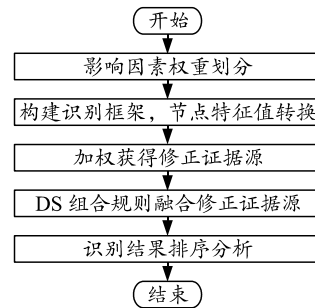


图 2 基于多属性决策评价的节点识别模型

5 仿真实验

文中设置 2 次仿真实验。第 1 次实验说明节点度指数和节点介数指数相对于传统节点度数和介数识别的优越性^[15]。第 2 次实验以某地域通信网络为背景说明笔者提出方法的有效性。

1) 实验 1。

设有包含 5 个节点(P_1, P_2, P_3, P_4, P_5)的无权无向网络如图 3 所示。

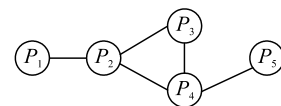


图 3 节点拓扑

由图可得：节点度数分别为 $k_1=1, k_2=3, k_3=2, k_4=3, k_5=1$ ，节点度数总和为 $k_w=10$ 。以 P_1, P_5 的度数为参考值，分别计算节点度指数： $k_{e1}=1, k_{e2}=1.58, k_{e3}=1.26, k_{e4}=1.58, k_{e5}=1$ 。从中可以看出：节点度指数因考虑了网络内所有节点，故其量化标准具有比较性，而度数仅表示节点自身重要程度，只能得到相对重要排序。

假设网络内 3 个节点介数分别为： $T_1=0.1, T_2=0.2, T_3=0.3$ 。由公式计算节点介数指数为： $T_{e1}=0, T_{e2}=0.089, T_{e3}=0.186$ 。类似的，节点介数指数将所有节点考虑进去，并将最小介数作为参考计算的结果，具有比较性质。

2) 实验 2。

如图 4 所示，设置某地域通信网络为实验背景，网络包含 18 个节点，记为 $(P_1, P_2, \dots, P_{18})$ 。

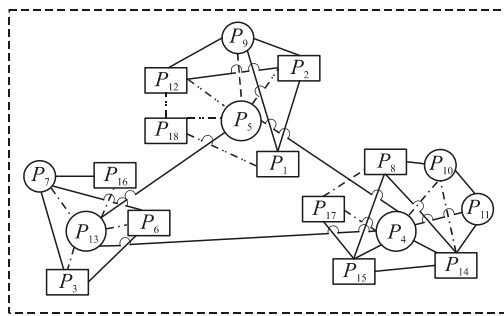


图 4 地域通信网络节点拓扑

参照实战环境模拟网络内节点属性特征，并依据地域通信网络拓扑，得到拓扑特征参数表示如表 3 所示 (其中指挥层次划分为 1~5 级)。

表 3 地域通信网络节点属性参数值统计

通信节点编号	指挥层次	信息流量	节点度指数	节点介数指数
P_1	2	352	1.256	0.005 1
P_2	2	462	1.256	0.005 0
P_3	3	485	1.186	0.005 0
P_4	5	1 020	1.490	0.030 8
P_5	5	964	1.490	0.025 1
P_6	1	231	1.256	0.005 0
P_7	2	310	1.256	0.005 0
P_8	4	652	1.256	0.005 2
P_9	1	186	1.256	0.005 0
P_{10}	2	440	1.256	0.005 5
P_{11}	1	216	1.186	0.005 0
P_{12}	4	524	1.256	0.005 1
P_{13}	5	783	1.408	0.020 0
P_{14}	3	496	1.333	0.005 6
P_{15}	2	315	1.256	0.005 5
P_{16}	4	960	1.186	0.005 6
P_{17}	3	852	1.186	0.005 0
P_{18}	3	766	1.186	0.005 4

将所有指标参数值归一化并转换为证据度量的表达形式，按照指标间的权重划分，将不同证据进行组合，得到识别结果如表 4 所示。

表 4 节点属性融合结果

通信节点编号	$m_c(H)$	$m_l(H)$	$m_{k_c}(H)$	$m_{T_c}(H)$	$m(H)$
P_1	0.375 0	0.349 5	0.365 1	0.252 0	0.031 7
P_2	0.375 0	0.415 4	0.365 1	0.250 0	0.033 8
P_3	0.500 0	0.429 3	0.250 0	0.250 0	0.031 7
P_4	0.750 0	0.750 0	0.750 0	0.750 0	0.219 6
P_5	0.750 0	0.716 4	0.750 0	0.639 6	0.190 3
P_6	0.250 0	0.277 0	0.365 1	0.250 0	0.024 6
P_7	0.375 0	0.324 4	0.365 1	0.250 0	0.030 7
P_8	0.625 0	0.529 4	0.365 1	0.253 9	0.049 6
P_9	0.250 0	0.250 0	0.365 1	0.250 0	0.023 8
P_{10}	0.375 0	0.402 3	0.365 1	0.259 7	0.034 1
P_{11}	0.250 0	0.268 0	0.250 0	0.250 0	0.019 3
P_{12}	0.625 0	0.452 7	0.365 1	0.252 0	0.046 0
P_{13}	0.750 0	0.607 9	0.615 1	0.540 7	0.133 9
P_{14}	0.500 0	0.435 8	0.491 8	0.261 6	0.049 7
P_{15}	0.375 0	0.327 4	0.365 1	0.259 7	0.031 5
P_{16}	0.625 0	0.714 1	0.250 0	0.261 6	0.047 3
P_{17}	0.500 0	0.649 3	0.250 0	0.250 0	0.002 6
P_{18}	0.500 0	0.597 7	0.250 0	0.257 7	0.000 0

度指数和介数指数均是基于全局网络节点考虑节点关键性，从对比排序中也可以看出：相比于网络边缘节点，处于网络拓扑中心的节点 P_4, P_5, P_{13} 拓扑特征参数值更大，在评价融合结果中表现更为重要。度指数算法将节点划分为 5 个不同的度指数，而节点介数指数则被划为 9 个，体现出介数指数相对于度指数而言，对关键节点的评价更加细化。同时分析表中数据可知：除节点 P_{17}, P_{18} 外，其他节点排序结果和融合结果相近，而指挥层次排序对融合结果影响不大，说明信息流量属性相对于指挥层次具有更高的贡献率。且基于不同属性的排序结果存在差异，不同属性区分能力不同且评价角度较为局限。故单一节点属性无法完全评估网络节点重要性，需要融合节点不同属性进行综合评价，更为准确地评价关键节点。如图 5 所示，分别考虑单一节点属性，得到节点排序，并与文中方法对比。

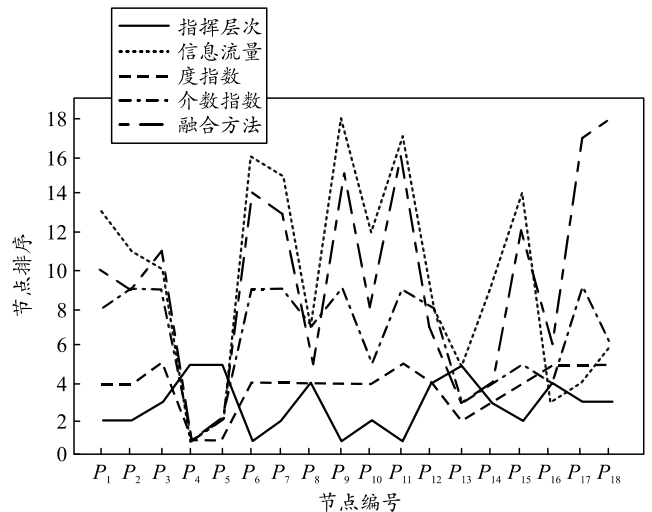


图 5 地域通信网络节点排序对比