

基于功能贡献度的网络化防空节点重要性评价方法

罗金亮 金家才 王雷

(国防科技大学电子对抗学院 合肥 230037)

摘要 为实现对网络化防空节点这类“功能性社会网络”节点的重要性进行评价,在分析当前网络节点重要性评价方法不足的基础上,提出了一种基于功能贡献度的节点重要性度量方法,其综合考虑了节点的功能属性及结构属性。为验证该方法的有效性 & 优越性,构建了网络连通效率及作战环等两类网络化体系效能指标,并运用该评价方法在ARPA网络这类“一般性社会网络”及防空网络这类“功能性社会网络”上进行节点重要性评价。实验结果表明,该方法在网络节点重要性评估的准确性及适用性方面存在一定优势。

关键词 复杂网络,关键节点,功能贡献度,网络化防空体系

中图分类号 TN972 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.02.031

Evaluation Method for Node Importance in Air Defense Networks Based on Functional Contribution Degree

LUO Jin-liang JIN Jia-cai WANG Lei

(Institute of Electronic Countermeasure, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract In order to evaluate the importance of node in air defense networks which is a kind of functional social network, on the basis of analyzing the shortcomings of current evaluation method for network node importance, a evaluation method for node importance based on functional contribution was put forward. The method comprehensively considers the functional properties and structural properties of the node. In order to verify the validity and superiority of the method, two types of efficiency index for networked systems, such as network connectivity efficiency and combat loop, were built, and the evaluation method was used to evaluate the node importance in ARPA and air defense networks. Experimental results show that the evaluation method has some advantages in accuracy and applicability of the network node importance evaluation.

Keywords Complex networks, Key nodes, Functional contribution degree, Networked air defense systems

1 引言

随着信息及网络技术在防空领域的广泛运用,防空体系逐步向信息化、网络化和一体化转变,同时衍生出了“一点发现全网皆知”的预警探测、“委托或接力实施指挥”的作战指挥、“某站发射,别站控制”的武器控制等全新防空作战运用方式,从而给空中进攻作战行动带来了极大的威胁与挑战。为有效保障空中进攻作战的顺利实施,空袭一方通常采取联合压制敌防空体系作战(J-SEAD)的行动,以对敌的网络化防空体系实施全面毁瘫,在当前“信息主导、精打要害、联合制胜、体系作战”的新形势军事战略方针的指导下,如何为联合压制敌防空作战提供合理的目标选择参考,以实现“攻点瘫面、攻点瘫体”的体系破击效果,已成为联合压制敌防空体系作战筹划的核心问题。由此可见,有效评价敌网络化防空作战体系中各作战节点的重要程度,以确定敌防空作战体系中的关键

节点,已成为了掣肘联合压制敌防空体系作战效能发挥及有效保障空中进攻作战顺利实施的关键基础和重要前提。

目前,用于评价网络化作战体系中节点重要性的方法可分为两大类:1)基于传统数理分析模型进行节点综合价值评定^[1-2]。此类方法通常选取一类或几类指标(如作战能力、抗打击能力、修复能力等)进行综合计算,然后结合各指标的权重采取某种算法对所得节点的各指标值进行综合叠加。该类方法的不足在于其仅从节点自身功能属性层面入手,未考虑节点加入或消亡给作战体系整体效能带来的“涌现性”及“坍塌性”的影响。2)基于复杂网络模型进行节点综合价值评定^[3-4]。此类方法通常以复杂网络理论为依据,分析影响各节点对整个作战体系网络结构及功能的影响程度,以此来确定其重要程度。由于该类方法可有效反映各节点对作战体系整体效能的支撑程度,并能有效体现各节点、各系统有机组合成体系后所带来的效能涌现,因此被大家广泛接受并成为了近

到稿日期:2016-11-24 返修日期:2017-11-18 本文受国家自然科学基金军事学项目(16GJ004-276),全军军事类研究生资助课题(2015JY251),安徽省自然科学基金项目(1308085QF105)资助。

罗金亮(1985-),男,博士,讲师,主要研究方向为电子对抗战术、信息作战仿真,E-mail:ljl200311@163.com(通信作者);金家才(1968-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电子对抗战术,E-mail:Jinjiacai@163.com;王雷(1980-),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向为网电对抗战术,E-mail:wanglei001@163.com。

些年来的研究热点^[5-10]。目前,基于复杂网络理论进行节点重要程度的评价方法主要集中在“社会网络”及“系统科学”两个方向。

社会网络分析方法的核心思想是:节点重要度等于其在网络中的显著程度。节点在网络中的显著程度通常由两类指标进行表征:1)该节点的邻居节点的数量及质量。其反映着节点对网络局部的影响能力,如节点度^[11-14]、特征向量中心性^[15-17]、PageRank^[8]等。此类指标计算简便,只能反映节点对网络局部的重要程度。2)该节点在网络中的位置。其反映对整体网络信息的控制及扭转能力,如节点介数、K-壳值、接近中心等。此类指标能反映节点对网络的整体影响程度,但因计算复杂而不太适用于大规模网络的计算,同时也无法有效反映节点对体系功能的影响。

系统科学分析方法的核心思想是:节点重要度体现在该节点被删除(毁伤)后对整个网络体系功能的破坏程度。节点删除分析的具体操作方法主要分为两类:1)节点移除法,如求出节点移除后网络的最短距离及网络的生成树数目等;2)节点收缩法,即将被分析节点与其邻居节点进行合并,收缩成一个节点,并求出节点收缩前后网络凝聚程度的变化情况。此类方法虽然可以在一定程度上反映节点对网络整体的某一功能的影响程度,但其计算复杂程度远大于“社会网络分析”两类计算指标中的任何一类,且当前缺乏对网络化作战体系功能进行有效描述的合理指标。

由此可见,基于复杂网络模型的分析方法已成为了评价网络化防空体系中各节点重要程度的热点及核心方法,且经过长期发展演变出了“两大方向、四类方法”,但其在以下几个方面仍存在一些不足:

1)目前,基于复杂网络模型的评估算法存在“简单而不准确,准确而又复杂”的现实不足。如节点度这类简单算法只能反映对网络局部的影响,而节点移除法这类可有效反映节点对整个网络体系的某一功能的具体影响的算法却又因计算过于复杂而无法适用于大规模网络及对时效性要求较高等场合的节点重要性评估。

2)目前,基于复杂网络模型的评估算法存在“顾功能丢结构、顾结构弃功能”的现实不足。如社会网络分析方法中的相关算法关注的核心为网络“结构”,通常不考虑网络体系的整体“功能”;而系统科学分析方法中的相关算法关注的核心在于节点对网络体系整体中某一具体“功能”的影响,而对网络“结构”的关注较少。

3)基于复杂网络模型的评估算法存在“各算法具有一定的适用性,而特殊网络仍需特殊分析”的现实不足。以防空作战网络为例,其与普通社会网络存在许多差别,主要体现在:①作战网络通常由规则网络和随机性连边构成,而一般社会网络通常为规则网络或随机网络;②作战网络中的节点具有一定的层次性,而一般社会网络中的节点通常属于同一层次;③作战网络中存在节点异质的特性,且其核心功能通常需要各型节点协同作用才能得以发挥,而一般社会网络通常为同类节点。

4)基于复杂网络模型的评估算法存在“难以依据‘局部’析‘整体’、无法依据‘静态’析‘动态’”的现实不足。以联合压

制敌防空系统作战筹划为例,在联合压制敌防空系统作战筹划的过程中,往往需要分析敌网络化防空体系各作战节点的重要程度,以对重要节点实施打击,从而有效毁瘫敌网络化防空体系。然而在实际作战筹划过程中,对敌网络化防空节点重要程度的分析通常只能基于敌网络化防空体系这一局部且静态的网络结构进行,与实际作战过程相比,明显缺失了对目标节点及与之动态相连的侦察链、攻击链的分析。不少研究为有效解决这一问题,在研究分析过程中往往对上述内容进行了人为假设,但这一人为假设的加入往往使得分析内容因动态而复杂、分析结论因假设而不真。

综上所述,为有效实现对敌网络化防空体系的全面压制,可充分借鉴现有的复杂网络分析模型及算法,在充分分析防空作战网络特殊性的基础上,针对性地构建网络节点重要性评估算法及评估指标,以准确、快速地选出敌网络化防空体系的关键节点,为联合压制敌防空体系作战提供合理、有效的目标参考。

2 基于功能贡献度的节点重要性度量算法

网络化防空作战体系不同于一般的社会网络,其网络内存在异质节点,通常包含侦察、指控、火力及目标4类节点,不同类型的节点为整个作战体系提供不同的功能支撑,因此针对不同类型的节点,在评估其重要性时往往会设置不同的权重;然而对于同类节点,其自身在功能属性(主要取决于该节点核心功能对目标的作用覆盖能力)及结构属性(主要取决于该节点的邻近节点及网络位置)上的不同,将导致其对整个网络化防空体系作战功能的有效发挥的贡献程度各不相同,也由此体现了该节点在网络化防空体系中的重要程度。

综合上述分析可知,网络化防空体系中各节点的重要性主要取决于其对整个网络化体系作战功能发挥的贡献程度,即功能贡献度。功能贡献度主要由以下3个方面决定:1)该节点的类型权重;2)该节点的功能属性;3)该节点的结构属性。因此,节点的功能贡献度可表示为:

$$CD_i = T_i (k_F \frac{F_i}{\sqrt{\sum_{j=1}^N F_j^2}} + k_S \frac{S_i}{\sqrt{\sum_{j=1}^N S_j^2}}) \quad (1)$$

其中, T_i 为节点*i*的类型权重,且节点所有类型权重之和必须为1,即 $\sum_{j=1}^M T_j = 1$; k_F 为节点功能属性权重, k_S 为节点结构属性权重,且 $k_F + k_S = 1$; F_i 为节点*i*的功能属性值; S_i 为节点*i*的结构属性值; N 为网络化体系中的节点数量。

2.1 节点功能属性值计算模型

节点*i*的功能属性值 F_i 通常取决于该节点核心功能对目标的作用覆盖能力。可将节点对目标的功能作用方式分为两类:1)直接作用,如防空作战中侦察节点及火力节点对目标的作用方式;2)间接作用,如防空作战中指控节点对目标的作用方式。对于采取“直接作用”方式的节点,其功能属性值其对目标作用覆盖区域的大小来决定,如防空作战中侦察节点的功能属性值以其对目标突防航路的覆盖面积来决定;对于采取“间接作用”方式的节点,其功能属性值则以其性能指标的大小来决定,如防空作战中指控节点的功能属性值以其指挥层级及指挥处理的能力来决定。因此,节点*i*的功能属性

战环数 N_{scl} 。为有效计算作战环数 N_{cl} ，本文拟采取深度优先搜寻算法来计算 N_{cl} ，具体流程如下：

- 1) 定义节点结构体 Struct V ，其内容包含当前节点的数据信息以及连边的下一节点指针；
- 2) 以目标节点 V_T 为起始，建立 Struct V 数组；
- 3) 根据节点的连边关系，逐次建立连接关系链表；
- 4) 遍历连接关系链表，找出终点节点为 V_T 的链路集 $Links[V_T \rightarrow V_T]$ ；
- 5) 遍历链路集 $Links[V_T \rightarrow V_T]$ ，在其中找出分别至少具有指控节点 V_{C2} 、侦察节点 V_S 、火力节点 V_F 、目标节点 V_T 各 1 个的链路，形成“有效作战环”链路集 $Links[V_T \xrightarrow{V_S, V_{C2}, V_F} V_T]$ ；

6) 统计“有效作战环”链路集 $Links[V_T \xrightarrow{V_S, V_{C2}, V_F} V_T]$ 的链路数量，得到作战环数 N_{cl} 。

在采用“作战环数” N_{cl} 进行表征网络化体系效能时，节点 i 的重要性可通过计算删除节点 i 后作战环数下降比 $\epsilon_{N_{cl}^i}$ 来验证。 $\epsilon_{N_{cl}^i}$ 的计算模型为：

$$\epsilon_{N_{cl}^i} = 1 - \frac{N_{cl}^i}{N_{cl}^0} \tag{8}$$

其中， N_{cl}^0 为在未删除任何节点条件下的网络化体系可形成的作战环数。

4 实例验证

为进一步验证“基于功能贡献度”的网络节点重要性评价算法的有效性及其适用性，下面运用该算法分别对一般性社会网络及功能性社会网络进行节点重要性评价，并运用“节点删除后的网络体系效能下降率”进行有效性验证。其中“一般性社会网络”主要以美国 ARPA(Advanced Research Project Agency)网络为例；“功能性社会网络”主要以按实际规则随机

生成的防空网络为例。

4.1 ARPA 网络的节点重要性评估

ARPA 网络是目前进行网络节点重要性分析的常用实例，其网络拓扑结构如图 2 所示。该网络由 21 个节点和 26 条连边组成，网络节点平均度值在 2~4 之间，大部分节点的度值为 2，网络平均路径长度为 3.4667。由于 ARPA 网络为一般性的社会网络，其网络体系效能通常体现为网络某种流的传播及影响能力，因此选择网络连通效率下降比 ϵ_{D_i} 作为其网络体系效能的评价指标，该网络的初始网络连通效率为 0.3886。

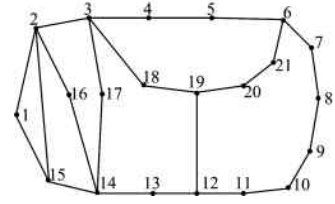


图 2 ARPA 网络的拓扑结构图

Fig. 2 Topology diagram of ARPA network

下面运用本文所提的基于功能贡献度的节点重要性度量算法对 ARPA 网络进行节点重要性计算并排序。由于 ARPA 网络为一般性的社会网络，不考虑网络各节点的功能属性之间的区别，因此设定 $k_F = 0, k_S = 1$ ；同时，由于 ARPA 网络中的各节点均为同类节点，不存在异质之分，因此设定 $T_i = 1$ ；再者，由于 ARPA 网络的网络体系效能以“网络连通效率”为主，因此在考虑节点在网络结构中的重要性时节点的网络位置显然比邻居节点状态更重要，故设定 $k_N = 0.2, k_P = 0.8$ 。

根据上述所设定的参数，运用基于功能贡献度的算法对 ARPA 网络的节点重要性值进行计算，并与文献[19-21]的计算结果进行对比，结果如表 1 所列。

表 1 ARPA 网络的节点重要性评估结果

Table 1 Evaluation results of node importance in ARPA network

| 节点排序 | 文献[19] | | 文献[20] | | 文献[21] | | 本文算法 | | 结果验证 | |
|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|
| | 重要度值 | 节点编号 | 重要度值 | 节点编号 | 重要度值 | 节点编号 | 重要度值 | 节点编号 | 效能下降比值 | 节点编号 |
| 1 | 0.2987 | 2 | 1 | 3 | 0.9930 | 3 | 0.4607 | 3 | 0.1944 | 3 |
| 2 | 0.2984 | 3 | 0.8538 | 2 | 0.9864 | 14 | 0.3554 | 12 | 0.1668 | 12 |
| 3 | 0.2522 | 15 | 0.8423 | 14 | 0.9864 | 15 | 0.2946 | 14 | 0.1487 | 19 |
| 4 | 0.2369 | 14 | 0.6654 | 15 | 0.9836 | 6 | 0.2873 | 19 | 0.1438 | 14 |
| 5 | 0.2214 | 17 | 0.6615 | 19 | 0.9780 | 12 | 0.2794 | 2 | 0.1399 | 6 |
| 6 | 0.1978 | 16 | 0.6385 | 12 | 0.9721 | 2 | 0.2545 | 6 | 0.1311 | 2 |
| 7 | 0.1970 | 18 | 0.6154 | 17 | 0.9671 | 19 | 0.2498 | 4 | 0.1257 | 4 |
| 8 | 0.1845 | 19 | 0.6077 | 18 | 0.8797 | 7 | 0.2307 | 13 | 0.1201 | 13 |
| 9 | 0.1839 | 13 | 0.5500 | 13 | 0.8797 | 8 | 0.2049 | 5 | 0.1184 | 11 |
| 10 | 0.1815 | 12 | 0.5115 | 16 | 0.8797 | 9 | 0.2004 | 11 | 0.1162 | 18 |
| 11 | 0.1562 | 4 | 0.5000 | 4 | 0.8797 | 10 | 0.1803 | 18 | 0.1135 | 5 |
| 12 | 0.1528 | 1 | 0.4038 | 6 | 0.8797 | 11 | 0.1392 | 15 | 0.1064 | 20 |
| 13 | 0.1261 | 6 | 0.3808 | 1 | 0.8387 | 4 | 0.1357 | 10 | 0.1057 | 17 |
| 14 | 0.1115 | 20 | 0.3269 | 20 | 0.8387 | 5 | 0.1339 | 7 | 0.1056 | 7 |
| 15 | 0.1090 | 5 | 0.3192 | 5 | 0.8279 | 20 | 0.1295 | 20 | 0.1026 | 15 |
| 16 | 0.1062 | 11 | 0.2654 | 11 | 0.8279 | 21 | 0.1114 | 17 | 0.1006 | 21 |
| 17 | 0.1023 | 21 | 0.2154 | 21 | 0.8051 | 13 | 0.0944 | 21 | 0.1001 | 10 |
| 18 | 0.0935 | 7 | 0.1269 | 7 | 0.7701 | 18 | 0.0902 | 9 | 0.0942 | 8 |
| 19 | 0.0680 | 10 | 0.0808 | 10 | 0.6977 | 17 | 0.0862 | 8 | 0.0927 | 9 |
| 20 | 0.0634 | 8 | 0.0115 | 8 | 0.6639 | 16 | 0.0758 | 16 | 0.0918 | 16 |
| 21 | 0.0624 | 9 | 0 | 9 | 0.6262 | 1 | 0.0620 | 1 | 0.0854 | 1 |

从表 1 中可以看出,基于文献[19-21]中的算法及本文所提算法对 ARPA 网络进行了节点重要性评估,各评估算法的评估结果之间及各算法与网络体系效能验证结果之间均存在一定差别:1)在评估 ARPA 网络中最重要节点的结果方面,本文算法、文献[20-21]中的算法、及通过网络体系效能下降率验证的方法均认为节点 3 为最重要节点,而文献[19]认为节点 2 为最重要节点;2)在评估 ARPA 网络中最次要节点的结果方面,本文算法、文献[21]中的算法及通过网络体系效能下降率验证的方法均认为节点 1 为最次要节点,而文献[19-20]认为节点 9 为最次要节点;3)在对 ARPA 网络中各节点的重要性进行排序方面,只有本文所提算法的计算结果与节点删除法的验证结果基本一致,即使在部分节点排序有所错位的情况下,位置相差也不会超过 3 位。

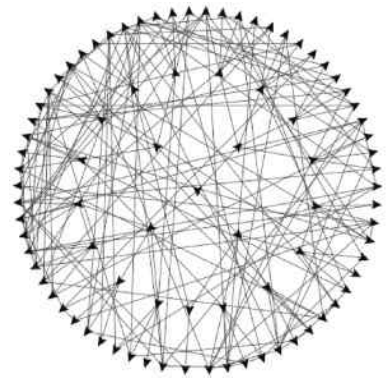
由此可见,在对 ARPA 网络这类一般性社会网络的节点重要性进行评估时,本文所提出的基于功能贡献度的算法具备以下能力:

1)基于功能贡献度的算法在对一般性社会网络的节点重要性进行评估时具有一定可行性及可靠性。其原因在于:1)该算法能对 ARPA 网络中任一节点的重要性进行有效区分,其重要度值不存在重复现象;2)该算法在节点重要性排序方面与文献[20]、文献[21]基本一致。

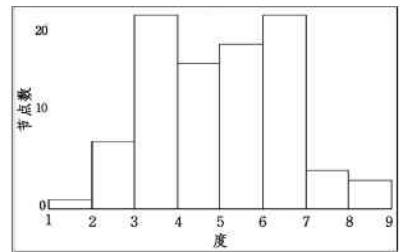
2)基于功能贡献度的算法在对大规模一般性社会网络的节点重要性进行评估时具有显著优越性。主要体现在:1)基于功能贡献度的算法在计算结果的准确度上具有一定的优越性。从表 1 的计算结果可以看出,运用基于功能贡献度的算法进行节点重要性排序评估的结果与网络体系效能验证的结果的一致性最高,说明其在计算结果准确度方面优于文献[19-21]所提出的算法。2)基于功能贡献度的算法在计算过程的复杂度上具有一定的优越性。虽然运用节点删除法来计算网络体系效能下降率是评估节点重要性的最精准方法,但其计算复杂度较高,无法适用于大规模网络;而基于功能贡献度的算法与文献[19-20]一样,主要基于分析节点在静态网络的相关参量进行重要性评估,其计算复杂度远小于节点删除法这类动态评估方法。

4.2 防空网络节点重要性评估

为有效评估敌网络化防空体系中各节点的重要程度,首先必须有效构造一个符合作战实际的网络化防空体系:假设防空指挥层级为 3 级(联合防空作战指挥中心—>区域防空作战指挥中心—>防空群指挥所),指挥跨度为 4,联合防空作战指挥中心与 4 个区域防空作战指挥中心的功一致,可互为替代;区域防空作战指挥中心及防空群指挥所均直接配备 1 部远程预警雷达;各防空群指挥所下辖 4 个防空营;为体现防空体系的网络化特性,在其同类节点间按 5%的比例增加作战协同链路。依据所设参数进行仿真,得到的网络化防空体系结构及节点度分布图如图 3 所示。



(a) 结构图



(b) 节点度分布图

图 3 网络化防空体系结构及节点度分布图

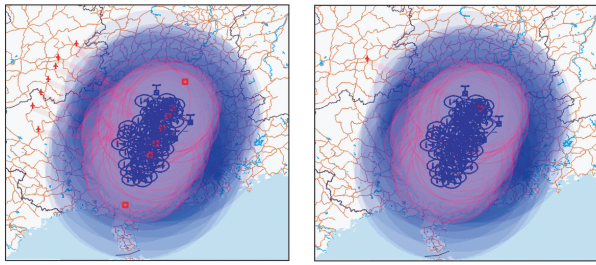
Fig. 3 Structure and node degree distribution diagram of networked air defense system

由于在计算各防空节点的功能属性时,其通常与各防空节点的性能指标及实际位置密切相关,因此需对各防空节点进行有效部署(限于文章篇幅,未将参数逐一列举),同时为简化仿真计算,做出如下假设:

1)区域防空作战指挥中心配备的远程预警雷达参数均一致, $P_r = 39\text{kw}$, $G_r = 30\text{dB}$, $\lambda = 0.23\text{m}$, $\theta_{0.5} = 2^\circ$, $R_{\max} = 462.5\text{km}$;防空群指挥所配备的侦察预警雷达参数均一致, $P_r = 30\text{kw}$, $G_r = 30\text{dB}$, $\lambda = 0.09\text{m}$, $\theta_{0.5} = 2^\circ$, $R_{\max} = 320\text{km}$;同级预警雷达之间按 5%的概率增加空情协同链路以形成预警探测网,在计算预警探测网整体探测威力时不考虑地形遮蔽等因素。

2)各防空营均配备“爱国者 II”型防空导弹,有效杀伤半径 R_k 为 160km。

由于防空网络的构建通常包含侦察、指控、火力及目标 4 类异质节点,其中目标节点与空中进攻方的作战企图及进攻方式有关。若进攻方需要对敌整个作战区域实施空中打击,目标节点将会充斥整个进攻正面,则相应地需构建的安全突防通道的数量较多;若进攻方仅对敌局部区域实施空中打击,目标节点通常沿某条或某几条突防航路实施进攻,则相应地需构建的安全突防通道的数量较少。这两种不同的目标节点形成方式将使得敌网络化防空体系中的各节点重要性的体现各不相同。为区别上述两种方式,分别以 7 条突防通道及 1 条突防通道为示例,如图 4 所示。



(a) 整体区域实施空中打击

(b) 局部区域实施空中打击

图4 空中进攻作战中的双方兵力部署示意图

Fig. 4 Deployment diagram of both sides in air offensive operations

下面运用本文所提出的基于功能贡献度的节点重要性度量算法对上述所构设的防空网络进行节点重要性计算并排序。由于防空网络为功能性的社会网络,且存在多类异质节

表2 防空网络的节点重要性评估结果

Table 2 Evaluation results of node importance in air defense network

| 节点排序 | 整体区域 (7条突防航路) | | 结果验证 | | 局部区域 (1条突防航路) | | 结果验证 | |
|------|------------------|------|--------|------|------------------|------|--------|------|
| | 重要度值 | 节点编号 | 效能下降比值 | 节点编号 | 重要度值 | 节点编号 | 效能下降率值 | 节点编号 |
| 1 | 0.0228 | 16 | 0.2493 | 16 | 0.0249 | 18 | 0.4478 | 18 |
| 2 | 0.0221 | 17 | 0.2463 | 17 | 0.0237 | 17 | 0.4411 | 16 |
| 3 | 0.0199 | 9 | 0.2380 | 7 | 0.0215 | 20 | 0.4389 | 5 |
| 4 | 0.0197 | 11 | 0.2234 | 20 | 0.0211 | 16 | 0.4189 | 17 |
| 5 | 0.0192 | 13 | 0.2224 | 18 | 0.0205 | 11 | 0.3956 | 47 |
| 6 | 0.0189 | 7 | 0.2084 | 27 | 0.0197 | 5 | 0.3789 | 67 |
| 7 | 0.0186 | 20 | 0.1975 | 9 | 0.0195 | 13 | 0.3411 | 11 |
| 8 | 0.0180 | 6 | 0.1822 | 47 | 0.0185 | 49 | 0.3411 | 50 |
| 9 | 0.0171 | 12 | 0.1812 | 50 | 0.0173 | 12 | 0.3367 | 58 |
| 10 | 0.0163 | 19 | 0.1809 | 6 | 0.0171 | 58 | 0.3356 | 49 |

由此可见,本文所提出的基于功能贡献度的算法可有效地对功能性社会网络进行节点重要性评价,且根据以作战环数为表征的网络体系效能下降比的验证结果来看,无论是对整体区域还是对局部区域实施进攻,本文所提算法均能较为准确地分析出敌网络化防空体系实施相应防空作战时提供核心支撑的关键节点。

但仍需注意的一点便是:运用本文所提算法计算整体区域实施空中进攻作战的情况下各防空节点的重要程度时,排序前10的均为序号靠前的指控节点与侦察节点,无序号靠后的火力节点;而在计算局部区域实施空中进攻作战的情况下各防空节点的重要程度时,排序前10的3类节点都存在。其原因在于受算法中功能属性 F_i 及节点类型权重 T_i 的影响,在整体区域情况下,序号靠前的节点(节点2—节点21)为侦察与指控的合体,从而使得节点权重增加;在局部区域情况下,由于存在部分侦察节点的范围无法覆盖到突防航路的情况,使得其 $F_i=0$,从而造成其功能属性值整体下降,相应地,一些能有效覆盖突防航路的核心火力节点的功能属性值便凸显出来,最终形成“整体看‘侦、控’,局部看‘三者’”的现象。

结束语 针对当前网络节点重要性评价算法在“简单而不准确,准确而又复杂”“顾功能丢结构、顾结构弃功能”“各算法具有一定的适用性,而特殊网络仍需特殊分析”“难以依据‘局部’析‘整体’、无法依据‘静态’析‘动态’”等方面的不足,本文提出了一种基于功能贡献度的网络节点重要性评价算法,通过在美国ARPA网络及按实战规则随机生成的防空网

络上进行仿真验证发现,该算法在节点重要性排序的准确度、各类各型网络的适用度及精度上具有一定的优势;同时,由于该算法的时间复杂度为 $O(n^2)$,其效率明显优于时间复杂度为 $O(n^n)$ 的节点删除法等全局性指标,但劣于时间复杂度为 $O(n)$ 的节点度等局部性指标。

参考文献

- [1] LEI T, ZHU C, ZHANG W M, et al. Research on the method of target selecting policy based on the Markov decision process [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(2): 161-167. (in Chinese)
雷霆, 朱承, 张维明, 等. 基于马尔科夫决策的目标选择策略[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(2): 161-167.
- [2] WANG G H, CHEN Z Y, WU W, et al. Joint target selection algorithm based on target topology and movement information [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(2): 516-522. (in Chinese)
王国宏, 陈泽元, 吴巍, 等. 基于目标间拓扑信息和运动信息的联合目标选择算法[J]. 航空学报, 2014, 35(2): 516-522.
- [3] JIA Z Y, HOU X L, PAN D Z. Assessment of Combat Unit Importance in Networked Antiaircraft System [J]. Modern Defense Technology, 2103, 41(5): 12-16. (in Chinese)
贾子英, 侯学隆, 潘大志. 网络化防空体系中作战单元重要度评估[J]. 现代防御技术, 2103, 41(5): 12-16.

- [7] ZOU J S,ZHANG Y S,GAO Y. Research of ABAC Model based on Usage Control under Cloud Environment[J]. Application Research of Computers,2014,31(12):3692-3694. (in Chinese)
邹佳顺,张永胜,高艳.云环境下基于使用控制的ABAC模型研究[J].计算机应用研究,2014,31(12):3692-3694.
- [8] LI R X,LU J F,LI T Y, et al. An Approach for Resolving Inconsistency Conflicts in Access Control Policies[J]. Chinese Journal of Computers,2013,36(6):1210-1223. (in Chinese)
李瑞轩,鲁剑锋,李添翼,等.一种访问控制策略非一致性冲突消解方法[J].计算机学报,2013,36(6):1210-1223.
- [9] DUBOIS D, LANG J, PRADE H. Possibilistic logic 1[OL]. <http://core.ac.uk/display/20741884>.
- [10] LANG J. Possibilistic logic: complexity and algorithms[M]// Handbook of defeasible reasoning and uncertainty management systems. Springer Netherlands,2000:179-220.
- [11] DAMIANOU N, DUALAY N, LUPU E, et al. The ponder policy specification language[M]// Policies for Distributed Systems and Networks. Springer Berlin Heidelberg,2001:18-38.
- [12] CAMPBELL G A. Ontologies for Resolution Policy Definition and Policy Conflict Detection[R]. Department of Computing Science and Mathematics, University of Stirling,2007.
- [13] DAVY S, JENNINGS B, STRASSNER J. The policy continuum- Policy authoring and conflict analysis[J]. Computer Communications,2008,31(13):2981-2995.
- [14] WANG Y Z, FENG D G. A Conflict and Redundancy Analysis Method for XACML Rules[J]. Chinese Journal of Computers, 2009,32(3):516-530. (in Chinese)
王雅哲,冯登国.一种XACML规则冲突及冗余分析方法[J].计算机学报,2009,32(3):516-530.
- [15] HUANG F, HUANG Z, LIU L. A DL-based method for access control policy conflict detecting[C]// Proceedings of the First Asia-Pacific Symposium on Internetware. ACM,2009:16.
- [16] CALERO J M A, PÉREZ J M M, BERNABÉ J B, et al. Detection of semantic conflicts in ontology and rule-based information systems[J]. Data & Knowledge Engineering, 2010, 69(11): 1117-1137.
- [17] LIU J, ZHANG H Q, DAI X D, et al. A Static Policy Conflict Detection Algorithm for Attribute Based Access Control[J]. Computer Engineering,2013,39(6):200-204. (in Chinese)
刘江,张红旗,代向东,等.一种ABAC静态策略冲突检测算法[J].计算机工程,2013,39(6):200-204.

(上接第180页)

- [4] JIANG B, LIU Z C, YAN J G. Research on the Defense on the Theory Code Attacking Compositor Based[J]. Mathematics In Practice and Theory,2013,43(24):75-79. (in Chinese)
姜波,刘志成,严建钢.基于复杂网络理论的防空节点攻击排序研究[J].数学的实践与认识,2013,43(24):75-79.
- [5] REN X L, LV L Y. Review of ranking nodes in complex networks[J]. China Science Bulletin,2014,59(13):1175-1197. (in Chinese)
任晓龙,吕琳媛.网络重要节点排序方法综述[J].科学通报,2014,59(13):1175-1197.
- [6] REN Z M, SHAO F, LIU J G, et al. Node importance measurement based on the degree and clustering coefficient information [J]. Acta Physica Sinica,2013,62(12):505.
- [7] LIU J G, REN Z M, GUO Q, et al. Node importance ranking of complex networks [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(17): 178901.
- [8] ZHANG K, LI P P, ZHU B P, et al. Evaluation method for node important in directed-weighted complex networks based PageRank[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2013,45(3):429-434. (in Chinese)
张琨,李配配,朱保平,等.基于PageRank的有向加权复杂网络节点重要性评估方法[J].南京航空航天大学学报,2013,45(3):429-434.
- [9] LANDERR A, FRIEDL B, HEIDEMANN J. A critical review of centrality measures in social networks[J]. Business & Information Systems Engineering,2010,2(6):371-385.
- [10] YU H, LIU Z, LI Y J. Key nodes in complex networks identified by multi-attribute decision-making method [J]. Acta Physica Sinica,2013,62(2):020204.
- [11] ZHANG K, MA Y H. Centrality ranking algorithm based on network structure [J]. Application Research of Computers, 2016,33(9):2596-2600. (in Chinese)
张凯,马英红.基于网络结构的节点中心性排序优化算法[J].计算机应用研究,2016,33(9):2596-2600.
- [12] MEO P D, FERRARAB E, FIUMARA G, et al. A novel measure of edge centrality in social networks [J]. Knowledge-Based Systems,2012,30(6):136-150.
- [13] HOLME P, SARAM K J. Temporal networks[J]. Physics Reports,2012,519(3):97-125.
- [14] NEWMAN M E J. Networks: an Introduction [M]. Oxford: Oxford University Press,2010:23-45.
- [15] MURRAY S, MARK W. Knotty-centrality: finding the connective core of a complex network [J]. Plos One, 2012, 7(5): e36579.
- [16] JIN J, XU K, XIONG N. Multi-index evaluation algorithm based on principal component analysis for node importance in complex networks [J]. IET Networks,2012,1(3):108-122.
- [17] ZHANG J, XU X K, LI P. Node importance for dynamical process on networks: a multi-scale characterization [J]. Chaos, 2011,21(1):016107.
- [18] ZHANG C H, ZHANG X K, DENG H Z. Operation system of systems on effectiveness assessment method based operation loop[J]. Electronic Design Engineering,2012,20(21):62-68. (in Chinese)
张春华,张小可,邓宏钟.一种基于作战环的作战体系效能评估方法[J].电子设计工程,2012,20(21):62-68.
- [19] ZHOU X, ZHANG F M, LI K W. Finding Vital node by node importance evaluation matrix in complex networks [J]. Acta Physica Sinica,2012,61(5):485.
- [20] ZHANG X P, LI Y S, LIU G, et al. Evaluation method of importance for nodes in complex networks based on importance contribution[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2014, 11(3):26-32. (in Chinese)
张喜平,李永树,刘刚,等.节点重要度贡献的复杂网络节点重要度评估方法[J].复杂系统与复杂性科学,2014,11(3):26-32.
- [21] ZHAO Y H, WANG Z L, ZHENG J. Finding most vital node by node importance contribution matrix in communication networks [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2009,35(9):1076-1079. (in Chinese)
赵毅寰,王祖林,郑晶.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.