

1-4-2019

Important Object Recognition Method for C⁴ISR System Based on Operation Traffic Mining

Zhou Fang

The Information System Important Laboratory of the 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China;

Chu Wei

The Information System Important Laboratory of the 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China;

Wendi Cheng

The Information System Important Laboratory of the 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Important Object Recognition Method for C⁴ISR System Based on Operation Traffic Mining

Abstract

Abstract: Considering the problem of vital object recognition for C⁴ISR system under confrontation condition, a vital object recognition method based on operation traffic mining is proposed. The system operation traffics are collected, *the operation data packet describing model is established based on six attribute group described method. The operation traffic association matrix and connectivity matrix are built based on the source IP and destination IP address on data packet. The inflow and outflow operation traffics about system node are counted, and the system vital computation model is established based on statistical traffics as the measurement criteria of system object importance.* Some area air defense operation command system is taken under simulation experiment environment, and the vital system object test verification is carried out. The test result shows that the vital object identification method can efficiently identify important object. Compared with the traditional method, the new method can avoid the problem of vital object identification failure brought by incomplete information.

Keywords

C4ISR system, operation traffic, important object identification, complex network

Recommended Citation

Zhou Fang, Chu Wei, Cheng Wendi. Important Object Recognition Method for C⁴ISR System Based on Operation Traffic Mining[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(4): 1520-1527.

基于业务流量挖掘的 C⁴ISR 系统重要目标识别方法

周芳, 楚威, 程文迪

(中国电子科技集团公司第二十八研究所信息系统工程重点实验室 南京 210007)

摘要: 针对对抗条件下如何准确识别敌方 C⁴ISR 系统重要目标问题, 提出了一种基于业务流量挖掘的重要目标识别方法。采集系统业务流量, 建立基于六元属性组的业务数据报文描述模型, 基于报文源/目的 IP 地址, 建立业务流量关联矩阵和连通性关联矩阵, 统计系统节点的流入/流出业务流量, 建立基于统计流量的系统节点重要度计算模型。在仿真环境下以某区域防空作战指挥系统为例, 开展系统重要目标识别的试验验证, 结果表明, 提出的方法能有效识别出系统中重要节点, 避免了因系统信息不完整而导致重要目标识别失效问题。

关键词: C⁴ISR 系统; 业务流量; 重要目标识别; 复杂网络

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 04-1520-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201804038

Important Object Recognition Method for C⁴ISR System Based on Operation Traffic Mining

Zhou Fang, Chu Wei, Cheng WenDi

(The Information System Important Laboratory of the 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China)

Abstract: Considering the problem of vital object recognition for C⁴ISR system under confrontation condition, a vital object recognition method based on operation traffic mining is proposed. The system operation traffics are collected, the operation data packet describing model is established based on six attribute group described method. The operation traffic association matrix and connectivity matrix are built based on the source IP and destination IP address on data packet. The inflow and outflow operation traffics about system node are counted, and the system vital computation model is established based on statistical traffics as the measurement criteria of system object importance. Some area air defense operation command system is taken under simulation experiment environment, and the vital system object test verification is carried out. The test result shows that the vital object identification method can efficiently identify important object. Compared with the traditional method, the new method can avoid the problem of vital object identification failure brought by incomplete information.

Keywords: C⁴ISR system; operation traffic; important object identification; complex network

引言

目前, C⁴ISR 系统已进入第四代网络化发展阶



收稿日期: 2016-05-18 修回日期: 2016-08-18;
作者简介: 周芳(1982-), 男, 江西, 博士, 高工, 研究方向为 C4ISR 系统仿真技术; 楚威(1978-), 男, 江苏, 硕士, 高工, 研究方向为 C4ISR 系统总体技术; 程文迪(1986-), 女, 湖北, 硕士, 工程师, 研究方向为 C4ISR 系统仿真试验技术。

段, 呈现“扁平化、网络化”特征^[1], 节点间存在多条通信路径, 对重要系统采用节点备份/功能接替等防御策略, 对系统进行局部节点与链路的攻击或破坏难以造成系统整体的破坏, 因此, 需要对系统中骨干网络节点、主干链路、指挥所、情报处理中心系统等高价值核心目标实施打击, 以达到系统通信断链、网络阻塞、目标控制与信息篡改等作战效

<http://www.china-simulation.com>

• 1520 •

果。然而,在真实战场对抗环境下,由于敌方目标系统与网络多为封闭网络且严格管控、制定并部署了成体系的安全防护策略与安防措施,导致往往难以获取完整的目标系统情报信息,无法还原敌方系统结构,包括系统组成要素、信息流程和关键节点等。此外,由于系统信息交互的实时性较高,随着系统作战业务处理流程的推进,系统节点的重要程度将会发生变化,如在情报处理阶段,情报处理节点重要性高于指挥所、武器平台等节点;在指挥控制阶段,指挥所节点的重要性要高于其它节点,即系统关键节点随着作战时间、作战进程的变化而发生变化,呈现系统关键节点动态转移现象。上述特点对战场对抗条件下目标系统中关键节点的识别提出了新的挑战。

本文着重针对网络对抗条件下 C⁴ISR 系统重要目标识别问题展开研究,提出了一种基于业务流量挖掘的系统重要目标识别方法,以某区域防空作战指挥系统为试验对象,对本文提出的方法有效性和合理性进行了试验验证。

1 相关工作

所谓关键节点是指相比于系统中其它节点而言能够在更大程度上影响系统结构和性能的某些核心节点,关键节点数量一般较少,但其影响确可以快速传播到系统中大部分节点,如在军事指挥信息系统中,某指挥所或情报处理中心节点遭受攻击破坏后,整个系统将陷入混乱状态。目前,在 C⁴ISR 系统中关键目标节点识别与挖掘方面,国内外学者已取得诸多研究成果^[2-16],总体上可分为两大类方法,社会网络分析方法和系统科学分析方法。

(1) 社会网络分析方法。基于“节点的重要性等价于显著性”的思想来判断目标系统中节点的重要性,主要目的系统中寻找节点的相关属性信息来体现节点的差异,通过节点的度、介数、最短路径、特征向量等指标来识别关键节点。

文献[7]针对 P2P 网络中关键节点识别问题,提出了一种基于网络流量的节点识别方法,采用出

入度、网络流大小、数据包速率与字节速率等统计特征作为关键节点识别的依据。文献[8]针对网络化信息系统关键系统节点挖掘问题,采用了基于信息流介数的挖掘方法,根据请把、协同、指控三类信息流计算节点介数,以此作为关键节点识别的依据。该方法的优势在于能够适应使命任务执行阶段的变化,揭示关键节点动态转移现象。不足之处为要求系统结构已知且静态不变,而在对抗条件下目标系统为非合作方,目标系统结构难以完全获取。

(2) 系统科学分析方法。基于“破坏性等价于重要性”的思想来判断目标系统/网络中关键节点,通过删除网络中节点来判断其对网络的破坏程度,以此反映节点的重要性。

文献[9]中针对非合作目标网络环境下关键节点识别问题,提出了一种改进的生成树协议法,计算连通节点对个数判断非连通图的连通指数,该方法受限于非合作目标网络的完整拓扑结构。文献[10]通过删除节点后对目标网络连通性造成的影响,来识别网络节点重要性,仅仅考虑了删除节点后连通分支个数,难以描述网络结构的差异。文献[11]提出了基于生成树数目的识别方法,将关键节点定义为删除此节点后上使得生成树数目最小的节点或节点集合。国防科大谭跃进等^[12]提出了一种节点收缩法来识别目标网络关键节点,通过收缩与该节点相连的边得到新的网络拓扑图,若该网络拓扑图的网络凝聚度越高,则认为被收缩的节点越重要,较好的克服了节点删除法的弊端。

虽然以上方法可较好识别复杂网络中的关键节点,其缺点是需要预知网络大部分或全部静态拓扑信息。但是在真实的网络对抗条件下,现有的重要目标/关键节点识别方法存在以下问题:

(1) 由于敌方目标网络制定和部署成体系的安全防护体系和防御措施,难以对敌方网络拓扑结构进行完整还原,导致基于节点度/介数/最短路径等属性度量方法,无法准确反映节点的重要程度。

(2) 针对大量零散或支离破碎的网络拓扑结构,无法客观准确计算网络节点的复杂网络统计参

量, 甚至无法使用节点删除法、节点收缩法(如针对零散网络节点的删除, 对系统整体结构无影响)。

(3) 单纯依据复杂网络统计参量来度量 C⁴ISR 系统节点, 具有局限性、片面性, 例如节点度指标仅仅从节点度值来衡量节点的重要性显得片面, 如系统中某指挥所节点的度值不高, 但其作为 C⁴ISR 系统的指挥中心, 显然其尤为重要。

综合上述分析, 针对上述归纳总结的重要目标识别问题以及现有方法的不足, 本文通过建立系统目标节点的业务流量模型, 基于业务流量特征识别重要目标, 有效规避了复杂网络严重依赖目标网络拓扑结构问题。该方法可操作性强、实用性高, 能够推广运用于网络作战指挥控制过程中, 为作战指挥员选择攻击目标提供参考和依据。

2 系统重要目标识别

2.1 重要目标识别原理

本研究从应用系统节点产生的业务流量和复杂网络统计参量两个维度, 创新提出了一种基于业务流量分析的应用系统重要度计算方法, 其核心思想是将用系统节点产生的业务流量、节点的介数中心性统计参量两类信息, 作为衡量系统重要程度的

依据。该方法的实施共包含 4 个环节: 业务流量采集、应用系统节点关联性分析、流量和复杂网络参量计算、应用系统节点重要度计算, 如图 1 所示。

2.2 业务流量采集处理

应用系统业务流量采集处理的难点主要体现在两方面: 一方面, 应用系统节点间交互的业务数据量大、实时性要求高, 包括战场情报、作战指令等业务数据, 如何提高数据采集效率, 即业务流量采集的时效性问题; 另一方面, 如何在背靠背模式下准确获取应用系统节点间交互的各类业务流量信息。

针对业务流流量采集的时效性问题, 本研究采用基于规则的业务流量采集方法, 其基本思想是通过剖析网络层和传输层协议特征、应用层统计特征, 建立多种过滤规则对业务流量进行过滤, 避免对应用层数据进行解析, 以此提高业务流量采集效率。

(1) 报文监听截获

报文监听截获模块主要完成对流经物理服务器的网络接口业务数据报文进行捕获, 具体采用 Libpcap/Winpcap 提供的数据包捕获函数实时监听并截获网络接口的原始数据报文。

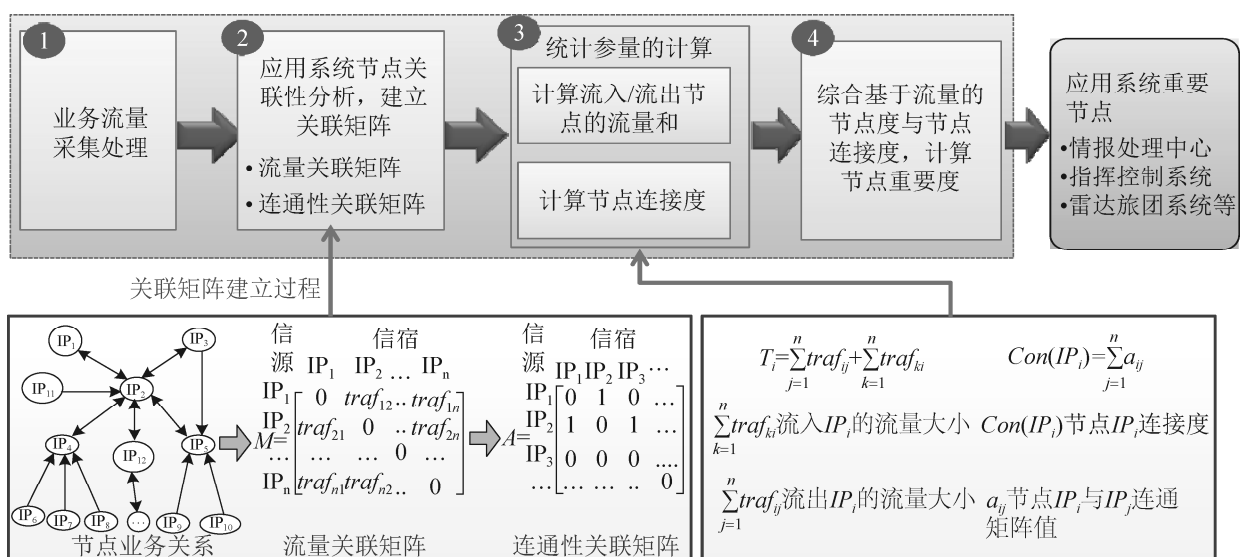


图 1 基于业务流量挖掘分析的系统重要目标识别原理

Fig. 1 Important object recognition principle for system based on operation traffic mining

(2) 报文过滤处理

考虑到应用系统中业务数据的传输将基于专用通信传输协议来完成,在实际对抗环境下难以获取专用通信传输协议,且业务数据在传输中进行了加密。因此,为对业务数据报文的过滤,提高业务数据采集效率,提出了 3 类过滤规则:

- 协议过滤规则
- 端口过滤规则
- 报文长度范围过滤规则

其中,协议过滤规则主要针对传输层协议进行过滤,包括 TCP、UDP 两种协议类型。这是因为 C⁴ISR 系统中业务数据的传输将基于专用通信传输协议来完成。而对专用通信传输协议识别需要预先获取协议的格式,并依据协议格式解析出应用数据负载来完成。然而在实际对抗环境下,难以获取专用通信传输协议格式,且对应用层数据的解析需要耗费大量的时间,将严重影响业务数据采集效率,导致业务数据采集丢失。因此,本研究将基于传输层协议类型进行过滤。

端口过滤规则主要针对传输层协议的目的与源端口号进行设置。

报文长度范围过滤规则主要针对应用层数据报文的长度范围进行设置。通过对情报、作战指令数据、定制的融合情报等典型业务数据进行分析,获取业务数据报文的长度范围,以此作为报文长度的过滤规则。如针对情报报文,通过对历史情报报文进行统计分析,将长度范围设置为[180~200]。

(3) 报文头信息解析处理

报文头信息解析处理完成对截获的数据报文头信息进行解析,提取数据报文头信息,具体包括协议类型、源 IP 地址、目的 IP 地址、源端口号、目标端口号、报文大小(报文字节数或报文分组数)等内容,并统一描述为六元属性组格式,如下所示:
traffic=<协议类型、源 IP、目的 IP、源端口、目的端口、报文大小>

(4) 数据采集管理模块

数据采集管理模块负责接收协同攻击系统下

达的数据采集指令信息,包括开始/暂停/结束采集命令、采集持续时间、采样周期等内容。同时将采集获取的报文信息反馈至协同攻击系统中,作为应用系统节点重要度计算的依据。

针对背靠背模式下业务流量采集问题,借鉴恶意代码入侵原理,采用业务流量采集方法,设计具备采集功能的自定义恶意代码。通过对应用系统实施渗透攻击,将自定义恶意代码预先植入到部署虚拟网络的物理服务器上,对流入与流出物理服务器中业务数据进行采集,获取节点间交互业务数据。

2.3 应用系统节点关联分析

根据上述获取的六元属性组中源 IP、目的 IP 信息,确定 IP 地址对之间的信息交互关系。具体方法为:以某 IP_i 地址为初始点,循环遍历数据库中每行,若 IP_i 地址为源地址,则将该行对应的目的地址 IP_j 作为其邻接节点,信息关系为 $IP_i \rightarrow IP_j$;若 IP_i 地址为目的地址,则将对应的源地址 IP_k 为其邻接节点,信息关系为 $IP_k \rightarrow IP_i$ 。重复该过程,直至数据库中所有 IP 地址均被遍历。

为某时刻获取的业务流量信息、以及建立的 IP 地址间信息交互关系图:依据应用系统节点间的信息交互关系,建立应用系统的有向加权复杂网络模型。以此为依据,建立流量关联矩阵和连通性关联矩阵。

定义 1 应用系统的有向加权复杂网络模型

采用有向加权图 $G=(O, L)$ 来描述各类应用系统间的业务交互关系,图中节点集 $O=\{o_1, o_2 \cdots o_m\}$ 代表各类应用系统集合,每类应用系统采用 IP 地址唯一标识,边集合 $L=\{l_1, l_2 \cdots l_k\}$ 表示应用系统间业务关系,边的权值 w_{ij} 代表节点 o_i 流向 o_j 的流量大小。

定义 2 流量关联矩阵: 描述了流经各类应用系统节点对 (IP_i, IP_j) 间的流量大小。矩阵中每一行代表一个信源节点,每一列代表一个信宿节点,第 i 行第 j 列元素代表从信源节点 IP_i 流入信宿节点 IP_j 的流量大小 $traf_{ij}$ 。流量关联矩阵 M 定义如下:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & traf_{12} & \dots & traf_{1n} \\ traf_{21} & 0 & \dots & traf_{2n} \\ \dots & \dots & 0 & \dots \\ traf_{n1} & traf_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

定义3 连通性关联矩阵: 描述两节点之间是否直接或间接存在业务信息交互关系。连通性关联矩阵 A 中每行元素代表信源节点, 每列元素代表信宿节点, 第 i 行第 j 列元素 a_{ij} 代表节点 IP_i 与 IP_j 之间是否存在业务交互关系, 即是否连通, 元素 a_{ij} 定义如下:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{节点 } IP_i \text{ 与节点 } IP_j \text{ 间连通} \\ 0 & \text{节点 } IP_i \text{ 与节点 } IP_j \text{ 间不连通} \end{cases}$$

连通性关联矩阵建立过程如图2所示, 假设某段时间内探测的应用系统业务信息交互关系见图2(a), 则其对应的复杂网络模型见图2(b)。

2.4 应用系统重要度计算

在系统实际作战业务处理过程中, 某些应用系统所产生的信息交互量较少, 即流经的业务流量较少, 如对于某航空兵指挥所, 其产生的业务流量甚至低于某雷达站上报的原始情报数据, 但其重要程度明显高于雷达站。因此, 单纯依据业务流量难以客观准确衡量重要程度。

针对上述问题, 本研究提出了基于流量的节点度、节点连接度两类复杂网络统计参量概念, 综合两类统计参量计算节点的重要度。

定义4 基于流量的节点度: 复杂网络结构中所有流经节点的业务流量总和, 包括流入和流出节

点的流量。计算方法如下:

首先, 统计流量关联矩阵 M 中第 i 列元素之和, 计算流入节点 IP_i 的流量大小, 即节点入度值 T_{i_in} , 如下所示。

$$T_{i_in} = \sum_{k=1}^n traf_{ki}$$

式中: n 为节点数量, $traf_{ki}$ 为节点 IP_k 流入节点 IP_i 的流量。

其次, 统计流量关联矩阵 M 中第 i 行元素之和, 计算流出节点 IP_i 流量大小, 即节点出度值 T_{i_out} , 如下所示。

$$T_{i_out} = \sum_{j=1}^n traf_{ij}$$

式中: $traf_{ij}$ 为节点 IP_i 流入节点 IP_j 的流量。

最后, 计算流入/流出节点 IP_i 的流量之和。

$$T_i = \sum_{j=1}^n traf_{ij} + \sum_{k=1}^n traf_{ki}$$

根据连通性关联矩阵, 计算节点的连接度, 作为衡量节点重要度的准则之一。

定义5 节点连接度: 与节点存在直接业务关系的所有其它节点的数量。依据连通性关联矩阵 A , 统计矩阵 A 中第 i 行所有元素之和, 作为节点 IP_i 连接度。计算方法如下:

$$Con(IP_i) = \sum_{j=1}^n a_{ij}$$

式中: $Con(IP_i)$ 为节点 IP_i 连接度, a_{ij} 为节点 IP_i 与节点 IP_j 的连通矩阵值。

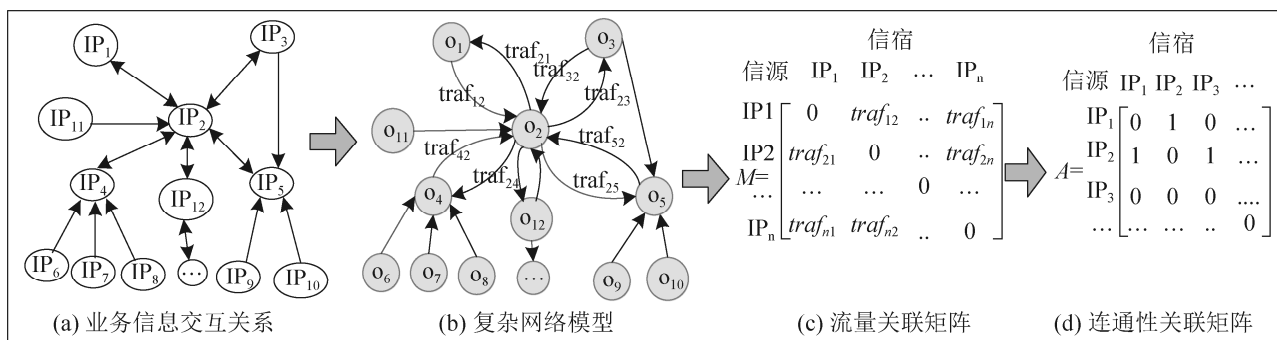


图2 连通性关联矩阵建立过程

Fig. 2 The construction process of connectivity association matrix

综合基于流量的节点度和节点连接度统计参量, 通过计算两类统计参量的加权平均值, 衡量应用系统节点的重要度。计算方法如下:

$$\text{import}(IP_i) = \beta_1 \frac{T_i}{T_{\text{Max}}} + \beta_2 \frac{\text{Con}(IP_i)}{\text{Con}(A)_{\text{Max}}}$$

式中: β_1, β_2 为两类参量相对于应用系统节点的重要程度, 且 $\beta_1 + \beta_2 = 1, \beta_1, \beta_2 \in (0, 1)$, T_{Max} 为所有基于流量的节点度最大值, $\text{Con}(A)_{\text{Max}}$ 为所有节点连接度的最大值, $\frac{T_i}{T_{\text{Max}}}$ 、 $\frac{\text{Con}(IP_i)}{\text{Con}(A)_{\text{Max}}}$ 分别表示对两类参量进行归一化处理。

3 仿真实验

(1) 实验环境

以对敌方某区域防空作战指挥信息系统的空中突击联合作战为背景, 己方通过通信侦察、网络侦察、电抗侦察、技术侦察等手段获取区域防空作战指挥系统的系统结构、应用系统组成、系统类型、

部署位置、功能服务、业务信息关系等情报数据, 实施掌握敌方战场及目标态势, 为制定作战计划、指挥决策等提供支持。在此基础上, 分别采用基于复杂网络节点介数和本文提出的流量挖掘方法来识别该系统中重要目标节点, 进行对比分析。

(2) 实验结果

首先, 利用基于复杂网络节点介数的方法识别重要目标节点, 图3给出了防空作战指挥信息系统中重要目标节点, 即雷达旅团系统2与雷达旅团系统3节点。此方法识别的重要目标节点是固定的, 不会随着作战进程的变化而发生变化; 同时, 系统间业务信息关系对节点重要度有较大影响, 如多个航空兵指挥所节点均向某雷达旅团系统提交订阅请求, 将增大该雷达旅团系统的重要度, 而事实上情报处理中心的重要程度明显高于雷达旅团系统, 导致该方法识别结果与实际情况不相符合。

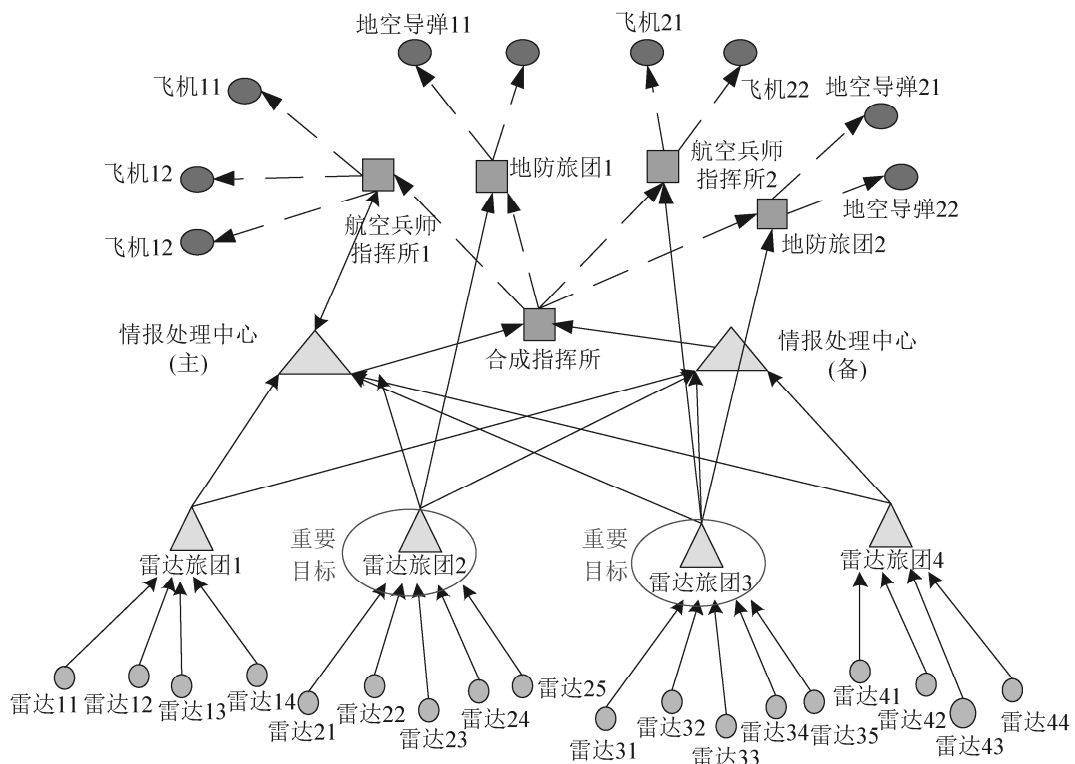


图3 基于复杂网络节点介数的重要目标识别

Fig. 3 Important object recognition principle based on complex network node intermediary

其次,利用本文提出的基于流量挖掘分析的方法进行重要目标节点识别。实验中通过部署业务流量采集代理,采集系统中业务数据报文,解析获取业务数据报文,提取<协议类型、源IP地址、目的IP地址、源端口、目的端口、报文大小>六元组信息,作为重要目标节点识别依据。表1为以节点IP地址作为系统节点标识,统计节点的流入/流出流量与总流量统计信息。

表1 系统节点的业务流量
Tab. 1 The operation traffic of system node

系统节点	流入流量(byte)	流出流量	总流量
IP1:10.1.17.101	49950	852	50802
IP2:10.2.1.101	26762	28254	55016
IP3:40.2.1.101	15022	11700	26722
IP4:100.0.1.10	0	26762	26762
IP5:20.1.104.2	616	0	616
IP6:110.0.1.10	0	15022	15022
IP7:30.0.13.2	284	166	450
IP8:20.2.1.101	0	7518	7518
IP9:30.2.1.101	0	2478	2478

基于流量的节点连接度计算应用系统节点重要程度,计算结果如图4所示。

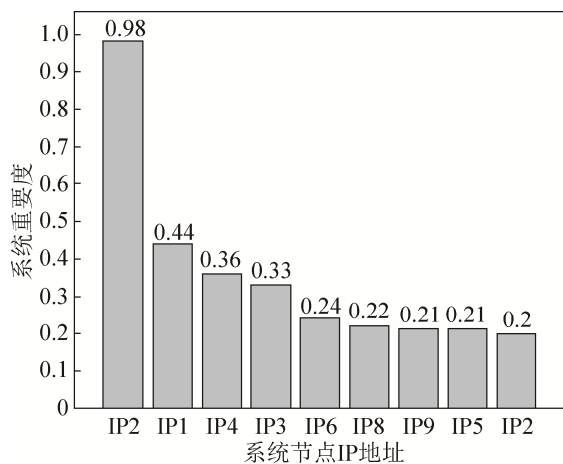


图4 系统节点重要度排序结果

Fig. 4 The ranking results on system node importance

其中,节点IP1与IP2为情报处理中心,IP3与IP4为雷达旅团系统,说明流经情报处理中心节点的业务流量最大,从而识别该节点为重要目标节点。

通过多组实验数据,证明该识别结果能够准确反映防空作战指挥信息系统中重要目标。而传统的基于复杂网络节点介数的重要目标识别方法,识别结果与实际重要目标存在一定偏差,本方法在传统方法的基础上考虑了节点间业务关联关系,将其与流量大小一起作为衡量应用系统节点重要度的指标,能够更全面、准确地反映作战应用系统节点的重要度。

4 结论

本文围绕着如何准确识别出C⁴ISR系统重要目标节点问题,提出了一种基于业务流量挖掘的重要目标识别方法,为有效识别不完整信息条件下系统重要目标提供了一种解决途径,可应用于未来网络作战行动计划的生成。今后需要针对C⁴ISR系统中情报侦察与通信网络等重要目标的综合识别展开研究,在统一的标准框架下快速识别出系统重要目标节点。

参考文献:

- [1] 毛少杰,邓克波.网络化和服务化C⁴ISR系统复杂性[J].指挥信息系统与技术,2012,3(4):1-7.
Mao Shao-jie, Deng Ke-bo. Complexity of Net-Centric and Service-oriented C⁴ISR System[J]. Command Information System and Technology, 2012, 3(4): 1-7.
- [2] Kitsak M, Gallos L K, Havlin S, et al. Identification of influential spreaders in complex networks[J]. Nat Phys(S1001-5285), 2010, 391(4): 888-893.
- [3] Duanbing Chena, Linyuan Lü, Ming-Sheng Shang, et al. Identifying influential nodes in complex networks[J]. Physica A(S0378-4371), 2012, 6(3): 1777-1787.
- [4] Zeng A, Zhang C J. Ranking spreaders by decomposing complex networks[J]. Phys Let A(S0378-4371), 2013, 377(39): 1031-1035
- [5] Dai jun Wei, Xin yang Deng, Xiao ge zhang, et al. Identifying influential nodes in weighted networks based on evidence theory[J]. PhysicaA (S0378-4371), 2013, 392(10): 2564-2575.
- [6] 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):4.
Ren Xiao-long, Lv Lin-yan. Review ranking nodes complex networks[J]. Science china, 2014, 59(13): 4.

- [7] 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): 1-5.
Hao nan, Li de-yi, Gan Wen-yan, et al. Mining Vital Nodes in Complex Networks[J]. Compute science, 2007, 34(12): 1-5.
- [8] 王晓磊, 杨岳湘, 何杰. 基于流量统计的P2P网络关键节点识别[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(5): 105-111.
Wang Xiao-lei, Yang Yue-xiang, He Jie. Traffic statistics-based identification of key nodes in P2P network[J]. Application research of computers, 2015, 32(5): 105-111.
- [9] 张金峰. 信息流的网络化 C⁴ISR 系统结构关键节点挖掘方法[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(8): 61-65.
Zhang jin-feng. Mining Method of Key Nodes in C⁴ISR Network System Structure Based on Information Flow[J]. Fire and command control, 2014, 39(8): 61-65.
- [10] 龚玉坤. 非合作目标网络中重要节点识别方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
Gong yu kun. Identification technique of essential nodes in non-cooperation network [D]. harbin: Harbin institute of technology, 2015.
- [11] 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, 26(11): 79-83.
Tan Yue-jin, Wu Jun, Deng hong-zhong. Evaluation Method for Node Importance based on Node Contraction in Complex Networks[J]. System engineering and theory practice, 2006, 26(11): 79-83.
- [12] 熊金石, 李建华, 莫建云. 基于边收缩方法的网络化信息系统链路重要性评估[J]. 电光与控制, 2013, 20(4): 27-30.
Xiong Jinshi, Li Jianhua, Mo Jianyun. Evaluation for link importance of Networked Information System Based on Edge-Contraction Method[J]. Electronics optics and control, 2013, 20(4): 27-30.
- [13] 王学光. 基于合作博弈论的社会网络关键节点发现研究[J]. 计算机科学, 2013, 40(4): 155-160.
Wang xue-guang. Discovering Critical Nodes in Social Networks Based on Cooperative Games[J]. Compute science, 2013, 40(4): 155-160.
- [14] 刘建国, 任卓明, 郭强, 等. 复杂网络中节点重要性排序的研究进展[J]. 物理学报, 2013, 62(17): 86-93.
Liu Jian-Guo, Ren Zhuo-Ming, Guo Qiang, et al. Node importance ranking of complex networks[J]. Acta Phys. Sin, 2013, 62(17): 86-93.

(上接第 1519 页)

- [21] 叶学民, 李新颖, 李春曦. 两级动叶可调轴流风机内流特征的数值模拟[J]. 动力工程学报, 2013, 33(11): 871-877.
Ye X M, Li X Y, Li C X. Numerical simulation on internal flow field of a two-stage variable vane axial flow fan[J]. Journal of Chinese Society Power Engineering, 2013, 33(11): 871-877.
- [22] 牛茂升, 臧述升, 黄名海. 间隙高度对涡轮叶顶间隙流动的影响[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(6): 935-939.
Niu M S, Zang S S, Huang M H. Effect of tip clearance height on tip clearance flow in turbine rotors[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(6): 935-939.
- [23] 王军, 姚瑞锋, 刘静, 等. 低压轴流风机叶顶间隙对叶尖涡及外部性能的影响研究[J]. 流体机械, 2011, 39(9): 26-29.
Wang J, Yao R F, Liu J, et al. Influence of tip clearance on external performance and tip leakage vortex of low-pressure axial fan[J]. Fluid Machinery, 2011, 39(9): 26-29.
- [24] 李春曦, 尹攀, 叶学民, 等. 轴流风机动叶异常对风机内熵产影响的数值模拟[J]. 动力工程学报, 2012, 32(12): 947-953.
Li C X, Yin P, Ye X M, et al. Effect of Abnormal Blade Incidence on Internal Entropy Generation in Axial-flow Fans[J]. Journal of Chinese Society Power Engineering, 2012, 32(12): 947-953.