Journal of System Simulation

Volume 29 | Issue 10 Article 23

6-4-2020

Complexity Analysis of Joint Operational Network Information System

Peng Jun
The Department of Information Operation& Command Training, National Defense University, Beijing 100091, China;

Mingzhi Zhang
The Department of Information Operation& Command Training, National Defense University, Beijing 100091, 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.

Complexity Analysis of Joint Operational Network Information System

Abstract

Abstract: Based on the theory of complex networks, *the structure and characteristics of joint operational network information system (JONIS) were analyzed from the perspectives of heterogeneous directional weighted network topology, strong degree and its centralities. It is found that the combat network based on JONIS has characteristics of small-world and scale-free, with a large average weighted aggregation coefficient and a small average weighted path length, showing a similar power-law distribution. In the example network, command centers, satellites, support force, and early warning unit all have larger strong degrees and centralities. These platforms as the center of gravity and fragile nodes in the JONIS should be focused on protection.*

Keywords

joint operation, network information system, complex network, simulation and modeling

Recommended Citation

Peng Jun, Zhang Mingzhi. Complexity Analysis of Joint Operational Network Information System[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(10): 2407-2414.

This paper is available in Journal of System Simulation: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol29/iss10/23

第 29 卷第 10 期 系统仿真学报© Vol. 29 No. 10
2017 年 10 月 Journal of System Simulation Oct., 2017

联合作战网络信息体系的复杂性分析

彭军，张明智
（国防大学信息作战与指挥训练教研部，北京 100091）

摘要：基于复杂网络理论方法，从异质有向加权网的拓扑构建、强度中心性、接近中心性和中介中心性等角度分析了联合作战网络信息体系的结构及特征。研究发现：基于网络信息体系的作战网络具有小世界和无标度特征，强度分布近似服从幂率分布，平均加权聚集系数较大，平均加权路径长度较小；示例网络中的陆上指挥所、空间卫星、支援力量、空中预警单元等平台节点的强度及各类中心性相对较大。因此，这些平台节点作为联合作战网络信息体系的体系重心和脆弱节点应予以重点防护。

关键词：联合作战；网络信息体系；复杂网络；仿真建模
中图分类号：TP391.9 文献标识码：A 文章编号：1004-731X (2017) 10-2407-08
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201710023

Complexity Analysis of Joint Operational Network Information System

Peng Jun, *Zhang Mingzhi*
(The Department of Information Operation& Command Training, National Defense University, Beijing 100091, China)

Abstract: Based on the theory of complex networks, *the structure and characteristics of joint operational network information system (JONIS) were analyzed from the perspectives of heterogeneous directional weighted network topology, strong degree and its centralities. It is found that the combat network based on JONIS has characteristics of small-world and scale-free, with a large average weighted aggregation coefficient and a small average weighted path length, showing a similar power-law distribution. In the example network, command centers, satellites, support force, and early warning unit all have larger strong degrees and centralities. These platforms as the center of gravity and fragile nodes in the JONIS should be focused on protection.*

Keywords: joint operation; network information system; complex network; simulation and modeling

引言

现代战争是基于网络信息体系将各种作战资源、服务和系统融合集成，形成作战要素无缝链接、作战平台自主协同的一体化联合作战体系。分布于多维战场空间的各类系统单元及其物理(信息)连边，构成了联合作战网络信息体系的作战网络。称网络信息体系对应于物理域(地理空间)的通信网为基础网，称对应于信息域(业务组织)的信息网为作战网(如指控网、协同网、保障网等)。网络信息体系作为一类军事功能明显的复杂大系统，具有和一般复杂系统不同的特征，如：节点异质、业务多样、级联影响、拓扑时变等。复杂网络的迅速发展，为网络信息体系的复杂性研究提供了理论基础和方法工具。国外，Cares[1]首次用复杂网络定义并推导了信息时代 IACM 模型；Dekker[2]提出一种 FINC 方法分析了空战和陆战的 C4ISR 系统；Grant[3]等

收稿日期：2017-05-05 修回日期：2017-07-21；
基金项目：国家自然科学基金(61403401)；
作者简介：彭军(1985-)，男，湖南常德，博士，工程师，研究方向为军事体系分析与建模；张明智(1962-)，男，陕西凤翔，博士后，教授，博导，研究方向为战略战役模拟、武器装备体系论证、军事运筹理论与方法。

Published by Journal of System Simulation, 2017

Journal of System Simulation, Vol. 29 [2017], Iss. 10, Art. 23

基于 SNA 方法分析了指控网的结构特征。国内，金伟新[4]从作战要素的功能类型及其隶属连接关系，发现作战网是由 δ 分布、指数分布与幂律尾分布构成的混合分布；刘洋[5]基于兵棋数据发现指控网具有扁平化结构；蓝羽石[6]提出 OPDAR 模型研究了 C4ISR 系统的抗毁性问题。

王运明[7]等考虑了指控网的军事复杂性，构建的扁平化指控网具有小世界和无标度特性，但没有对指控网的度和中心性作进一步研究。本文运用复杂网络理论方法，构建反映网络信息体系结构特征的异质有向加权网，以强度中心性、接近中心性和中介中心性等指标分析了某局域作战网的结构，反映了节点之间的连接关系和服务范围，进而分析了某些关键节点(脆弱节点)在网络中的重要性，为进一步开展网络信息体系拓扑构建及抗毁性研究提供依据和参考。

1 模型描述及数据来源

1.1 网络信息体系结构模型

1.1.1 结构特征

网络信息体系结构是指组成网络信息体系的系统单元及系统单元之间的关系，即：网络信息体系结构={系统单元，系统单元关系}。本文将网络信息体系系统单元抽象为 5 类基本单元：传感单元(Sensor，S)、指控单元(Commander，C)、传输单元(Transmitter，T)、武器单元(Weapon，W)和保障单元(Guarantee，G)。它们是对网络信息体系主要功能特征的抽象描述。这里要注意的是，上述系统单元虽然是在不同功能下的划分，但也不能完全区分彻底，有的在资源服务上是互相包含，分解组合而成的，只不过它们在某个时间和任务环境下履行对应职责，提供相应功能。如海上大型作战单元在大的作战环境中被当作是下级指控单元，若处在小的作战环境和作战任务中，则起到指控、传输、保障等功能单元的作用。因此应根据具体的使命任务区分各系统单元的功能。

网络信息体系中不同系统单元之间存在物理的连接关系和信息的逻辑关系。前者对应于有形的、实际的物理连边，如通信传输连接；后者对应于无形的、虚拟的抽象连边，如各种信息交互关系(指控、协同、保障等)。本文将系统单元之间的关系抽象为 4 类基本关系：传输关系(Transmission relation，TR)、指控关系(Command relation，CR)、协同关系(Synergy relation，SR)和保障关系(Guarantee relation，GR)。其中，传输关系是网络信息体系的各系统单元之间基于物理域的物理交互，其它关系是基于信息域的信息交互关系抽象而来。网络信息体系的物理域基础网与信息域作战网的映射关系如图 1 所示。

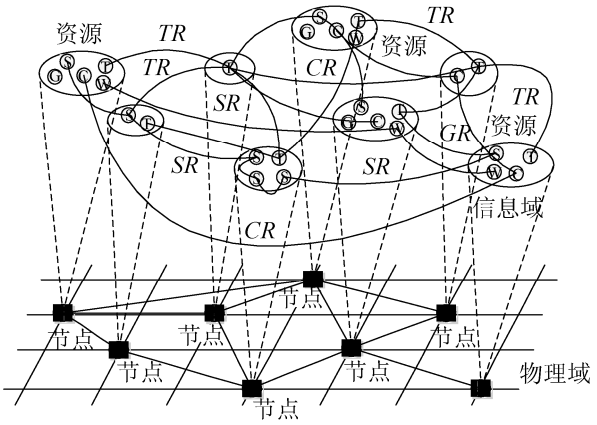


图 1 基础网与作战网的映射

Fig. 1 Mapping of base network and combat network

1.1.2 基本单元

下面给出 5 类基本单元的定义：

(1)传感单元表示情报、侦察、监视类功能平台，具备战场空间感知能力，接收来自目标的探测信息，进行目标识别和信息融合，并将其通过传输单元传递给指控单元。具体体系作战网络中，可根据情报感知手段分为陆上、海上、空中、空间等雷达、红外/光电、通信信号、无源探测单元节点。

(2)指控单元表示指挥、控制类功能平台，具备指挥所指控能力，接收来自传感单元、武器单元、保障单元和其它指控单元的作战信息，进行态势分析和判断决策，并将其通过传输单元传递给其它被

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol29/iss10/23
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201710023

指控的对象。具体体系作战网络中，可按功能和级别分为联合、战区、军兵种及部队指挥所等。

(3)传输单元表示计算机、通信类功能平台，具备通信传输和中继能力，接收各类情报、指控、协同信息，并通过有线、无线信道传递给其它功能单元。在具体体系作战网络中，可按功能和用途分为各级骨干网汇接、编队子网、数据链、短波通信、卫星通信等通信网络及节点。

(4)武器单元表示软、硬杀伤类功能平台，具备电子干扰和制导毁伤能力，接收指控单元的命令，对敌目标进行攻击。具体体系作战网络中，可按功能和用途分为机载武器装备、舰载武器装备、固定式武器装备、车载武器装备以及赛博武器等武器节点。

(5)保障单元表示保障类功能平台，具备信息支援和后勤装备保障能力，对网络信息体系的运行提供必不可少的支援保障。具体体系作战网络中，可按作战功能和用途分为导航定位、网络安防、气象水文、远程维修、远程医疗等保障节点。

1.1.3 基本关系

下面给出 4 类基本关系的定义：

(1)传输关系是系统单元之间中继、传递信息的关系，一般发生在传感单元与传输单元、指控单元与传输单元、传输单元之间、保障单元与传输单元之间交互的情报、指控、保障类信息的传输，它是一种双向传输的关系。在传输方面，不同类型不同级别的系统单元之间如果有信息交流和传递，则基于通信介质建立相应的传输关系，且受通信范围和地理空间的限制，系统单元之间应尽量减少路由。

(2)指控关系是系统单元之间的指控与被指控的关系，一般发生在指控单元对传感单元、上下级指控单元之间、指控单元对武器单元、指控单元对保障单元的指控类信息的交互，它是一种单向指挥关系。在指控方面，指控与被指控单元之间存在多种指挥方式，如按级指挥、越级指挥等，它是一种基于物理连接上的业务逻辑关系，受体制编成、组织关系和作战任务的影响，系统单元之间应尽量减少层级指挥链，提高指挥效率，实现扁平化指挥。

(3)协同关系是系统单元之间相互协同配合的关系，一般发生在传感单元之间、指控单元之间、武器单元之间、保障单元之间的协同类信息的交互，它是一种双向协同的关系。在协同方面，相互协同的单元之间根据任务需要建立起任务协同的关系，一般发生在同类型的系统单元之间，可以提高目标探测效率、指挥协同效率、武器协同效率，如多雷达协同可以提高目标识别概率，多武器协同可以提高目标毁伤概率，它也是一种基于物理连接上的业务逻辑关系。

(4)保障关系是保障单元对其它被保障单元的情报支援、信息保障的关系，一般发生在传感单元对指控单元、传感单元对武器单元、保障单元对指控单元、保障单元对武器单元之间保障类信息的交互，它是一种单向保障关系。在保障方面，保障单元对所实施保障范围的其它系统单元提供后装保障和信息保障，基于保障网承担对应的武器单元、指控单元的情报支援和维修保障，并将各个保障单元连接起来提高保障能力，同样的，保障关系也是一种基于物理连接上的业务逻辑关系。

1.2 网络信息体系拓扑构建

复杂网络是一种用来描述和分析复杂系统拓扑结构和行为特征的模型[8]。为使联合作战网络信息体系的网络模型更贴合作战实际，对模型作以下假设和修正：

(1)将模型粒度设置为平台级，即一个网络节点代表一个武器装备或作战平台。平台在物理空间上独立分布，有固定的 IP 地址，具有相应的职责分工和功能属性，完成特定的使命任务，在系统结构上根据任务按需分解组合，在系统功能上相互协同配合。

(2)考虑节点类型、地理空间、交互强度及方

Journal of System Simulation, Vol. 29 [2017], Iss. 10, Art. 23

向等结构属性，引入异质有向加权网 $G=(V,E,W)$ 对网络信息体系的基础网和作战网的拓扑结构描述。区分 5 类节点类型，考虑 4 类交互边的类型和权值方向。既反映了节点的功能属性及边的方向性关系(如指控流、协同流、保障流等)，又反映了边的作用强度(如数量、流量、容量、时延等)。异质有向加权网中，$V=\{v_1,v_2,...,v_n\}$ 是节点集，$v_i\in\{S,C,T,W,G\}$，$E=\{e_1,e_2,...,e_m\}$ 是边集，$e_i\in\{TR,CR,SR,GR\}$，$W=(w_{ij})_{n\times n}$ 是边的权重集，w_{ij} 代表权重值。采用邻接矩阵可将 G 表示为

$$A=\{a_{ij}\}_{n\times n}$$

式中：$$a_{ij}=\begin{cases}w_{ij} & ((v_i,v_j)\in E)\\ 0 & ((v_i,v_j)\notin E)\end{cases} \tag{1}$$

基础网中，w_{ij} 表示节点之间信息传输时延，定义如下：

$$w_{ij}=\begin{cases}[0.8,0.9) & v_iv_j\text{的距离}>10^3\ \text{km}\\ [0.5,0.8) & v_iv_j\text{的距离}<10^3\ \text{km}\\ [0.2,0.5) & v_iv_j\text{的距离}<10^2\ \text{km}\\ [0.1,0.2) & v_iv_j\text{的距离}<10\ \text{km}\end{cases} \tag{2}$$

作战网中，w_{ij} 表示节点之间信息交互的强度，定义如下：

$$w_{ij}=\delta_{CR}+\delta_{SR}+\delta_{GR} \tag{3}$$

式中：$\delta_{CR},\delta_{SR},\delta_{GR}\in(0,1)$，0 表示无相应的信息边，1 表示有相应的信息边(指控、协同、保障)。$0\leqslant w_{ij}\leqslant 3$，且 $w_{ij}\neq w_{ji}$。

(3)给出一个局域联合作战网络信息体系的示例网络如图 2 所示。图 2(a)用异质无向加权网表示物理域的基础网，图 2(b)用异质有向加权网表示信息域的作战网(将指控网、协同网和保障网合为了一个整体的业务逻辑网)。节点的点权大小表示节点级别，大号圆圈表示高层节点(高价值)，中号圆圈表示中层节点(中价值)，小号圆圈表示底层节点(低价值)，点权定义如下：

$$\lambda=\begin{cases}[0.7,0.9) & v_i\in\text{高层节点}\\ [0.3,0.7) & v_i\in\text{中层节点}\\ [0.1,0.3) & v_i\in\text{底层节点}\end{cases} \tag{4}$$

网络包含 298 个节点，其中，指控单元(蓝绿色)30 个、传感单元(品红色)62 个、传输单元(绿色)46 个、武器单元(白色)133 个、保障单元(橘色)27 个；基础网中包含 284 条实际的有/无线通信连边，表示传输关系(绿色)；作战网中包含 943 条边，其中，指控关系(蓝绿色)157 条、协同关系(灰色)550 条、保障关系(绿色)236 条。

2 复杂网络特征分析

2.1 强度及强度分布

强度是复杂网络拓扑结构的基本参数，主要描述节点在网络中的影响力。节点 v_i 的强度 s_i 定义为与该节点有连线关系的其它节点的边权和，表示为：

$$s_i=\sum_{j\in N_i}w_{ij}$$

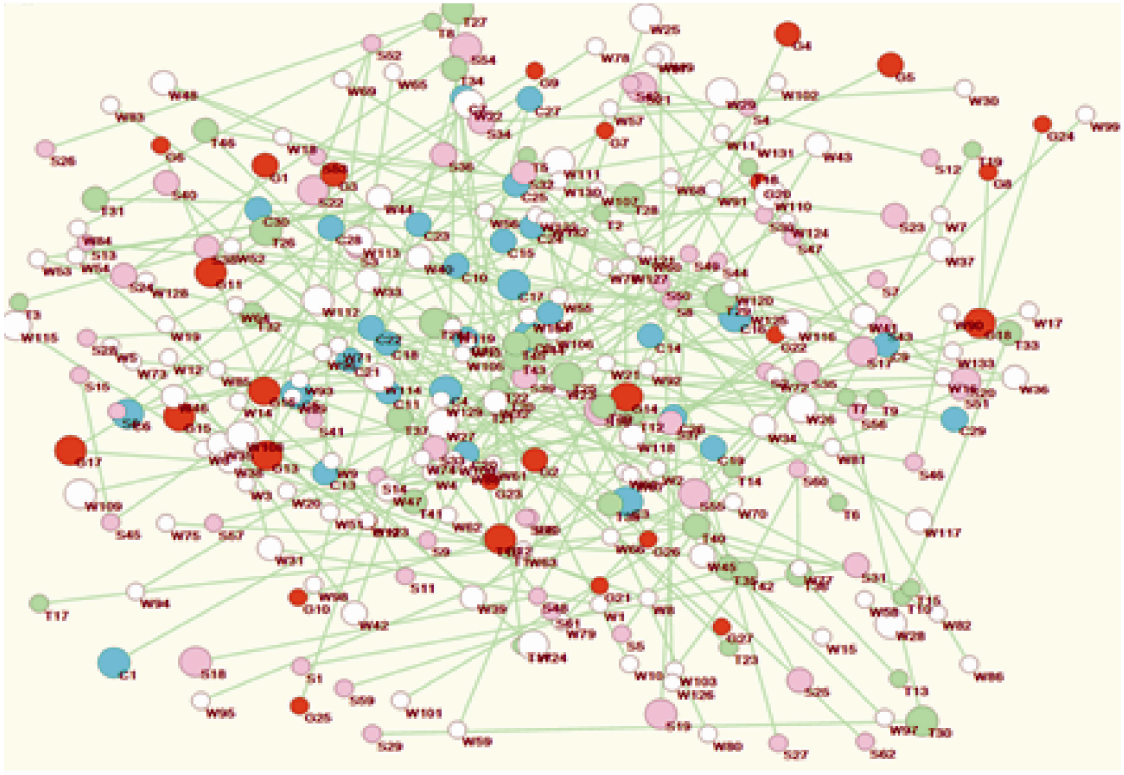
式中：N_i 表示节点 v_i 的邻居节点集合；w_{ij} 表示节点 v_iv_j 之间的边权值。一般强度大的节点在局域范围内较为重要。节点的强度值越大，说明与该节点交互的信息边越多，连接关系越复杂，节点在网络中的重要性和影响力越高。对于示例网络的作战网，根据拓扑结构数据计算各个节点的强度值，排序前 15 的强度散点图如图 3 所示。

由图可知，网络中有少量强度值较大的节点，如 C1、C3、T7、S1、S4、G2 等平台的强度值较大，且多为高层平台。

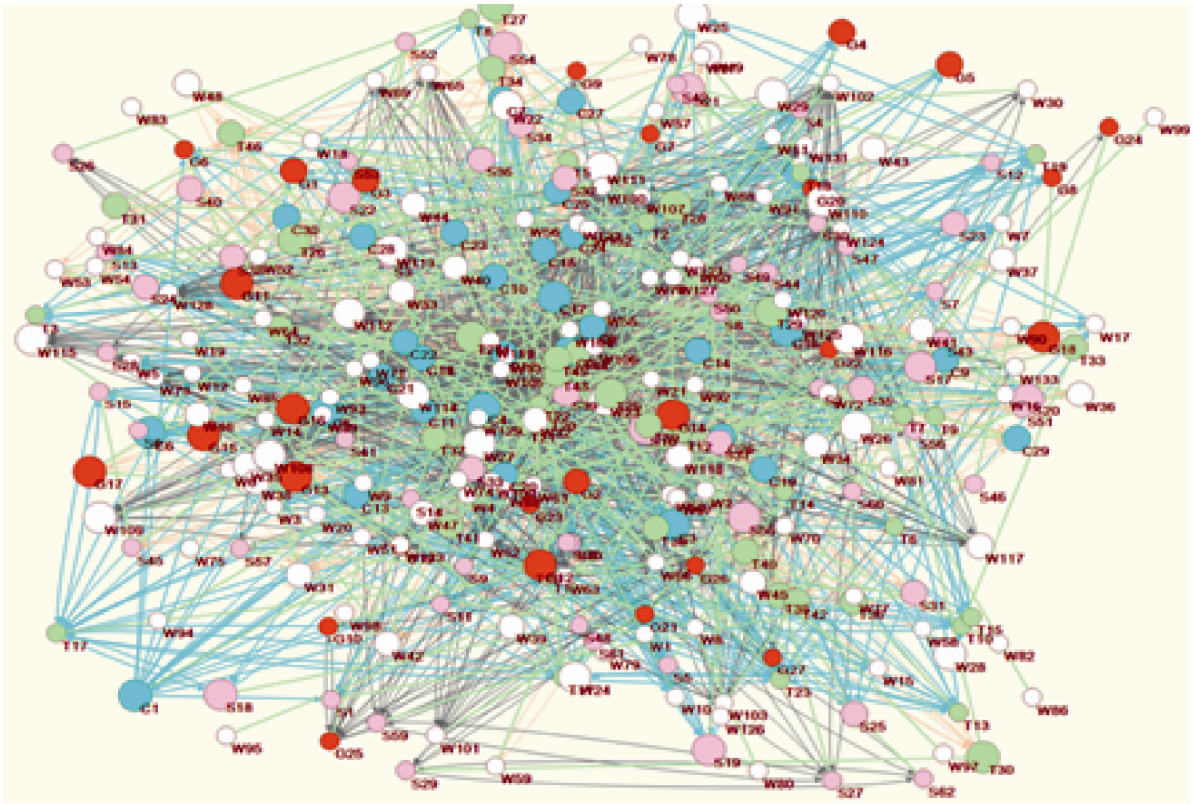
节点强度分布 $P(s)$考察的是强度 s 的统计概率分布情况。一般网络的强度分布 $P(s)$具有类似于无标度网络的胖尾特征，随着度值增大呈现缓慢下降的趋势。示例网络中各节点的强度分布如图 4 所示。

由图可知，强度分布与幂指数为–1.27 的曲线拟合较好，基本符合幂率分布。约有 70%节点的强度值在 10 以下，且大部分为底层传感单元、武器单元和部分中层指控单元、保障单元。这说明局域联合作战网络信息体系的系统单元之间差异性较大，且对高层指控单元、传输单元和保障单元的依赖性较大，存在一定的风险。

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol29/iss10/23
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201710023



(a) 异质无向加权网



(b) 加权有向异质网

图 2　网络信息体系拓扑结构示意

Fig. 2　Topology of network information system

Journal of System Simulation, Vol. 29 [2017], Iss. 10, Art. 23

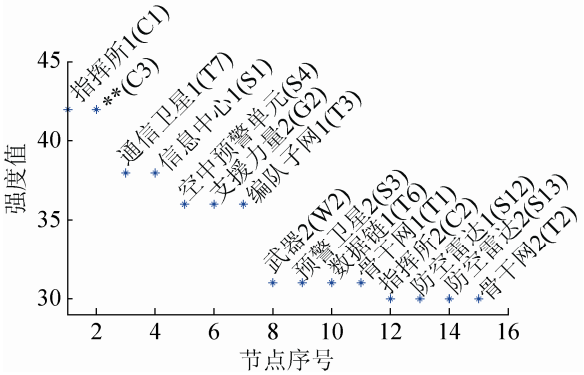


图 3 示例网络的强度散点图

Fig. 3 Intensity scatter plot of example network

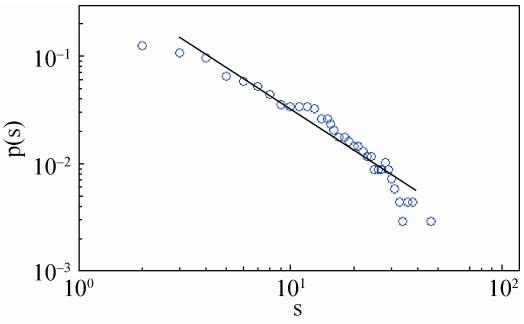


图 4 示例网络的强度分布图

Fig. 4 Intensity distribution of example network

2.2 加权聚集系数

聚集系数描述的是节点的聚集程度，即一个节点的邻居节点之间有多少是邻居。聚集系数大反映了邻居节点之间联系紧密，聚集系数小则表明邻居节点之间关联度不够。本文示例网络中考虑了近邻闭合三元组中各边的权值。节点 v_i 的加权聚集系数是指所有相邻节点之间实际存在加权边值占所有可能的最大连边数的比例，表示为

$$c^w{}_i = \sum_{k,j=1}^{n} w_{ik} w_{kj} w_{ij} / (k_i(k_i - 1)) \tag{5}$$

式中，$w_{ik}w_{kj}w_{ij}$ 是节点 v_i 的邻居节点间的加权边值，对于基础网是指信息传输时延，对于作战网是指信息交互边数，k_i 是节点 v_i 的度，$k_i(k_i-1)$是归一化因子，使得 $0 \leqslant c_i^w \leqslant 1$。整个网络的加权聚集系数 C 由各节点的平均加权聚集系数求平均得来，即

$$C = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} C_i^w \tag{6}$$

如果网络的平均加权聚集系数越大，说明各节点间联系越密切，对其它节点的依赖程度越小，也反映了网络越鲁棒抗毁。对于示例网络的各个节点，分析基础网和作战网的加权聚集系数，如图 5 所示。截取了降序排列的前 60 个节点值。对于基础网(作战网)的任一节点，其相邻节点间聚集可能性平均为 0.385(0.502)，大部分节点的加权聚集系数较大。

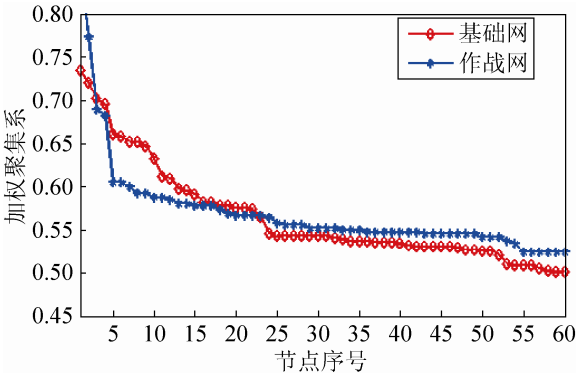


图 5 示例网络的加权聚集系数

Fig. 5 Weighted clustering coefficient of example network

2.3 平均加权路径长度

最短路径长度是复杂网络中的一个重要测度，网络中任意两个节点之间可能有多条路径，最短路径长度指的是两个节点之间的一组有序点边集合的最短距离。平均最短路径长度是网络中所有节点之间最短路径的平均值。加权路径长度考虑了边权值，是使权重之和取最小值的有序点边集合。如果节点 v_iv_j 之间有 l 个中间节点 $a,b,..,v,w$，那么加权路径长度为：

$$l_{ij} = \sum_{a,b,..v,w=1}^{n} w_{ia} w_{ab} ... w_{vw} w_{wj} \tag{7}$$

用 L 表示平均加权路径长度，计算公式为：

$$L = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i>j} l_{ij} \tag{8}$$

式中：l_{ij} 为节点 v_iv_j 之间的信息传输时延。当 L 越小时，表明网络中任意两个节点之间的传输时延越短，网络整体运行效率越高。通过计算得到示例网络的平均加权路径为 1.13，即任意两个节点之间传递信息的平均时间。另外，当 w_{ij}=1 时还可以计算网络的平均路径长度(约为 2.45)，低于同等规模随机网络的平均路径长度(约为 3.76)。

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol29/iss10/23
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201710023

由上可知，该示例网络拥有较大的平均聚集系数和较小的平均路径长度，表现出一定的小世界特性和无标度特性，具有网络连通性好、网络各节点之间联系较紧密、网络传输效率较高的特点。

3 各类中心性分析

3.1 强度中心性

强度中心性的基本思想是：一个节点在网络中的中心性取决于该节点的强度值，强度值越大，说明该节点越重要。强度值为 s_i 的节点的归一化强度中心性计算公式为：

$$C_s(i)=\frac{2s_i}{N-1} \tag{9}$$

节点的强度中心性体现了一个节点与其它节点直接发生信息交互的能力，反映了该节点在网络信息体系中的枢纽地位。通过计算，发现示例网络中强度中心性在 0.178~0.415 之间的节点约占 10%，且多为高层单元，表明信息交互主要发生在这些拥有较多连边的节点，具有较强的信息交互能力(指控、协同、保障)。强度中心性在 0.080~0.178 之间的节点约占 60%，且多为中层(底层)单元，具有一定的信息交互能力。其它节点的强度中心性低于 0.080，且多为底层单元，表明信息交互能力偏弱。强度中心性前 10 的节点如表 1 所示。

3.2 接近中心性

接近中心性的基本思想是：一个节点在网络中的中心性取决于该节点与其它节点接近的程度，其值为一个节点到达其它节点的最短路径之和的倒数。节点 v_i 的归一化接近中心性计算公式为：

$$C_c(i)=\frac{N}{\sum_{j=1,j\neq i}^{N} l_{ij}} \tag{10}$$

式中：l_{ij} 表示节点 v_iv_j 的最短路径。强度中心性研究的是节点之间的直接联系，接近中心性研究的是节点之间的间接联系，即一个节点与其它节点间建立联系的通达可能性，由此反映出该节点在网络中的中心地位。通过计算发现示例网络的接近中心性差异较小，主要分布在 0.220~0.520 之间，这表明示例网络具有一定的小世界特性。接近中心性前 10 的节点如表 1 所示。

3.3 中介中心性

中介中心性的基本思想是：一个节点在网络中的中心性取决于该节点充当其它节点之间“桥”的角色，即经过一个节点的最短路径数越多，说明该节点越重要。介数有两种：点介数和边介数。点(边)介数是网络中所有经过该节点(边)的最短路径数与整个最短路径数的比值，节点 v_i 的归一化中介中心性计算公式为

$$C_b(i)=\frac{1}{N^2}\sum_{i\neq j\neq k}\frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}} \tag{11}$$

中介中心性大的节点(边)在全局范围内较为重要，往往是信息中继或充当“桥”的角色。通过计算发现示例网络中介中心性较高的是传输单元，其次是指控单元，其它大部分节点的中介中心性较低，大约 75%节点的值为 0。由此可见，节点中介中心性的差异性较大，高层传输单元是区域内最大的通信枢纽，中层传输单元也是该区域重要的通信枢纽，同时该区域内众多底层节点导致其中介中心性较小。中介中心性前 10 的节点如表 1 所示。

表 1 示例网络中心性排名前 10 的节点
Tab. 1 Top 10 nodes of example network center

节点	强度中心性	节点	接近中心性	节点	中介中心性
C1	0.415	C1	0.518	T3	0.442
C3	0.415	C3	0.490	T4	0.375
T7	0.370	T7	0.478	T6	0.362
S1	0.370	S1	0.475	T7	0.354
S4	0.291	G2	0.462	T1	0.319
G2	0.291	S4	0.458	T2	0.283
T3	0.291	T2	0.445	C2	0.281
W2	0.253	C2	0.442	C3	0.278
S3	0.253	T3	0.439	T9	0.275
T6	0.253	G1	0.407	T5	0.264

Journal of System Simulation, Vol. 29 [2017], Iss. 10, Art. 23

3.4 示例网络节点中心性分析

通过对表 1 中示例网络节点的各类中心性分析，发现空间卫星、指挥所、支援力量、海上大型作战单元、空中预警单元等节点与其它节点的信息交互最为密切。在局域联合作战网络信息体系中，不论信息的产生、传递、处理、协同等都需要经过这些节点，这些关键节点成为了体系的重心，决定了整个网络的作战效能。一旦节点被毁，会严重影响作战网络的连通性，造成网络坍塌。传输单元虽然不是作战主体，但在作战网络中充当“桥梁”连接作用，是使“OODA”成环的关键因素，是体系中的脆弱节点。这些节点在网络信息体系构建和运行中都应予以重点保护或备份。

4 结论

(1)通过复杂网络理论，从异质有向加权网络拓扑构建、复杂网络特征和各类中心性分析等方面研究了某局域联合作战网络信息体系的结构特征。计算结果表明，示例网络的强度分布近似服从幂率分布，具有较大的平均加权聚集系数和较小的平均加权路径长度，表现出无标度特性和小世界特性，是典型的复杂网络。

(2)通过对示例网络的强度中心性、接近中心性和中介中心性分析，能够发现各节点之间的交互关系以及节点在网络中的地位，进而挖掘联合作战网络信息体系的复杂性特征和运行规律，从而为构建鲁棒高效灵活的网络信息体系结构提供理论支撑。

后续工作可以从以下方面开展：将网络拓扑模型扩展到陆海空天网电一体的大体系中来，引入负载容量、传输时延等数据，开展基于多重网络的联合作战网络信息体系级联失效模型研究。

参考文献：

[1] Jeffery R Cares. Distributed networked operations [M]. New York, USA: iUniverse, 2005.

[2] A H Dekker. Applying the FINC (Force, Intelligence, Networking and C2) Methodology to the Land Environment [R]// DSTO-GD-0341, 2003.

[3] Grant T J, Janssen R H P, Monsuur H. Network Topology in Command & Control: Organization, operation & evolution [M]. Hershey PA, USA: IGI Global, 2014.

[4] 金伟新, 肖田元. 作战体系复杂网络研究 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2009, 6(4): 12-25. (Jin Weixin, Xiao Tianyuan. Research on the combat SoS complex Network [J]. Complex System and Complex Science, 2009, 6(4): 12-25.)

[5] 刘洋, 胡晓峰. 基于仿真数据的作战体系结构层次分析 [J]. 军事运筹与系统工程, 2014, 28(3): 65-69. (Liu Yang, Hu Xiaofeng. Base on the simulation data analysis of the operational architecture level [J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2014, 28(3): 65-69.)

[6] 蓝羽石, 毛少杰, 王珩, 等. 指挥信息系统结构理论与优化方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015. (Lan Yushi, Mao Shaojie, Wang Heng. Theory and Optimization of C4ISR System Structure [M]. Beijing, China: National Defense Industry Press, 2015.)

[7] 王运明, 崔怀建, 陈波, 等. 基于边连接策略的指控网络模型研究 [J]. 指挥与控制学报. 2016, 2(1): 40-46. (Wang Yunming, Cui Huaijian, Chen Bo. On the Model of Command and Control Networks Based on Edge-link Strategy [J]. Journal of Command and Control, 2016, 2(1): 40-46.)

[8] 汪小帆, 李翔, 陈关荣, 等. 网络科学导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2012. (Wang Xiaofan, Li Xiang, Chen Guanrong. Network Science: An Introduction [M]. Beijing, China: High Education Press, 2012.)

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol29/iss10/23
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201710023