

doi: 10.7690/bgzd.2019.03.011

面向能力评估的指挥信息系统本体模型向网络拓扑模型转化的方法

程建博¹, 刘德生², 李迎春²

(1. 西昌卫星发射中心技术部, 四川 西昌 615000;

2. 航天工程大学复杂电子系统仿真实验室, 北京 101416)

摘要: 针对采用直接映射法进行指挥信息系统网络建模存在建模规范不统一的问题, 在指挥信息系统规范化本体模型的基础上, 提出一种本体模型向网络拓扑模型转化的方法。通过解析规范化的本体模型得到建立网络模型所需 3 个要素, 构建网络拓扑模型, 并对区域联合防空指挥信息系统实现本体模型到网络模型的转化, 从网络模型的时效性、协同性、抗毁性角度出发分别建立评估模型, 以实现从整体结构层面对指挥信息系统的能力进行评估。结果表明: 该方法在解析数据的基础上实现了由指挥信息系统本体模型向网络拓扑模型的转化, 可为其他本体模型的按需解析提供参考。

关键词: 指挥信息系统; 本体模型; 网络拓扑模型; 能力评估

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

A Method of Transformation from Ontology Model of Command Information System to Network Topology Model for Capability Evaluation

Cheng Jianbo¹, Liu Desheng², Li Yingchun²

(1. Department of Technology, Xichang Satellite Launching Center, Xichang 615000, China;

2. Complex Electronic System Simulation Laboratory, University of Aerospace Engineering, Beijing 101416, China)

Abstract: Aiming at the problem of modeling the command information system network by direct mapping method, the problem of modeling is not unified. Based on the normalized ontology model of command information system, a method of transforming ontology model into network topology model is proposed. Through the analysis of the standardization of the ontology model to obtain the required 3 elements to establish the network model, construction of network topology model, and the transformation of regional joint air defense command information system to realize ontology model to network model, the network model of timeliness, coordination, survivability angle out respectively to establish evaluation model, to achieve a commanding information system capacity evaluation from the overall structural level. The results show that this method can transform the command information system ontology model to the network topology model based on the analysis data, and provide reference for other ontology models on-demand analysis.

Keywords: command information system; ontology model; network topology model; capability evaluation

0 引言

随着指挥信息系统^[1]的发展, 越来越强调信息在系统之间的交互作用。基于信息的整体网络特性日益突出, 传统基于还原论的能力评估方法已不适应现代指挥信息系统的特征。近年来, 研究人员将网络科学引入到复杂系统的研究中来, 强调系统结构对系统能力的影响^[2-4]。系统网络拓扑建模的方法可归纳为 2 种^[5]: 一种是规则建模法, 通过建立符合网络特性的网络模型生成规则, 设计网络模型生成算法, 并对算法进行完善以生成符合实际系统特征的网络模型; 另一种是映射建模法, 通过对网络模型中节点和边的定义, 建立实际系统到网络模型的映射, 直接由实际系统(数据)映射成网络模型。

前者算法的准确性直接决定了模型的准确性, 但无法保证所建立网络模型特性的准确性、全面性; 直接映射建模法保留了原始系统结构的特性, 应用价值更高。现阶段直接映射建模法还没有统一规范的建模方法。笔者通过本体解析得到网络模型要素, 生成系统网络拓扑模型。整个过程属于映射建模的方法。

1 本体模型与网络拓扑模型的对应关系

笔者在指挥信息系统本体模型^[6]的基础上实现由本体模型向网络拓扑模型的转化。在指挥信息系统本体模型中, 将指挥信息系统分为信息获取单元、信息处理单元、指挥决策单元, 并定义了各单元所属实体的能力指标以及各实体间的关联关系。其中

收稿日期: 2018-11-02; 修回日期: 2018-12-19

基金项目: 部委级基金资助项目; 重点实验室基础研究项目

作者简介: 程建博(1992—), 男, 河南人, 硕士, 从事信息系统建模与评估研究。

用本体类及类的实例表示指挥信息系统的组成，用本体数据类型属性表示度量实体自身能力的战技指标，用本体对象属性表示实际作战中指挥信息系统实体间产生的各种信息交互关系。

网络模型是由指挥信息系统实际组成结构抽象而来，描述了指挥信息系统中节点以及节点之间的关联关系，是展开指挥信息系统能力评估的基础。将指挥信息系统中的实体抽象成节点，将实体之间的信息交互关系抽象成有向边，即可建立与实际指挥信息系统相对应的网络模型。

因此，本体模型中的实例以及实例之间的信息关系分别对应网络模型中的节点和边。具体为：本体类的实例对应网络模型中的节点；本体实例所继承的类的数据类型属性值对应网络模型中节点的能力属性值，对应到评估中即节点的战技指标；本体模型中所定义的实例之间的 shareWith 对象属性和 commandTo 对象属性分别对应网络模型中的信息共享边和指挥控制边。

综上所述，建立指挥信息系统本体模型与指挥信息系统网络模型之间的对应关系如图1所示。

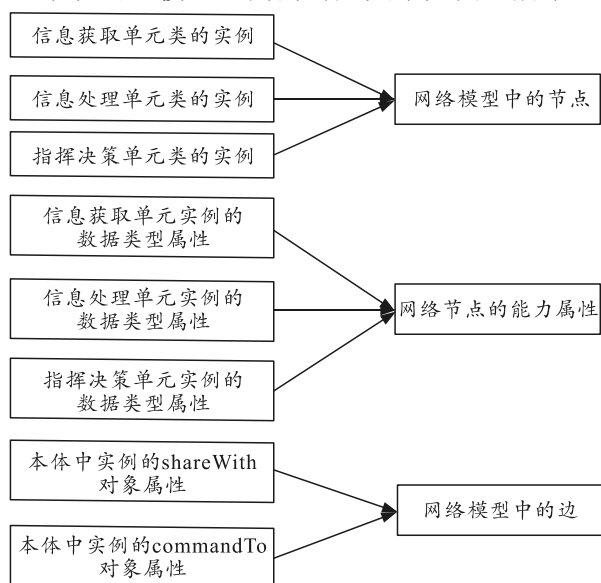


图1 本体模型与网络拓扑模型间对应关系

2 本体解析

在本体模型和网络模型要素对应关系分析的基础上，就要思考如何得到本体模型中所需要的关键要素，并作为网络模型生成的输入要素；因此，笔者利用 Jena 开源软件包提出了一种面向指挥信息系统能力评估的本体解析方法。通过本体解析，解析出能够转化为网络模型以及能力评估所需要的关键要素信息，为指挥信息系统能力评估提供输入。

2.1 本体解析概念

本体解析以 RDF 三元组的形式显示本体文件中的陈述信息。利用 Protégé 等本体开发工具，或者 Jena Ontology API 及其他方法可以得到本体模型，之后可以通过本体解析的方式得到本体模型中类的组成、类之间的层次关系、实例间关系及实例属性等数据，进而利用这些解析出来的数据，为我们的需求服务^[7-8]。

在系统评估中，通过解析指挥信息系统本体文件，可以得到指挥信息系统所包含的实体组成、实体间关系及实体属性值，通过实体间信息关系可以在此基础上建立复杂网络模型从结构层面对系统能力进行评估；通过实体属性值，可以利用评估聚合方法从数据层面对系统能力进行评估。

2.2 本体解析方法

本体解析可以利用 Jena API。Jena 是 HP 惠普实验室面向语义网应用程序开发的 Java 工具包。是一个 Java 的 API，需要 Java 运行环境。笔者对本体解析的环境配置采用 Jdk1.88 和 Eclipse4.6.3，采用的 Jena 版本是 2.6.0。将 Jena 中的所有 jar 文件通过添加外部文件的方式添加到 Java 工程中，即可在 Eclipse 中调用 Jena API 对本体文件进行解析。

1) URI 的简化。

针对评估任务，解析本体文件的目的是得到简洁、明确的评估数据。在解析过程中，要使输出结果简洁明确，就需要对本体 URI 进行处理，所以本节先讨论 URI 的简化方法，再讨论解析的方法步骤。

解析本体文件得到的 RDF 数据由三元组构成，组成三元组的主体 (subject)、属性 (predicate) 和客体 (object) 都是以资源的形式描述的，分别属于 Resource 类型、Property 类型和 RDFNode 类型。主语代表资源，谓语代表资源的属性，客体代表属性的值，它可以是一个资源或者文本。资源用统一资源标识符 (uniform resource identifier, URI) 表示。因此解析得到的信息中包含资源的位置信息或者是属性值的数据类型信息，不便于对关注信息的直接读取。例如对于主体资源的描述：<http://www.semanticweb.org/ontologies/2017/evaluiton-ontology#预警探测单元>，只需要得到节点是预警探测单元，而不需要知道它的位置信息，所以去掉符号“#”之前的内容。而对数据类型数据值的描述例如：`200^^http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int`，只需要得到属性值是 200，而不

需要知道它的数据类型，所以去掉符号"^^"之后的内容。针对上述情况，需要对输出数据进行简化处理，以简明直观地得到需要的数据内容，下面讨论简化 URI 的方法。

3 种去除 URI 符号"#"之前内容的方法：

① a.toString(). substring(a. toString(). indexOf("#")+ 1);

② a.getModel().getGraph().getPrefixMapping().shortForm(a.getURI());

③ a.getLocalName();

去除 URI 符号"^^"之后内容的方法：

④ object.toString().substring(0,object.toString().indexOf("^^"))

对 RDF 三元组，subject、predicate 去除 URI 前缀简化 URI，以上 3 种方法均可，但方法③明显代码简洁。而对于 object 属性值的获取则不能直接运用上述方法得到。因为 object 为 RDFNode 类型，而 RDFNode 类型没有 getLocalName 函数和 getURI 函数，无法用方法②和③。又因为 RDFNode 类型是 Resource 类型和 Literal 类型的公共超类，对应着对象属性值的类型和数据类型属性值的类型。所以在得到 RDFNode 类型变量 object 基础上，要进一步判断 object 是 Resource 类型，还是 Literal 类型。即判断客体分为 2 种情况。

⑤ 对于 Resource 类型的 object，即对对象属性值的处理可以通过调用 toString 函数将 RDFNode 类型转化为 String 类型，可利用方法①的方式；也可以通过调用 asResource 函数将 RDFNode 类型转化为 Resource 类型，再运用 getLocalName 函数：object.asResource().getLocalName()。

⑥ 对于 Literal 类型的 object，即对数据类型属性值的处理，则用方法④。

以上是简化 URI 的方法，属于本体解析的一部分，可为后文本体解析得到易读的结果打下基础。

2) 解析流程。

已经建好的本体文件包含了许多信息，如类的信息、对象属性信息、数据类型属性信息、实例信息等。为实现本体模型向复杂网络模型的转化，没有必要得到本体文件中的所有数据信息，只需要得到本体文件中有关实体的信息，所以要有选择地对本体文件进行解析。需要注意的是，系统中的装备实体在本体模型描述中有 2 种表述方式，在本体模型中与类、属性概念处于同一层次时称为实体 (Individual)，而作为类的实例化时称为实例

(Instance)，但两者代表的含义均为装备实体(在单独论述实例时用实体概念，强调是通过实例化产生实体时用实例概念)。所以，从有针对性地获得实体信息的角度出发，根据实体表述来源的不同，可以得到 2 种方法对本体文件进行解析。本节对本体解析方法的讨论，所用本体文件为文献[5]中的实例化本体模型。

方法 1：

按照迭代获取模型中所有的实例，再获取实例所属类，然后获取实例所属类的所有属性，最后获取实例属性值的思路，对本体文件进行解析。

解析流程如图 2 所示。

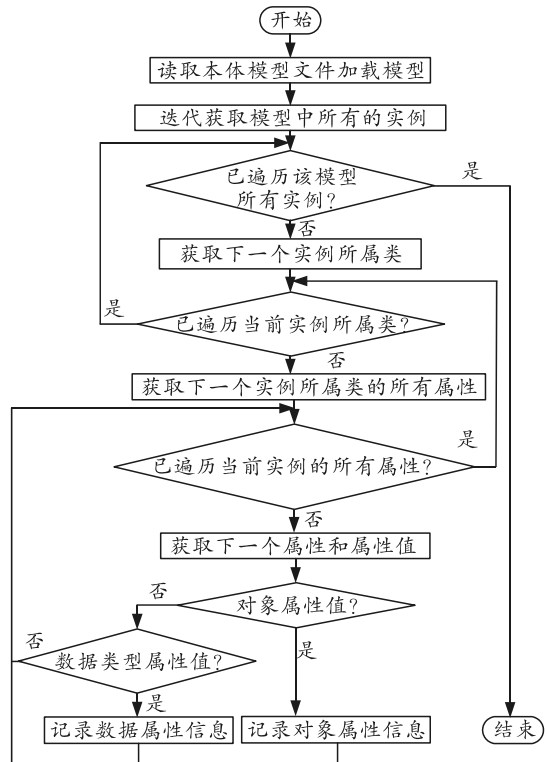


图 2 本体解析方法 1

解析结果如图 3 所示。

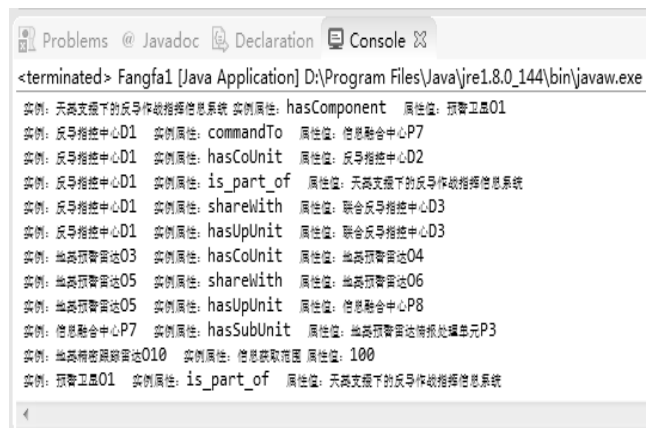


图 3 本体解析方法 1 所得结果

方法2:

按照迭代获取模型中的类，再获取类包含的所有实例，最后获取实例的属性和属性值的思路，对本体文件进行解析。

解析流程如图4所示。

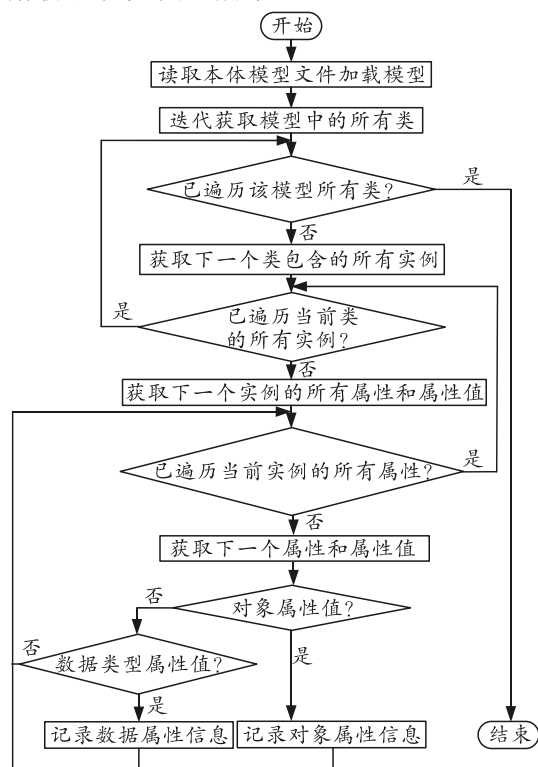


图4 本体解析方法2

解析结果如图5所示。

```

Problems @ Javadoc Declaration Console X
<terminated> Fangfa2 [Java Application] D:\Program Files\Java\jre1.8.0_144\bin\javaw.exe

实例:反导指控中心D1
实例:反导指控中心D1 实例属性:shareWith 属性值:联合反导指控中心D3
实例:反导指控中心D1 实例属性:shareWith 属性值:反导指控中心D2
实例:反导指控中心D1 实例属性:is_part_of 属性值:天高云阔下的反导作战指挥信息系统
实例:反导指控中心D1 实例属性:hasUpUnit 属性值:联合反导指控中心D3
实例:反导指控中心D1 实例属性:hasCoUnit 属性值:反导指控中心D2
实例:反导指控中心D1 实例属性:commandTo 属性值:信息融合中心P7
实例:反导指控中心D1 实例属性:type 属性值:指挥决策单元
实例:反导指控中心D1 实例属性:type 属性值:NamedIndividual

实例:地面站P2
实例:地面站P2 实例属性:type 属性值:信息处理单元
实例:地面站P2 实例属性:type 属性值:NamedIndividual
  
```

图5 本体解析方法所得结果

解析结果对比分析:

方法1通过获取实例所属类的所有属性，进而间接获得实例属性和属性值的方式，虽然可以得到实例对应属性的属性值，但存在属性值缺失的情况。

当一个实例的一种对象属性有多个属性值时，代表此实例与多个实例之间存在关系，但此方法只能输出其中一个属性值，也就缺少了与其他实例间的关系，造成后面关系分析数据的缺失。例如：实例反导指控中心D1的对象属性shareWith有2个属性值，反导指控中心D2和联合反导指控中心D3，即D1、D2和D3都存在着shareWith关系，但按此方法解析得到D1的对象属性shareWith只有一个属性值D3，缺少了D1和D2之间的shareWith关系，不符合实际。这种方法在实例的一种对象属性具有多个属性值的时候会造成关键信息的缺失。

方法2通过先获取模型中的类，再获取类包含的所有实例，最后获取实例属性信息的方式，可以解析得到实例的所有属性信息和属性值，而不存在属性值缺失的情况，经与方法1比较，笔者选择方法2对本体进行解析。

将本体解析后所得数据导入Gephi网络可视化分析软件，即可生成有向无权的网络拓扑模型，实现由指挥信息系统本体模型转化为网络拓扑模型。在转化得到的网络模型基础上，可以开展指挥信息系统的能力评估。

3 实例验证

以区域联合防空指挥信息系统^[9]为例，在建立区域联合防空指挥信息系统本体模型的基础上，利用笔者提出的本体解析方法对本体模型进行解析，进而转化为网络拓扑模型。在网络模型基础上，从系统结构的时效性、协同性、抗毁性3个角度出发，基于复杂网络特征参数分别建立评估模型，以实现从整体结构层面对指挥信息系统的能力进行评估。

3.1 区域联合防空指挥信息系统本体模型

在指挥信息系统本体模型^[6]的基础上，实例化产生区域联合防空指挥信息系统。首先对信息获取单元类实例化为雷达，信息处理单元类实例化为雷达情报处理中心和情报融合中心，指挥决策单元类实例化为联合防空指控中心、战区陆军指控中心、战区空军指控中心、地导旅指挥所和航空兵师指挥所；其次，对实体的数据类型属性实例化，即对实体的战技指标进行赋值；最后，对实体之间的关联关系进行实例化，定义实体之间的关联关系。利用Protégé工具建立的区域联合防空指挥信息系统本体模型如图6所示。



图 6 区域联合防空指挥信息系统本体模型

3.2 本体模型向网络拓扑模型的转化

对 Protégé 工具生成的本体文件利用第 2 章所提方法②进行解析, 得到系统中实体、实体属性以及实体间关联关系如图 7 所示。

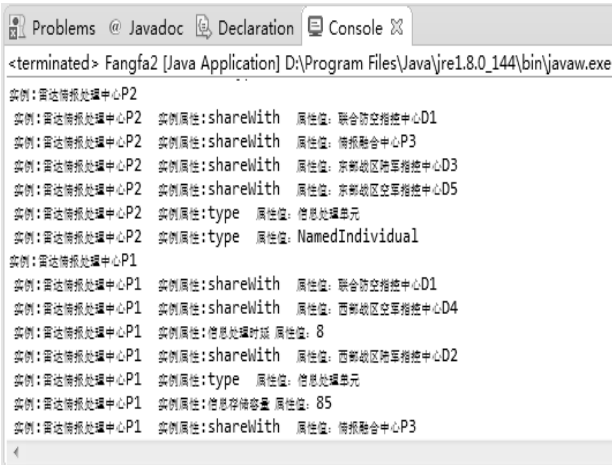


图 7 区域联合防空指挥信息系统本体模型解析结果

输入到 Gephi 软件中, 即可获得其网络拓扑模型如图 8 所示。

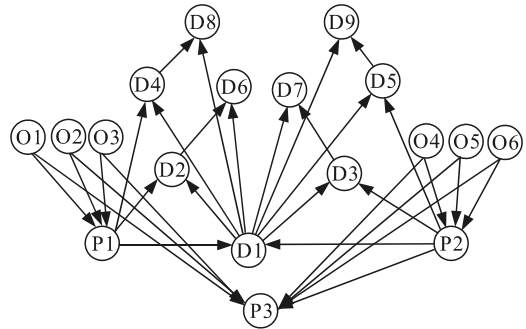


图 8 区域联合防空指挥信息系统网络拓扑模型

3.3 基于网络特征参数的能力评估模型

结构决定系统功能, 进而决定系统能力。对区域联合防空指挥信息系统的能力评估从系统结构角度出发, 分别度量系统结构的时效性、协同性、抗毁性 3 种特性。建立复杂网络特征参数^[10]与 3 种系统结构特性之间的函数关系, 以实现从整体结构层面对区域联合防空指挥信息系统进行能力评估。

1) 系统结构的时效性。

区域联合指挥信息系统结构的时效性体现在信息共享的时效性和指挥控制的时效性。在系统网络结构中, 两节点之间距离越短, 跳数越少, 信息传递速率越快, 系统结构的时效性就越好。在网络拓扑模型中, 通常用参数平均路径长度来度量节点之间的距离; 因此, 可以通过建立系统结构时效性能力指标与网络模型中平均路径长度之间的函数关系来度量系统结构时效性的大小。

在有向无权网络中, 两节点 v_i 和 v_j 之间的距离 d_{ij} 定义为连接两节点的最短路径所包含边的数目, 网络的平均路径长度 L 定义为网络结构中任意 2 个节点之间距离的平均值, 数学表达式为

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad (1)$$

式中 N 表示节点总数。

在网络模型中, 网络的平均路径长度越大, 说明网络结构层次越多, 信息流动、共享、同步的时效性越差; 相反, 平均路径长度越小, 信息能够及时地从一个节点传递到另一个节点, 系统整体的时效性越好; 因此, 平均路径长度与系统结构时效性指标呈负相关关系, 记系统结构时效性指标为 S , 则定义度量系统结构时效性的评估模型为:

$$S = \frac{1}{\mu L + 1} \quad (2)$$

其中 μ 为时效性指标系数。

2) 系统结构的协同性。

区域联合防空指挥信息系统的协同性主要是指节点和节点之间为完成同一使命任务相互协调的能力。在系统网络结构中，各节点之间联系越紧密，节点之间的信息交互能力越强，协同性越强，系统节点之间的协同作战能力也就越大。在网络模型中，节点之间的相互联系情况可以用参数聚类系数来度量；因此，可以通过建立系统结构协同性能力指标与网络模型中聚类系数之间的函数关系来度量系统结构协同性的大小。

在有向无权网络中，节点的聚类系数分为节点入聚类系数和节点出聚类系数。节点入聚类系数 C_i^{in} 定义为网络结构中连向该节点(以该节点为终点)的所有相邻节点之间聚集的程度，用这些节点之间实际存在的边数占可能存在最大边数目的比值来表示，数学表达式为

$$C_i^{\text{in}} = \frac{E_i^{\text{in}}}{k_i^{\text{in}}(k_i^{\text{in}} - 1)} \quad (3)$$

式中： E_i^{in} 为连向该节点的所有相邻节点之间实际存在的边数； k_i^{in} 为节点 v_i 的入度。

则网络结构入聚类系数 $C_{\text{in}}(G)$ 为网络中所有节点入聚类系数的平均值，即

$$C_{\text{in}}(G) = \frac{1}{n} \sum_{\forall v_i \in V} C_i^{\text{in}} = \frac{1}{n} \sum_{\forall v_i \in V} \frac{E_i^{\text{in}}}{k_i^{\text{in}} \times (k_i^{\text{in}} - 1)} \quad (4)$$

同理，可定义节点出聚类系数 C_i^{out} 和网络结构出聚类系数 $C_{\text{out}}(G)$ ，分别为：

$$C_i^{\text{out}} = \frac{E_i^{\text{out}}}{k_i^{\text{out}}(k_i^{\text{out}} - 1)} \quad (5)$$

$$C_{\text{out}}(G) = \frac{1}{n} \sum_{\forall v_i \in V} C_i^{\text{out}} = \frac{1}{n} \sum_{\forall v_i \in V} \frac{E_i^{\text{out}}}{k_i^{\text{out}}(k_i^{\text{out}} - 1)} \quad (6)$$

则网络结构聚类系数定义为网络结构入聚类系数和网络结构出聚类系数之和，即

$$C(G) = C_{\text{in}}(G) + C_{\text{out}}(G) = \frac{1}{n} \left(\sum_{\forall v_i \in V} C_i^{\text{in}} + \sum_{\forall v_i \in V} C_i^{\text{out}} \right) \quad (7)$$

在网络模型中，网络结构聚类系数越大，说明节点之间聚集程度越高，联系越紧密，各节点之间的信息交互能力和任务协同能力越高，系统结构的协同性越好。因此网络结构聚类系数与系统结构协同性指标呈正相关关系，记系统结构协同性指标为 R ，则定义度量系统结构协同性的评估模型为

$$R = e^{-\frac{1}{\theta C}} \quad (8)$$

其中 θ 为协同性指标系数。

3) 系统结构的抗毁性。

区域联合防空指挥信息系统的抗毁性，主要是指系统网络结构中的节点或边失效后仍能维持系统功能的能力。在系统网络结构中，作战链路数目越多，意味着打击目标的途径越多，系统结构的抗毁性越强。这是因为当系统的网络结构中某条链路因节点或边的失效而失效时，因冗余作战链路的存在，仍然存在其他作战链路以保证目标打击任务的完成。在网络模型中，可以用自然连通度来计算网络结构中作战链路的数量，进而度量系统结构的抗毁性；因此，可以通过建立系统结构抗毁性能力指标与网络模型的自然连通度之间的函数关系来度量系统结构抗毁性的大小。

有向无权网络中，网络的自然连通度 $\bar{\lambda}$ ^[11-12]可由网络模型的邻接矩阵特征谱得到，数学表达式为

$$\bar{\lambda} = \ln \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{\lambda_i} \right) \quad (9)$$

式中 λ_i 为网络邻接矩阵的特征根。

在网络模型中，网络的自然连通度越大，说明网络中包含的作战链路数目越多，替代途径的冗余性越高，系统结构的抗毁性越强。因此网络的自然连通度与系统结构抗毁性指标呈正相关关系，记系统结构抗毁性指标为 H ，则定义度量系统结构抗毁性的评估模型为：

$$H = 1 - e^{-\varepsilon \bar{\lambda}} \quad (10)$$

其中 ε 为抗毁性指标系数。

假设3个指标的系数分别为： $\mu = 0.4$ ， $\theta = 0.6$ ， $\varepsilon = 0.5$ 。经分析，系统的3个复杂网络特征参数值分别为： $L = 1.738$ ， $C = 0.385$ ， $\bar{\lambda} = 1.236$ 。由相应评估模型可得系统结构的时效性、协同性和抗毁性值分别为：0.590，0.013，0.461。

4 结束语

笔者针对面向指挥信息系统能力评估问题，在规范化指挥信息系统本体模型的基础上，提出一种指挥信息系统本体模型解析方法，在解析数据的基础上实现了由指挥信息系统本体模型向网络拓扑模型的转化，以此规范了网络拓扑直接映射建模法的建模过程，并在网络模型的基础上，从系统结构层面提出了指挥信息系统能力评估模型，可为其他本

体模型的按需解析提供参考。

参考文献:

[1] 曹雷. 指挥信息系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 18-23.

[2] DEKKER A H. C⁴ISR architectures, social network analysis and the FINC methodology[J]. an experiment in military organisational structure, 2002, 12(4): 23-27.

[3] CARES J R. Distributed networked operations[M]. The Foundations of Network Centric Warfare: Alidate, 2005: 279-292.

[4] 谭跃进, 张小可, 杨克巍. 武器装备体系网络化描述与建模方法[J]. 系统管理学报, 2012, 21(6): 781-786.

[5] 马力, 张明智. 基于复杂网络的战争复杂体系建模研究进展[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(2): 217-225.

[6] 程建博, 刘德生. 基于本体的指挥信息系统建模[J].

指挥控制与仿真, 2017, 39(6): 82-88.

[7] 赵会群, 张诗侃, 赵俊宝. 本体解析的应用研究[J]. 计算机时代, 2012, 20(7): 20-22.

[8] 刘珊. 基于本体的船舶火灾危险性评估系统的设计与实现[D]. 大连: 大连海事大学, 2011.

[9] 胡彦峰, 周勇, 李秉. 区域联合防空的系统动力学模型与模拟研究[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(9): 58-66.

[10] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 网络科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.

[11] 李际超, 吴俊, 谭跃进, 等. 基于有向自然连通度的作战网络抗毁性研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2015, 12(4): 25-31.

[12] 吴俊, 谭谏怡, 谭跃进, 等. 基于自然连通度的复杂网络抗毁性分析[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2014, 11(1): 77-86.

(上接第 38 页)

表 3 快速零偏估计方法的结果对比

项	轴向	估计值/(°/hr)	残差/(°/hr)	百分比/%
传统 算法	X	-178.777 0	1.257 2	99.3
	Y	202.795 8	129.413 5	76.3
	Z	-233.753 2	0.781 7	99.6
两点 估计法	X	-178.025 4	0.505 6	99.7
	Y	74.290 3	0.908 0	98.7
	Z	-234.782 5	0.247 6	99.9

4 结论

针对 MEMS 陀螺误差项, 笔者提出了完整的快速处理算法。其中, 两点估计法相比传统算法, 增加了对位置信息的利用, 充分利用了载机数据。数学仿真和靶试数据处理的结果表明: HMM/RLS 可以达到随机漂移处理的零时延, 兼顾了时延和带宽; 零偏两点估计法可以快速估计出 90% 以上的陀螺零偏。笔者提出的方法适用于机载灵巧弹药, 但是算法验证的实验样本数据有限, 有待其他机载武器进一步的工程验证。

参考文献:

[1] 李保平. 航空制导炸弹的发展技术途径及关键技术[J]. 火箭与制导学报, 2006, 26(3): 100-103.

[2] KAIN J E, CLOUTIER J R. Rapid transfer alignment for tactical weapon application[C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, 1989: 1290-1300.

[3] 戴洪德, 陈明, 周邵磊, 等. 一种新的快速传递对准方法及其可观测度分析[J]. 宇航学报, 2009, 30(4): 1449-1454.

[4] 周峰, 孟秀云. 机载武器捷联惯导系统传递对准仿真环境研究[J]. 火箭与制导学报, 2009, 29(1): 35-38.

[5] 周本川, 程向红, 刘道静. 基于谱分解的 SINS 传递对准可观测度分析方法[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(5): 518-522.

[6] YiGiTER YüKSEL. Design And Analysis of Transfer Alignment Algorithm [D]. Turkish: Middle East Thercial University, 2005.

[7] LYU S L, XIE L, CHEN J B. New techniques for initial alignment of strapdown inertial navigation system[J]. Journal of the franklin institute, 2009, 346(10): 1021-1037.

[8] 孙枫, 曹通. 基于 HMMKF 滤波的捷联惯组快速标定方法研究[J]. 控制与决策, 2012, 27(4): 567-570.

[9] 殷德全, 熊智, 施丽娟, 等. 发射系下 SINS/GPS 组合导航系统的算法研究[J]. 兵工自动化, 2017, 36(10): 6-10.