

卫星通信网评估本体^{*}

袁伟伟^{1,2}, 端义锋¹, 胡谷雨¹, 倪桂强¹

(1. 解放军理工大学 指挥自动化学院 计算机系, 南京 210007; 2. 中国人民解放军 61096 部队, 北京 100084)

摘要: 将本体应用到卫星通信网评估系统(SCNES)中,可以有效提高卫星通信网评估系统的可重用性。对卫星通信网评估系统进行分解,对其构成要素进行分析;构建了卫星通信网评估本体(SCNEO),对其主要概念以及公理进行了设计;对 SCNEO 在卫星通信网评估系统中的应用流程进行了介绍,通过实例说明基于 SCNEO 的评估系统具有自适应能力。

关键词: 本体; 评估; 卫星通信网评估系统; 重用; 自动化

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)02-0577-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.02.072

Satellite communication network evaluation ontology

YUAN Wei-wei^{1,2}, DUAN Yi-feng¹, HU Gu-yu¹, NI Gui-qiang¹

(1. Dept. of Computer, Institute of Command Automation, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China; 2. 61096 Army of PLA, Beijing 100084, China)

Abstract: Using ontology technologies could effectively improve the reusability of SCNES. This paper decomposed the SCNES and analyzed the characteristics of its building blocks. It constructed a new ontology named satellite communication network evaluation ontology(SCNEO) and designed its main concepts and axioms. And it demonstrated the procedure to adopt SCNEO in SCNES, and showed the auto-adaptability of the SCNES based on SCNEO.

Key words: ontology; evaluation; SCNES(satellite communication network evaluation system); reuse; automation

0 引言

随着卫星通信^[1]越来越多地应用到各个领域,其网络规模不断扩大,设备一体化和复杂程度不断提高,系统评价也呈现出多样化、个性化、复杂化的发展趋势,基于多属性决策理论^[2](multi criteria decision making, MCDM)的卫星通信网评估系统(satellite communication network evaluation system, SCNES)是自动化、系统化地对卫星通信网运行状况进行分析和评价的重要手段。

各个卫星通信系统由于其通信制式、应用目的、面向的用户、建设背景等都存在较大差别,随之带来的是其设备组成、数据格式、评估指标的多样化。SCNES 若针对各个不同的卫星通信网独立开发和建设,则存在开发成本高、开发周期长、不易维护和使用的缺点。

本体作为共享概念模型的形式化规范说明^[3,4],用形式化的方法对领域内的共享概念以及概念间的关系进行描述,实现了领域知识的共享和重用,已经在金融、医学、生物、情报检索、电子商务等应用领域取得了成功^[4,5]。

建立卫星通信网评估本体(satellite communication network evaluation ontology, SCNEO),将本体应用于 SCNES,用本体对卫星通信网中的评估要素进行形式化表示,从而将评估应用与所评估的卫星通信网相隔离,在卫星通信网和评估系统之间建立

清晰明确的功能界面,实现与具体卫星通信网无关的卫星通信网评估,从而提高了 SCNES 的可重用性、缩短了开发周期、改善了系统质量。

本文对 SCNES 中的各组成要素进行了分析,利用本体技术对其中的各个要素进行建模,构建了基于 SCNEO 的卫星通信网评估系统。首先对本体的概念、表示语言和构建工具进行了简单介绍;然后对卫星通信网评估系统中的各个要素进行了分析和定义;利用 Protégé 本体开发工具构建了 SCNEO;并对 SCNEO 在 SCNES 中的应用进行了设计和实例说明。

1 本体

1.1 概念

本体是借用哲学上的概念,其本是研究世界的本质的科学。亚里士多德在其著作《形而上学》中将本体定义为“研究物之为物的科学(science of being qua being)”,在哲学范围内更多的是一种认识世界的原则和方法^[4]。在人工智能领域,最早给出本体定义的是 Neches 等人^[6],他们将本体定义为“给出构成相关领域词汇的基本术语和关系,以及利用这些术语和关系构成的规定这些词汇外延的规则的定义”。而引用最为广泛的定义则是 Gruber 于 1993 年给出的定义,即“本体是概念的明确表示”^[7]。Borst 在 Gruber 定义的基础上进行了完

收稿日期: 2012-06-29; **修回日期:** 2012-07-30 **基金项目:** 国防预研重点基金资助项目(9140A21050910JB8101); 国家“十二五”预研资助项目(41001090203)

作者简介: 袁伟伟(1982-),男,河南叶县人,博士研究生,主要研究方向为网络管理(yuanweiweipp@163.com);端义锋(1974-),男,江苏溧水人,副教授,博士,主要研究方向为网络管理、知识工程等;胡谷雨(1963-),男,浙江东阳人,教授,博导,博士,主要研究方向为卫星通信、网络管理、网络安全等;倪桂强(1966-),男,浙江湖州人,教授,博导,博士,主要研究方向为卫星通信、网络管理、软件工程等。

善,提出“本体是共享概念模型的规范说明”^[3],这一定义也成为现今人们广泛接受的本体定义。Guarino 于 1998 年对本体进行了形式化的分析,对概念 (conceptualization)、目标模型 (intended model)、本体约定 (ontology commitment) 等基本概念进行了形式化定义和明确,并在此基础上给出了本体的形式化定义^[8],并于 2009 年对此定义进行了更为系统和明确的描述^[4]。

1.2 本体表示语言

从 20 世纪 90 年代初,一系列基于 AI 的本体表示语言被提出,这些语言大多基于一阶谓词逻辑、框架逻辑或者描述逻辑^[9],如 KIF、LOOM、OCML、FLogic、SHOE、XML、XOL、RDF(S)、OIL、DAML + OIL 以及基于 DAML 和 OIL 的 OWL 等。不同的语言对概念表示、概念关系定义、公理定义和推理规则等提供了不同的支持方法和支持能力,而其支持的推理能力也随表达能力的不同而不同。OWL 扩展了 RDF(S) 的字典并可以表示更加丰富的关系,与 DAML + OIL 兼容,OWL DL 具有严格的描述逻辑基础,并于 2004 年成为 W3C 推荐的标准语义网本体表示语言^[10]。目前 OWL 已经获得了大量本体开发工具的广泛支持,OWL 与多种其他本体表示语言之间的转换也得到了广泛的研究和应用。SCNEO 采用 OWL DL 作为本体表示语言。

1.3 本体开发工具

直接通过手工对本体进行编码是一项繁杂的工作,不同的研究者开发了不同的本体开发工具,以可视化的方式辅助本体编码,并向本体开发者提供了本体的一致性检查、推理等功能。

Ontolingua Server 是第一个本体开发工具^[9],它是斯坦福大学的知识系统实验室 (KSL) 于 20 世纪 90 年代初开发的用于支持 Ontolingua 本体开发的工具,它还提供了本体向其他语言如 Loom、Prolog、IDL 等的转换。支持特定语言的本体构建的开发工具还有 OntoSaurus、WebOnto 等。随后,组件化、与特定本体语言无关的开发工具也被开发出来,如 Protégé、WebODE、OntoEdit、DUET 等,这些工具大多以插件的方式支持多种语言的本体构建,并提供多种语言之间的相互转换,支持基于本体的推理。Mizoguchi 等人^[11]于 2009 年从本体开发、本体使用、本体评估和完善以及工具本身特点这四个方面对典型的五种本体构建工具进行了分析和评价。Khondoker 等人^[12]于 2010 年通过在线调查的方式对开发者使用本体构建工具的情况进行了统计和分析,指出 Protégé 是应用最为广泛的本体构建工具。

Protégé 是斯坦福医学情报实验室 (Stanford Medical Informatics, SMI) 开发的本体构建工具^[13],由于其公开了源代码、灵活的插件结构、对多种本体语言的支持、支持本体概念的多种可视化形式、支持多种推理引擎、开发文档丰富,成为了应用最为广泛的本体开发工具,而其支持中文的特性,使其成为国内最为流行的本体开发工具之一。SCNEO 本体构建采用 Protégé 作为本体构建工具。

2 卫星通信网评估系统

2.1 系统组成

卫星通信网评估系统根据某一个对象在某一段时间内的与评估目的相关的运行数据对该对象的运行状况进行评价,其

目的包括任务保障中的设备挑选、业务讲评、异常检测等。

评估系统通常由评估者、评估目的、评估对象、评估数据、评估约束、评估指标、评估方法、评估模型、评估结果等组成。

a) 评估者 (evaluator, ER)。评估者是评估操作的执行和发起人员,是评估活动的主体,通常为通信网系统的设计者或执勤人员。

b) 评估目的 (evaluation goal, EG)。评估目的是指评估者对评估对象进行评估的目的,主要包括选择、排序和分类等。评估目的确定了评估的范围和限制,如评估时间段、数据的时间粒度等。

c) 评估对象 (evaluated object, EO)。评估对象是评估活动的客体,是指评估系统中可以用来评估的设备的集合,这些设备可以是物理设备如地球站、转发器等,也可以是逻辑划分的虚拟设备如地区群组、保障任务群组等。

d) 评估数据 (evaluation data, ED)。评估数据是指评估对象运行过程中与评估相关的数据信息,是评估的依据,包括评估对象运行过程中自身的配置数据。性能数据以及与其活动相关的外部环境数据,以地球站为例,其评估数据包括配置信息如站型、天线类型、功率等;包括性能数据如呼叫数据、通信对象数据、入网数据等;包括运行数据如稳定性、可靠性等;还包括与其活动相关的外部数据如天气情况、所分配信道的干扰情况等。评估数据在不同对象、不同目的、不同系统中各不相同,具有多样性、多变性、差异性的特点。

e) 评估约束 (evaluation constraint, EC)。评估约束是指对评估所依赖数据的限制,如评估数据的时间范围、时间粒度等,评估约束与评估目的一致。

f) 评估指标 (evaluation index, EI)。评估指标是针对评估目的对评估数据的抽象,是对评估数据的明确和具体,是进行评估活动的前提,也是评估有效性和合理性的基础。它随评估者、评估对象、评估目的、评估数据等的变化而变化,具有多样性、多变性和差异性大的特点,但是通常情况下通过对指标进行预处理可以达到数值上的统一和规范。

g) 评估方法 (evaluation algorithm, EA)。评估方法是进行评估活动的关键,是根据评估指标获取评估结果的数学模型的统称,如 AHP、TOPSIS、ADC、DEA 等方法,以及基于智能的方法如神经网络方法等。评估方法根据所处理的数据的动态性可以分为静态方法和动态方法;根据指标的形态可以分为确定性方法、模糊方法和随机方法。所有的方法其核心是聚合函数 (aggregation function) 的形态^[13]。

h) 评估模型 (evaluation model, EM)。评估模型是依据评估对象评估指标及其预处理、评估方法和评估约束以实现评估目的要素的统称,包括评估对象、评估指标及其预处理、评估方法、评估约束等,其定义如定义 1 所示。

定义 1 评估模型可以定义为 $EM = (EO', EI', ea)$ 。其中, EO' 为评估对象集合的子集, EI' 为评估指标的子集, ea 为本模型采用的评估方法。

如评估任务“利用呼通率、呼叫频度指标、AHP 方法对地球站 A、地球站 B 的工作情况进行评估”的评估模型各要素定义为 $EO' = \{\text{地球站 A, 地球站 B}\}$, $EI' = \{\text{呼通率, 呼叫频度}\}$, $ea = \{\text{AHP 方法}\}$ 。

i) 评估结果 (evaluation result, ER)。评估结果是一次评估活动执行得到的结果信息,包括结果数据、结果呈现方式、结果

处理方式、结果推论等。其中,结果数据是评估结果中最基本的部分,根据不同的评估方法,可以是分类、排序、打分等;结果呈现方式包括列表方式、图形方式等;结果处理方式包括结果保存方式、通知方式等;结果推论是指在获取结果的基础上所执行的附加功能如异常检测、频繁模式挖掘等。

2.2 评估流程

评估流程是评估模型的扩展和外延,包括确定目的和范围、明确指标及其预处理、设定评估方法,最终获取评估结果。评估流程框图如图1所示。

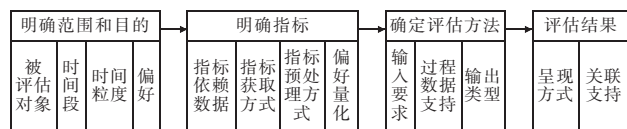


图1 评估流程框图

2.3 卫星通信网评估系统研究现状^[14]

国外对卫星通信系统本身的评估主要集中在特定设备、特定技术的特定指标层面,如信道质量、编码效率、信道分配效率、遮蔽对卫星通信的影响等,对卫星通信系统进行综合评估的研究还比较少。

国内方面,李维国等人于1999年首次将层次分析法和模糊综合评判方法引入到战术卫星通信系统性能评估中,建立了对应的性能评价指标体系并对评估的流程进行了讨论;应勤民等人利用AHP和模糊综合方法对卫星通信系统的立项论证过程中的评估进行了研究;徐培德等人对卫星通信系统的作战效能评估进行了研究;王宇等人对星座卫星通信系统的综合评估进行了研究;尹江丽等人通过对军用卫星通信系统的特点和任务进行分析,提出了军用卫星通信系统效能评估的指标体系;张昭等人提出了卫星通信网的性能评估的指标体系,利用层次分析法对其进行了分析并将其应用到星上缓存调整的验证中;胡谷雨等人则从地球站的视角提出了卫星通信网评估的指标体系并尝试建立卫星通信网评估的自动化方法^[14]。

3 本体建模

SCNEO应能表示评估系统中的各个要素并能够对评估流程进行定义,各个要素及其相关约束直接构成了评估本体的顶层概念,如图2所示。

3.1 评估对象(EO)

在卫星通信网评估系统中,EO主要由参与通信过程的各要素组成,如地球站、转发器、频率资源、网控中心等,这些要素的工作状况直接反映了整个卫星通信系统的工作质量和效率,也是系统设计人员和执勤维护人员进行系统设计、系统分析、工作评价的关注点所在。但是这些对象并不是SCNEO的全部,评估活动中往往关注其中的一个子集,如定义1中的EO',而且相同的关注点在不同系统、不同应用中存在较大差别,需要对EO进行抽象,从而能够表示这几种EO之外的对象,如多波束卫星通信系统中,EO还包括波束,在星状网和网状网的卫星通信系统中,其网控中心存在很大差别。

SCNEO需要对EO进行抽象,对其在整个SCNEO概念集合中的地位和其他概念的关系进行分析,使得SCNEO既能良好地定义典型评估对象,也能很容易地进行扩展以满足新的评估对象定义。

EO作为评估活动的客体,是进行评估数据和指标选择的依据,需要为其定义与指标和数据进行关联的属性;为保证其定义的可扩展性,需要为具体的评估对象个体提供扩展接口;由于评估活动中关注点为EO的子集,需要为其定义集合分类方法。

在SCNEO中,通过设备及其子概念对评估对象进行抽象,同时将设备概念的属性分为通用属性、侧面属性和特例属性进行描述,通用属性用于提取所有评估对象的共同特征如名称、ID、设备类型等,侧面属性用于对评估对象的分类属性进行定义,如地球站的生产厂家、频段类型等,特例属性用于实现不同卫星通信网中特定评估对象的专有属性定义。SCNEO中EO定义如图3所示。

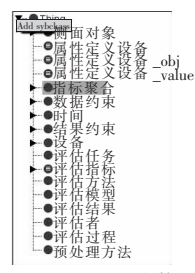


图2 SCNEO本体顶层概念

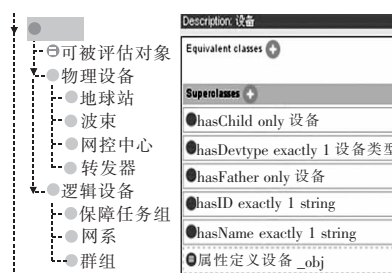


图3 评估对象本体建模

3.2 评估指标(EI)

评估指标是进行评估活动的基础和前提,包括指标获取方法、指标数值约束等。同时评估指标作为SCNEO的概念,与EO存在关联关系。

通常情况下,不同卫星通信系统由于通信体制、应用目的、面对用户等的不同,其数据的表示、存储与访问方式、种类等都存在较大差别。如星状网由于其网控中心具有较强的控制能力,能够集中保存地球站活动、系统资源占用等比较详细的信息,而网状网由于各地球站具有较强的自组织能力,地球站活动、资源占用等数据一般采用分布存储,需要通过专门的协议对数据进行收集从而形成完整的系统运行信息。卫星通信网中评估数据访问协议的复杂性和异构性,导致对数据访问协议进行本体建模复杂度较高。在SCNEO中,评估指标的本体建模不对指标访问协议进行详细定义,仅仅指定指标访问接口的执行实体,应用需要获取指标数据时直接调用执行实体的接口实现数据获取操作。这种设计将SCNEO从多变的数据访问协议中独立出来,从而为评估系统应用和本体表示划定了清晰的功能界面,保证了评估系统的高可移植性和易维护性。

指标的数值约束包括指标的数据类型、数据约束、数值类型等。卫星通信网评估系统指标常用的数据类型主要包括数值型(如整数型、浮点数值型等)和等级型(如优、良、中、差等);数据约束是指数据的取值范围或分布参数定义,由于卫星通信网评估系统的指标从现实卫星通信系统提取,可以定义数值型数据的最大值、最小值、中间值,对等级型数据则按照枚举的方法进行等级定义;数值类型则是指数据取值的意义(如效益型、成本型等)。

指标与其他概念的关联关系主要包括与EO的关联和与预处理方法的关联,通过forDevtype属性和hasDataConstraint分别与EO和预处理方法关联。此外,在卫星通信网评估系统中,为简化指标管理和定义,对其组合进行概念定义。

在本体建模中,评估指标、数据约束、指标组合方式、预处理

理方法以及相关关联关系等共同构成指标定义,如图4所示。

3.3 评估模型(EM)

评估模型是评估对象、评估指标及其预处理、评估方法的统称,是评估对象、评估指标及其预处理和评估方法的组合。评估模型是预先设定好的启动评估流程的要素的集合,是简化评估操作的必要手段。在SCNEO中,评估对象通过forDevtype属性进行定义,由于评估模型中所包含的评估指标已经绑定了预处理方法,为其建立新的概念“应用指标”实现指标与预处理的组合,EM定义如图5所示。



图4 评估指标相关概念及综合指标定义示例



图5 评估模型属性定义

3.4 评估结果(ER)

评估结果是进行评估的目的所在。按照所确定的范围、指标、方法等,通过计算,得到以数据形式所呈现的与对象关联的数值信息,结果类型包括分类、排序、打分等。在结果数据的基础上,还包括结果呈现方式(如数据列表、曲线图、直方图)、结果处理方式(如通知相关代理、持久化进数据库以供查询)和结果推论。其中结果推论需要第三方支持,不在SCNEO中进行定义,但是SCNEO保留对结果推论的兼容和支持。评估结果定义如图6所示。

3.5 评估过程

评估过程是从明确评估目的、数据源、指标及预处理、评估方法到获取评估结果整个过程的完整描述,通过对评估过程的定义,支持一次评估操作的重现和数据回放,其定义如图7所示。



图6 评估结果定义



图7 评估过程定义

3.6 其他要素

SCNEO利用OWL DL提供的概念和属性约束机制对其中的重要概念进行特别的定义,将评估各要素的概念定义为disjoint关系,以明确评估系统中实例的所属概念;对评估对象之间的逻辑包含关系通过hasChild和hasFather进行关联,并将它们定义为inverse关系,简化了评估对象间的逻辑关系构造;将hasID属性定义为functional以确保整个卫星通信网评估系统中所有要素实例编码的唯一性。

4 基于SCNEO的应用

4.1 应用流程

SCNEO建立以后,实现了对卫星通信系统中评估对象、评

估指标、评估方法、评估结果以及评估流程的形式化描述,向卫星通信网评估系统提供了自定义的卫星通信网知识表示。卫星通信网评估系统只需要处理规范定义的SCNEO,而对不同卫星通信网、不同评估目的透明,以达到快速构建卫星通信网评估系统,降低系统开发成本,提高系统可重用性的目的。

将基于SCNEO的卫星通信网评估系统应用到一个新的卫星通信网时,只需根据卫星通信网中的数据对SCNEO中的对象和指标进行实例化,而卫星通信网评估应用无须进行任何的更改,如图8所示。

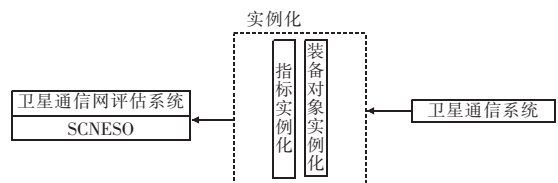


图8 对新的卫星通信系统进行评估步骤

4.2 基于SCNEO的自适应评估任务实现

一次评估任务可以描述为依据特定指标对特定对象在某段时间内的效能进行评估,即需要自动实现对象、指标的表示及其组织。在SCNEO的基础上其实现过程如下:

a)透明评估对象筛选。SCNEO中定义了设备类,设备类中的对象根据hasDevtype属性对设备类型进行区分,在进行评估对象选择时,根据所有对象实例的hasDevtype属性取值组织所有待选评估对象设备类型,用户选定某一个设备类型D以后,定义“hasDevtype equals D”概念,利用本体支持的概念推理功能实现所有设备类型为D的实例的选择,用户在此基础上进行评估对象的筛选。在此过程中,评估系统根据SCNEO实现整个对象筛选过程,无须关心其所关联的具体评估对象。

b)自动评估指标关联。评估对象设定以后,根据评估对象的设备类型属性取值,在SCNEO中指标定义的基础上,定义“forDevtype equals D and 评估指标”公理,利用本体支持的推理功能获取该概念的所有实例,即为可用于用户选择对象的评估指标集合,在该集合中可以实现可用评估指标的自主选择。在此过程中,评估系统仅仅对SCNEO中的概念和实例进行推理,无须关心具体的评估指标配置。

c)获取评估结果。评估对象和评估指标确定以后,首先按照评估指标的属性定义获取其评估指标取值,然后将指标取值按照用户需求进行聚合集合获取评估结果,从而完成一次评估任务。

在上述过程中,评估系统只需要面对SCNEO,而不用关心其作用于哪一个卫星通信网,从而使得评估系统建设者只需要关心系统本身的特点和规律。而SCNEO关注于所面对的卫星通信网的知识特点,从而将知识表示与应用相分离,实现了卫星通信评估系统的自适应。

5 结束语

本体作为明确概念的规范化描述,已经在医学、生物、情报检索等领域取得了应用,但是将其应用到卫星通信网评估系统的研究还比较少。卫星通信网评估系统具有应用模式相对固定、流程清晰、数据复杂多变的特点,传统的卫星通信网评估一般采用手工驱动的非系统化方法,针对卫星通信网的不同,评

估系统通常面临重复开发和建设的问题,存在开发成本高、不易部署的特点。

本文分析了卫星通信网评估系统的组成要素,将其抽象为评估者、评估对象、评估数据、评估约束、评估指标、评估方法、评估模型、评估结果等部分,利用 RDF/OWL 本体表示语言和 Protégé 本体建模工具构建了卫星通信网评估本体 SCNEO,对其中的要素和评估过程进行了形式化表示,最后对基于 SCNEO 所构建的评估系统的构建流程进行了设计,将其应用到一次评估任务中,证明了基于 SCNEO 的评估系统具有自适应能力。

参考文献:

- [1] RODDY D. 卫星通信[M]. 郑宝玉,译. 4版. 北京:机械工业出版社,2011.
- [2] FIGUEIRA J, GRECO S, EHRGOTT M. Multiple criteria decision analysis, state of the art surveys[M]. Boston: Springer Science + Business Media, Inc, 2005: 3-24.
- [3] BORST W N. Construction of engineering ontologies for knowledge sharing and reuse[D]. Enschede: University of Twente, 1997.
- [4] GUARINO N, OBERLE D, STAAB S. What is an Ontology? [M]// STAAB S, STUDER R. Handbook on Ontologies. 2nd ed. London: Springer, 2009.
- [5] De NICOLA A, MISSIKOFF M, NAVIGLI R. A software engineering approach to ontology building[J]. Information Systems, 2009, 34(2): 258-275.
- [6] NECHES R, FIKES R E, GRUBER T R, et al. Enabling technology for knowledge sharing[J]. AI Magazine, 1991, 12(3): 36-56.
- [7] GRUBER T R. A translation approach to portable ontology specifications[J]. Knowledge Acquisition, 1993, 5(2): 199-220.
- [8] GUARINO N. Formal ontology and information systems[C]//Proc of International Conference on Formal Ontology in Information Systems. Amsterdam: IOS Press, 1998: 3-15.
- [9] CORCHO O, FERNANDEZ-LOPEZ M, GOMEZ-PEREZ A. Methodologies, tools and languages for building ontologies: where is their meeting point? [J]. Data & Knowledge Engineering, 2003, 46(1): 41-64.
- [10] McGUINNESS D L, Van HARMELEN F. W3C recommendation, OWL Web ontology language overview[S]. 2004.
- [11] MIZOGUCHI R, KOZAKI K. Ontology engineering environments [M]//STAAB S, STUDER R. Handbook on Ontologies. 2nd ed. London: Springer, 2009: 315.
- [12] KHONDOKER R M, MUELLER P. Comparing ontology development tools based on an online survey[C]//Proc of the World Congress on Engineering. London: Springer, 2011: 188-192.
- [13] HORRIDGE M. A practical guide to building OWL ontologies using Protégé 4 and CO-ODE[R]. Manchester: University of Manchester, 2011.
- [14] HU Gu-yu, YUAN Wei-wei, NI Gui-qiang, et al. Earth station based tactical satellite communication system evaluation[C]//Proc of International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence. 2012: 2666-2671.
- [15] GAMPANELLA G, RIBEIRO R A. A framework for dynamic multiple-criteria decision making[J]. Decision Support Systems, 2011, 52(1): 52-60.

(上接第559页)

4 结束语

本文针对平稳网络层析成像很难真实地反映链路丢包率的时变特征,提出了基于时空相关性的链路时变丢包率估计方法,并且利用 NS-2 进行仿真,得到的结果比用平稳方法估计出的结果能更好地逼近真实链路丢包率曲线,同时具有较好的估计精度,从而验证了本文估计方法的有效性。

参考文献:

- [1] CASTRO R, COATES M, LIANG Gang, et al. Network tomography: recent developments [J]. Statistical Science, 2004, 19(3): 499-517.
- [2] ERIKSSON B, DASARATHY G, BARFORD P, et al. Toward the practical use of network tomography for Internet topology discovery[C]//Proc of IEEE INFOCOM. 2010: 1-9.
- [3] CHEN Ai-you, CAO Jin, BU Tian. Network tomography: identifiability and Fourier domain estimation[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2010, 58(12): 6029-6039.
- [4] DUFFIELD N G, LO PRESTI F, PAXSON V, et al. Network loss tomography using striped unicast probes[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2006, 14(4): 697-710.
- [5] FIROOZ M H, ROY S. Network tomography via compressed sensing [C]//Proc of IEEE GLOBECOM. 2010: 1-5.
- [6] GU Yu, JIANG Guo-fei, VISHAL S, et al. Optimal probing for unicast network delay tomography[C]//Proc of IEEE INFOCOM. 2010: 1-9.
- [7] COATES M J, NOWAK R D. Sequential Monte Carlo inference of internal delays in nonstationary data networks[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2002, 50(2): 366-376.
- [8] IROLDI E A, FALOUTSOS C. Recovering latent time-series from their observed sums: network tomography with particle filters[C]//Proc of the 10th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM Press, 2004: 30-39.
- [9] SOULE A, SALAMATIAN K, NUCCI A, et al. Traffic matrix tracking using Kalman filters [J]. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Inference, 2005, 33(3): 24-31.
- [10] NGUYEN H X, THIRAN P. Network loss inference with second order statistics of end-to-end flows[C]//Proc of the 7th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement. New York: ACM Press, 2007: 227-240.
- [11] COATES M J, NOWAK R D. Network loss inference using unicast end-to-end measurement[C]//Proc of ITC Conference on IP Traffic, Modeling and Management. 2000: 1-9.
- [12] GHITA D, ARQYRAKI K, THIRAN P. Network tomography on correlated links [C]//Proc of the 10th Annual Conference on Internet Measurement. New York: ACM Press, 2010: 225-238.
- [13] ZHANG Yin, ROUGHAN M, WILLINGER W, et al. Spatio-temporal compressive sensing and Internet traffic matrices[C]//Proc of ACM SIGCOMM Conference on Data Communication. New York: ACM Press, 2009: 267-278.
- [14] KAILATH T, SAYED A H, HASSIBI B. Linear estimation[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2000.
- [15] 徐雷鸣, 庞博, 赵耀. NS 与网络模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003: 57-125.