基于IP应用的网络质量评价研究

周红琼 周 宇 叶庆卫 王晓东
(宁波大学信息科学与工程学院 宁波 315211)

摘 要 将信息融合领域应用广泛的D-S证据理论引入网络评价领域。以网络应用为导向,分析选取待评价网络主要承载应用的KPI,使其作为指标级信息输入;采用AHP法进行基本概率赋值,建立一种互联网质量评价层次结构,利用两级的D-S结构进行证据融合,得到目标级网络质量评价结果。经计算可知,两级的D-S证据融合推理模型极大程度上消除了不确定性,具有很好的实践性。

关键词 IP网络质量,数据融合,D-S证据理论,不确定性度量,层次分析法
中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Study of Network Quality Evaluation Based on IP Application

ZHOU Hong-qiong ZHOU Yu YE Qing-wei WANG Xiao-dong
(College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract D-S evidence theory widely used in the information fusion field was introduced into network evaluation area. Taking the network application as guide, we selected the KPI which mainly bears application in the evaluated network as indicator-level information input. An internet quality evaluation hierarchical structure was established by using AHP method to assign basic probability. The two-level D-S structure was used to fuse evidence to get the network quality evaluation results. The calculated results show the model using two levels of D-S structure to fuse evidence eliminates the uncertainty at a great extent. Furthermore, it has good practicality.

Keywords Quality of IP network, Data fusion, Dempster-shafer theory of evidence, Uncertainty measurement, Analytic hierarchy process

IP网络的质量是互联网运营商、互联网服务提供商、网络用户都十分关注的问题。如何在现有网络环境基础上提高网络性能,如何为下一代互联网设计出具有更好的运行效率和更高性能的网络互联协议等问题,目前已成为国内外研究的热点[1,2]。这些问题的解决都要求对网络质量进行有效的评价与分析。但是目前的IP网络还未真正完善,由于网络规模扩大、网络带宽增加、复杂性不断提高、网络新业务不断出现,使得人们对互连网络的流量、性能特征、网络行为模型缺乏理解和精确描述的问题日益突出,Internet性能的可知性越来越低。因此,建立一套可行的网络性能评价方法和体系用于对网络包括安全性、稳定型、实用型等进行评估,以便为用户提供具有较高可信度的网络服务,就成了一件非常有意义的事情[1,2]。

国际上IETF[3]和ITU-T[4]制定了相应的网络性能指标,但没有建立宏观的评估模型;文献[5]以图论为基础构造了一种端到端网络性能分析算法;文献[1]提出了一种基于测量方法的网络性能评估模型,采用加权平均方法计算路径性能评估值;文献[6]提出了从全局性或整体性角度来评估网络性能;文献[7]对网络监测和管理的指标进行了分类;文献[8]提出了结合网络健康度和路由器健康度的综合性能评估模型;文献[9]提出从维度、空间和时间3方面的综合化来评估网络运行质量。但是,目前这些研究还存在一些问题:这些方法都只能给出一个综合评估结果,却不能给出评估结果的确定性和不确定性度量;另外,这些方法既不能体现、也不能处理评估中的未知性信息。目前的相关文献中未见对网络评估未知性度量的研究。

针对这些不足,本文根据IP网络的结构体系和运营特点,以网络应用为导向,选取网络质量应用评价KPI,基于应用广泛的D-S证据理论来尝试解决这些问题。建立了一种互联网评价层次结构,利用两级D-S证据理论进行数据融合,为网络质量的科学评价提供了可靠的理论依据。

1 D-S证据的数据融合基本原理

数据融合包括对各类信息源给出的有用信息的采集、综合、过滤、相关及合成,以辅助人们进行态势判定、验证、诊断,有效地提高了信息精度和分辨率,为分析、评估和校准不同形

本文受浙江省科技厅基金(2008C21103),宁波市科技局基金(2007B10006),浙江省大学生创新创业孵化项目(2010R405064,2010R405066)资助。

周红琼(1986—),女,硕士生,主要研究方向为互联网质量评价,E-mail:zhouhq1212@sohu.com;周 宇(1960—),男,副教授,主要研究方向为信息安全、计算机网络;叶庆卫(1970—),男,博士,副教授,主要研究方向为各类优化算法;王晓东(1970—),男,副教授,主要研究方向为计算机网络、嵌入式通信。

式的信息、适应海量数据处理的需要，同时利用这些信息正确反映实际情况提供了可能[12]。

数据融合的方法很多，其中 Dempster-Shafer 证据理论是应用得最多的一种。Dempster-Shafer 证据理论是一种不精确推理理论，是贝叶斯方法的扩展。但贝叶斯方法必须给出先验概率，而证据理论则能够处理这种由不知道引起的不确定性[11,13]。

设 Θ 表示所要研究问题的所有可能取值的集合，且所有在 Θ 内的元素间是互不相容的。在 D-S 理论中，称 Θ 为问题的一个识别框架[10]。

定义 1 设 Θ 为一识别框架，$m:2^{\Theta}\to[0,1]$，A 表示识别框架 Θ 的任一子集，在满足下列条件时：

$$\begin{cases} m(\phi)=0 \\ \sum\limits_{A\subset\Theta} m(A)=1 \end{cases} \tag{1}$$

称 $m(A)$ 为事件 A 的基本概率赋值(BPA)。

定义 2 设 Θ 为一识别框架，$m:2^{\Theta}\to[0,1]$ 是 Θ 上的基本概率赋值，定义函数：

$$Bel(A)=\sum_{B\subset A} m(B)\ (\forall A\subseteq\Theta) \tag{2}$$

称该函数为 A 的信任函数，它表示证据对 A 为真的信任程度。

定义 3 若识别框架 Θ 的一子集 A，其 $m(A)>0$，则称 A 为信任函数 Bel 的焦元，所有焦元的并称为核。

定义 4 设 Θ 为一识别框架，定义 $Pl:2^{\Theta}\to[0,1]$ 为：

$$Pl(A)=1-Bel(\overline{A})=\sum_{B\subset\Theta} m(B)-\sum_{B\subset A} m(B)=\sum_{B\cap A\neq\phi} m(B) \tag{3}$$

Pl 称为似然函数。式(3)说明了似然函数 $Pl(A)$ 包含了所有与 A 相容的那些集合(命题)的基本置信度。

定义 5 设 Bel_1 和 Bel_2 是同一识别框架 Θ 上的两个信任函数，m_1 和 m_2 分别是其对应的基本概率赋值，焦元分别为 $A_1,\cdots,A_k$ 和 $B_1,\cdots,B_r$，又设：

$$K_1=\sum_{\substack{i,j\\ A_i\cap B_j=\varnothing}} m_1(A_i)m_2(B_j) \tag{4}$$

则：

$$m(C)=\begin{cases} \dfrac{\sum\limits_{\substack{i,j\\ A_i\cap B_j=C}} m_1(A_i)m_2(B_j)}{1-K_1}, & \forall C\subseteq\Theta, C\neq\Phi \\ 0, & C=\Phi \end{cases} \tag{5}$$

式(4)中，若 $K_1\neq1$，则 m 确定一个基本概率赋值；若 $K_1=1$，则认为 m_1 和 m_2 矛盾，不能对基本概率赋值进行组合。上面定义的证据组合规则称为 Dempster 组合规则。对于多个证据的组合，可采用 Dempster 组合规则对证据进行两两综合。

D-S 证据理论最吸引人的地方是它能够很好地表示未知信息的程度。D-S 不确定性区间如图 1 所示。

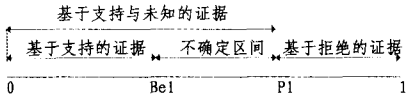

图 1 D-S 不确定性区间

图 1 中，Bel、Pl 分别代表信任函数、似然函数，表示某个子集信任度的下限和上限。有了上述的定义和不确定性区间，可以运用 D-S 证据推理进行决策融合。多传感器信息融合的一般过程如下描述：

(1)分别计算各传感器的基本概率赋值、信任函数和似然函数。

(2)合成。利用 D-S 合并规则，求得所有传感器联合作用下的基本概率赋值、信任函数和似然函数。

(3)推断。在一定决策规则下，选择具有最大支持度的目标。

2 基于应用的 D-S 理论网络质量评价

2.1 网络应用评价 KPI

在网络质量评价中，主要使用延时、丢包率、带宽、流量等多项指标对所测量的网络进行性能评价。这些指标虽能反映某一个事物的发展状况，但是它们对于全局整体性的网络质量评估是片面的。绝不能仅仅因为某条路径时延过大或者暂时出现拥塞情况而草率做出升级网络容量的决策。同时，这些测量指标的数值体现不能很好地显示出网络差异性和应用的需求性，浏览网页和在线视频对网络延时的需求依赖度是不能同一而论的；ftp 文件上传下载和 voip 对丢包率的敏感度也是不一样的。

正是因为存在这些不足，加之网络最终承载的是各类应用，网络运营商和服务提供商才以应用能满足客户需求为网络建设的目标。本文以应用为导向，确立一种多指标间实现相互融合的方式，构建一种综合的质量体系架构用以评价多种不同应用所基于的网络平台。

本文的一个工作就是以网络应用为划分，整理提出网络承载业务的应用评价 KPI，以克服单个评价指标的片面性，实现多指标融合评价。例如，选取 Web 连接时延、平均时延、测试成功率、传输率等作为 Web 的 KPI；选取上传(下载)速率、建立连接时延、测试成功率等作为 ftp 的 KPI；选取总消耗时间(播放时间+等待时间)、缓冲时间、缓冲次数、连接时间等作为流媒体评价的 KPI。图 2 是本文网络质量评价的层次结构，根据待评价的网络实际情况确定网络应用，每个应用都有相应的 KPI。其中，可以视网络质量的综合评价为目标层 A，对每一种应用的 KPI 选取即是指标层 C。文中 KPI 的选取应遵循以下原则：

1)网络应用区别性。进行网络质量评价最终是为了使网络应用能够更好地运行，因此，对于不同网络应用执行要有与其密切相关的评价指标，并且能依据这些指标还原出网络应用的使用状况。

2)抓住关键信息。网络评价中有些指标是非独立、相互影响的，选取关键信息能剔除冗余评价，有效提高评价算法效率。

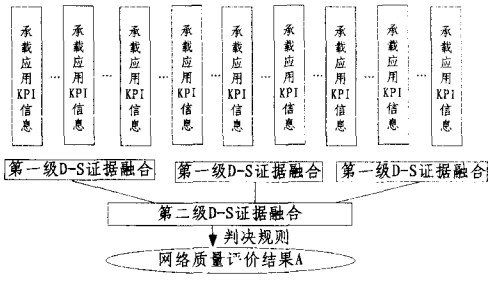

图 2 基于应用 KPI 的网络质量评价层次

2.2 基于 D-S 理论的网络质量评价

如图 2 所示，分别选取不同应用 KPI 值作为第一级 D-S 证据的输入，经证据合成后得到本应用对网络质量评价的分

类结果；再通过第二级融合中心的 D-S 证据推理模型对各应用证据推理的结果进行融合，最后得到融合所选应用的全部信息后的可信度更好的网络质量评价分类结果。构建网络质量评估方法如下：

1)构建网络质量评价问题的识别框架

将 $\Theta=\{A,B,C,D\}$作为网络质量评价问题的识别框架。式中，A 表示网络质量非常好，B 表示网络质量一般，C 表示网络质量差，D 表示网络质量非常差。选取网络主要承载的应用，每一个应用相当于一个框架函数，可表示为 $m_1,m_2,\cdots,m_n$，n 表示评价网络主要承载的业务类型的数目。

2)选定应用 KPI 作为多个传感器数据

本文选取评价网络主要承载的应用作为第一级融合对象：ftp 上传下载、浏览网页、在线视频。针对这些应用选取各自的 KPI，构成 D-S 融合定量的推理信息。

3)第一级 D-S 融合模型

确定各个框架函数基本概率赋值大小。命题基本概率赋值的确定是 Dempster-Shafer 证据推理得以广泛应用的关键环节。在不同的应用背景下，命题基本概率赋值的确定方法不同。本文采用传统 AHP 法来确定其值。

4) 第二级 D-S 融合模型

文中选取的 3 个第一级证据推理融合模型就各自的证据进行融合处理后，整体网络的第二级将对这些数据进行进一步的融合，得到最终用于判决的结果。

5)判决

利用如下的决策判断规则，对网络质量状况给出相应的评价结果。规则(ⅰ)表明融合结果中最可能的命题具有最大的基本概率赋值。规则(ⅱ)表明最可能的命题的基本概率赋值与其它所有命题的基本概率赋值和未知命题的基本概率赋值之间的差值分别不少于 $\varepsilon_1,\varepsilon_2$；规则(ⅲ)表明未知命题的基本概率赋值必须小于 γ。本文中，$\varepsilon_1,\varepsilon_2,\gamma$ 均取 0.1。

(ⅰ) $m(A)=\max_i\{m(B_i)\}$

(ⅱ) $m(A)-m(B_i)>\varepsilon_1, B_i\neq A; m(A)-m(\theta)>\varepsilon_2; \varepsilon_1,\varepsilon_2\in R, \varepsilon_1,\varepsilon_2>0$

(ⅲ) $m(\theta)<\gamma, \gamma\in R, \gamma>0$

3 算法实现与结果分析

本文将对提出的基于 D-S 证据推理的网络质量评估方法进行实例实现。第一级 D-S 数据融合推理以 ftp 应用为例，选择建立连接时延、上传(下载)速率、测试成功率作为 KPI，也就是第一级 D-S 传感器信息的输入。

使用 AHP 方法来确定 D-S 的命题基本概率赋值。在 AHP 中，根据要素的重要程度进行成对比较形成判断矩阵，一般用 1～9 及其倒数的标度方法，其标度和含义如表 1 所列。

表 1　1－9 标度及含义

标度	含义
1	两指标相比，具有同等重要程度
3	两指标相比，一个指标比另一个指标稍微重要
5	两指标相比，一个指标比另一个指标明显重要
7	两指标相比，一个指标比另一个指标非常重要
9	两指标相比，一个指标比另一个指标极端重要
2,4,6,8	分别表示为相邻 1－3,3－5,5－7,7－9 的中值
倒数	若因素 i 与 j 比较得，则 j 与 i 比较得

根据上文的算法描述和评价流程介绍，进行实例算法论证。在以电信 ADSL 方式承载接入，主要承载业务为 Web、ftp、视频应用的典型环境下进行大量的实验测试。通过测试发现，ftp 的连接时延在 0.11 到 0.68 之间，ftp 下载速率在 140kB/S 到 195kB/S 之间，测试成功率在 81%到 100%之间。

统计选取实验中的部分数据，对 3 个 KPI 的认知判断结果如下：

建立时延 KPI 认知判断结果：$\{A\},\{B\},\theta$；下载速率 KPI 认知判断结果：$\{B\},\{C\},\theta$；测试成功率 PI 认知判断结果：$\{A\},\{C\},\theta$。

识别框架为 $\Theta=\{A,B,C,D\}$。

根据表 2 中的赋值情况进行第一级的 D-S 推理及两两 D-S 证据融合。按照式(4)、式(5)分别计算 K 值和融合值，最终由 ftp 应用情况得出的一级融合结果为：$m(\{A\})=0.7080, m(\{B\})=0.1372, m(\{C\})=0, m(\{D\})=0, m(\theta)=0.1548$。

表 2　判断矩阵、一致性检验及基本概率赋值

命题				一致性校验情况	命题的基本概率赋值
KPI	{A}	{B}	θ		
{A}	1	5	4	CR=0.0904<0.1	m({A})= 0.6870 m({B})= 0.1865 m(θ)=0.1265
{B}	1/5	1	2		
θ	1/4	1/2	1		
KPI	{B}	{C}	θ		
{B}	1	2	4	CR=0.0176<0.1	m({B})= 0.5584 m({C})= 0.3196 m(θ)=0.1220
{C}	1/2	1	3		
θ	1/4	1/3	1		
KPI	{A}	{C}	θ		
{A}	1	3	5	CR=0.0825<0.1	m({A})=0.6267 m({C})= 0.2797 m(θ)=0.0936
{C}	1/3	1	4		
θ	1/5	1/4	1		

经过特征融合，A 分类概率赋值为 0.7080，是命题中最大的基本概率赋值，较之其它分类有明显的优势，满足决策判断规则(ⅰ)、(ⅱ)。但是此时未知命题 θ 的赋值 0.1548 大于设定的门限值，不符合判决规则(ⅲ)，所以此时仅靠一个应用 KPI 融合，无法合理给出网络质量的情况。

接着进行第二级 D-S 证据融合，选取 ftp、Web、在线视频应用作为第二级的融合对象。相对应的一级 D-S 数值计算如上文 ftp 应用。

表 3 中，m_1 为 ftp 业务，m_2 为 Web 应用，m_3 为在线视频业务，$m'=m_1\oplus m_2\oplus m_3$。由此可见，在利用 D-S 证据组合得到的第二级融合结果中，分类结果不确定概率赋值降低到 0.0028，分类结果 A 可信度为 0.9667。根据本文约定的决策判断规则，可以判定该网络质量为非常好的情况。将算法得到的结果与宁波某公司长期测量网络性能指标得到的网络状态判定结论相对比，两者具有一致的描述。

表 3　第二级 D-S 融合分类结果

第二级融合	证据的基本概率分配函数值(0-1)					评价结果
	m(A)	m(B)	m(C)	m(D)	m(θ)	
m_1	0.7080	0.1372	0	0	0.1548	
m_2	0.6450	0.1025	0.1000	0	0.1525	
m_3	0.7550	0.1500	0	0.0525	0.0425	
m'	0.9667	0.0270	0	0.0035	0.0028	非常好

本文算法弥补了现有算法对网络质量评价只单单给出一个综合数值而无法确定评价过程中未知因素影响的缺点，有效地处理了网络质量评价过程中的不确定性，从而提升了网

络质量评估过程的合理性。

结束语 IP网络质量问题一直是一个热门课题。本文将D-S证据理论引入网络管理评价中，体现并处理评估中的未知性信息。以常见网络应用为导向，建立网络质量评价的两级D-S证据融合推理模型，极大程度上削减了不确定性因素的影响，使得评价更趋合理性。后续的研究中，可以将根据两级D-S证据融合得出的网络评价结果用于指导网络应用调整、升级或网络故障检测中，也可以进行算法整合，将D-S证据理论与其他优化算法相结合用于网络质量评价，对用户的主观体验进行有效分析。

参 考 文 献

[1] 张冬艳，胡铭曾，张宏莉. 基于测量的网络性能评价方法研究[J]. 通信学报，2006，27(10)：74-79

[2] 谈杰，李星. 网络测量综述[J]. 计算机应用研究，2006，23(2)：5-8

[3] IETF. IP performance metrics(IPPM) metrics registry [M]. RFC4148，Aug. 2005

[4] ITU-T. Network performance objectives for IP-based services [M]Y. 1514，Feb. 2006

[5] 刘怀亮，王东，徐国华. 一种基于流量工程的网络端到端性能分析算法[J]. 系统工程与电子技术，2003，25(9)：1165-1168

[6] 蒋序平. 网络性能综合评估方法IEMONP的设计和实现[J]. 海军工程大学学报，2006，18(5)：74-78

[7] Hershey P，Runyon D，Wang Y W. Metrics for endto-end monitoring and management of enterprise systems[C]// Proc. 2007 IEEE military communication conference(MILCOM2007). IEEE Press，Oct. 2007：1-7

[8] 阙伟科，张国清，魏郑浩. IP网络综合性能评估模型[J]. 计算机工程，2008，34：99-101

[9] 陈小帅. IP网络运行质量分析与系统实现[D]. 北京：北京邮电大学，2008

[10] 杨风暴，王肖霞. D-S证据理论的冲突证据合成方法[M]. 北京：国防工业出版社，2010

[11] 曹菊英，赵跃龙. 基于DS证据推理的信息安全风险评估方法研究[J]. 计算机工程与应用，2009，45(11)：129-131

[12] 王玉波. 基于基本概率赋值调整的数据融合方法及应用[D]. 大连：大连理工大学，2010

[13] 倪国强，梁好臣. 基于Dempster-Shafer证据理论的数据融合技术研究[J]. 北京理工大学学报，2001，21(5)：603-609

(上接第116页)

4.2 语义分析与应用

语义可以表现为流程次序或者问题内容的变化。活动流程的变化需要引入多重Try-p机制，活动内容的变化则需要从面向资源的角度分析问题。基于语义的理发师问题也是生产者-消费者模型的特例化，需要根据不同的语义环境，灵活运用信号量和pv原语机制。

用面向资源的方法，更方便分析和解决进程同步问题中的资源竞争。例如，对于理发师进程，理发师作为进程的驱动者，同时又是barber进程和cashier进程的互斥资源，也是barber进程和customer进程同步的临界资源。将面向流程和面向资源的方法结合，更容易解决进程并发中的同步互斥问题。根据语义分析解决问题，更加有现实意义。

理发师的经典模型及其语义变化形成的处理进程同步问题的新模型应用参数如表1所列。从表1中可清晰地看到复杂语义变化形成的许多新的问题，利用复杂信号量机制从面向资源的角度可以较容易分析和解决复杂语义产生的新问题。例如，在入党流程或者住院流程步骤较多的多信号量的并发工作流模型中都可以进行应用。

表1 各种理发师模型使用参数比较

参数 \ 模型	理发师经典模型	流程语义改变模型	内容语义改变模型
顾客数量	M	M	M
收银台数量	—	1	1
理发师数量	1	P	P
理发椅数量	1	P	P
沙发数量	N	N	N
站区位置数量	—	—	Q
缓冲队列数量	1	3	4
是否门口等待	否	是	否
模型分析方法	面向过程	面向资源和面向过程	面向资源和面向过程

结束语 根据前述问题的论述和总结可以看出，问题语义不同，解决方案就会有变化。改变理发师问题的原有语义，利用不同的机制对应的解决方案需要修改。用面向资源的方法结合面向流程的模式，能更好地解决进程间同步互斥问题。在本复杂版本的基础上，还可以继续改变问题语义进行变形，比如将收银工作由单独收银员执行，理发师不可以进行收银工作；收银台可以有多个。只要抓住解决该类问题的关键点，选取合理的分析模式，根据具体的语义去分析解决问题就是有经验规则可遵循的。

参 考 文 献

[1] 郭小群，郝克刚，侯红，等. 复杂分支和同步模式的Pi演算描述[J]. 计算机科学，2010，37(2)：139-141

[2] 李小群，赵慧斌，孙玉芳. 进程间通信机制的分析与比较[J]. 计算机科学，2002，29(11)：16-21

[3] 萧美阳，叶晓俊. 并发控制实现方法的比较研究[J]. 计算机应用研究，2006(06)：19-22

[4] Dijkstra E W. Co-operating Sequential Processes [M]. Academic Press，1968：43-112

[5] 杨建书，吴尽昭，周瑾. 基于通信顺序进程的OWL-S语义分析与建[J]. 计算机应用，2010，30(8)：2173-2196

[6] Raghunathan S. Extending Inter-Process Synchronization with Robust Mutex and Variants in Condition Wait[C]// IEEE. 2008：121-128

[7] 王文磊，徐汀荣. 经典进程同步问题的研究与实现[J]. 计算机工程与设计，2006，27(12)：2248-2253

[8] Zissulescu C，Kienhuis B，Deprettere E. Communication Synthesis In A Multiprocessor Environment[C]// IEEE. 2005：360-365

[9] 汤子瀛，等. 计算机操作系统[M]. 西安：西安电子科技大学出版社，1996：121-134