

可重构网络中基于中心度与拓扑势排序的资源分配算法

王子厚, 韩言妮, 林涛, 徐月梅, 唐晖

(中国科学院 声学研究所 高性能网络实验室, 北京 100190)

摘要: 可重构网络中的一个研究难点是虚拟资源的分配问题。首次将社会网络中心度和拓扑势研究引入到可重构网络虚拟资源分配问题中, 在映射虚拟网络时考虑节点在网络中的位置重要性, 提出了基于中心度和拓扑势的虚拟网映射算法。实验表明, 所提出的新算法在提高资源分配效率, 降低物理网络开销方面, 与本领域以往算法相比, 具有显著的进步。

关键词: 可重构网络; 网络虚拟化; 资源分配; 网络中心度; 拓扑势

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)08-0010-11

Resource allocation algorithms in the reconfigurable network based on network centrality and topology potential

WANG Zi-hou, HAN Yan-ni, LIN Tao, XU Yue-mei, TANG Hui

(High Performance Network Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In reconfigurable network environment, a major challenge is how to map virtual networks to the substrate network efficiently, network centrality and topology potential were introduced into the allocation of virtual resources. Two algorithms were proposed that consider the embedding problem with the attributes of network topology. Simulation experiments show that the proposed algorithms increase the acceptance ratio and the revenue, while decreasing the provisioning cost in the long term.

Key words: reconfigurable network; network virtualization; resource allocation; network centrality; topology potential

1 引言

互联网自诞生以来, 经过 40 年的发展, 对人类社会产生了深刻的影响。从早期的文件传输、电子邮件服务, 到现在的即时通信、网络社区、电子商务, 各类基于互联网的新型社会及商业应用层出不穷, 互联网已然成为人们生活的必需品。互联网之所以能够获得如此巨大的成功, 来源于互联网简单而高效的设计理念。互联网基于 TCP/IP 协议的

分层体系结构设计, 使得互联网上层与下层之间可以相互分离, 上层的应用设计无需考虑物理层和数据层的传输模式, 因此上层的应用可以最大规模的扩展可互操作的网络数量和范围, 这也是互联网能够获得如此大发展的关键。然而, 这种基于 IP 协议族的设计, 同时成为互联网革新与继续向前发展的巨大障碍。多年以来, 处于互联网沙漏模型上下位置的应用层和接入层都有很大的创新和变化, 唯有中间的 IP 层一直保持不变, 如图 1 所示。这带来了

收稿日期: 2011-09-01; 修回日期: 2012-04-15

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (2010ZX03004-002); 国家自然科学基金资助项目 (60972083, Y011021601, 11161140319); 中国科学院战略性先导科技专项基金资助项目 (XDA06010302); 国家国际科技合作计划基金资助项目 (2010DFB10570)

Foundation Items: The National Science and Technology Major Project (2010ZX03004-002); The National Natural Science Foundation of China (60972083, Y011021601, 11161140319); The Strategic Pilot Project of Chinese Academy of Sciences (XDA06010302); The National International Science and Technology Cooperation Project (2010DFB10570)

2 方面的问题：一方面，互联网上多种互联网服务提供商（ISP, internet service provider）共存的环境，使得采纳一种新的互联网架构或者在现有的架构上进行一些修改都变得十分困难，如何开展创新性研究，克服 IP 协议的缺点和局限性而仍然保持其优点，是目前互联网研究领域的一个热点问题^[1~3]。另一方面，新的网络应用不断涌现，用户需求的特性差异日益扩大，在传统的互联网体系结构下，简单的依靠拓宽链路带宽、提高节点处理速度、增大节点存储能力，已经很难满足快速增长的用户业务需求。

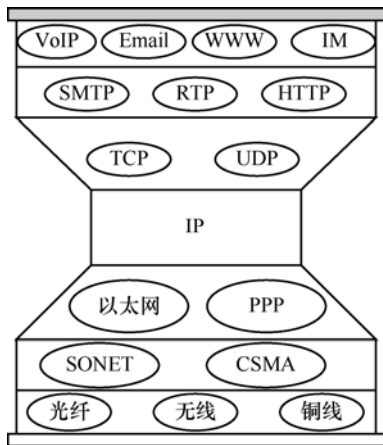


图 1 互联网的沙漏模型

柔性的可重构网络就是为解决这些问题而提出的^[4,5]。在可重构网络中，每层与每层之间是松耦合关系，下面一层为上面一层提供资源，上面一层通过命令指导下面一层进行相应的重构。上层虚拟网是底层物理网络资源的一个子集。相同的基础网络可以支撑多种不同的用户业务，因此网络需要改造的机率大大下降。在可重构网络研究中，网络虚拟化是一种重要的基础技术。支持网络虚拟化的可重构网络将传统的互联网服务提供商的角色一分为二：物理网络提供者（InP, infrastructure provider）与服务提供者（SP, service provider），物理网络提供者运营维护底层网络，服务提供者租用物理网络提供者的资源，建立虚拟网络并向用户提供服务。目前，在理论研究方面，可重构的网络虚拟化方法被认为是解决目前互联网“僵化”问题的有效手段^[1,2,6]。而在创新实验方面，网络虚拟化与可重构的新型路由设备也被很多未来网络测试床作为设计的重要组成部分^[7~9]。

在可重构网络的研究中，刘强等提出了基于构

件的层次化可重构网络体系架构，以及松耦合、兼容融合、扩展和隔离的构建原则^[4]。齐宁等提出了一种资源共享的逻辑承载网构建方法，增强了网络的可扩展性和可升级性^[5]。Feamster 等提出了可重构的 CABO 虚拟网架构，通过虚拟网的隔离实现多种应用与协议的同时运行^[6]。目前，研究者主要关注可重构网络的体系结构、资源的描述机制、虚拟资源的分配等内容。其中，虚拟资源的分配是可重构网络中的关键问题，如何实现虚拟资源的分配，高效地将虚拟资源请求映射到物理网络上，满足上层不同类型的应用和业务需求，成为关系到提高网络资源利用率、降低网络运营成本的重要问题。

本文将社会网络分析方法引入到虚拟资源分配问题中，从统计特性上分析了虚拟网络和物理网络的拓扑特征，首次提出了基于网络中心度的虚拟网络映射方法，以提高虚拟网络的映射成功率，并在此基础上利用拓扑势方法进行改进，进一步降低网络的开销。本文的其余部分组织如下。第 2 节对虚拟资源分配问题进行数学建模，给出网络模型、虚拟网映射过程、评价指标，并对当前的虚拟网映射的算法进行了介绍。第 3 节首先对网络中心度理论进行介绍，分析了网络中心度的几种表达方式，并说明为什么选取接近度作为虚拟网映射过程中节点重要性排序的参数。接下来，借鉴数据场理论中节点之间的相互作用关系，提出基于拓扑势的改进计算方法。第 4 节提出基于接近度排序和拓扑势排序的虚拟网映射算法。第 5 节对实验的仿真结果进行了分析，并与目前该领域其他算法进行对比。第 6 节总结全文，展望下一步的工作。

2 虚拟资源分配问题

可重构网络中的虚拟资源分配问题，就是如何高效地根据用户或者服务提供商的网络资源请求，选取物理网络上的可重构资源，创建运行于物理网络之上的逻辑承载网或虚拟网。下面从网络模型、虚拟网络的映射过程、虚拟网映射的评价指标 3 方面来描述虚拟资源分配问题。

2.1 网络模型

本文将可重构的物理网络描述为一个带权重的无向图，标记为 $G_S = (N_S, E_S)$ ， N_S 为底层节点的集合， E_S 为底层链路的集合。每个底层节点 $n_S \in N_S$ ，属性包括节点的 CPU 处理能力 $c(n_S)$ ，也可以扩展以表示节点的其他能力，如位置信息、可重构能力

等。每条底层链路 $es(i, j) \in E_S$ ，属性包括节点 n_i 与 n_j 之间链路上的带宽容量 $bw(es)$ ，也可以扩展以表示链路的时延、QoS 级别等。

虚拟网/逻辑承载网与物理网络相似，也描述为带权重的无向图。一个虚拟网的拓扑被描述为 $G_V = (N_V, E_V)$ ，包括虚拟节点的集合 N_V ，与虚拟链路的集合 E_V ，以及相对应的虚拟节点 $n_v \in N_V$ 上的 CPU 需求 $c(n_v)$ 与虚拟链路 $ev(i, j) \in E_V$ 上的带宽需求 $bw(ev)$ 。

2.2 虚拟网的映射过程

服务提供者以发起虚拟网请求的方式向底层物理网络申请资源以实现资源分配。第 i 个虚拟网的存活时间为 d_i ，即申请的物理资源使用时间长度为 d_i 。一个虚拟网络的映射问题被定义为从 G_V 到 G_S 的一个子集 $G'_S = (N'_S, E'_S)$ 的映射，并满足 G_V 中的各种限制条件。这里的限制条件包括多个方面：节点的处理能力、链路的带宽能力、映射位置的限制，以及资源定价、能耗控制等。图 2 给出了 2 个虚拟网络请求向物理网络的映射。图中 2 个虚拟网映射到相同的物理网络上，其中，虚拟网 1 与虚拟网 2 共享了节点 A、B 的节点资源和 AB 之间的链路资源。

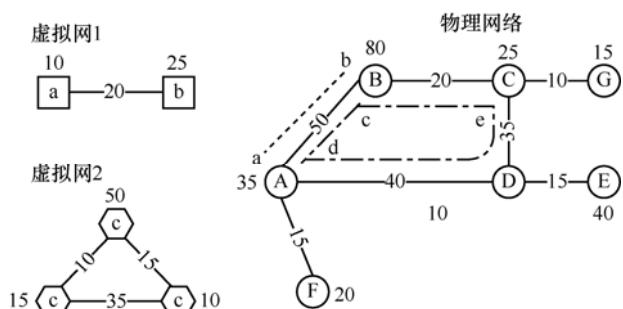


图 2 虚拟网络映射

虚拟网映射包括节点映射和链路映射 2 个阶段：

节点映射： $M^N : N_V \dashrightarrow N'_S$ ；

链路映射： $M^E : E_V \dashrightarrow E'_S$ 。

本文着重考虑节点的处理能力与链路的带宽能力，这 2 种最基本的限制条件，以此作为后续研究的基础。节点映射阶段，节点的可用 CPU 资源需要满足虚拟节点的 CPU 需求，链路映射阶段，物理路径的带宽需要满足被映射的虚拟链路带宽限制条件。

2.3 虚拟网映射的评价指标

虚拟网映射存在多种评价指标。比如，对于物

理网络来说，物理网络的开销、物理网络的总收益等，对于服务提供者来说，映射的稳定性以及物理网络的时延、抖动等，都是虚拟网映射的评价指标。本文中选用虚拟网映射的成功率，物理网络长期的平均收益、开销以及收益开销比作为主要的参考指标。

虚拟网络向物理网络的映射成功率，即虚拟网请求能否被成功映射，关系到物理网络提供者的稳定性、可靠性和服务提供者的体验质量，是最重要的指标。虚拟网络映射的成功率等于在一定时间内，映射成功的虚拟网数目与该段时间内虚拟网请求的总数目之比：

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{VNR_{Accepted}}{VNR} \quad (1)$$

对于物理网络来说，映射的基本目标就是提高物理网络的收益，降低物理网络的开销。为了体现本文工作的有效性，本文采用本领域中一致采用的收益与开销的定义^[10~12]，其中，收益是指被映射的虚拟网络的大小，这里用被映射的虚拟网的节点资源与链路资源表示。开销是指被映射的虚拟网络占用的底层物理网络的大小，这里用物理网络中被占用的节点与链路资源表示。

对于一个虚拟网请求 $G_V = (N_V, E_V)$ ，其在某个时间 t 的收益与开销分别定义为

$$R(G_V, t) = \sum_{ev \in E_V} bw(ev) + \alpha \sum_{n_v \in N_V} c(n_v) \quad (2)$$

$$C(G_V, t) = \sum_{ev \in E_V} \sum_{p \in P_S(ev)} hops(p)bw(ev) + \beta \sum_{n_v \in N_V} c(n_v) \quad (3)$$

其中， $bw(ev)$ 为虚拟链路 ev 上的带宽请求。 $c(n_v)$ 表示虚拟网络中 G_V 中虚拟节点 n_v 占用的 CPU 资源。 $P_S(ev)$ 代表物理链路中为虚拟链路 ev 分配的路径 p 的集合， $hops(p)$ 代表路径 p 在物理网络上经过的跳数，与 $bw(ev)$ 相乘代表虚拟链路 ev 占用的底层物理链路的总和。式(2)和式(3)中 α 与 β 表示在计算收益与开销时节点资源与链路资源的平衡参数，在考虑的侧重不同时，可以选取不同的值。在本文实验中，皆取 α 、 β 为 1。

物理网络的长期收益等于在一定时间内，所有被映射的虚拟网络的收益之和。物理网络的长期开销等于在一定时间内分配给被映射的虚拟网络的物理资源之和。本文定义物理网络长期的平均收益

与开销为

$$R(G_S) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T R(G_V, t)}{T} \quad (4)$$

$$C(G_S) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T C(G_V, t)}{T} \quad (5)$$

对于物理网络来说, 在相同开销的情况下, 能够映射的虚拟网规模越大, 数目越多, 收益就越大。而在相同的虚拟网映射请求即相同的收益情况下, 尽量使被映射的资源相对集中, 占用尽量少的物理资源, 开销就越小, 更有利于物理网络降低能耗。本文将长期平均收益和开销相比, 作为考察物理资源利用效率的参考指标:

$$\frac{R(G_S)}{C(G_S)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T R(G_V, t)}{\sum_{t=0}^T C(G_V, t)} \quad (6)$$

2.4 目前虚拟网映射的算法

虚拟资源的分配要同时满足节点映射和链路映射的要求, 受到节点、链路、位置等多方面的限制, 是一个多目标多约束问题。由于虚拟网映射问题的多目标多约束属性导致的虚拟网映射决策的复杂性, 使得虚拟网映射问题目前还没有最优的解决方案, 之前的研究集中在提出一些启发式算法。

2006年, Zhu等人首次将虚拟网映射问题抽象成图论问题, 提出了基于贪婪算法解决节点映射问题的启发式算法^[13]。2007年, Yu等人在贪婪算法的基础上引入了多商品流算法以解决链路的分割和迁移问题^[10]。以上2种算法的不足主要是仅仅考虑了“离线”的虚拟网映射问题, 即虚拟网请求是提前预知的, 而不是实时响应的。2009年, Chowdhury等人将动态规划的方法引入到虚拟网映射问题中, 将节点映射和链路映射一定程度地结合在一起, 但该算法受制于节点的映射位置限制^[11]。2010年, Houidi等人尝试提出了一种分布式的映射算法, 但是算法效率较低^[14]。2011年, Cheng等人首次将拓扑结构分析引入映射问题, 基于贪婪算法采用马尔可夫随机游走模型对网络中的节点进行了排序^[12], 但该方法受限于特征向量值的人为设定, 不能满足网络动态变化的需要。

归纳目前的虚拟网映射算法基本为以下研究思路: 将虚拟网映射分成节点映射和链路映射2个独立的过程。节点映射只考虑节点的可用资源或与节点相邻链路的可用资源与状态, 而不考虑网络的

拓扑结构和网络中其他节点、链路对本节点在网络中显著性的影响。

本文从一个全新的角度, 借鉴社会网络分析方法, 对物理网络和虚拟网从拓扑的视角进行统计特征与节点中心度分析, 采用网络中心度中的接近度方法对物理网络和虚拟网络中的节点进行中心度排序, 并利用排序的结果作为先验知识, 在映射过程中, 使得中心度更显著的虚拟网节点与中心度更显著的物理网络节点相互匹配。进一步, 鉴于接近度指标中仅仅从节点的拓扑位置和节点之间的最短逻辑路径考虑, 忽略了实际网络中重要的、客观存在的物理信息和属性内容, 本文受到数据场理论中节点之间相互作用模式的启发, 采用拓扑势方法对传统接近度算法进行了改进, 定义了包含节点和链路的属性信息的接近度计算方法, 反应节点间相互作用的局域特性, 凸现网络节点间影响力的差异, 不仅能够更加真实地反映实际网络的拓扑形态, 而且能够用更精确的数学语言来定量地刻画网络上节点之间的作用力特征。

3 中心度与拓扑势分析

在社会网络中, 中心度是评价一个人重要与否, 衡量他/她的职务的地位优越性或者特权性以及社会声望的重要指标。一个人在社会中的位置越重要, 则他/她越处在社会的中心。本文借鉴社会网络中的节点中心度定义, 用来反应在网络拓扑(物理网络和虚拟网络)中节点的重要程度。

3.1 网络中心度分析方法

社会网络中心度有多种度量方法, 这里介绍最常用的4种方法: 度数、接近度、介数和特征向量, 由于方法原理和侧重发现的问题不同, 因此对同一网络可能会出现不同的排序结果^[15]。

1) 度数 (degree) 中心度最简单, 以连接到节点的边的数目作为度量节点重要性的依据。如果一个节点拥有更多的相邻链路, 则该节点更重要。度数仅仅描述在静态网络中节点所产生的局部影响力, 无法反应网络的全局情况。

2) 介数 (betweenness) 中心度以网络中经过该节点的所有点与点之间的最短路径的数目作为度量依据。介数中心度更多反映节点的交互能力, 通过信息流动的概念, 可以确定信息负载繁重的网络节点, 适合于缓解网络拥塞及级联失效等恶意攻击行为。

3) 接近度 (closeness) 中心度以该节点到网络中所有可达节点的最短路径为度量依据。直观地说, 一个节点到网络中所有可达节点的最短路径的和最小, 则该节点在网络中更接近中心。反之, 如果一个节点到其他所有节点的最短路径和较大, 则该节点更加接近网络的边缘。接近度中心度更加强调网络的全局结构, 不仅考虑到了节点度数的大小, 而且还考虑到了节点在整个网络中所处位置的接近度, 因此测试的准确度明显较高。

4) 特征向量 (eigenvector) 中心度通过与其相邻节点的中心化指标线性迭加进行度量, 反映节点的间接影响力, 更多的应用于有向图的度量, 如在传播性网络中, 特征向量中心度值高的节点说明该节点与病源很近, 通常是需要重点防范或重点利用的关键节点。

由于本文中所要解决的是物理网络与上层虚拟网络的映射问题, 需要考虑全局信息, 并且以提高算法的执行效率和准确性为目标, 因此本文中采用接近度中心度方法。

3.2 接近度中心度

接近度中心度以距离作为概念来计算一个节点的中心程度。本地节点与可达的其他节点越接近, 则中心度值越高; 反之, 与其他节点相距越远则中心度值越低:

$$C_c(n_i) = \frac{1}{\sum_{j=1}^n d(i, j)} \quad (7)$$

其中, $d(i, j)$ 代表节点 n_i 与 n_j 之间的距离, 在网络拓扑中, 采用两点之间最短路径的长度/路由器跳数来代表 2 个节点之间的距离。接近度 $C_c(n_i)$ 就是节点 n_i 到其他节点的最短路径长度之和再求倒数。其值越小, 表示该节点与其他节点距离越大, 该节点越接近边缘, 也就越不重要, 反之亦然。

3.3 拓扑势理论改进的中心度分析

在传统的接近度的定义中, 仅考虑了节点之间的距离, 即网络的拓扑结构。而在虚拟网络的映射过程中, 网络中节点与链路的物理属性都是影响映射成功率和映射效果的关键因素和直接因素。

本文借鉴数据场理论中场的概念来分析网络节点的中心度^[16]。场的概念最早由法拉第提出来, 用来描述物理系统中粒子之间的相互作用。在数据场理论中, 网络被看作一个包含 n 个节点及其

相互作用的物理系统。每个节点存在一个作用场, 场中的任何节点都受到该场的作用。单个节点的场对网络中的所有可达节点存在作用, 反之, 单个节点也受到所有可达节点的作用场的作用。每个节点的作用范围随着网络距离的增长而快速衰减。根据数据场的相关讨论, 采用代表短程场且具有良好的数学性质的高斯势函数来描述场中节点之间的相互作用, 并称之为拓扑势场^[16,17]。根据数据场的势函数定义, 任意节点 n_i 的拓扑势 φ 可以表示为

$$\varphi(n_i) = \sum_{j=1}^n m_j \times e^{-\left(\frac{d(i, j)}{\sigma}\right)^2} \quad (8)$$

其中, m_j 表示节点 n_j 的质量, 可以用来描述节点的固有属性。在真实的网络中, m_j 被用来描述网络中个人的活动能力、通信网络中节点的存储能力等。 $d(i, j)$ 表示节点 n_i 与 n_j 之间的距离, 一般采用网络中两点之间的最短路径的长度来度量。 σ 为影响因子, 表示节点场的作用范围。 σ 的大小代表节点影响力的强弱^[17]。 σ 越大, 代表节点的作用范围越大, 影响力越强。

基于以上数据场理论, 将物质粒子间的相互作用及其场的描述方法应用于网络拓扑中, 描述节点的影响力和网络拓扑特性。本文将计算机网络看作包含 n 个节点的物理系统, 节点之间的相互作用受节点之间距离、跳数的影响, 而节点的作用范围则可用节点的对外带宽表示。在本文中对于每个节点考虑 3 个属性, 即每个节点可用的 CPU 处理能力、本节点到网络中其他节点的最短路径的长度、本节点到其他节点的可用带宽和。节点 n_i 的拓扑势 P 计算公式如下定义:

$$P(n_i) = \sum_{j=1}^n c(n_j) \times e^{-\left(\frac{d(i, j)}{bw_a(j)}\right)^2} \quad (9)$$

其中, $P(n_i)$ 表示节点 n_i 的拓扑势, $c(n_j)$ 为节点 n_j 的可用处理能力, 随节点的状态的变化而变化。 $d(i, j)$ 表示节点 n_i 与 n_j 之间的距离, 用节点 n_i 与 n_j 之间的最短路径的长度表示。 $bw_a(j)$ 为节点 n_j 对外的可用带宽总和。这里用 $bw_a(j)$ 来表示节点 n_j 的作用范围。在网络拓扑不变、节点之间最短路径一定的情况下, 节点 n_j 的可用 CPU 能力越大, 到节点 n_i 的距离越短, 对外的可用带宽越大, 则该节点对节点 n_i 的作用越大, 反之亦然。节点 n_i 的拓扑势即为所有

节点对它作用的总和。

根据高斯函数的数学性质, 每个节点 n_i 的影响范围近似为 $3bw_a(n_i)/\sqrt{2}$, 当距离大于此范围时, 势函数很快衰减为 0, 指示着短程场的作用。分析可知, 处于网络连接密集区域的节点具有较高的拓扑势, 而拓扑势值最大的节点附近连接也最密集。当节点的对外可用带宽逐渐减少时, 节点的拓扑势值会逐渐降低, 显示出节点在网络中重要性的下降。

从上述公式中可以看出, 它既能体现虚拟网映射问题中节点和链路的属性信息, 又能定量地反映节点拓扑位置及其作用强度。

4 基于中心度与拓扑势的映射算法

在上面分析的基础上, 本节中提出了基于传统接近度和基于拓扑势方法的 2 种虚拟网映射算法。

4.1 基于传统接近度的虚拟网映射算法

网络中心度分析能够较好地反映网络中节点的重要性与显著性, 使得拓扑中的稀缺资源更容易被找到。基于网络中心度中接近度概念排序的虚拟网映射算法, 使虚拟网映射过程中较为重要和更接近“中心”的节点, 能够映射到底层较为重要和更接近“中心”的节点, 提高映射的效率。该算法以物理网络和虚拟网请求的拓扑为输入, 输出映射结果和映射后更新的物理网络拓扑。算法分为节点映射与链路映射 2 个过程。算法 1 中展示了基于传统接近度计算的虚拟网映射算法。

算法 1 基于传统接近度的虚拟网映射算法

- 1) 等待虚拟网请求到达;
- 节点映射:
 - 2) 对 G_s 中节点按照接近度公式进行排序计算;
 - 3) 对 G_v 中节点按照接近度公式进行排序计算;
 - 4) 对于所有未被映射的虚拟节点,
 - ① 选择接近度最大的虚拟节点;
 - ② 寻找物理网络中未映射过、且满足该虚拟节点的资源需求的、接近度最大的物理节点进行映射;
 - 5) 如果所有节点资源限制条件被满足,
 - 6) 则, 输出“节点映射成功”;
 - 7) 否则, 返回“映射失败”;
- 链路映射:
 - 8) 对于每条虚拟链路,

在物理网络中寻找满足带宽要求的第 K 条最短路径, 对虚拟链路进行映射;

- 9) 如果所有链路资源限制条件被满足,
- 10) 则, 输出“映射成功”;
- 11) 否则, 返回“映射失败”;
- 12) 更新底层网络资源状态信息;
- 13) 返回 1)。

算法 1 首先计算物理网络和需要映射的虚拟网络的节点接近度的值, 并分别进行排序。然后, 选择虚拟网络中具有最大接近度的节点首先进行映射, 在同时满足虚拟节点的节点需求与相邻链路需求的物理节点中, 选择接近度最大的节点进行映射。接下来, 映射虚拟网络中具有第 2 大接近度的节点, 选择物理网络中没有被映射且满足需求的接近度最大的点进行映射, 并依此类推, 直到虚拟网络中所有的节点被映射完毕。在链路映射阶段, 采用 K -最短路径方法^[18], 在物理网络中寻找 2 个被映射的虚拟节点之间, 满足带宽要求的第 K 短路径, 对虚拟链路进行映射。

在算法 1 中, 需要计算所有节点之间的最短路径, 一般采用 Floyd-Warshall 算法, 需要 $O(N^3)$ 的时间, 而如果网络为疏松图, 则时间复杂度可降为 $O(N^2 \log N + NE)$ ^[19], 空间复杂度为 $O(N^2)$, 其中 N 和 E 分别代表网络拓扑中节点与链路的数目。 K -最短路径算法则可以在多项式时间 $O(N+E)$ 内解决。

4.2 基于拓扑势的虚拟网映射算法

基于传统接近度的映射算法中, 没有考虑链路的权重与节点的处理能力, 这会导致 2 个方面的不足。一方面, 排序没有考虑链路和节点的权重, 只能反映纯粹的拓扑结构的影响。另一方面, 排序的结果是静态的, 网络中可用的网络资源的变化情况得不到反映, 比如, 节点因资源被分配、可用资源减少而导致在未来分配中实时重要性的变化不能体现, 当一个中心度显著的节点资源分配将尽的时候, 仍将该节点作为网络中的重要节点进行优先选择, 排序的结果无法完全反映网络的真实状况。在改进的算法中, 对传统接近度的算法中的节点排序部分进行了修改, 使用拓扑势计算公式进行节点的排序。

基于拓扑势的算法的基本步骤与算法 1 相同, 这里只描述与算法 1 不同的地方。由于拓扑势算法的计算考虑链路的实际状态, 在映射完毕后, 需要

实时更新物理网络的状态，重新计算底层网络节点的拓扑势值，以使得下次计算顺利进行。

与算法 1 的计算过程相同，基于拓扑势算法计算拓扑势值的时间复杂度为 $O(N^3)$ ，疏松网络则为 $O(N^2 \log N + NE)$ ，空间复杂度为 $O(N^2)$ 。这 2 种算法的复杂度与现有研究中提出的算法^[12]相比，复杂度相似，在可以接受的范围内。

5 仿真结果分析

本节通过对文中提出的 2 种算法与之前研究中提出的相关算法^[10,12]进行对比实验，来证明文中提出的 2 种算法的有效性。

5.1 仿真环境设置

实验中的物理网络与虚拟网请求均采用 GT-ITM 拓扑生成器^[20]产生。物理网络中保证所有节点之间的连通性，每次实验生成的物理网络包括 100 个节点，500 多条链路，相当于一个中等的 ISP 的规模。物理网络中每个节点的 CPU 资源和每条链路的带宽以符合 [50, 100] 的均匀分布随机产生。

虚拟网络为随机拓扑，在每个虚拟网请求中，虚拟节点的数目在 [2, 10] 之间均匀分布。虚拟节点两两之间以 0.5 的概率相连，对于一个有 n 个节点的虚拟网，链路的数目为 $n(n-1)/4$ 。虚拟网中，每个节点的 CPU 资源和每条链路的带宽符合 [0, 50] 的均匀分布。虚拟网请求的到达时间符合泊松分布，平均 100 个时间单位内有 5 个虚拟网请求到达。虚拟网的存活时间 d 符合以 1 000 个时间单位为期望的指数分布。在每组实验中，约有 2 500 个虚拟网请求生成。与之前的几组研究环境^[10~12]类似，本文仿真运行约 50 000 个时间单位，这样是为了使得整个网络的运行进入比较稳定的状态，获得更真实的实验数据。对于每组实验，进行 10 次仿真，取实验结果的平均值。

5.2 基于接近度和拓扑势改进算法的评价

在这里，进行了 4 种算法的比较，以文献[10]中的贪婪算法作为基准 (BL, baseline) 算法。第 2 种算法为文献[12]中提出的算法，即使用马尔可夫随机游走模型对节点排序进行改进的算法 (RW 算法)。第 3、第 4 种则为本文提出的算法，基于传统接近度的算法 (CL 算法)，新的基于拓扑势改进的算法 (NC 算法)。具体描述如表 1 所示。

本文从映射成功率、长期的物理网络的平均收

益、开销及收益开销比 4 项指标进行分析，评价指标在第 2 节已经定义。

表 1 用来比较的映射算法

算法	描述
BL	基准算法，节点映射采用贪婪算法，以 CPU 的可用资源作为贪婪算法的排序基础，链路映射采用 K-最短路径算法
RW	以可用节点资源与相邻链路资源的乘积作为排序基础，使用马尔可夫随机游走改进
CL	本文提出的基于传统的接近度计算的算法
NC	本文提出的新的基于拓扑势改进的算法

图 3 为不同算法下的映射成功率随时间的变化情况。在 10 000 个时间单位以后，算法的效率逐渐稳定。基准算法的映射成功率约为 78%~80%，其他 3 种算法的成功率均高于基准算法。基于传统接近度的算法效率最高 (约 92%)，比拓扑势算法和 RW 算法高 3%~5% 左右，比 BL 算法高 10%~13% 左右。可以看出，接近度作为网络中心度分析的重要指标，与其他几种算法相比，能更好地反映拓扑的结构。拓扑势算法与 RW 算法成功率基本相同，在 87% 左右。拓扑势算法在映射成功率上比传统接近度算法降低了一些。但是拓扑势算法的映射成功率，仍与 RW 算法不相上下，与基准算法 BL 相比优势明显。

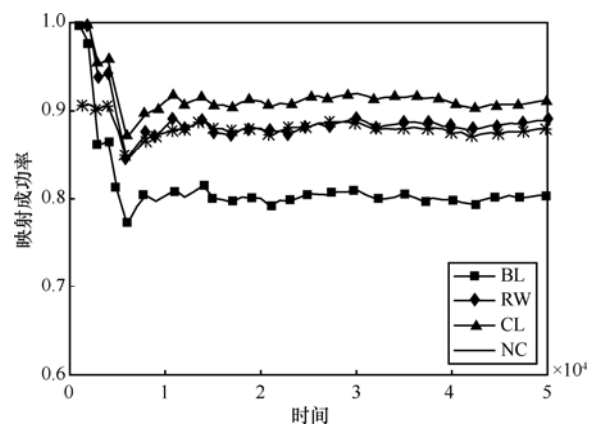


图 3 映射成功率随时间的变化

图 4 为不同算法下物理网络平均收益的变化情况。在映射开始阶段，状态较为不稳定，在大约 10 000 个时间单位后，逐渐达到稳态。可以看出，传统接近度算法和拓扑势算法的收益基本相同，RW 算法其次，BL 算法收益最低。基于接近度和拓扑势的 2 种算法的收益比 RW 算法高约 6%~8%，

比 BL 基础算法高约 15%。传统接近度算法与拓扑势算法的收益明显高于其他 2 种算法。

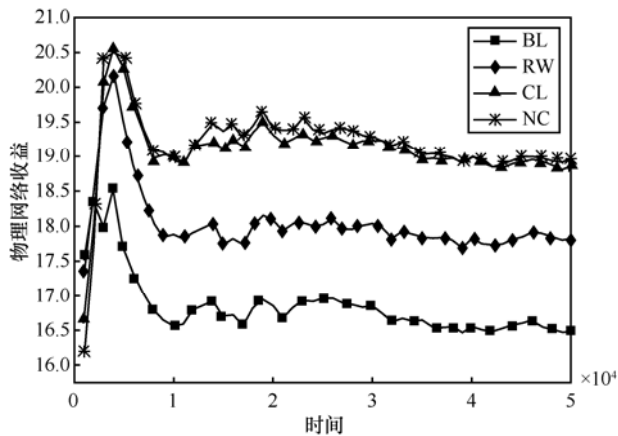


图 4 物理网络收益随时间变化

图 5 为不同算法下物理网络平均开销的变化情况。在图 5 中，BL 算法的开销最低，其他的几种算法开销均高于 BL 算法。因为 BL 算法映射成功率最低，故其开销也较小。其他几种算法导致的物理网络开销从大到小依次为：基于传统接近度的算法、RW 算法、拓扑势算法。拓扑势算法开销最小，与传统接近度算法相比，明显降低了开销（5%~6%），同时也比 RW 算法开销小（3%~4%左右）。

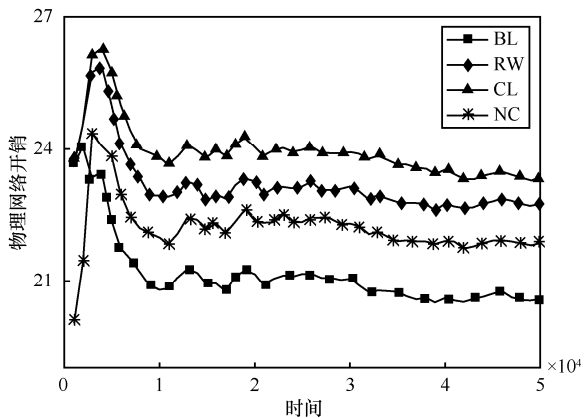


图 5 物理网络开销随时间变化

在图 6 中，将收益与开销相比，以观察底层网络资源利用的有效性。图中显示，基于拓扑势的算法收益开销比最高（约 0.85），其他 3 种算法则在 0.75 到 0.8 之间，可以得出结论，在占用相同的底层资源情况下，拓扑势算法能够映射更多的虚拟资源，资源利用率最高。这是因为拓扑势算法在考虑网络拓扑属性的同时，较好地考虑了节点和链路的属性，使得映射更为有效。

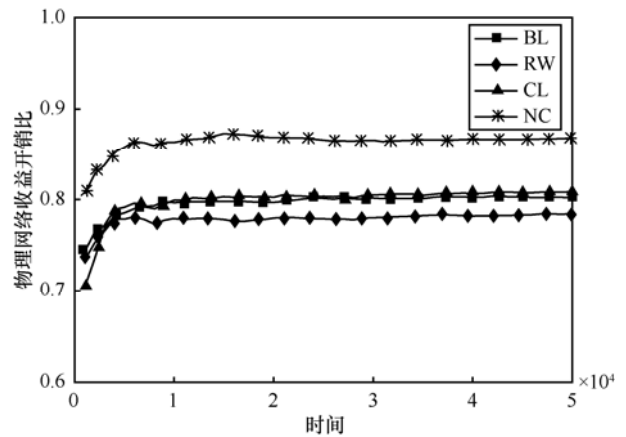


图 6 收益开销比随时间变化

从上面的结果可以得出，基于传统接近度的算法在提高映射成功率方面具有一定的优势，而基于拓扑势的算法虽然映射成功率不是最高(多组实验表明，与传统接近度相比低 2%左右)，但是明显提高了底层网络资源的利用率，降低了网络的实际开销。

5.3 不同类型虚拟网对映射成功率的影响

之前的研究集中在横向比较不同算法之间的映射成功率和收益开销上，而没有考虑不同类型的虚拟网请求对算法性能的影响。实际上，虚拟网请求类型存在着很大的不同，有的虚拟网请求倾向于占用节点能力，如 P2P 缓存系统、内容中心网络等，而有的虚拟网则倾向于占用较大的带宽，如 IPTV、VoIP 等。有的虚拟网节点之间的连通度较高，而有的虚拟网较为稀疏。实际上，不同类型的虚拟网请求，对算法的执行效率有着显著影响。本文进行了 4 组实验，研究不同类型虚拟网请求下几种算法的映射成功率的变化。

第 1 组实验模拟虚拟网倾向占用较大节点资源的情况。图 7 为虚拟网请求对节点能力需求逐渐增大的情况下映射成功率的变化。在实验中，将虚拟网请求的节点和链路的能力需求分别设置在 [0, x] 和 [0, 50] 区间的均匀分布上，x 为虚拟节点 CPU 需求分布区间的上限，即图 7 中的 x 坐标变量。随着 x 的增大，虚拟网请求对节点能力的需求逐渐增大。实验中其他的所有条件保持不变。随着 x 的增大，各个算法的效率（映射成功率）会发生不同的变化。从图 7 总体来看，随着 CPU 需求逐渐增大，映射的成功率会逐渐降低，但是不同的算法效率下降的速度不同。当对节点能力需求逐渐增大时，基于接近度和拓扑势的 2 种算法的效率相对其他 2 种

算法下降较慢, 当 $x \geq 50$ 时, 算法效率明显优于其他算法 4%~10% 左右。

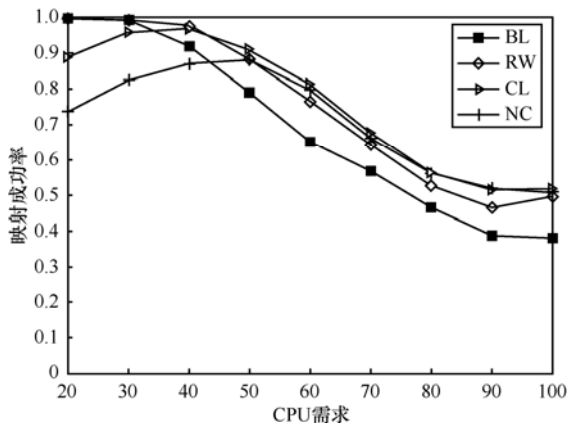


图 7 映射成功率随 CPU 需求增大的变化

第 2 组实验模拟了虚拟网对带宽需求不同的情况下, 对虚拟网映射成功率的影响。图 8 反映了虚拟网请求对链路能力需求逐渐增大的情况下映射成功率的变化。与第 1 组设置类似, 在保持实验中其他条件不变的情况下, 虚拟网节点与链路能力分别设置在 $[0, 50]$ 与 $[0, x]$ 上, x 为虚拟链路带宽需求分布区间的上限, 即图 8 中的 x 坐标变量。从图 8 中来看, 随着带宽需求的逐渐增大, 映射的成功率也是逐渐降低, 不同算法效率下降速度不同。在带宽需求上限处于 $[20, 60]$ 时, RW、CL、NC 3 种算法与基准算法相比, 均具有优势, 而当带宽需求上限大于 60 时, 3 种算法对基准算法的优势已不明显。

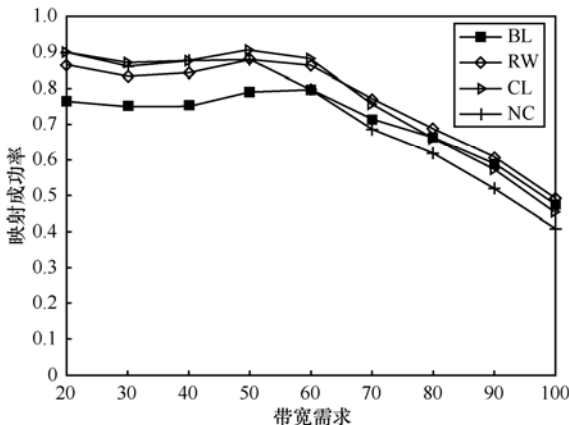


图 8 映射成功率随带宽需求增大的变化

第 3 组实验则考虑虚拟网的节点数目增多时, 映射成功率的变化情况。在实验中, 保持其他参数不变, 节点之间的连接概率不变, 保持为 0.5, 逐

渐增大虚拟网的节点数目分布的区间 $[2, x]$, 从 $x=5$ 增大到 $x=40$ 。从图 9 中可以看出, 基于接近度的算法在图中较大范围 $[5, 25]$ 内保持了最高的映射率 (与基准算法相比, 高 5%~10%), 基于拓扑势的算法, 则与参考算法 RW 效率基本相同, 在节点数目较多 ($x > 25$) 时, 具有一定优势。可见当虚拟网需求规模扩大时, 本文中提出的算法具有很好的顽健性。

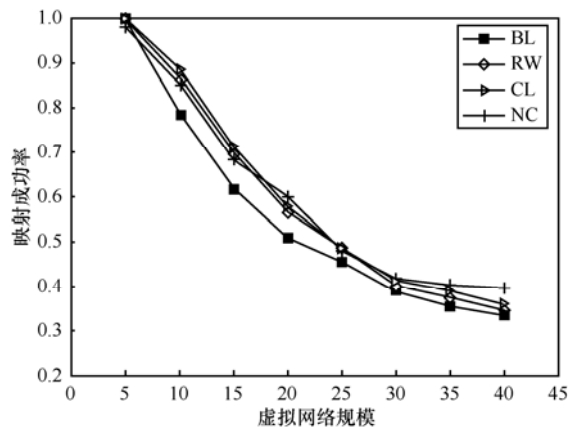


图 9 映射成功率随虚拟网规模增大的变化

第 4 组实验考察了虚拟网络的节点连通度对算法效率的影响。图 10 显示了节点连通度逐渐增大时, 算法效率的变化。在保持虚拟网中节点数目分布 $[2, 10]$ 不变的情况下, 逐渐增大虚拟节点之间的联接概率, 从 0.1 增大到 1.0 (全连通), 实验中其他参数保持不变。图 10 中显示, 随着节点连通度的增加, 导致虚拟链路的需求增大, 算法的效率会有所降低, 但没有第 3 组实验中虚拟节点数目增多时变化明显。这个结果说明与虚拟链路相比, 算法效率对虚拟节点数目的变化更敏感。

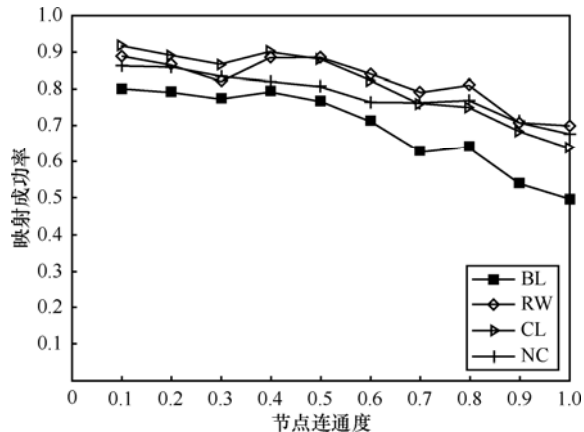


图 10 映射成功率随节点连通度增大的变化

从这里的分析本文也能看出虚拟网映射问题的多目标特性, 很难找出一种算法在所有的情况下均取得明显的效果。不过, 通过实验和上面的分析可以看出, 本文提出的算法, 在大多数情况下保持了较好的效率, 具有较大的适用范围。而由于虚拟网请求类型本身的多样性, 在不同的需求和目的下, 采用不同的算法进行资源分配具有一定的必要性。

6 结束语

本文主要围绕可重构网络环境下虚拟资源分配的问题展开讨论, 本研究首次将社会网络研究中的网络中心度理论与虚拟网络映射算法进行交叉融合, 并借鉴数据场理论中的拓扑势思想, 对传统的节点接近度概念进行了改进, 以同时描述局部的节点链路资源属性和全局的网络拓扑特性, 并将基于传统接近度和拓扑势的方法作为先验知识, 指导虚拟网映射方法。为了验证算法的有效性, 在本领域内公测的仿真环境下进行实验与算法比对分析, 仿真结果表明, 传统接近度算法成功地提高了虚拟网映射成功率, 提高了物理网络的收益。而拓扑势算法虽然映射成功率略低于传统接近度算法, 但不低于已有文献中提出的算法。与传统接近度算法及已有算法相比, 拓扑势算法明显降低了物理网络的开销, 提高了资源利用率。

本文算法重点关注如何将网络拓扑分析与节点映射贪婪算法相结合, 以提高映射成功率、降低物理网络开销方面的问题, 而没有考虑映射过程中的位置信息、物理资源的定价等其他问题, 下一步工作将重点关注如何扩展算法以考虑虚拟网映射过程中更多的限制条件。

参考文献:

- [1] SCHAFFRATH G, WERLE C, PAPADIMITRIOU P, *et al.* Network virtualization architecture: proposal and initial prototype[A]. Proceedings of the 1st ACM Workshop on Virtualized Infrastructure Systems and Architectures[C]. 2009. 63-72.
- [2] GUO C, LU G, WANG H, *et al.* Secondnet: a data center network virtualization architecture with bandwidth guarantees[A]. The 6th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies[C]. ACM, 2010.
- [3] CHOWDHURY N, BOUTABA R. A survey of network virtualization[J]. Computer Networks, 2010, 54(5): 862-876.
- [4] 刘强, 汪斌强, 徐恪. 基于构件的层次化可重构网络构建及重构方法[J]. 计算机学报, 2010, 33(9): 1557-1568.
LIU Q, WANG B, XU K. Construction and reconfiguration scheme of the hierarchical reconfiguration network based on the components[J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(9): 1557-1568.
- [5] 齐宁, 汪斌强, 郭佳. 逻辑承载网构建方法的研究[J]. 计算机学报, 2010, 33(9): 1533-1540.
QI N, WANG B, GUO J. Research on construction methods of logical carrying network[J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(9): 1533-1540.
- [6] FEAMSTER N, GAO L, REXFORD J. How to lease the internet in your spare time[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(1): 61-64.
- [7] Global environment for network innovations (GENI)[EB/OL]. <http://www.geni.net>, 2012.
- [8] MCKEOWN N, ANDERSON T, BALAKRISHNAN H, *et al.* OpenFlow: enabling innovation in campus networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communications Review, 2008, 38(2): 69-74.
- [9] BAVIER A, FEAMSTER N, HUANG M, *et al.* In VINI veritas: realistic and controlled network experimentation[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2006, 36(4): 3-14.
- [10] YU M, YI Y, REXFORD J, *et al.* Rethinking virtual network embedding: substrate support for path splitting and migration[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(2): 17-29.
- [11] CHOWDHURY N, RAHMAN M, BOUTABA R. Virtual network embedding with coordinated node and link mapping[A]. Proc IEEE INFOCOM[C]. 2009. 783-791.
- [12] CHENG X, SU S, ZHANG Z., *et al.* Virtual network embedding through topology-aware node ranking[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41(2): 38-47.
- [13] ZHU Y, AMMAR M. Algorithms for assigning substrate network resources to virtual network components[A]. Proc IEEE INFOCOM[C]. 2006. 1-12.
- [14] HOUIDI I, LOUATI W, ZEGHLACHE D. A distributed virtual network mapping algorithm[A]. Proc ICC'08[C]. 2008. 5634-5640.
- [15] FREEMAN L. Centrality in social networks conceptual clarifica-

tion[J]. Social Networks, 1979, 1(3): 215-239.

[16] LI D, DU Y. Artificial Intelligence with Uncertainty[M]. CRC Press. 2008.

[17] 淦文燕, 赫南, 李德毅等. 一种基于拓扑势的网络社区发现方法[J]. 软件学报, 2009, 20(8): 2241-2254.

GAN W, HE N, LI D Y, *et al.* Community discovery method in networks based on topological potential[J]. Journal of Software, 2009, 20(8): 2241-2254.

[18] CORMEN T, LEISERSON C, RIVEST R, *et al.* Introduction to Algorithms[M]. Second Edition. Cambridge: Cambridge MIT Press, 2001. 386-389.

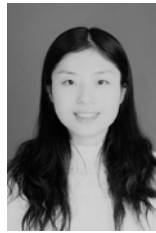
[19] CORMEN T, LEISERSON C, RIVEST R, *et al.* Introduction to Algorithms[M]. Second Edition. Cambridge: Cambridge MIT Press, 2001. 636-640.

[20] ZEGURA E, CALVERT K, BHATTACHARJEE S. How to model an internet network[A]. Proceedings of IEEE INFOCOM[C]. 1996. 594-602.

作者简介:



王子厚 (1985-), 男, 河北衡水人, 中国科学院声学研究所博士生, 主要研究方向为网络虚拟化、云计算、下一代互联网等。



韩言妮 (1981-), 女, 山东烟台人, 博士, 中国科学院声学研究所助理研究员, 主要研究方向为网络虚拟化与虚拟资源管理。



林涛 (1978-), 男, 河南焦作人, 博士, 中国科学院声学研究所副研究员, 主要研究方向为互联网体系结构和未来网络。



徐月梅 (1986-), 女, 广西梧州人, 中国科学院声学研究所博士生, 主要研究方向为网络虚拟化和服务计算等。



唐晖 (1970-), 男, 山东潍坊人, 博士, 中国科学院声学研究所研究员、博士生导师, 主要研究方向为未来网络、宽带无线移动多媒体和物联网。