

网络虚拟化环境中虚拟网络的嵌套映射算法^{*}

卿苏德^{1,2}, 廖建新^{1,2+}, 朱晓民^{1,2}, 王敬宇^{1,2}, 戚琦^{1,2}

¹(网络与交换技术国家重点实验室(北京邮电大学), 北京 100876)

²(东信北邮信息技术有限公司, 北京 100191)

Virtual Network Embedding Algorithms in the Network Virtualization Environment

QING Su-De^{1,2}, LIAO Jian-Xin^{1,2+}, ZHU Xiao-Min^{1,2}, WANG Jing-Yu^{1,2}, QI Qi^{1,2}

¹(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology (Beijing University of Posts and Telecommunications), Beijing 100876, China)

²(EBUPT Information Technology Co., Ltd., Beijing 100191, China)

+ Corresponding author: E-mail: liaojianxin@ebupt.com

Qing SD, Liao JX, Zhu XM, Wang JY, Qi Q. Virtual network embedding algorithms in the network virtualization environment. *Journal of Software*, 2012, 23(11): 3045-3058 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4217.htm>

Abstract: Network virtualization allows multiple isolated virtual networks to run simultaneously on a shared substrate infrastructure to provide diversifying services to the end user, solving the Internet ossification problem. However, a major challenge is efficiently mapping multiple virtual networks with different topologies into a shared infrastructure, named the virtual network embedding problem. This paper surveys the current literature primarily according to the composition of the infrastructure. Firstly, the concept and feature of network virtualizations are elaborated, and the corresponding model of virtual network embedding is formulated. Secondly, the latest research progress of virtual network embedding algorithms is reviewed according to the composing way of infrastructure, the integrity of problem space, the number of embedding stage and so on. Finally, the potential future research directions are outlined in the aspects of fairness, scalability, high utilization and trust.

Key words: network virtualization; virtual network embedding; ossification; next generation Internet; virtual private network

摘要: 网络虚拟化技术可以在共用的底层网络基础设施上同时构建多个彼此隔离的虚拟网络,为用户提供差异化服务,从而解决现有因特网的僵化问题。然而,一个重要的挑战是,如何在共用的基础设施中高效地映射多个具有不同拓扑的虚拟网络,即虚拟网络的嵌套映射问题。主要根据基础设施的构成方式对现有的虚拟网络映射算法进行了综述。首先,阐述了网络虚拟化的概念、特点以及相应的虚拟网络映射模型;其次,按照基础设施的构成方式、问题空间完整性、映射阶段数等方面梳理了嵌套映射算法的最新研究进展;最后,对虚拟网络映射算法在公平性、扩展性、高利用率、信任度等未来可能的发展方向进行了展望。

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(61072057, 61101119, 61121001, 61271019, 60902051); 国家科技重大专项(2011ZX03002-001-01); 长江学者和创新团队发展计划(IRT1049)

收稿时间: 2011-03-24; 修改时间: 2011-06-20; 定稿时间: 2012-04-09

关键词: 网络虚拟化;虚拟网络嵌套映射;僵化;下一代因特网;虚拟专用网

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

1 网络虚拟化概述

网络虚拟化是一种新兴的网络技术.它通过虚拟化技术对共用的底层基础设施(infrastructure)进行抽象并提供统一的可编程接口,将多个彼此隔离且具有不同拓扑的虚拟网络同时映射到共用的基础设施上,为用户提供差异化服务.网络虚拟化技术通过租借底层基础设施切片(slice)的方式,为服务提供商(service provider,简称 SP)提供网络端到端的控制权,加快了新技术和高级应用的开发和部署进度,促进了下一代因特网的发展和演进.最近几年,网络虚拟化技术受到了越来越多的关注^[1-6],与此相关的研究项目^[7-10]也相继得以开展.

1.1 从虚拟专用网到网络虚拟化

虚拟网络并不是一个全新的概念,它起源于虚拟专用网(virtual private network,简称 VPN)技术.虽然 VPN 技术已经在公共网络之上取得了巨大的成功,但它仍存在着很多局限性.例如,

- 现有 VPN 技术大都基于 IP 协议,不支持多种异构网络的互联互通.
- 在一般情况下,虚拟网络之间并没有实现完全的、端到端的隔离.
- 在运营模式上,VPN 技术并没有将基础设施提供商从服务提供商中抽象出来.

考虑到上述不足之处,网络虚拟化凭借虚拟化技术,如图 1 所示,将底层的网络基础设施抽象成相应的虚拟底层(virtualized substrate),通过租用虚拟资源切片的方式,在共用的底层基础设施上部署了两个不同拓扑结构、彼此彻底隔离的虚拟网络,如图中 Virtual network 1 和 Virtual network 2 所示.

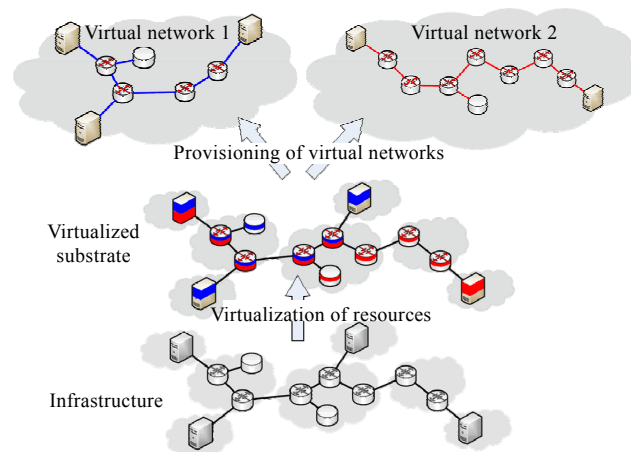


Fig.1 An emample of network virtualization

图 1 网络虚拟化示例

从本质上讲,虚拟化技术在上层应用和底层基础设施之间提供了一种抽象关联,使得具体的硬件资源对上层应用透明,而上层应用则将其使用的硬件资源视为自己的专属资源.最近几年,日趋成熟的虚拟化技术在越来越多的应用环境中得以使用.此外,文献[11-13]已开始探索网络虚拟化在商用硬件上的实现技术,预示着在现实网络中应用网络虚拟化技术的愿景即将成为现实.

1.2 网络虚拟化的技术特征

理想中的网络虚拟化技术应具有以下 4 大特性^[4]:

- (1) 强隔离性(isolation):VPN 在边缘网络对虚拟网络进行了隔离,在公用互联网上的数据传输仍然依赖尽力而为的传输机制.此外,PlanetLab 切片中的多个虚拟机由于共享 1 个 IP 地址,只能通过 IP 数据包中携带数据,以达到复用端口的目的.这些隔离并不彻底.相反地,网络虚拟化具有强隔离性.例如,Trellis^[11]使用 GRE(generic routing encapsulation)协议封装以太网帧,通过复用 MAC 地址,提供虚拟的以太网链接,实现彻底的隔离.在这种情况下,即使共用基础设施中的某个虚拟网络遭受攻击^[14],共存的其他虚拟网络也不会受到任何影响.此外,虚拟化的链路层给虚拟网络提供了独立的编程能力,可以不依赖 IP 技术而自定制协议.
- (2) 高扩展性(scalability):通过虚拟化技术,网络虚拟化将底层基础设施抽象为功能实体,为上层屏蔽了底层基础设施之间的差异,有利于异构网络的互联互通.此外,网络虚拟化为上层应用提供了端到端的访问权、控制权以及统一的编程接口,有助于新技术的实现.
- (3) 快速部署(deployment):传统因特网是由多个运营商构成的.在因特网上大范围地部署一个新的协议,需要多个运营商的协作.然而,由于多个运营商的利益导向不一致,跨域部署并不是一件简单的事情.网络虚拟化通过租用虚拟资源切片的方式在多个自治域上构建虚拟网络,本身具备大范围快速部署的特性.
- (4) 促进创新(innovation):传统因特网在取得巨大成功的同时,越来越难以满足业务多样化的需求.此外,传统因特网的僵化特性要求新的网络协议标准和基础设施向后兼容,严重阻碍了创新.网络虚拟化的出现改变了这一现状.在网络虚拟化环境中,底层基础设施可以摆脱以往因特网基础架构的束缚,以多样化的联网方式组建自定制的网络体系结构,促进因特网的创新和演进.

1.3 网络虚拟化的业务角色

底层基础设施通过网络虚拟化技术映射为多个虚拟网络.如图 2 所示,网络虚拟化的商业模型中包括 4 种不同的业务角色^[4]:

- 基础设施提供商(infrastructure provider):负责部署、管理和维护底层的物理网络资源.基础设施提供商在使用虚拟化技术将底层物理资源抽象成功能实体,提供统一编程接口的同时,为上层屏蔽底层基础设施的差异,并将物理资源分割成多个虚拟切片,供不同的服务提供商使用.此外,基础设施提供商之间可相互通信、相互协作,为服务提供商创建一个完整的跨域的底层基础设施.
- 虚拟网络提供商(virtual network provider):为了满足服务提供商的需求,在 1 个或多个基础设施提供商中发现和组合虚拟资源.虚拟网络提供商作为基础设施提供商与服务提供商之间的中介角色,简化了基础设施提供商和服务提供商之间的供需匹配过程.虚拟网络提供商将虚拟资源组合成一个网络容器,但并不在网络容器中部署协议.
- 服务提供商(service provider):在虚拟网络中部署自定制的协议,并负责运行、管理和维护虚拟网络.服务提供商根据服务的特点(例如 CPU 资源、内存资源、带宽资源、时延要求、地理位置等),生成虚拟网络请求,并将请求转发给虚拟网络提供商,由其组建虚拟网络.无论虚拟网络是否跨越了多个基础设施提供商的域,服务提供商对整个虚拟网络都有一个统一的视图.
- 终端用户(end users):与现有的互联网用户类似,终端用户接入虚拟网络享用服务.其区别在于,在网络虚拟化环境中,面对多个服务提供商提供的同类服务,终端用户可以自主选择服务进行接入.

如图 2 所示,基础设施提供商提供了一套共用的底层基础设施.其中,链路上的数字及其括号里的数字分别代表了该链路的总带宽和剩余带宽.长方形里的数字及其括号里的数字分别代表了该服务器 CPU 的总资源和剩余资源.在虚拟网络请求中,正方形里的数字代表虚拟节点的 CPU 资源需求量,链路上的数字代表虚拟链路的带宽需求量.虚拟网络提供商收到了两个服务提供商的虚拟网络请求.虚拟网络提供商将虚拟网络请求转发给基础设施提供商并由其进行映射.最后,服务提供商在虚拟网络上部署协议并构建服务.终端用户可以通过查询代理服务器获取相应的虚拟网络接入点.在图 2 中,终端用户 1 同时接入了两个虚拟网络.

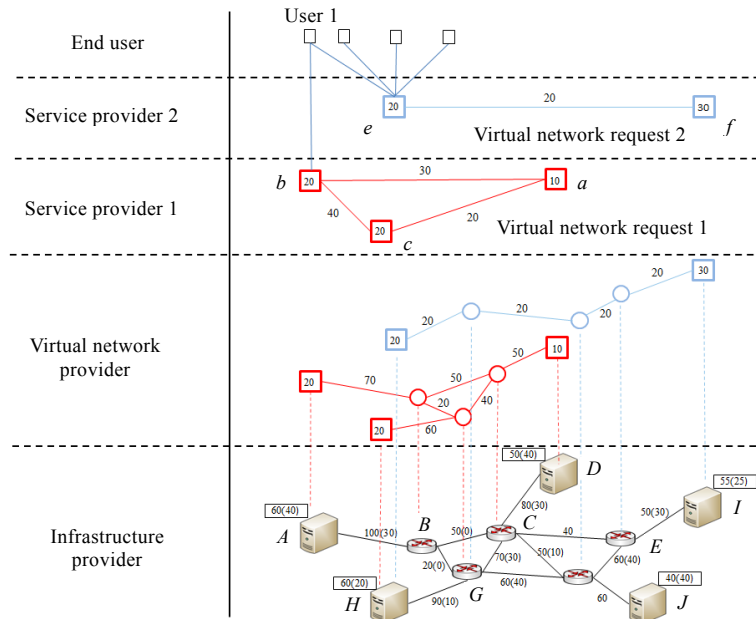


Fig.2 An example of virtual network embedding
图 2 虚拟网络嵌套映射示例

2 虚拟网络的嵌套映射算法建模

虚拟网络的嵌套映射是指在不破坏底层资源约束的前提下,如何将多个具有不同拓扑的虚拟网络同时映射到共用的基础设施中,并且保证底层资源的有效利用性.本节将详细介绍虚拟网络的嵌套映射模型,表 1 是嵌套映射模型中各个变量和函数的符号说明.

Table 1 Notations of virtual network embedding model
表 1 虚拟网络嵌套映射模型的符号说明

| | | | |
|--------------|------------|---------------|-----------|
| G^S | 底层网络基础设施 | G^V | 虚拟网络请求 |
| N^S | 物理节点集合 | N^V | 虚拟节点集合 |
| L^S | 物理链路集合 | L^V | 虚拟链路集合 |
| n^s | 一个物理节点 | l^s | 一条物理链路 |
| p^s | 一条物理路径 | f | 一条网络流 |
| $R^N(\cdot)$ | 节点剩余资源函数 | $R^E(\cdot)$ | 链路剩余资源 |
| $MN(\cdot)$ | 节点映射函数 | $ME(\cdot)$ | 链路映射函数 |
| $MF(\cdot)$ | 流映射函数 | t | 时刻 |
| $u(\cdot)$ | CPU 效能需求函数 | $b(\cdot)$ | 链路带宽需求函数 |
| $Rev(\cdot)$ | 总收益函数 | $Cost(\cdot)$ | 总开销函数 |
| Φ | 长期平均收益 | Γ | 长期 R/C 比率 |
| Ω | 虚拟网络请求接受率 | | |

我们将底层物理网络建模为一个带权值的无向图,记为 $G^S=(N^S,L^S)$.其中, N^S 是物理节点的集合, L^S 是物理链路的集合.每一个物理节点 $n^s \in N^S$ 具有相应的 CPU 能力 $u(n^s)$.相邻物理节点 i 和 j 之间的物理链路 $l^s(i,j)$ 具有相应的带宽值 $b(l^s)$.

同样地,我们将虚拟网络请求建模为一个带权值的无向图,记为 $G^V=(N^V,L^V)$.其中, N^V 是虚拟节点的集合, L^V 是虚拟链路的集合.每一个虚拟网络请求定义了虚拟节点 n^v 的 CPU 效能需求量 $u(n^v)$ 、虚拟链路 l^v 的带宽需求量 $b(l^v)$.其中, $n^v \in N^V, l^v \in L^V$.除此之外,每个虚拟网络请求都有一定的生命周期 T .假设开始时间为 t_0 ,当 $t_0 \leq t \leq t_0 + T$

时,虚拟网络占用底层物理资源.当 $t > t_0 + T$ 时,基础设施提供商将释放该虚拟网络占用的底层资源,供将来到达的虚拟网络使用.虚拟网络的映射包括节点映射和链路映射.

2.1 节点映射

对于同一个虚拟网络请求,每一个虚拟节点 n^v 映射至不同的物理节点上,即同一个虚拟网络请求中的每个虚拟节点独占底层网络中的一个物理节点.如果多个虚拟节点归属不同的虚拟网络请求,则它们可以在底层网络中的同一个物理节点上共存.在时刻 t ,对于所有的 $n^v \in N^V$,有 $MN_t(n^v) = n_t^s \in N^S$. 节点资源限制包括 CPU 能力、内存大小、磁盘空间、地理位置等.文献[15-22]使用 CPU 能力值作为节点的资源限制.因此,

- t 时刻物理节点 $n_t^s \in N^S$ 的 CPU 剩余能力为

$$R_t^N(n_t^s) = u(n_t^s) - \sum_{\forall n^v, MN_t(n^v) = n_t^s} u(n^v) \quad (1)$$

- 节点映射的约束条件为

$$\{u(n^v) \leq R_t^N(n_t^s)\} \quad (2)$$

我们将符合公式(2)的物理节点集合定义为 $A_t^S(n^v)$,将与物理节点 n_t^s 直接相连的所有链路集合定义为 $L(n_t^s)$.

在图 2 中,虚拟网络请求 1 的节点映射关系为 $MN_1(a)=D, MN_1(b)=A$ 和 $MN_1(c)=H$;虚拟网络请求 2 的节点映射关系为 $MN_2(e)=H$ 和 $MN_2(f)=I$.其中,只要底层物理节点有足够的资源,归属于不同虚拟网络请求的多个虚拟节点(虚拟网络请求 1 的节点 c 和虚拟网络请求的节点 e)就可以同时在物理节点 H 上共存,共同使用物理节点 H 的物理资源.

2.2 链路映射

令 P^S 为物理网络中的路径集合,其中,物理节点 m 至物理节点 n 的路径记为 $p^s(m,n) \in P^S$.假设在时刻 t ,虚拟链路 $l^v \in L^V$ 有映射关系:

$$MN_t(l^v) = (f_1, f_2, \dots, f_k) \quad (3)$$

即,虚拟链路 l^v 的映射由 k 条网络流 f_i 实现.其中, $1 \leq i \leq k$, 每条网络流 f_i 对应底层网络中的一条物理路径 p^s , 即

$$MF(f_i) = p_i^s \quad (4)$$

当底层网络不支持路径切分时,1 条虚拟链路 l^v 只能映射至 1 条网络流上,此时, $k=1$;当底层网络支持路径切分时,1 条虚拟链路 l^v 可以映射至多条网络流上,此时, $k \geq 1$.其中, k 条网络流对应的 k 条路径之间并非完全独立,我们应该尽可能地选择相关度小的多条路径^[23].

物理链路 l^s 的剩余带宽为

$$R_t^E(l^s) = b(l^s) - \sum_{\forall f_i, l^s \in MF(f_i)} b(f_i) \quad (5)$$

物理路径 $p^s \in P^S$ 的可用带宽为

$$R_t^E(p^s) = \min_{l^s \in p^s} R_t^E(l^s) \quad (6)$$

虚拟链路映射的约束条件为

$$bw(l^v) = \sum_{i=1}^k bw(f_i) \quad (7)$$

$$bw(f_i) \leq R_t^E(p_i^s) \quad (8)$$

在图 2 中,

- 虚拟网络请求 1 的链路映射关系为

$$p_1^s(a,b) = \overline{DCBA}, p_1^s(a,c) = \overline{DCGH}, p_1^s(b,c) = \overline{ABGH}, p_2^s(b,c) = \overline{ABCGH}.$$

- 虚拟网络请求 2 的链路映射关系为

$$p_i^s(e, f) = \overline{HGFEI},$$

其中, $p^s(b, c)$ 包含两条路径向量. 因为映射虚拟链路 ac 之后, 虚拟链路 bc 找不到合适(需求为 40)的映射路径, 但由于底层物理网络支持路径切割, 原本不能映射的虚拟链路 bc 通过使用两条路径 \overline{ABGH} 和 \overline{ABCGH} 实现了映射. 其中, 每条路径的占用带宽为 20.

2.3 目标函数

基础设施提供商将底层网络资源租用给服务提供商以获取利润. 在长期的运营中, 基础设施提供商希望尽可能多地接受虚拟网络请求, 最大化收益, 并且尽可能地减少映射开销, 维持底层网络的负载均衡. 这就是虚拟网络嵌套映射算法的主要目标. 此外, 在收益相当的情况下, 基础设施提供商更倾向于使用虚拟网络接受率高和映射开销低的映射算法. 文献[15–18]中给出了以下定义:

- 虚拟网络请求带来的收入为

$$Rev(G^v) = \sum_{n^v \in N^v} u(n^v) + \sum_{l^v \in L^v} b(l^v) \quad (9)$$

- 虚拟网络请求产生的映射开销为

$$Cost(G^v) = \sum_{n^v \in N^v} u(n^v) + \sum_{l^v \in L^v} \sum_{i=1}^k b(f_i) \cdot hops(f_i) \quad (10)$$

其中, $hops(f_i)$ 是流 f_i 对应的物理路径 p_i^s 的跳数.

- 长期平均收益为

$$\Phi = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T Rev(G^v)}{T} \quad (11)$$

- 长期 R/C (revenue/cost) 比率为

$$\Gamma = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T Rev(G^v)}{\sum_{t=0}^T Cost(G^v)} \quad (12)$$

- 虚拟网络请求接受率为

$$\Omega = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T VNR_a}{\sum_{t=0}^T VNR_t} \quad (13)$$

其中, VNR_a 代表已经接受的虚拟网络请求数, VNR_t 代表到达的虚拟网络请求总数.

3 单个基础设施提供商域内的映射算法分类

单个基础设施提供商域内的虚拟网络映射问题, 是指在一个共有的基础设施之中, 基础设施提供商能够掌握全局的资源信息, 并期望以一种高效的资源使用方式映射尽可能多地具有不同拓扑的虚拟网络, 以获取更多的盈利. 其中, 每个虚拟网络的节点和链路具有不同的资源需求. 底层网络的物理资源不变, 底层网络中的每个物理节点以切片的方式租借给多个虚拟网络. 在一个虚拟网络中, 每个虚拟节点以独占的方式使用底层网络的物理节点.

虚拟网络的嵌套映射问题与 VPN 的规划问题^[24,25]不同: VPN 规划问题仅仅考虑带宽的限制, 而嵌套映射需要同时考虑链路和节点的资源限制. 虚拟网络的嵌套映射问题与网络仿真实验床映射问题(network testbed mapping problem)^[26]也有区别: 前者可以在多个虚拟网络之间共享底层网络的同一个物理节点, 即一个物理节点上可以同时存在隶属于不同虚拟网络的多个虚拟节点; 而后者在多个虚拟网络之间并不具备共享特性, 即只要一个虚拟网络占用了物理节点, 其他虚拟网络都不能使用该物理节点.

由于虚拟网络的嵌套映射问题存在多个目标和多个限制条件, 即使预先知道所有的虚拟网络请求, 也难以找到一个最优的解决方案. 例如, 在满足带宽限制的前提下, 将节点映射至底层物理网络的问题可以降解为多路分割问题(multiway separator problem), 然而多路分割问题是 NP 问题^[27]; 预选节点, 在限制带宽资源的约束下寻

求链路映射方案的问题也是 NP 问题^[15].针对上述模型,现有的文献[15-22,28-30]提出了多种解决方案.表 2 比较了 2006 年~2011 年嵌套映射算法的研究进展.

Table 2 Comparison of virtual network embedding algorithms in a single infrastructure provider
表 2 单个基础设施提供商域内的虚拟网络映射算法比较

| | 模式 | 类型 | 准入控制 | 拓扑结构 | 目标函数 |
|--------|----|---------|------|----------|-------|
| 文献[15] | 在线 | 分离型 | 有 | 任意 | 收入和开销 |
| 文献[16] | 在线 | 分离型 | 有 | 任意 | 收入和开销 |
| 文献[17] | 在线 | 分离型 | 有 | 任意 | 收入和开销 |
| 文献[18] | 在线 | 分离型和整合型 | 有 | 任意 | 收入和开销 |
| 文献[19] | 在线 | 分离型 | 有 | 任意 | 收入和开销 |
| 文献[20] | 在线 | 整合型 | 没有 | 星状、辐射状拓扑 | 开销 |
| 文献[21] | 在线 | 整合型 | 有 | 任意 | 收入和开销 |
| 文献[22] | 在线 | 整合型 | 有 | 任意 | 重映射开销 |
| 文献[28] | 离线 | 分离型 | 没有 | 星状拓扑 | 开销 |
| 文献[29] | 在线 | 分离型 | 没有 | 流量矩阵 | 开销 |
| 文献[30] | 离线 | 分离型 | 没有 | 任意 | 负载平衡 |

由于虚拟网络嵌套映射的复杂性,目前的研究都使用启发式算法寻找解决方案.本文将虚拟网络的嵌套映射算法分为两类:限制问题空间的映射算法和不限问题空间的映射算法.

3.1 限制问题空间的映射算法

由于同时存在节点和链路的资源限制,并且每个虚拟网络请求的到达时间、资源需求信息都是不可预知的,在不破坏底层资源约束的前提下实现多个不同拓扑的虚拟网络的映射是一个巨大的挑战.因此,文献[28-30]采用忽略节点资源限制、忽略准入控制、假设已知虚拟网络请求信息等减少问题空间的方法,寻求启发式解决方案.

文献[28]在忽略节点资源限制、忽略准入控制和假设已知所有虚拟网络请求的前提下,将虚拟网络请求的拓扑局限在 Backbone-Star 拓扑,并且基于成对的流量约束,分别使用线性规划^[31]和混合整数二次规划(mixed interger quadratic programming)^[32]找出满足映射需求的物理路径和骨干节点.

文献[29]在忽略节点资源限制和忽略准入控制的前提下,将小型网络的通信矩阵建模成连续时间的马尔可夫决定过程^[33],通过模拟退火算法^[34]寻找映射开销最小的最优拓扑.文献[29]基于一直改变的、从不改变的和基于簇的策略,选择总映射开销最小的映射策略对网络进行重映射.

文献[30]在忽略准入控制和假设已知虚拟网络请求信息的前提下,使用节点潜能 $\pi(t,v)$ 衡量节点及其相连链路的负载程度.在将虚拟网络请求切割成多个星状(star)拓扑的子请求之后,根据节点潜能 $\pi(t,v)$ 使用自适应的贪婪算法找出星状拓扑中心节点的映射集合.该算法使用最短路径算法映射中心节点之间的虚拟链路,最后映射各个星状拓扑,实现整个虚拟网络的映射.文献[30]假设所有的虚拟资源需求都是相等的,忽略了业务的多样性和业务需求的差异性,并且在底层网络负载重的情况下不能有效地分配资源.

3.2 不限问题空间的映射算法

文献[15-22]在不限问题空间的前提下,寻找映射虚拟网络的解决方案.这一类方法又可以细分为分离型映射算法和整合型映射算法.分离型算法将虚拟网络的映射算法分为节点映射阶段和链路映射阶段.在节点映射阶段,映射算法选出满足各个虚拟节点资源需求的物理节点进行节点映射.在这个阶段,所有的虚拟节点都将映射至底层网络的物理节点上.在链路映射阶段,映射算法在已经映射的物理节点之间寻找 1 条或多条无环路径实现相关的虚拟链路映射.当底层网络不支持路径切割时,映射算法通过 K 条最短路径算法^[35]寻找可行流.当底层网络支持路径切割时,映射算法基于多商品流的线性规划^[36]进行求解.整合型映射算法则是在映射过程中同时考虑节点和链路的资源限制,即映射一个虚拟节点 n^v 时,不但需要考虑 n^v 的节点资源需求,而且要考虑 n^v 与已映射的虚拟节点之间的链路资源需求.在 n^v 的所有资源需求得到满足之后,才能映射下一个虚拟节点.这类

算法往往使用回溯的方法进行试探.

3.2.1 分离型映射算法

文献[15]率先提出分离型虚拟网络映射算法,将虚拟网络的映射过程分为节点映射和链路映射两个阶段.该文献在底层物理网络中引入路径切割和迁移技术,并借助该技术的灵活性,将切分虚拟网络的计算开销转移到底层物理网络,利用底层物理网络的多路径传输实现一条虚拟链路的映射.该文献在节点映射阶段使用贪婪算法,优先处理收益大的请求.在链路映射阶段,则在底层网络支持路径切割的情况下,使用基于多商品流的线性规划求解;否则,使用 K 条最短路径算法求解.该算法使用 CPU 能力和节点周围链路带宽之和的乘积作为节点资源可及性的评价标准:

$$H(n^s) = u(n^s) \cdot \sum_{l^s \in L(n^s)} b(l^s) \quad (14)$$

这种衡量标准容易将虚拟节点映射到一个 CPU 能力强而周围带宽弱的节点上,导致虚拟链路映射失败,从而影响映射性能.由于使用贪婪算法选择节点,该算法没有考虑节点之间的拓扑关系,可能将相距较近的虚拟节点映射至相距较远的物理节点,增加了链路映射开销,进而影响未来虚拟网络请求的接受率.

文献[16]认为,文献[15]将原本相互关联的节点映射和链路映射分开考虑会影响映射的性能.因此,文献[16]通过在节点映射阶段综合考虑链路的带宽限制,优化了节点映射算法.即,在节点映射阶段,结合地理位置限制条件,由物理网络结合元节点和元链接形成增广图(augmented substrate graph),使用混合整数规划法^[37]求解可行的节点映射.在链路映射阶段,则采用与文献[15]相同的算法.为了解规划问题,该算法将表示网络流是否通过某链路的布尔变量 x 松弛成正实数,最后使用确定性舍入算法和随机性舍入算法选择节点进行映射.确定性舍入算法将布尔变量 x 和相关流量 f 的乘积结果 p_x 作为节点的资源可及性评分,使用贪婪算法选取 p_x 最大的节点进行映射,这有可能选择一个布尔变量 x 大而相关流量 f 小的节点.随机性舍入算法将乘积结果 p_x 均一化为节点的选择概率,给予映射算法多种节点选择的可能性.因此在仿真结果中,随机性舍入算法优于确定性舍入算法,带来了更多的收益.文献[17]基于文献[16]的算法,在映射过程中通过拓扑感知技术识别物理网络中的瓶颈节点和链路,优化已映射的虚拟网络,弥补了文献[15,16]中忽略关键链路的不足.

文献[17]用拓扑感知技术优化已经映射的虚拟网络,文献[18]将拓扑感知技术用于优化节点映射过程.文献[18]将虚拟网络映射问题建模为一个马尔可夫随机游走模型,根据节点自身的资源可及性以及与其相连节点的资源可及性对节点进行评分.在节点映射阶段,文献[18]用贪婪算法将评分最高的物理节点和评分最高的虚拟节点进行匹配映射.在链路映射阶段,则采用与文献[15]相同的算法.由于马尔可夫随机游走模型,该算法很好地控制了映射节点之间的距离,减少了虚拟网络的映射开销,为将来的虚拟网络映射预留了更多资源.但当网络规模变大时,由于状态变换矩阵的收敛过程,该算法拥有较长的运行时间.马尔可夫随机游走模型也增加了与高分节点相邻的节点的评分,使得原本资源可及性较低的节点由于与高分节点相邻,也获得了较高的节点评分,容易导致链路映射阶段的失败.

在传统的虚拟网络嵌套映射问题中,对于多个虚拟网络请求,同一个物理节点是可以共享的.但对于同一个虚拟网络请求,每个虚拟节点都是以独占的方式使用底层网络中的物理节点.文献[19]创新性地提出底层物理节点可以重复映射同一个虚拟网络请求的多个虚拟节点,利用物理节点内部通信带宽无穷大的优势,减少虚拟链路的映射开销,提高虚拟网络请求的接受率.然而,将一个虚拟网络请求中的多个虚拟节点映射至同一个物理节点,在一定程度上改变了虚拟网络的拓扑,不适用于有地理位置要求的虚拟网络.

3.2.2 整合型映射算法

分离型映射算法在映射完所有虚拟节点之后,再进行相关虚拟链路的映射.将相互关联的节点映射和链路映射分开考虑,性能会受到影响.整合型映射算法将节点映射和链路映射作为一个整体考虑,规避了这种弊端.

整合型映射算法是可回溯的映射算法,即遍历所有满足映射需求的节点集合 $\mathcal{A}_i^s(n^s)$,寻找可行的链路映射:

- 如果找不到合适的链路映射,则回溯至上一次可行的节点映射方案进行重新计算;
- 如果找到了合适的链路映射,则将对应的节点加入至可映射集合,继续计算下一个节点的映射方案,直

到虚拟网络全部映射完毕为止。

当网络规模变大时,整合型映射算法的运行时间较长,甚至无法找到可行的映射方案.因此,限制回溯次数和搜索范围与获得更优性能是一个值得权衡的问题。

文献[20]基于多代理系统(multi-agent system)^[38]提出了分布式的嵌套映射协议,使用分布式算法同时映射节点和链路.然而,该文献假设底层物理网络有足够的资源满足所有到达的虚拟网络请求,即不采用任何准入控制.此外,虚拟网络的映射拓扑也仅仅局限于星型拓扑和辐射状(hub-and-spoke)拓扑。

文献[21]基于子图匹配算法^[39],率先提出了一种可回溯的整合型映射算法,在映射阶段同时考虑节点和链路的资源需求.与文献[20]不同的是,文献[21]是一种集中式的映射算法.由于从近到远地选择节点进行映射,一旦发现可行的节点映射则开始映射下一个虚拟节点,因此,该算法很好地控制了虚拟网络的映射成本,具有很高的R/C比率.然而,该算法并没有完备的起始节点选择算法,也没有设计相关的映射顺序.这增加了无效的回溯次数,降低了映射算法的性能。

文献[18]通过马尔可夫随机游走模型对虚拟网络和物理网络的节点进行评分,将评分最高的虚拟节点作为树的根节点映射至评分最高的物理节点上.然后,通过广度优先搜索算法建立映射顺序树,并在节点可行映射集合中进行遍历,回溯式寻找可行的映射方案.当映射节点 n_i^v 失败时,该算法回溯至映射树上相同层次的 n_{i-1}^v 进行重映射.然而,当 n_i^v 和 n_{i-1}^v 的父节点不相同,重映射 n_{i-1}^v 并没有有效地改进 n_i^v 的可行映射集合.在这种情况下,考虑重映射 n_i^v 的父节点可能是一种更好的回溯策略。

虚拟网络嵌套映射问题,是在底层物理网络拓扑、资源不变的情况下进行虚拟网络的映射.文献[22]讨论了在底层物理网络演进,以至拓扑和资源发生变化时,对已映射的虚拟网络进行重映射的优化问题.文献[22]将重映射的网络节点分为迁移节点和重映射节点(分别对应着迁移开销和重映射开销),并使用整合型映射算法寻求解决方案.该算法只讨论了链路延时需求相同的情况,然而在现实网络中,每条链路有着自己特定的延时需求.此外,该算法只关注必须重映射的节点.当底层网络发生改变时,已映射的虚拟网络可能找到更优的映射方案.是否可以在重映射的过程中迁移更多节点,使得虚拟网络的映射开销更小,为将来的虚拟网络映射预留更多的资源,值得进一步探讨。

4 多个基础设施提供商域内的映射算法分类

文献[15–22,28–30]讨论了一个基础设施提供商域内的嵌套映射问题.然而在现实生活中,因特网是由多个运营商(基础设施提供商)组成的.文献[40–42]对多个基础设施提供商共同提供底层基础设施的方式进行了研究。

图3描述了在多个基础设施提供商之间进行的嵌套映射流程:

- 基础设施提供商首先在虚拟网络提供商处注册登记,同时提交虚拟资源描述.服务提供商生成构建虚拟网络的资源请求,并将请求发送给虚拟网络提供商.虚拟网络提供商在收到请求后,进行资源发现和询价,并根据虚拟资源报价切分虚拟网络.
- 其后,服务提供商和多个基础设施提供商签署协议,由各个基础设施提供商将虚拟子网络映射至底层基础设施上.各个虚拟子网络之间建立域间连接,构成完整的虚拟网络.
- 最后,服务提供商在虚拟网络之上部署自定义的协议并提供服务.

有关多个基础设施提供商的嵌套映射算法可以根据维度分为两类:垂直维度和水平维度。

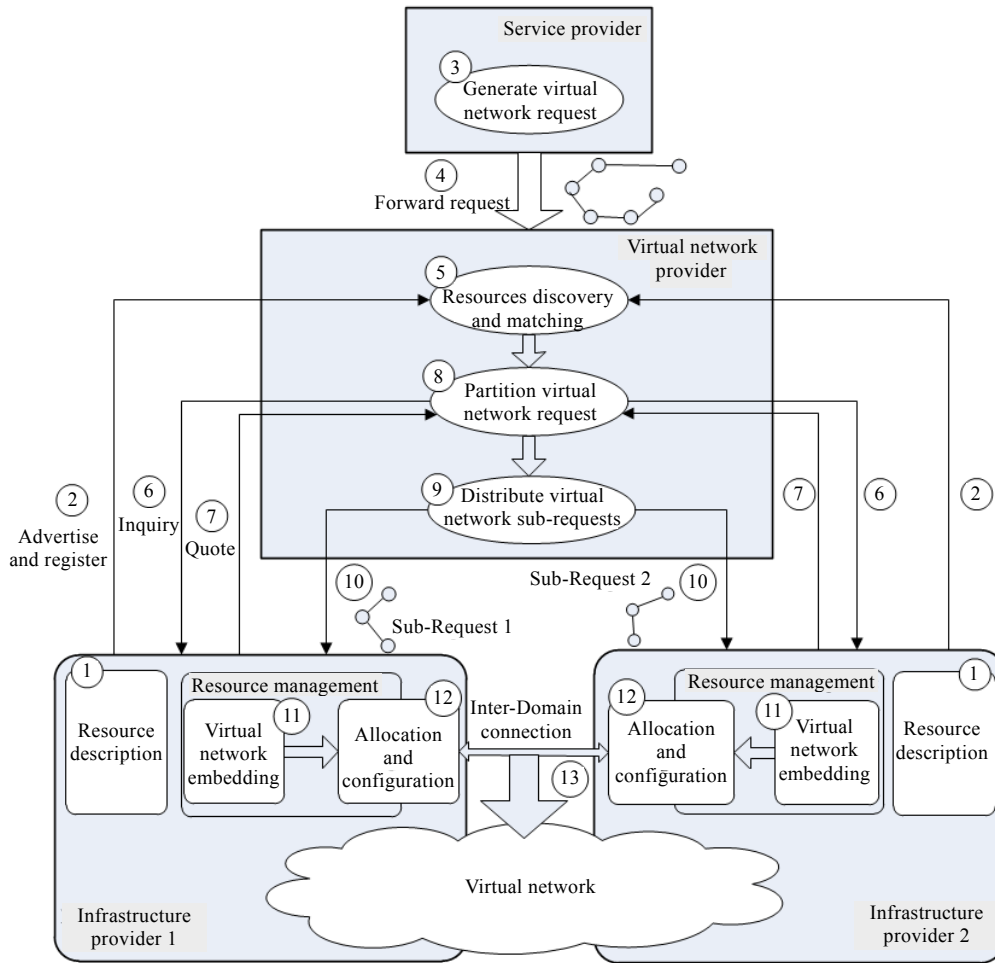


Fig.3 Virtual network embedding among multiple infrastructure providers

图 3 多个基础设施提供商的虚拟网络嵌套映射

4.1 垂直维度的多个基础设施提供商

所谓垂直维度的多个基础设施提供商,是指在一个地理区域内存在多个基础设施提供商,他们为了赢取虚拟资源的竞标而相互竞争.然而,每一个基础设施提供商都是私利的.为了实现收益最大化,基础设施提供商各自采用本地最优化策略,而这样的最优化策略并非全局的最优策略.此外,拓扑信息和资源信息是私有的,外界无从获取,基础设施提供商可能为了满足自己的利益需要,对外界捏造虚假信息,给实现全局最优增加困难.

因此,基础设施提供商们需要一种激励相容的机制,使其从全局角度做出正确的社会选择,将整个社会的福利最大化.

文献[40]将博弈论中的机制设计(mechanism design)^[43]引入到网络虚拟化环境中,在每个基础设施提供商只能控制一条物理链路的假设前提下,基于 Vickrey-Clarke-Groves(VCG)机制^[44],由各个基础设施提供商根据以下代价函数对所有物理链路进行报价:

$$c_i^E(l^s) = Cost_{edge}(G^S - l^s) - Cost_{edge}(G^S |_{l^s=0}) \tag{15}$$

激励相容的 VCG 机制,促使各个基础设施提供商按照商品的真实价值进行出价,使得基础设施提供商的利益和社会福利最大化的目标一致.然而,该文献没有考虑多个虚拟网络同时映射的实验场景,也没有考虑域间路径开

销对选路的影响。

文献[41]提出了一种根据竞价切分和映射虚拟网络的迭代算法,即 V-Mart 算法。与文献[40]不同,V-Mart 算法假设域间路径的开销为常量,基于密封的 Vickrey 拍卖^[43]机制,分两个阶段将一个虚拟网络切割成任意数目的子网络,分别进行映射。切割子网络的问题属于 k -割问题(K -cut problem),是一个 NP 问题^[45]。V-Mart 采用启发式算法寻求解决方案:在第 1 轮 Vickrey 拍卖中,由基础设施提供商对虚拟节点和虚拟链路进行报价,并根据竞价获胜者(基础设施提供商)切分虚拟网络;在第 2 轮 Vickrey 拍卖中,V-Mart 算法判断加入或移除一个虚拟节点及其相关链路是否可以获益,以此决定是否更改虚拟子网络的划分;最后,由各个基础设施提供商针对虚拟子网络进行最终报价,服务提供商选择各个虚拟子网络的竞价获胜者进行签约。

4.2 水平维度的多个基础设施提供商

水平维度的多个基础设施提供商,是指在不同的地理区域分布的多个基础设施提供商。他们相互通信、相互协作,构建一个全球范围的底层基础设施,供服务提供商使用。

文献[42]针对水平维度的多个基础设施提供商,提出了 PolyViNE 架构。与文献[41]相比,文献[42]是一种根据地域切分和映射虚拟网络的递归算法:服务提供商将虚拟网络请求转发给几个知名的基础设施提供商,由其收集虚拟网络的映射方案和报价。在对自己地理位置范围内的虚拟网络进行映射和报价后,知名的基础设施提供商将剩余的虚拟网络请求转发给其他地理位置的基础设施提供商,并收集相关报价和映射方案,直至虚拟网络请求得到完全映射,才将所有信息回送给服务提供商,并由服务提供商选择最优的映射方案。此外,PolyViNE 提出了按地域分级的寻址机制和地理位置感知的分发协议,使得基础设施提供商之间能够更好地转发和更新信息。

5 展望未来

对于网络虚拟化,特别是嵌套映射算法的研究而言,还存在很多有待解决的开放问题。

5.1 结合网络的拓扑属性提升映射算法性能

文献[18]利用节点之间的连接性提高了节点映射的合理性,有效地增加了虚拟网络的接受率和长期收益。然而,其他拓扑属性尚未得以利用,例如节点的度。度数高的节点拥有更大的概率来找到一条可行的路径实现链路映射。度数高的节点之间具有较少的跳数,有利于节省虚拟网络映射的开销。利用网络的拓扑属性改进节点映射的合理性,进而提升映射算法的性能,是一个值得关注的研究方向。

5.2 虚拟网络请求排队机制的公平性和优先级

基础设施提供商为了最大化收益,一般优先出价高、收益大的虚拟网络请求。然而,如果出价高(收益大)的请求一直存在,出价低(收益小)的请求则将处于饥饿状态。在这种情况下,基础设施提供商的利益得到了满足,但是不利于整个市场的公平竞争。同样地,虚拟网络承载的业务具有不同的业务特性和业务需求。不同业务特性的多类业务不加区分地在一个队列中排队是不恰当的。区分优先级,使用多队列的排队机制代替目前的单队列机制^[46,47],可以更好地满足不同业务的映射需求。此外,当底层网络负载重时,是否允许高优先级业务抢占低优先级业务的资源,也是一个值得权衡的问题。

5.3 重映射算法的周期

网络虚拟化在提供多个相互隔离的虚拟网络的同时,保证了各个虚拟网络的服务质量和安全性。然而,各个虚拟网络并不能保证网络资源的高利用率,而且空闲的网络资源不能提供给彼此隔离的其他虚拟网络使用,由此造成了总体资源利用率的下降。虽然可以通过重映射算法迁移虚拟节点^[48]重新分配资源,然而重映射算法属于网络规划问题,在时间粒度上无法适应瞬息万变的网络流量。如何在保证各个虚拟网络服务质量的同时最大化总体资源利用率,值得进一步加以探讨。

5.4 从服务提供商的角度思考嵌套映射算法

现有的虚拟网络映射算法都是从基础设施提供商利益最大化的角度出发,考虑如何使得可共存的虚拟网络数最多,而未从服务提供商的角度思考该问题.服务提供商的收益直接与使用其服务的终端用户数相关.在已知基础设施的租用费和用户的分布情况的前提下,服务提供商可以考虑如何在覆盖所有用户的同时减少部署开销^[49].此外,终端用户可能频繁地进入或离开网络,导致网络振荡.为了保证所有用户的接入及其服务质量,控制用户的接入延时,服务提供商需要重映射虚拟网络,进行服务迁移^[50].然而,迁移服务需要付出一定的代价,例如服务中断产生的开销.服务提供商如何在尽可能提高服务质量的同时控制成本、规避经济风险的问题值得深入研究.

6 总 结

网络虚拟化技术通过在共用的基础设施上同时构建多个彼此隔离的虚拟网络,赋予了各个服务提供商定制体系结构和网络协议的能力,加快了创新技术的部署和测试评估流程,从而有效地促进了下一代因特网的发展和演进.在网络虚拟化环境中,虚拟网络的嵌套映射需要同时考虑链路和节点的资源限制,极大地增加了该问题的复杂性.针对这一 NP 问题,解决方案从开始的限制问题空间的映射算法发展成如今的在不限限制,甚至改变问题空间的前提下实现虚拟网络映射的嵌套算法.不限限制问题空间的映射算法是未来研究的主要方向.该类算法还可以细分为分离型映射算法和整合型映射算法.对于分离型映射算法,由于在底层基础设施中引入了路径切割技术,链路映射阶段得到了极大的灵活性.因而,最近的研究主要关注改进资源可及性的评价标准以及优化节点映射的算法,这将成为一个重要的研究发展方向.对于整合型映射算法,由于需要考虑计算的复杂度,限制回溯上限与获得更好的性能是一个值得权衡的问题.减少不必要的回溯,制定更合理的映射顺序,将成为这个方向关注的重点.从总体上看,目前有关虚拟网络嵌套映射的算法以单个基础设施提供商的集中式算法为主,将来会向多个基础设置提供商之间的分布式算法发展.

References:

- [1] Anderson T, Peterson L, Shenker S, Turner J. Overcoming the Internet impasse through virtualization. *IEEE Computer*, 2005,38(4): 34–41.
- [2] Turner J, Taylor D. Diversifying the Internet. In: *Proc. of the GLOBECOM 2005*. St.Louis: IEEE, 2005. 755–760.
- [3] Feamster N, Gao LX, Rexford J. How to lease the Internet in your spare time. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2007,37(1):61–64.
- [4] Chowdhury M, Boutaba R. A survey of network virtualization. *Computer Networks*, 2010,54(5):862–876.
- [5] Carapinha J, Jiménez J. Network virtualization: A view from the bottom. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM VISA 2009*. Barcelona: ACM Press, 2009. 73–80.
- [6] Zhu W, Sun MJ. Research on network virtualization. *Telecommunications Network Technology*, 2010,36(9):19–23 (in Chinese with English abstract).
- [7] GENI: Global environment for network innovations. <http://www.geni.net/>
- [8] VINI: A virtual network infrastructure. <http://www.vini-veritas.net/>
- [9] The 4WARD project. <http://www.4ward-project.eu/>
- [10] Clean slate. <http://cleanslate.stanford.edu/>
- [11] Bhatia S, Motiwala M, Muhlbauer W, Mundada Y, Valancius V, Bavier A, Feamster N, Peterson L, Rexford J. Trellis: A platform for building flexible, fast virtual networks on commodity hardware. In: *Proc. of the ACM CoNEXT 2008*. Madrid: ACM Press, 2008. 1–6.
- [12] He JY, Rui ZS, Ying L, Lee CY, Rexford J, Chiang M. Davinci: Dynamically adaptive virtual networks for a customized Internet. In: *Proc. of the ACM CoNEXT 2008*. Madrid: ACM Press, 2008. 1–12.
- [13] Egi N, Hoerdet ME, Mathy L, Papadimitriou P, Greenhalgh A, Handley M, Huici F. A platform for high performance and flexible virtual routers on commodity hardware. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2010,40(1):127–128.

- [14] Mirkovic J, Reiher P. A taxonomy of DDoS attack and DDoS defense mechanisms. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2004,34(2):39–53.
- [15] Yu ML, Yi Y, Rexford J, Chiang M. Rethinking virtual network embedding: Substrate support for path splitting and migration. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2008,38(2):17–29.
- [16] Chowdhury M, Rahman MR, Boutaba R. Virtual network embedding with coordinated node and link mapping. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM 2009*. Rio de Janeiro: IEEE, 2009. 783–791.
- [17] Butt NF, Chowdhury M, Boutaba R. Topology-Awareness and Reoptimization Mechanism for Virtual Network Embedding. In: *Proc. of the Networking 2010*. Chennai: Springer-Verlag, 2010. 27–39.
- [18] Cheng X, Su S, Zhang Z, Wang H, Yang F, Luo Y, Wang J. Virtual network embedding through topology-aware node ranking. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2011,41(2):38–47.
- [19] Li W, Wu CM, Chen J, Ping LD. Virtual network mapping algorithm with node repeatable embedding and link splitting. *Telecommunications Science*, 2010,26(10):114–120 (in Chinese with English abstract).
- [20] Houidi I, Louati W, Zeghlache D. A distributed virtual network mapping algorithm. In: *Proc. of the IEEE ICC 2008*. Beijing: IEEE, 2008. 5634–5640.
- [21] Lischka J, Karl H. A virtual network mapping algorithm based on subgraph isomorphism detection. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM VISA 2009*. Barcelona: ACM Press, 2009. 81–88.
- [22] Cai ZP, Liu F, Xiao N, Liu Q, Wang ZY. Virtual network embedding for evolving networks. In: *Proc. of the GLOBECOM 2010*. Miami: IEEE, 2010. 1–5.
- [23] Liao JX, Wang JY, Li TH, Zhu XM. Introducing multipath selection for concurrent multipath transfer in the future Internet. *Computer Networks*, 2010,55(4):1024–1035.
- [24] Kumar A, Rastogi R, Silberschatz A, Yener B. Algorithms for provisioning virtual private networks in the hose model. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM 2001*. San Diego: ACM Press, 2001. 135–146.
- [25] Duffield NG, Goyal P, Greenberg A, Mishra P, Ramakrishnan KK, van der Merwe JE. Resource management with hoses: Point-to-cloud services for virtual private networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2002,10(5):679–692.
- [26] Ricci R, Alfeld C, Lepreau J. A solver for the network testbed mapping problem. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2003,33(2):65–81.
- [27] Haider A, Potter R, Nakao A. Challenges in resource allocation in network virtualization. In: *Proc. of the 20th ITC Specialist Seminar*. Hoi An: ITC, 2009. 1–9.
- [28] Lu J, Turner J. Efficient mapping of virtual networks onto a shared substrate. Technical Report, WUCSE-2006-35, Washington: Department of Computer Science and Engineering, Washington University, 2006. <http://www.cs.washington.edu/>
- [29] Fan J, Ammar M. Dynamic topology configuration in service overlay networks: A study of reconfiguration policies. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM 2006*. Barcelona: IEEE, 2006.
- [30] Zhu Y, Ammar M. Algorithms for assigning substrate network resources to virtual network components. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM 2006*. Barcelona: IEEE, 2006. 1–12.
- [31] Fingerhut A. Approximation algorithms for configuring nonblocking communication networks [Ph.D. Thesis]. Washington University in St. Louis, 1994.
- [32] Lazimy R. Mixed-Integer quadratic programming. *Mathematical Programming*, 1982,22(1):332–349.
- [33] Howard R. *Dynamic Programming and Markov Processes*. Cambridge: The MIT Press, 1960.
- [34] Kirkpatrick S. Optimization by simulated annealing: Quantitative studies. *Journal of Statistical Physics*, 1984,34(5):975–986.
- [35] Eppstein D. Finding the k shortest paths. In: *Proc. of the IEEE FOCS'94*. Santa Fe: IEEE, 1994. 154–165.
- [36] Ahuja RK, Magnanti TL, Orlin JB. *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1993.
- [37] Schrijver A. *Theory of Linear and Integer Programming*. New York: John Wiley & Sons Inc., 1986.
- [38] Tesauro TG, Chess D, Walsh W, Das R, Segal A, Whalley I, Kephart J, White S. A multi-agent systems approach to autonomic computing. In: *Proc. of the AAMAS 2004*. New York: IEEE, 2004. 464–471.

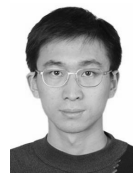
- [39] Cordella LP, Foggia P, Sansone C, Vento M. An improved algorithm for matching large graphs. In: Proc. of the 3rd IAPR-TC15 Workshop on Graph-based Representations in Pattern Recognition. Ischia, 2001. 149–159.
- [40] Rahman M. Mechanism design for network virtualization. Technical Report, CS-2009-34, Department of Computer Science, University of Waterloo, 2009. <http://www.cs.uwaterloo.ca/>
- [41] Zaheer F, Xiao J, Boutaba R. Multi-Provider service negotiation and contracting in network virtualization. In: Proc. of the NOMS 2010. Osaka: IEEE, 2010. 471–478.
- [42] Chowdhury M, Samuel F, Boutaba R. PolyViNE: Policy-Based virtual network embedding across multiple domains. In: Proc. of the ACM SIGCOMM VISA 2010. New Delhi: ACM Press, 2010. 49–56.
- [43] Nisan N, Roughgarden T, Tardos E, Vazirani VV. Algorithmic Game Theory. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [44] Groves T. Incentives in teams. *Econometrica*, 1973,41(4):617–631.
- [45] Goldschmidt O, Hochbaum DS. A polynomial algorithm for the k -cut problem for fixed k . *Mathematics of Operations Research*, 1994,19(1):24–37.
- [46] Mu'alem AW, Feitelson DG. Utilization, predictability, workloads, and user runtime estimates in scheduling the IBM SP2 with backfilling. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2002,12(6):529–543.
- [47] Shreedhar M, Varghese G. Efficient fair queuing using deficit round-robin. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2002,4(3):375–385.
- [48] Wang Y, Keller E, Biskeborn B, van der Merwe J, Rexford J. Virtual routers on the move: Live router migration as a network management primitive. In: Proc. of the ACM SIGCOMM 2008. Seattle: ACM Press, 2008. 231–242.
- [49] Capone A, Elias J, Martignon F. Routing and resource optimization in service overlay networks. *Computer Networks*, 2009,53(2): 180–190.
- [50] Bienkowski M, Feldmann A, Jurca D, Kellerer W, Schaffrath G, Schmid S, Widmer J. Competitive analysis for service migration in VNs. In: Proc. of the ACM SIGCOMM VISA 2010. New Delhi: ACM Press, 2010. 17–24.

附中文参考文献:

- [6] 朱伟,孙明俊.网络虚拟化探讨.电信网技术,2010,36(9):19–23.
- [19] 李文,吴春明,陈键,平玲娣.节点可重复映射和链路可分流的虚拟网映射算法.电信科学,2010,26(10):114–120.



卿苏德(1985—),男,湖南永州人,博士生,主要研究领域为网络虚拟化,云计算.



王敬宇(1978—),男,博士,副教授,CCF 学生会员,主要研究领域为业务网络,流量工程.



廖建新(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为移动智能网,宽带智能网.



戚琦(1982—),女,博士,讲师,主要研究领域为下一代网络,云计算.



朱晓民(1974—),男,博士,副教授,主要研究领域为业务网络,下一代网络.