软件学报 ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software,2012,23(4):864−877 [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04063]
©中国科学院软件研究所版权所有.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

虚拟网络映射模型及其优化算法*

蔡志平+, 刘 强, 吕 品, 肖 侬, 王志英

(国防科学技术大学 计算机学院,湖南 长沙 410073)

Virtual Network Mapping Model and Optimization Algorithms

CAI Zhi-Ping+, LIU Qiang, LÜ Pin, XIAO Nong, WANG Zhi-Ying

(College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

+ Corresponding author: E-mail: zpcai@nudt.edu.cn

Cai ZP, Liu Q, Lü P, Xiao N, Wang ZY. Virtual network mapping model and optimization algorithms. *Journal of Software*, 2012,23(4):864−877. http://www.jos.org.cn/1000-9825/4063.htm

Abstract: Network virtualization can serve as the important technology for constructing the next-generation Internet architecture. It has been proposed as a powerful vehicle for running multiple architectures or experiments simultaneously on a shared infrastructure. It allows multiple service providers to offer customized end-to-end services over a common physical infrastructure. Virtual network embedding is a critical step for network virtualization that deals with the efficient mapping of virtual nodes and virtual links onto the substrate network resources. The virtual network-mapping problem is extremely challenging for four main practical reasons: Node and link constraints, admission control, online request, and diverse topologies. Due to different application scenarios, optimization objectives, mapping approaches, and constraints, there are many virtual network-mapping models. Unfortunately, the optimization problems of these models are generally NP-hard. The model of virtual network mapping is presented. The virtual network mapping methods and algorithms are concluded. The technological approaches to solve the optimization problems of the virtual network mapping are summarized. Finally, some open issues are presented to be further studied in the virtual network-mapping field.
Key words: network virtualization; virtual network mapping; optimization algorithm; integer programming

摘 要: 网络虚拟化被视为构建新一代互联网体系架构的重要技术,它使得能在一个共享的底层物理网络上同时运行多个网络架构或网络应用,从而能为用户提供多样化的端到端定制服务.虚拟网络映射是实现网络虚拟化的关键环节,其目的是在满足虚拟网络资源需求的前提下,将虚拟网络植入到合适的底层物理节点和链路.虚拟网络映射需要解决资源约束、准入控制、在线请求和拓扑多样性等多方面的问题.根据应用场景、优化目标、映射方式和约束条件的不同,可以得到不同类型的虚拟网络映射优化问题.这些优化问题通常是 NP 难的.通过形式化建立了虚拟网络映射模型,归纳了虚拟网络映射的方法和算法.总结了解决虚拟网络映射模型优化问题的几条技术途径,指出了该领域中需要进一步研究的热点问题.
关键词: 网络虚拟化;虚拟网络映射;优化算法;整数规划
中图法分类号: TP393 **文献标识码**: A

* 基金项目: 国家自然科学基金(61070198, 60903040, 61170288); 国家重点基础研究发展计划(973)(2007CB310901)
收稿时间: 2011-04-03; 定稿时间: 2011-05-18

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

网络虚拟化技术被视为构建新一代 Internet 体系架构的重要技术[1−6].利用网络虚拟化技术,服务提供商可以在同一个底层物理网络上创建多个虚拟网络,从而为用户提供多样化的可定制端到端服务.例如,通过分配专用资源并使用一些特定的路由协议,在虚拟网络上运行 IP 语音(VoIP)应用可以达到预定的高性能.对于在线银行应用来说,虚拟网络通过使用自认证地址和安全路由协议能够提供安全应用保证.因此,网络虚拟化可以作为未来 Internet 应用的基础.

虚拟网络支持多个网络架构、实验和服务同时运行在一个共享的底层物理网络上.一个虚拟网络由一组虚拟节点(如虚拟路由器)和连接虚拟节点的虚拟链路组成,多个虚拟网络可能共享相同的底层物理网络,如图 1 所示.虚拟节点和虚拟链路分别被映射到底层物理节点和底层物理路径.底层物理节点可以承载一个或者多个虚拟节点,例如图 1 中虚拟网络 *G*1 中的虚拟节点 *A* 和虚拟网络 *G*2 中的虚拟节点 *B* 可映射到同一个底层物理节点上.一条底层物理路径是一条连接两个底层物理节点的逻辑路径,可能是单条物理链路,也可能像图 1 所示的虚拟链路 *L* 那样是一条物理路径.

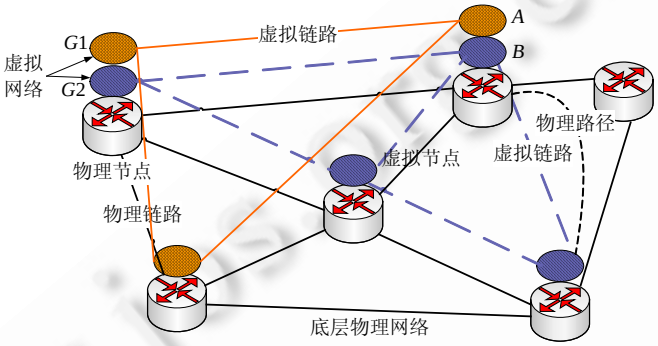


Fig.1 Illustration of virtual network mapping

图 1 虚拟网络映射示意图

为了有效地利用底层物理网络资源,虚拟网络映射(virtual network mapping)技术扮演着重要的角色.虚拟网络映射也可称为虚拟网络植入(virtual network embedding),是一种将虚拟网络映射到底层物理网络实体中特定节点和链路的技术,其目标是在满足资源约束条件的前提下,实现底层物理网络资源的高效利用.

虚拟网络映射主要面临以下几方面的问题[6]:

(1) 资源约束.虚拟网络映射必须满足每一个虚拟网络请求的资源约束,诸如节点上的计算资源和链路上的带宽资源.例如,在实验运行过程中,研究人员需要每个虚拟节点拥有 1GHz 的 CPU 资源并保证每条虚拟链路上具有 10Mbps 的带宽资源.另外,某些虚拟网络可能具有一些特定的约束,如节点部署的位置等;

(2) 准入控制.底层网络实体必须保留节点资源和链路资源,并且对新到的虚拟网络请求实施准入控制,用于确保充足的可用资源.由于底层资源是有限的,一些虚拟网络请求将被拒绝或者延迟响应以免对现存的虚拟网络造成影响;

(3) 在线请求.虚拟网络请求到达的时间是动态的、随机的,其占用物理网络的时间也可能是任意长的.因此,映射算法必须能在虚拟网络请求到来时及时而有效地处理请求,而不能让大量请求进行等待以进行批处理.由于无法预知未来请求的到达时间和需求,因此在线请求加大了解决虚拟网络映射问题的难度;

(4) 拓扑多样.虚拟网络可能有多种多样的拓扑,但在实际中常见的只有几种,包括星型拓扑、树型拓扑等.尽管虚拟网络拥有多种不同的结构,但如何高效地支持最典型的几种拓扑,同时具备处理任意网络拓扑的能力,也是设计映射算法时所面临的挑战.

以上 4 个因素使得虚拟网络映射问题变得难以解决.实际上,即使忽略其中的一些考虑因素,或者加上更多

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

限定条件,在多项式时间内求取虚拟网络映射问题的优化解也是非常困难的.例如,即便预先确定了虚拟节点的位置,基于带宽约束的虚拟链路映射问题也是 NP 难的[7].传统的解决方法对于虚拟网络映射问题并非完全适用.例如,由于虚拟网络请求的时间和需求不可预知,当底层网络实体规模较大时,传统的在线问题解决方法(如动态规划)将产生庞大的搜索空间,这对于虚拟网络映射来说是不可行的.

根据应用场景、映射方式、约束条件和优化目标的不同,可以得到不同类型的虚拟网络映射模型优化问题.最近,有不少学者对虚拟网络映射模型及其优化算法展开了大量的研究.

本文第 1 节对虚拟网络映射模型进行形式化,讨论模型的约束条件、优化目标和复杂性.第 2 节归纳虚拟网络映射的几种方法和优化算法,提供静态网络环境下的通用解决方案.第 3 节讨论虚拟网络映射中的几个重要研究主题,分别考虑动态网络环境、无线网络和容错性等因素:当底层物理网络具有动态性时,分配给虚拟网络的资源也需要不断演化;当需要提高容错性时,分配给虚拟网络的资源就需要有冗余备份;而在无线网络环境中进行虚拟网络映射时,还要受到底层物理网络在时域、频域等不同维度上的限制.这些因素的引入无疑使得虚拟网络映射问题更加复杂,因此需要对通用解决方案进行拓展以满足特殊的要求和约束.第 4 节总结解决虚拟网络映射问题的几条技术途径,并展望该领域的研究趋势.

1 虚拟网络映射模型

1.1 虚拟网络映射模型

在虚拟网络映射问题中,底层物理网络形式化为一个无向图 $G^s=(N^s,L^s,A_N^s,A_L^s)$,其中,$N^s$ 和 L^s 分别表示底层节点集合和底层链路集合,并把 L^s 中的链路组成的路径记为 P^s; A_N^s 表示底层节点属性集合,如节点的 CPU 资源或物理位置; A_L^s 表示底层链路属性集合,如链路的带宽资源或延迟特性.虚拟网络请求形式化为一个无向图 $G^v=(N^v,L^v,C_N^v,C_L^v)$,其中,$N^v$ 和 L^v 分别表示虚拟节点集合和虚拟链路集合, C_N^v 表示虚拟节点约束集合, C_L^v 表示虚拟链路约束集合.为了更精确地描述虚拟网络映射问题,下面给出虚拟网络映射的定义[6−8].

定义 1. 设底层物理网络为 G^s,虚拟网络为 G^v,则称从 G^v 到 G^s 子集的映射 $M:G^v\to(N',P',R_N,R_L)$为一次虚拟网络映射,其中,$N'\subset N^s$,$P'\subset P^s$;R_N 和 R_L 分别表示分配给虚拟网络请求的节点资源集合和链路资源集合.

从虚拟网络映射的定义可以看到,虚拟网络映射问题可以分解为两个子问题,即虚拟节点映射问题和虚拟链路映射问题.

定义 2. 设底层物理网络为 G^s,虚拟网络为 G^v,则称从 G^v 到 G^s 子集的映射 $M^N:(N^v,C_N^v)\to(N',R_N)$为一次虚拟网络节点映射.

定义 3. 设底层物理网络为 G^s,虚拟网络为 G^v,则称从 G^v 到 G^s 子集的映射 $M^L:(L^v,C_L^v)\to(P',R_L)$为一次虚拟网络链路映射.

1.2 整数规划形式

虚拟网络映射的目标是在满足条件约束的前提下,通过高效的映射算法得到的虚拟网络能够获取最大的效益.设在 t 时刻处理虚拟网络请求获取的效益为 $R(G^v(t))$,则虚拟网络映射的目标是长期平均效益最大化,其中,长期平均效益函数如公式(1)所示:

$$\lim_{T\to\infty}\frac{\sum_{t=0}^{T}R(G^v(t))}{T} \tag{1}$$

对于一个具体的虚拟网络映射任务而言,需要找到虚拟节点和虚拟链路的映射关系 X 和 Y,使得效益最大化.用 $X=\{x_{ij}|v_i\in N^v,v_j\in N^s\}$表示虚拟网络和底层物理网络之间的节点映射关系,$x_{ij}=1$ 表示在虚拟网络 G^v 中节点 v_i 映射到底层物理网络 G^s 中的节点 v_j,否则 $x_{ij}=0$.用 $Y=\{y_{ij}|l_i\in L^v,l_j\in L^s\}$表示虚拟网络与底层物理网络之间的链路映射关系,$y_{ij}=1$ 表示在虚拟网络 G^v 中链路 l_i 包含底层物理网络 G^s 中的链路 l_j,否则 $y_{ij}=0$.

因此,虚拟网络映射问题的整数规划形式可以表示为

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

$$\text{maximum} \lim_{T\to\infty} \frac{\sum_{t=0}^{T} R(G^v(t))}{T} \tag{2}$$

满足如下约束条件:

$$\sum_{i=1}^{|N^v|} x_{ij} = 1(\forall v_i \in N^v, v_j \in N^s) \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^{|L^v|} y_{ij} \geqslant 1(\forall l_i \in L^v, l_j \in L^s) \tag{4}$$

$$x_{ij} C_{N_i}^v \leqslant x_{ij} A_{N_i}^s (\forall v_i \in N^v, v_j \in N^s) \tag{5}$$

$$y_{ij} C_{L_i}^v \leqslant y_{ij} A_{L_i}^s (\forall l_i \in L^v, l_j \in L^s) \tag{6}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} (\forall v_i \in N^v, v_j \in N^s) \tag{7}$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} (\forall l_i \in N^v, l_j \in L^s) \tag{8}$$

约束条件(3)保证了每个虚拟节点都被映射到一个底层物理节点,约束条件(4)保证了每条虚拟链路都被映射到一条物理链路或一条物理路径.约束条件(5)和约束条件(6)分别保证了虚拟节点和虚拟链路的资源请求能被满足.

1.3 资源约束条件

在进行虚拟网络映射时,需要考虑满足虚拟网络映射请求所需的资源约束.资源约束主要包括节点约束和链路约束两部分.节点约束指的是底层物理节点提供的 CPU、内存、磁盘和网络接口等系统资源能够满足虚拟网络的要求.链路约束则要复杂得多,它主要考虑 3 个方面的约束:终端约束、节点对流量的约束和距离约束.

终端约束表明,虚拟网络中节点的流量不应超过流量上界.流量上界通常由物理节点的流量限制来决定,可用α函数和ω函数来定义,其中,$\alpha(u)$表示虚拟节点 u 的出口流量上界,$\omega(u)$表示虚拟节点 u 的入口流量上界.令集合 $A\subseteq N^s$ 为物理网络中的映射节点集合,映射完成后的目标流量为 $f(u,v)$,那么终端约束要求,对于$\forall u,v\in A$,有 $\sum_{u\in A} f(u,v) \leqslant \alpha(u)$ 和 $\sum_{v\in A} f(u,v) \leqslant \omega(v)$. 节点对流量的约束由$\mu(u,v)$函数定义,表征从节点 u 到节点 v 的流量上界,那么节点对流量的约束要求,对$\forall u,v\in A$,有 $f(u,v)\leqslant\mu(u,v)$.假设$\gamma(u)$为节点 u 的邻居节点集合,距离约束由α_F函数和ω_F函数定义,其中,$\alpha_F(u)$表示从节点 u 到$\gamma(u)$之外的节点总流量上界,$\omega_F(u)$表示从$\gamma(u)$之外的节点到节点 u 的总流量上界,那么距离约束要求,对于$\forall u,v\in A$,有 $\sum_{u\in A,\mu\notin\gamma(u)} f(u,v) \leqslant \varpi_F(u)$ 和 $\sum_{v\in A,\mu\notin\gamma(v)} f(u,v) \leqslant \varpi_F(v)$.

在大部分应用场景中,节点约束可简化为以 CPU 为主的计算资源需求.链路约束中的节点对流量约束可简化为带宽约束,而距离约束可简化为延迟约束或路由跳数约束.对于带宽约束,只要为虚拟网络保留足够的带宽,就能满足虚拟网络映射的需求.从这个角度来考虑,虚拟网络的多条虚拟链路可以映射到同一条物理链路或者物理路径上,只要底层物理网络能为每个虚拟网络请求预留足够的带宽.对于延迟约束或者距离约束,则是通过限定相邻虚拟节点之间的距离来保障虚拟网络的服务质量.

除了资源约束以外,节点和链路的准入控制、位置和类型都可能构成网络映射时的约束条件.例如,有些虚拟节点希望能被部署在服务器附近,而出于网络安全或者其他方面的考虑,底层物理节点可能无法或者拒绝接受虚拟节点的映射.这些约束条件实际上缩小了映射虚拟节点和链路的搜索空间,降低了问题复杂度.

1.4 优化目标

从服务提供商的角度,必然希望能在满足虚拟网络映射需求的情况下消耗尽量少的资源.这样,一方面能够保障现有业务的服务质量;另一方面,也能够保留更多的资源来满足未来的虚拟网络映射的需要.消耗的资源体现在 CPU、存储空间等节点资源和带宽等链路资源上.显然,虚拟网络消耗的资源越少,可保留的网络资源就越多.用函数 $A(\cdot)$代表节点和链路的物理资源,函数 $r(\cdot)$代表虚拟网络节点和链路所消耗的资源,那么优化目标可表示为

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

$$R(G^v(t))=\sum_{n^v\in N^v}\{A(n^v)-r(n^v)\}+\rho\sum_{l^v\in L^v}\{A(l^v)-r(l^v)\} \tag{9}$$

在优化目标公式中,加入了一个参数ρ来调节节点收益和带宽收益的比重.例如,如果底层物理网络的带宽足够大,更看重对节点资源的消耗,则可以设定ρ=0.而对于分布式虚拟计算平台,底层物理节点的计算资源足够大,但是远程网络链接的服务质量得不到保障,则可以把ρ设定成较大的值.

从用户的角度出发,希望虚拟网络映射任务的等待时间最小.设定每个任务的等待时间为($w(G^v(t))$),那么对用户而言,优化目标是

$$R(G^v(t))=1\Big/\sum_{t=0}^{\infty}w(G^v(t)).$$

如果当前没有节点和链路资源能够满足虚拟网络映射需求,那么这个任务必须等待.如果等待时间过长,用户可能会放弃.因此,在为当前的虚拟网络映射任务分配资源时,应尽量消耗少的资源以保留更多的资源.但是未来的虚拟网络映射任务的需求是无法预料的,因此,在线请求问题要复杂得多.一种解决的思路是设定时间窗口,对同一时间窗口内的请求任务统一处理,请求无法被满足的任务则放入请求队列,等待下一轮的处理.时间窗口的设定往往与用户能够承受的最大等待时间相关.

1.5 复杂性分析

在进行虚拟网络映射时,如果需要同时考虑资源约束、准入控制、在线请求、拓扑多样性等多方面的问题,将使得虚拟网络映射问题变得极为复杂,由此带来的优化问题通常都是 NP 难的.

即使忽略其中的几个因素,虚拟网络映射问题依然很复杂.在最普遍的情况下,只考虑节点和链路资源约束的虚拟网络映射问题就是 NP 难的[7,8].而且,即使只考虑带宽约束,在虚拟节点已经映射完成的情况下,满足带宽约束的虚拟网络映射问题可以归约到多路分割问题,这依然是一个 NP 难问题[9].

因为虚拟网络映射问题通常是 NP 难的,无法在多项式时间内求取最优解,因此,在解决虚拟网络映射问题时,往往通过简化问题或增加假设来缩小搜索空间,获取优化解.

2 虚拟网络映射的方法和算法

2.1 两阶段映射方法

解决虚拟网络映射问题的直观方法是采用两阶段优化方法.首先,实现虚拟节点的优化映射;然后,基于定位好的虚拟节点,寻找虚拟链路映射的优化解决方案.在寻找优化解的过程中,常常基于贪婪策略,根据不同的优化目标寻找优化解.

两阶段优化方法的第 1 步是实现虚拟节点的优化映射.通用的基于贪婪策略的虚拟节点映射算法用伪代码形式表示如下:

输入:虚拟网络映射需求 $G^s=(N^s,L^s,A_N^s,A_L^s)$ 和底层物理网络 $G^v=(N^v,L^v,C_N^v,C_L^v)$;

输出:虚拟节点映射关系 X.

(1) 对于虚拟网络映射请求根据收益进行排序;

(2) While (仍存在未映射的虚拟节点)

(3) 选取有最大收益的虚拟网络映射请求的节点 u;

(4) 构造候选集合 $S(u)$,满足 $\forall v\in S(u),C_{N_u}^v\leqslant A_{N_v}^s$; //候选集合中的节点均能满足 u 的节点约束要求;

(5) 如果 $S(u)$为空,则将节点 u 放入请求队列,等待下一轮节点映射;

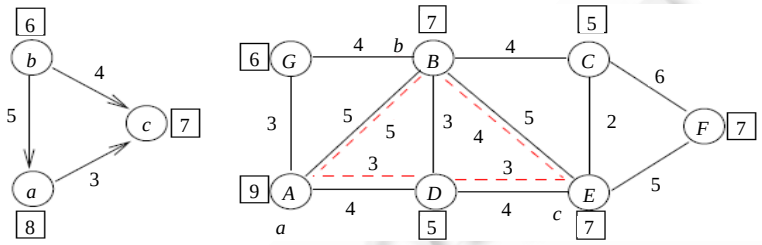
(6) 从候选集合 $S(u)$中选取能使优化目标最大化的物理节点 v,令 x_{uv}=1;

根据优化目标的不同,算法的第(6)步可以选择不同的节点进行映射.以图 2 为例,节点上方的方框内数字代表虚拟节点所需的 CPU 资源,线条上的数字代表链路带宽.图 2(a)表示一个由 3 个节点构成的虚拟网络请求,图 2(b)表示一个由 7 个节点构成的底层物理网络.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

因为虚拟节点 b 所需的 CPU 资源是 6,不难计算出 $S(b)=\{A,B,E,F,G\}$.如果希望保留带宽大的链路以满足未来虚拟网络请求的需要,那么将优化函数可设定为节点相邻链路的最小带宽,节点 b 会映射到 E.如果希望避免占用瓶颈带宽,那么将优化函数可设定为节点相邻链路的最大带宽,节点 b 会映射到 F.如果将优化函数设定为节点相邻链路中最大带宽与节点 CPU 资源的乘积,节点会映射到 A.如果将优化函数设定为节点相邻链路带宽的总和与节点 CPU 资源的乘积,节点 b 会映射到 B.

在虚拟节点映射完成后,从虚拟链路到底层路径的最佳映射是一个不可分割流问题,这是一个 NP 难问题.可以采用类似的贪婪策略和算法步骤完成链路的映射,通常可以通过最短路径算法作为近似算法来确定映射的链路.图 2 中构建的虚拟网络映射如虚线所示.



(a) 虚拟网络请求 (b) 底层物理网络

Fig.2 Example of virtual network mapping

图 2 虚拟网络映射图例

基于两阶段优化方法,文献[6–8,10]等设计了很多优化算法和策略.但是两阶段优化方法会把节点映射和链路映射分割开来,往往导致无法求取全局最有解,或者造成链路映射时约束无法满足.在这样的情况下,可以采取回溯的方法重新选取节点映射方案,或者直接将虚拟映射请求放到下一轮.

2.2 同阶段映射方法

采用两阶段优化方法是把多目标优化问题简化成两个阶段的单目标优化问题,但是,一方面很难得到全局最优;另一方面,如果出现坏的映射决定时需要回溯,而回溯是非常耗时的.例如,如果节点映射完成后发现无法满足所有的链路约束需求,则需要把节点约束回溯或者重新映射一次.因此,如果同时考虑这两个阶段,则能实现收益率更高的虚拟网络映射,也能达到更快的映射速度.

文献[11–13]均提出了同阶段解决方案,试图同步完成节点与链路的映射.文献[11]采用的是子图同构检测(subgraph isomorphism detection)的方法,在底层物理网络拓扑中寻找满足虚拟网络需求的子图,完成虚拟网络映射.

以图 2 中的虚拟网络请求和底层物理网络为例,限定虚拟节点间的距离不超过 2,基于子图同构的同阶段虚拟网络映射示例如图 3 所示.设定集合 C 为当前所有满足映射条件的候选集合.图 3(a)中将虚拟节点 a 映射到物理节点 A,则 $C=\{(c,B),(c,E),(b,G),(b,B),(b,E)\}$,如图 3(b)所示.如果选定虚拟节点 c 映射到物理节点 B,则候选集精简成 $C=\{(b,G),(b,E)\}$,如图 3(c)所示.因为映射(b,G)和(b,E)均不满足条件(如图 3(c)和图 3(d)所示),因此重新把 c 映射到 E(如图 3(e)所示),直至完成最后的映射(如图 3(f)所示).

文献[12]采用的是扩展图的方法,在底层物理拓扑的基础上增加中间节点和中间边,构造一个扩展图.采用规划松弛的方法,利用线性规划工具求取优化解.文献[13]则采用了分布式的求解方式,将求解任务分散到各个节点,减轻集中求解方式的负担.但其性能和求解效果无法与集中式求解方式相比.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

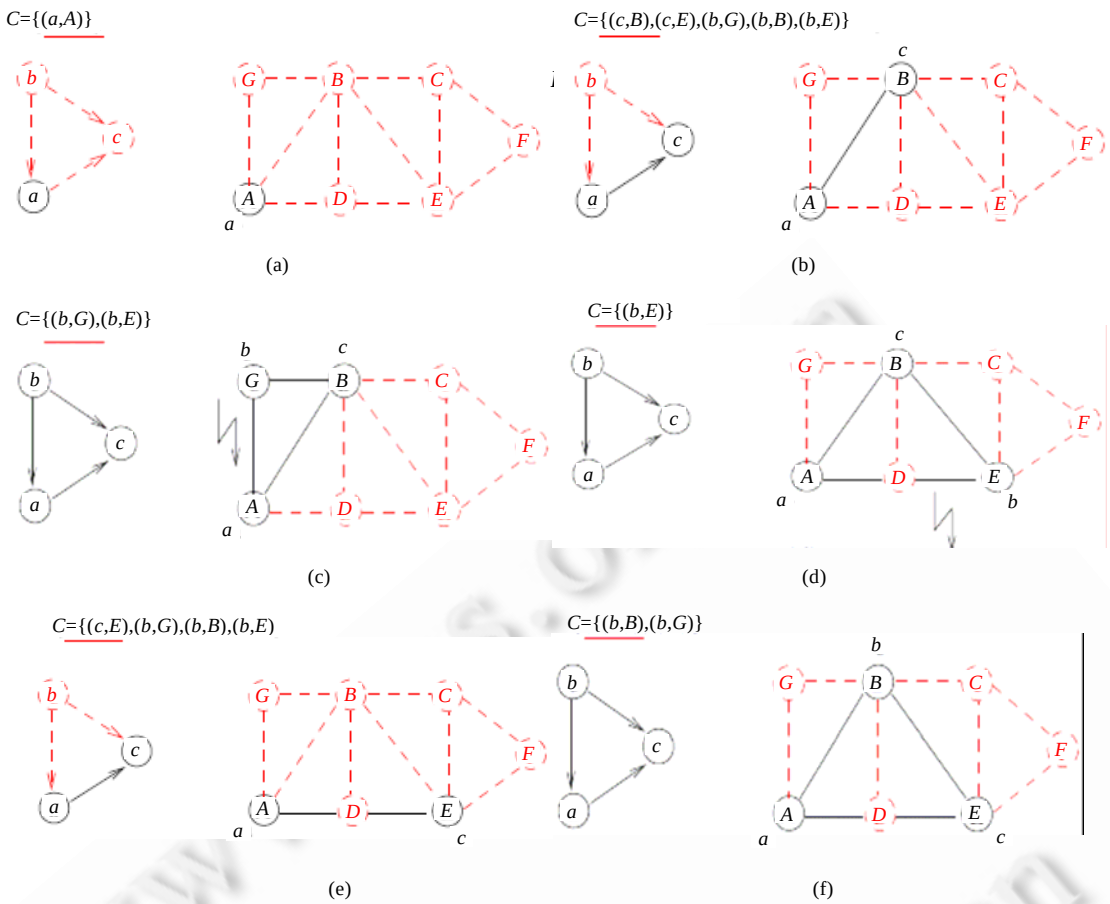


Fig.3 Example of virtual network mapping based on subgraph isomorphism

图 3 基于子图同构的同阶段虚拟网络映射图例

2.3 路径的切割和迁移

前面两节提出的方法把一条虚拟链路一对一地映射到一条物理路径上,在整个虚拟网络任务执行过程中也不再作任何调整.但是,如果能在满足带宽需求的情况下把一条虚拟链路映射到多条物理路径上,并能在虚拟网络任务执行过程中对映射关系进行动态调整和优化,无疑能对虚拟网络的调度和配置带来更大的灵活性,从而减少甚至消除虚拟网络映射问题的约束条件,满足尽可能多的虚拟网络请求.文献[6]从底层物理网络设计的角度提出了路径的切割和迁移方法.路径切割方法主要用于处理虚拟链路映射的问题,通过该方法,一条虚拟链路能够映射到底层物理网络中的多条底层路径上.路径迁移方法主要用于处理在线虚拟网络请求的问题,该方法周期性地优化已有的映射关系,采取的方法有重新映射到新的底层路径或者改变路径分割率.

2.3.1 路径的切割

为了更好地解决虚拟链路映射问题,文献[6]提出了路径切割方法,将一条虚拟链路映射到多条底层路径上.路径切割方法能够有效地利用物理网络中分散的剩余资源,从而接受更多的虚拟请求,如图 4 所示.

从图 4 的左图可以看出,当虚拟网络请求 1 到达时,由于物理网络拥有足够多的剩余资源,虚拟节点映射算法分别把 *a*,*b*,*c* 这 3 个虚拟节点映射到 *A*,*E*,*F* 这 3 个底层节点上,虚拟链路映射算法分别把虚拟链路 *a*-*b* 和 *a*-*c* 链路映射到底层链路 *A*-*D*-*E* 和 *A*-*D*-*F* 上.从图 4 的右图可以看出,当虚拟网络请求 2 到达时,如果不采用路径切割方法,实体网络中任何一条路径都没有足够的带宽资源满足该请求的约束,则虚拟网络植入算法将拒绝该请

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

求.相反地,如果采用路径切割方法,虚拟节点映射算法分别把 *d*,*e* 这两个虚拟节点映射到 *D*,*E* 这两个底层节点上,虚拟链路映射算法把虚拟链路 *d*-*e* 映射到两条底层路径上,即 *D*-*E* 和 *D*-*G*-*H*-*I*-*E*,那么映射算法将接受并处理该请求.

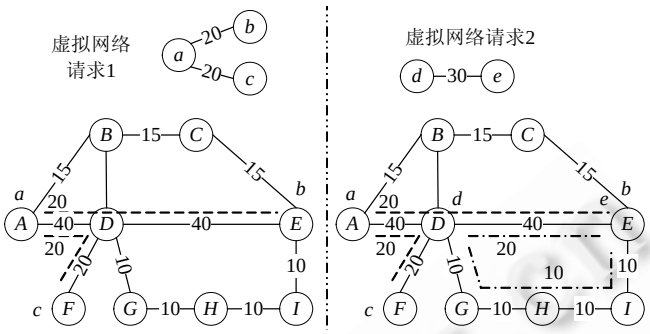


图 4 Example of virtual network mapping based on path splitting

图 4 基于路径切割的虚拟网络映射图例

显然,对于一条虚拟链路 *l* 以及支持路径切割的虚拟网络映射算法,链路 *l* 将被映射到多条底层路径上,每条底层路径满足该虚拟链路的部分约束.下面给出路径切割率的定义.

定义 4. 假设某条虚拟链路 *l* 的约束为 C_l,通过虚拟链路映射,链路 *l* 被映射到底层链路 $L_1^s, L_2^s, ..., L_n^s$,则路径切割率定义为 $p_1^s, p_2^s, ..., p_n^s$,且满足关系 $\sum_{i=1}^{n} p_i^s = C_l$.

在图 4 所示的例子中,路径切割率为 2:1.文献[6]设计了基于两阶段映射方法的虚拟链路映射算法以支持路径切割.为了处理部分虚拟链路映射结果不满足约束条件的情况,算法新增了虚拟节点重映射步骤,该步骤主要用来处理底层链路资源负载均衡方面的问题.对于映射结果包括瓶颈链路的虚拟链路,算法将其中一个虚拟节点重新映射到可用资源最多的底层节点上,修改路径切割率,从而减轻瓶颈链路的负载.

2.3.2 路径的迁移

由于在线虚拟网络请求的到达时间和离开时间都是不可预知的,为了更好地处理该问题,文献[6]提出了路径迁移方法,用于优化已有虚拟网络映射关系,保留更多的底层物理网络资源以处理未来的虚拟网络请求.路径迁移可通过多种方式实现,包括寻找新的映射路径、改变路径切割率等.图 5 给出了路径迁移的一个实例.

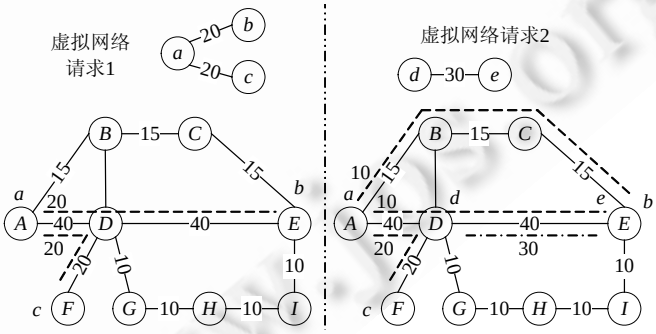


Fig.5 Example of virtual network mapping based on path migration

图 5 基于路径迁移的虚拟网络映射图例

从图 5 的左图可以看出,当虚拟网络请求 1 到达时,由于物理网络拥有足够多的剩余资源,虚拟节点映射算法分别把 *a*,*b*,*c* 这 3 个虚拟节点映射到 *A*,*E*,*F* 这 3 个底层节点上,虚拟链路映射算法分别把虚拟链路 *a*-*b* 和 *a*-*c* 链路映射到底层链路 *A*-*D*-*E* 和 *A*-*D*-*F* 上.从图 5 的右图可以看出,当虚拟网络请求 2 到达时,如果不采用路径迁

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

移方法,物理网络中任何一条路径都没有足够的带宽资源满足该请求的约束,那么虚拟网络植入算法将拒绝该请求.相反地,如果采用路径迁移方法,算法将优化虚拟网络请求 1 的映射结果,把请求 1 的虚拟链路 *a-b* 重新映射到两条底层路径上,分别是 *A-B-C-E* 和 *A-D-E*,路径切割率为 1:1.通过路径迁移,底层链路 *D-E* 的可用带宽资源为 30,满足请求 2 的链路约束,映射算法将接受并处理该请求.

为了实现路径迁移,虚拟网络映射算法周期性地运行支持路径切割的虚拟链路映射算法.对于仅通过改变路径切割率实现路径迁移的情况,通过添加新的约束条件以保证算法的正确性;对于仅通过寻找新的映射路径实现路径迁移的情况,则在不改变已有约束条件的情况下,重新运行支持路径切割的链路映射算法.

3 虚拟网络映射的重要研究选题

3.1 动态的虚拟网络映射

虚拟网络映射的动态性是虚拟网络映射研究中一个重要的选题,其动态性包含底层物理网络的动态性、虚拟任务请求的动态性和虚拟网络运行过程的动态性等多方面的因素.我们在文献[14]中考虑了底层物理网络的动态性,当底层物理网络更新或发生变化时,部分物理节点和链路会被删除,因此,映射其上的虚拟节点和虚拟链路需要被重新映射.那么,如何以最优化的代价重新部署虚拟网络是值得研究的议题.我们注意到,虚拟网络映射时节点迁移和节点重部署的代价之间存在着差异,因此定义了一个参数γ,这个参数可以根据服务提供商的需求、硬件价格的变化和虚拟网络迁移技术的特性进行动态的调整.我们设计了一系列启发式策略,以获得优化的虚拟网络重部署代价.

绝大部分的研究都没有考虑虚拟网络运行时的动态优化.随着虚拟网络的不断映射和陆续结束,底层物理网络的资源会慢慢地碎片化,从而导致虚拟网络请求得不到满足,使得虚拟网络请求处于等待或者被拒绝的状态.文献[15]提出了一种两阶段的运行时重优化机制:第 1 阶段检测网络中的瓶颈带宽和节点状况;第 2 阶段则重新映射和迁移虚拟链路和节点,从而释放瓶颈链路的资源.通过实验验证了,这种重优化机制和瓶颈链路上的负载均衡算法能够显著地提高虚拟网络请求的接受率和收益回报比.

文献[16]同样研究了虚拟网络运行时的动态优化.该文注意到,在网络拥塞时,为虚拟网络预留的带宽可能没有得到有效利用.因此而设计了一种动态自适应的虚拟网络结构,通过周期性的重新分配虚拟链路之间的带宽来不断优化虚拟网络,以获取最大收益和保留最多资源,提高了资源的利用率.但是,运行时优化的做法代价比较大,并且可能影响虚拟网络的稳定性.

3.2 容错的虚拟网络映射

底层的物理网络可能会因为自然灾害、恶意攻击、计算资源节点或物理链路的故障等多种原因而产生失效,如何让映射的虚拟网络具备一定的容灾容错能力是提高虚拟网络服务质量和可生存性的关键,而预留备份资源和链路无疑是最直观的解决方案.文献[17]考虑了在单链路失效的情况下,如何进行容错的虚拟网络映射问题.为了提高虚拟网络的可生存性,在进行虚拟网络映射时,预先为虚拟链路考虑好备份链路,并预留一定的带宽.在链路发生失效时,可通过重新设定路由的方法,将失效的虚拟链路移植到备份物理链路上.这种方法通过改进,也能够处理多链路失效的情况.结合节点迁移策略[18],类似的方法还能处理单节点失效的情况.但是这种策略本质上是一种修复的方法,并不能保证在任何情形下虚拟网络都能得到恢复.

文献[19]则考虑由于地震等自然灾害或炸弹等恐怖袭击造成的区域失效的情况.如图 6 所示,当区域失效发生后,节点 *B*,*C* 及之间的链路无法提供正常服务.那么就需要将虚拟节点 *a* 和 *b* 从物理节点 *C* 和 *F* 重新映射到物理节点 *F* 和 *D*,并将虚拟链路(*a*,*b*)从物理路径 *C-F* 重新映射到 *F-E-D*.

为构建容错的虚拟网络,文献[19]提出一个多步骤的映射方案:首先不考虑区域失效的情况,进行虚拟节点和虚拟链路的映射,然后在不同的区域为虚拟网络分配多余的节点和带宽作为备份.其优化目标是使得冗余的备份资源尽量小,并设计了两种优化算法来完成容错的虚拟网络映射.为达到容错的效果,该方法需要虚拟节点与备份节点间定时地传送虚拟节点状态状况,例如虚拟机映像等,其整个通信代价和消耗的资源代价都非常大.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

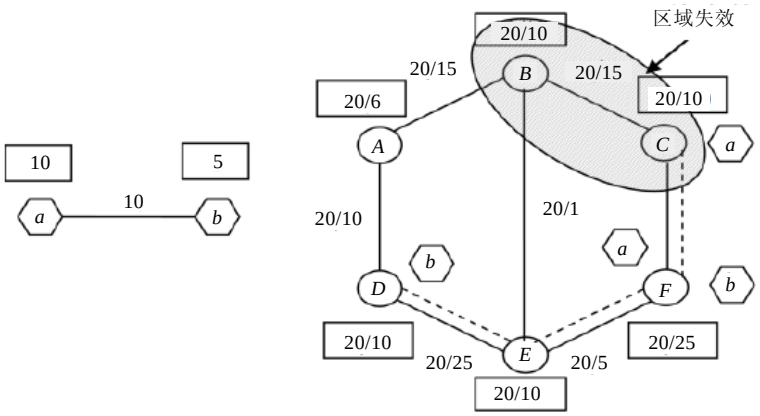


Fig.6 Virtual network remapping under regional failures

图 6 区域失效后的虚拟网络重映射

文献[17,19]都是为虚拟网络预先分配了物理资源作为备份,文献[20]则提出一种优化冗余池(opportunistic redundancy pooling)的机制来动态地分配备份资源.该文作者为 n 个已映射的资源预分配 k 个冗余资源,通过所构建的这种冗余资源池来实现冗余备份资源的共享,从而减少对物理资源的消耗,取得更好的容错效果和性价比.

3.3 无线网络中的虚拟网络映射

在无线网络中,物理网络的传输媒介是无线频谱,而各物理链路之间共享和竞争频谱资源.为了保证不同虚拟网络之间的独立性,在进行无线网络环境中的虚拟网络映射时,将具有比有线网络更多的约束,从而导致问题更加复杂.

实现无线网络的虚拟映射主要有以下几条途径[21,22]:

(1) 空分复用:这是最简单的方式,即将虚拟网络映射到物理网络中相距足够远的物理空间中,使得各个虚拟网络之间互不干扰,而相距的距离取决于物理节点的发射功率和无线信道的衰减特性.这种方法虽然能够确保虚拟网络之间的独立性,但对物理网络的利用率不高;

(2) 频分复用:在进行虚拟网络映射时,通过信道分配的方法,使得不同虚拟网络映射到的物理链路工作在不相交叠的信道上.这通常要求物理节点具有多个无线射频接口,并能够同时工作在不相干扰的信道上;

(3) 时分复用:通过将时间轴划分为不相交的时间片,为不同的虚拟网络分配不同的时间片,并在其对应的时间片内得到激活.这种时分复用的方式非常类似于现代操作系统中多任务共享处理器的调度机制.时间同步机制是时分复用方法的关键,然而在规模较大的分布式网络系统中,实现精确的时间同步是非常困难的;

(4) 码分复用:通过编码方式的选择使得不同的虚拟网络使用正交的编码来实现虚拟网络的并行工作.因此,编码的选择是码分复用方法的关键,同时也限制了虚拟网络的数量;

(5) 混合方法:通过综合利用以上几种方法,可以提高虚拟网络映射的灵活性和效率.例如,结合频分复用与时分复用就成为跳频的方法,可比静态频分复用获得更高的吞吐率[23].

目前,已有一些研究机构搭建了无线网络虚拟化的实验平台,如 ORBIT[24],NVS[25],AiroLAB[26]等.但是与有线网络相比,无线网络环境具有自身的特点,具备特定的约束.无线网络环境中的虚拟网络映射仍然存在很多尚未解决的问题,特别是优化算法的设计还有待于进一步的深入研究.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

4 总结与展望

4.1 总 结

利用网络虚拟化技术,通过创建虚拟网络以充分利用底层物理网络资源,为用户提供端到端的定制服务,是突破互联网现有局限的一种重要技术手段和发展趋势.虚拟网络映射模型研究如何在满足条件约束的情况下完成虚拟网络映射,同时获取尽量多的收益.

虚拟网络映射包含节点映射和链路映射两部分的任务,并且考虑到虚拟网络请求的动态性和未知性,其优化问题的求解比一般的服务器放置[27−29]、Cache 放置[30]、网络监控节点放置[31]等问题更为复杂.虚拟网络映射模型的优化问题通常属于 NP 难问题,不能在多项式时间内精确求解.目前,解决虚拟网络映射模型优化问题的方法主要包括以下 3 种:

(1) 映射到经典优化问题,利用经典优化问题的难解性结论和近似算法.用带权的有向图或无向图将虚拟网络映射模型建模以后,虚拟网络映射模型的优化问题往往可以映射成经典的优化问题.例如,把节点约束或链路约束下所能选择的节点或链路作为映射候选集合,许多优化问题都能映射成集合覆盖问题,从而可以知道这些优化问题都是 NP 难的,而利用贪婪算法可以得到 $1+\ln n$ 的近似解.另外,虚拟链路映射问题常常可以映射到网络流分割问题,虚拟网络映射的在线问题常常可以映射到任务调度问题,等等.在文献[6–9]的研究中都使用了这种解决方法;

(2) 采用数学规划方法解决优化问题.用整数规划可以清晰地描述带约束的优化问题,且虚拟网络映射模型的优化问题通常都是 0-1 整数规划问题,文献[6–8,12]都利用整数规划来描述问题.整数规划的求解方法包括割平面算法、分解算法、分支定界算法等精确算法,理论上可以找到问题的最优解.但由于整数规划问题本身就是 NP 完全的,要得到整数规划问题的最优解,这些算法常常需要以问题大小的指数函数为界的计算时间,从而极大地降低了算法的实用价值.有些研究者挖掘优化问题本身的特性,适当地松弛规划问题的约束条件,可以求得较为理想的结果.例如,文献[12]就通过对整数约束条件的松弛将同阶段映射问题转换成线性规划问题,继而设计优化算法;

(3) 设计启发式算法求取近似解.在虚拟网络映射模型的研究中,有些模型不能映射到经典优化问题,或者现有的近似算法不够理想.研究者都竭力挖掘网络虚拟网络映射模型本身的特性,设计更高效和更优化的近似算法[11−16].在启发式策略中,用得最多的是贪婪策略.贪婪策略直观、有效,算法实现也较为简单,但在很多情况下并不能求得最优化的结果.文献[11,12]都是利用问题特性,设计了基于图形的启发式算法.

4.2 展 望

网络虚拟化是构建新一代互联网体系的重要技术,虚拟网络则是提供新一代互联网应用的基础.近年来,网络虚拟化迅速成为学术界和工业界的研究热点.除了 SIGCOMM,INFOCOM,VEE 等国际顶尖学术会议和期刊上发表的网络虚拟化文章逐步增多以外,2009 年和 2010 年,SIGCOMM 还专门举办了虚拟化 Workshop-VISA (ACM SIGCOMM Workshop on Virtualized Infrastructure Systems and Architectures)[32].

国家 973 项目“计算系统虚拟化基础理论与方法研究”和“虚拟计算环境聚合与协同机理研究”等项目组和其他科研院校相继开展了虚拟化的研究,并取得一系列研究成果[33,34].网络映射模型及其优化算法是网络虚拟化研究的核心问题之一.目前的研究成果表明,针对不同的映射方式和应用场景,可以设计合理的网络映射模型和优化算法,满足快速高效的虚拟网络映射需求,提高虚拟网络收益.虚拟网络映射模型及其优化算法领域在以下几个方面还有待于进一步加以研究.

4.2.1 在线问题

因为无法预知未来虚拟网络映射任务的到达时间和需求,研究者仍未找到很好的在线问题解决方案.文献[6]通过设定时间窗口来简化在线问题,把请求队列中的请求和当前时间窗口内到达的新请求统一处理.但是这样必然损坏任务处理的公平性,而且通常无法取得最优解.文献[15,16]考虑到了虚拟网络运行时的动态性,设计

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

了一种动态自适应的虚拟网络结构,通过周期性地重新分配虚拟链路之间的带宽来不断优化虚拟网络,以获取最大收益和保留最多资源.但是这样的做法代价太大,影响了系统的性能.

4.2.2 分布式与集中式

现有的大部分优化算法都是基于有一个集中的控制和调度平台,在掌握全局拓扑信息和需求的前提下,实现虚拟网络的最优映射和调度.但在很多应用场景中,收集全局信息需要付出很大的代价,甚至根本无法掌握全局信息.例如,虚拟网络穿越多个网络域时,因为安全或者利益等因素,无法获取全网信息.分布式虚拟网络映射方法把虚拟网络映射的决策和管理过程去集中化,具有比集中式方法更好的可扩展性以及降低映射复杂程度的特点.分布式方法对于底层物理网络动态可变或包含多个网络域的情况更具优势,如节点和链路失效、节点位置变动等.文献[13,35]分别提出了一种分布式自主虚拟网络映射框架和算法;文献[36]则提出了一种基于策略的域间虚拟网络映射框架,并设计了一个分布式的域间协商协议.但是,分布式解决方案通常无法达到集中式那样的优化效率,而且分布式自主虚拟网络映射框架中各节点之间的通信和协同也会带来系统代价.因此,如何在满足应用需求的情况下寻求分布式处理方式和集中式处理方式间的折衷,是值得深入研究的问题.

4.2.3 虚拟网络映射模型的通用性和扩展性

虚拟网络映射模型及其优化算法通常是针对某些具体的应用场景来设计的,当网络演化或者优化目标发生改变时,现有的优化算法不能很好地自适应处理.最典型的是面向拓扑多样化的情况,当网络中存在线形拓扑、树形拓扑、星形拓扑等多种类型的拓扑结构时,如何保证优化算法在不同的拓扑结构中都能取得很好的优化结果?如何在高效处理常见情形时都能具有很好的通用性?因此,如何设计自适应的通用算法,或者提高现有算法的自适应性、通用性和扩展性,是非常值得研究的.我们研究了网络变化情况下的虚拟网络映射问题[14],但是仍有待更多、更深入的研究.

4.2.4 现有研究暂未涉及的问题

对虚拟网络映射问题展开研究的时间不长,许多值得研究的问题暂时未看到相关研究成果.例如,各节点间的负载均衡、虚拟网络请求任务之间的公平性、满足各方经济利益的虚拟网络映射问题等.虚拟网络映射问题与服务器放置、Cache 放置等诸多问题[27−31]有类似之处,可以借鉴这些已被深入研究的科学问题的研究成果.另外,神经网络、遗传算法和进化规划等智能算法具有利用随机搜索求取全局最优近似解的优点,也是解决优化问题的一条有效途径.最近,已有研究者利用蚁群算法来求解虚拟网络映射问题[37].

References:

[1] Chowdhury NMMK, Boutaba R. A survey of network virtualization. Computer Networks, 2010,54(5):862−876. [doi: 10.1016/j.comnet.2009.10.017]

[2] Chowdhury NMMK, Boutaba R. Network virtualization: State of the art and research challenges. IEEE Communications Magazine, 2009,47(7):20−26. [doi: 10.1109/MCOM.2009.5183468]

[3] Keller E, Szefer J, Rexford J, Lee RB. NoHype: Virtualized cloud infrastructure without the virtualization. In: Proc. of the ISCA 2010. New York: ACM, 2010. 350−361. [doi: 10.1145/1815961.1816010]

[4] Carapinha J, Jiménez J. Network virtualization——A view from the bottom. In: Proc. of the SIGCOMM 2009 Workshop: VISA. New York: ACM, 2009. 73−80. [doi: 10.1145/1592648.1592660]

[5] Anderson T, Peterson L, Shenker S, Turner J. Overcoming the Internet impasse through virtualization. IEEE Computer Magazine, 2005,38(4):34−41. [doi: 10.1109/MC.2005.136]

[6] 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. [doi: 10.1145/1355734.1355737]

[7] Lu J, Turner J. Efficient mapping of virtual networks onto a shared substrate. Technical Report, WUCSE-2006-35, Washington University, 2006.

[8] Zhu Y, Ammar M. Algorithms for assigning substrate network resources to virtual network components. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. 2006. 1−12. [doi: 10.1109/INFOCOM.2006.322]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[9] Andersen DG. Theoretical approaches to node assignment. Technical Report, Carnegie Mellon University, 2002. http://www.cs.cmu.edu/~dga/papers/andersen-assign.ps

[10] Szeto W, Iraqi Y, Boutaba R. A multi-commodity flow based approach to virtual network resource allocation. In: Proc. of the IEEE GLOBECOM, Vol.6. 2003. 3004−3008. [doi: 10.1109/GLOCOM.2003.1258787]

[11] Lischka J, Karl H. A virtual network mapping algorithm based on subgraph isomorphism detection. In: Proc. of the SIGCOMM 2009 Workshop: VISA. New York: ACM, 2009. 81−88. [doi: 10.1145/1592648.1592662]

[12] Chowdhury NMMK, Rahman MR, Boutaba R. Virtual network embedding with coordinated node and link mapping. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2009. 2009. 783−791. [doi: 10.1109/INFCOM.2009.5061987]

[13] Houidi I, Louati W, Zeghlache D. A distributed virtual network mapping algorithm. In: Proc. of the IEEE ICC 2008. 2008. 5634−5640. [doi: 10.1109/ICC.2008.1056]

[14] Cai ZP, Liu F, Xiao N, Liu Q, Wang ZY. Virtual network embedding for evolving networks. In: Proc. of the IEEE GLOBECOM 2010. 2010. 1−5. [doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5683160]

[15] Butt NF, Chowdhury NMMK, Boutaba R. Topology-Awareness and reoptimization mechanism for virtual network embedding. In: Proc. of the IFIP Networking 2010. LNCS 6091, Springer-Verlag, 2010. 27−39. http://dblp.uni-trier.de/db/conf/networking/networking2010.html#ButtCB10

[16] He JY, Rui ZS, Li Y, Lee CY, Rexford J, Chiang M. DaVinci: Dynamically adaptive virtual networks for a customized Internet. In: Proc. of the ACM CoNext 2008. New York: ACM, 2008. 15:1−15:12. [doi: 10.1145/1544012.1544027]

[17] Rahman MR, Aib I, Boutaba R. Survivable virtual network embedding. In: Proc. of the IFIP Networking 2010. LNCS 6091, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 40−52. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12963-6_4

[18] 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 SIGCOMM 2008. New York: ACM, 2008. 231−242. [doi: 10.1145/1402958.1402985]

[19] Yu HF, Qiao CM, Anand V, Liu X, Di H, Sun G. Survivable virtual infrastructure mapping in a federated computing and networking system under single regional failures. In: Proc. of the GLOBECOM 2010. 2010. 1−6. [doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5683951]

[20] Yeow WL, Westphal C, Kozat U. Designing and embedding reliable virtual infrastructures. In: Proc. of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Virtualized Infrastructure Systems and Architecture (VISA). New York: ACM, 2010. 33−40. [doi: 10.1145/1851399.1851406]

[21] Paul S, Seshan S. Technical document on wireless virtualization. Technical Report, GDD-06-17, The GENI Project Office, 2006.

[22] Smith G, Chaturvedi A, Mishra A, Banerjee S. Wireless virtualization on commodity 802.11 hardware. In: Proc. of the ACM WiNTECH. New York: ACM, 2007. 75−82. [doi: 10.1145/1287767.1287782]

[23] Mishra A, Agrawal D, Shrivastava V, Banerjee S, Ganguly S. Distributed channel management in uncoordinated wireless environments. In: Proc. of the ACM MOBICOM 2006. New York: ACM, 2006. 170−181. [doi: 10.1145/1161089.1161109]

[24] Orbit. http://www.orbit-lab.org/

[25] Kokku R, Mahindra R, Zhang HH, Rangarajan S. NVS: A virtualization substrate for WiMAX networks. In: Proc. of the ACM MOBICOM 2010. New York: ACM, 2010. 233−244. [doi: 10.1145/1859995.1860023]

[26] Corin RD, Riggio R, Miorandi D, Salvadori E. AiroLAB: Leveraging on virtualization to introduce controlled experimentation in operational multi-hop wireless networks. In: Proc. of the Tridentcom 2010. Springer-Verlag, 2010. 331−344. [doi: 10.1007/978-3-642-17851-1_27]

[27] Cidon I, Kutten S, Soffer R. Optimal allocation of electronic content. In: Proc. of the IEEE INFOCOM, Vol.3. 2001. 1773−1780. [doi: 10.1109/INFCOM.2001.916675]

[28] Li B, Golin MJ, Italiano GF, Deng X, Sohraby K. On the optimal placement of Web proxies in the Internet. In: Proc. of the IEEE INFOCOM, Vol.3. 1999. 1282−1290. [doi: 10.1109/INFCOM.1999.752146]

[29] Qiu L, Padmanabhan VN, Voelker GM. On the placement of Web server replicas. In: Proc. of the IEEE INFOCOM, Vol.3. 2001. 1587−1596. [doi: 10.1109/INFCOM.2001.916655]

[30] Krishnan P, Raz D, Shavitt Y. The cache location problem. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2000,8(5):568−582. [doi: 10.1109/90.879344]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[31] Suh K, Guo Y, Kurose J, Towsley D. Locating network monitors: Complexity, heuristics, and coverage. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2005, Vol.1. IEEE Communication Society, 2005. 351−361. [doi: 10.1109/INFCOM.2005.1497905]

[32] VISA 2010: SIGCOMM Workshop. 2010. http://conferences.sigcomm.org/sigcomm/2010/VISA.php

[33] Chen WL, Xu MW, Yang Y, Li Q, Ma DC. Virtual network with high performance: VegaNet. Chinese Journal of Computers, 2010,33(1):63−73 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3724/SP.J.1016.2010.00063]

[34] Xie WB, Li J, Xian M, Chen YG. Distributed virtue backbone network algorithm based on topology characteristic. Journal of Software, 2010,21(6):1416−1425 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/3572.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03572]

[35] Houidi I, Louati W, Zeghlache D. A distributed and autonomic virtual network mapping framework. In: Proc. of the ICAS 2008. 2008. 241−247. [doi: 10.1109/ICAS.2008.40]

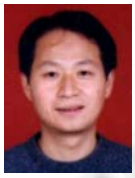
[36] Chowdhury NMMK, Samuel F, Boutaba R. PolyViNE: Policy-Based virtual network embedding across multiple domains. In: Proc. of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Virtualized Infrastructure Systems and Architecture (VISA). New York: ACM, 2010. 49−56. [doi: 10.1145/1851399.1851408]

[37] Fajjari I, Aitsaadi N, Pujolle G, Zimmermann H. VNE-AC: Virtual network embedding algorithm based on ant colony metaheuristic. In: Proc. of the ICC 2011. 2011. 1−6. [doi: 10.1109/icc.2011.5963442]

附中文参考文献:

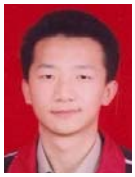
[33] 陈文龙,徐明伟,杨扬,李琦,马东超.高性能虚拟网络 VegaNet.计算机学报,2010,33(1):63−73. [doi: 10.3724/SP.J.1016.2010.00063]

[34] 解文斌,李佳,鲜明,陈永光.基于拓扑特性的分布式虚拟骨干网算法.软件学报,2010,21(6):1416−1425. http://www.jos.org.cn/1000-9825/3572.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03572]



蔡志平(1975－),男,湖南益阳人,博士,副教授,CCF 高级会员,主要研究领域为虚拟化,计算机网络测量,优化算法,信息安全.

刘强(1986－),男,博士生,主要研究领域为计算机网络,信息安全.



吕品(1983－),男,博士生,主要研究领域为无线网络.

肖侬(1969－),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为虚拟化,网络存储.

王志英(1956－),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为虚拟化,体系结构.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn