

网络虚拟化与虚拟网映射算法研究

姜 明¹, 王保进², 吴春明³, 孔祥庆⁴, 闵 啸⁴, 张 旻¹

(1. 杭州电子科技大学计算机学院, 浙江杭州 310018; 2. 国家数字交换系统工程技术研究中心, 河南郑州 450002;
3. 浙江大学计算机系统工程研究所, 浙江杭州 310027; 4. 嘉兴学院数理与信息工程学院, 浙江嘉兴 314001)

摘 要: 本文对网络虚拟化技术中的虚拟网映射问题及其研究现状进行了介绍, 分析了当前虚拟网映射算法存在的不足, 提出了一种解决路径跳数限制约束的虚拟网映射算法—基于路径集多商品流问题模型的映射算法 PBMC, 该算法有效解决了路径跳数约束与网络资源分布均衡性之间的问题, 提高了虚拟网构建成功率和网络资源利用率。

关键词: 网络虚拟化; 虚拟网; 映射算法; 多商品流问题

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 06-1315-06

Research on Network Virtualization and Virtual Network Mapping Algorithm

JIANG Ming¹, WANG Bao-jin², WU Chun-ming³, KONG Xiang-qing⁴, MIN Xiao⁴, ZHANG Min¹

(1. Computer Science College of Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;
2. China National Digital Switching System Engineering and Technological Research Center, Zhengzhou, Henan 450002;
3. Institute of Computer System & Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;
4. Mathematics Physics and Information Engineering College of Jiaxing University, Jiaxing, Zhejiang 314001, China)

Abstract: This paper introduces the problem of virtual network mapping on network virtualization technology, reviews the previous studies and analyzes the shortage of existing mapping algorithms. A new mapping algorithm PBMC is proposed, which is based on path based multi-commodity problem model to resolve the problem of hop count limit and network resource distribution balance. Simulation results indicate that compared with traditional multi-commodity based algorithm, PBMC performs better in virtual network request acceptance ratio and resource utilization ratio.

Key words: network virtualization; virtual network; mapping algorithm; multi-commodity problem

1 网络虚拟化概述

随着互联网业务类型的不断丰富, 网络规模的不断扩大, 促使网络技术需要不断地进行革新, 以适应用户业务和网络规模快速发展的需求。例如, 针对服务质量问题提出了 InteServ/RSVP 和 DiffServ 两种网络体系结构模型, 针对 IPv4 的不足提出了 IPv6 协议, 以及 IP 组播技术、安全路由技术等。但时至今日, 上述技术在经过长期的研究以后都未能得到大规模的应用, 至多只是停留在试验网阶段。究其原因, 是因为在当前的互联网体系架构下, 应用上述新技术需要对网络系统进行升级和改造, 而互联网庞大的规模导致这种改造成本过高。另一方面, 互联网是由不同 ISP 建设、运营和管理的众多异构自治域组成, 一个 ISP 部署应用上述新技术只能获得很少的收益, 而要其他 ISP 都同意这样做是非常困难的^[1,2]。因此, 虽然目前互联网应用上的创新层出不穷,

但是在网络技术本身的创新方面却处于停滞不前的僵化境地^[1~3]。

网络虚拟化技术能有效破解互联网在技术创新上所面临的僵局^[1]。具体来说, 未来的互联网应该支持网络基础设施提供和服务提供两大功能实体在逻辑上相分离^[3]。基础设施提供商 (Infrastructure Provider, InP) 建设、管理和维护物理网络基础设施; 服务提供商 (Service Provider, SP) 根据业务需求向 InP 购买或租赁物理网络资源, 通过构建虚拟网的方式 (如图 1 和图 2 所示) 为用户提供端到端的服务, 从而在共享由不同基础设施提供商提供的底层物理网络资源基础上, 能同时支持多个不同服务提供商的异质的网络体系结构并存, 为用户提供多样化的网络服务。

通过将网络服务提供从基础设施提供中分离出来, 网络虚拟化使得网络技术的创新和改变变得更加灵活, 这种逻辑上的分离使得二者可以独立地演进, 可以在

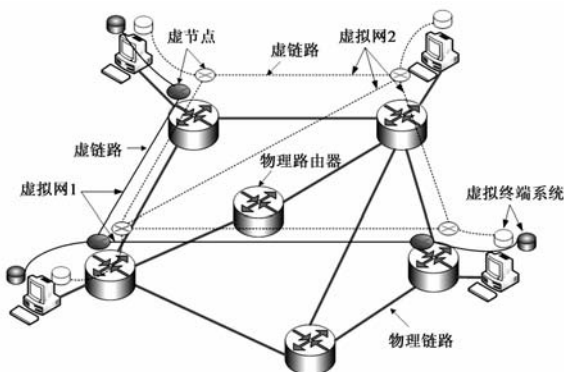


图1 虚拟网构建需求示意图

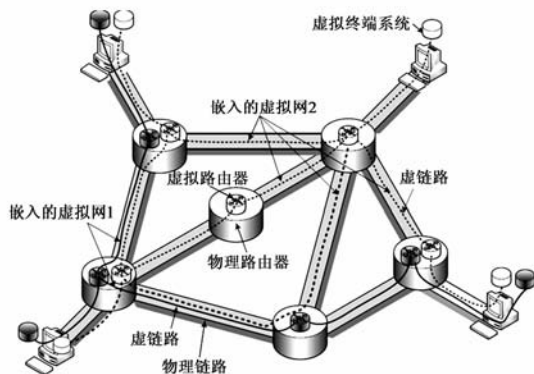


图2 嵌入后生成的虚拟网示意图

支持现有服务的同时灵活地部署新的互联网服务。目前,国内外正在开展的新一代互联网体系结构研究计划中,无论是美国的 GENI^[4] 和 FIND^[5], 还是欧盟的 FIRE^[6] 和 4WARD^[7], 或者日本的 AKARI^[8], 以及我国 863 重大研究计划“新一代高可信网络”^[9] 等, 都提出基于网络服务与基础设施相分离的思想来破解当前网络在部署新型网络体系架构、网络协议以及提供网络实验环境等方面面临的僵局。

2 网络虚拟化分层服务提供模型

网络虚拟化环境中, 服务提供采用分层的方式, 通过构建虚拟网为用户提供面向业务的服务。服务提供模型分为资源层、服务层和应用层三层(如图 3 所示)。在资源层, InP 负责部署和管理底层物理网络资源, 并通过开放、标准的可编程接口将资源提供给 SP 使用。不同的 InP 在资源的质量以及使用自由度等方面提供差异化的服务。在服务层, SP 通过映射代理向资源层的 InP 购买或租赁物理网络资源, 不仅可构建用于满足用户端到端业务需求的虚拟网, 也可将其中的一部分资源租赁给其他 SP, 从而构建出具有层次性的虚拟网。此外, SP 通过 InP 提供的接口对其虚拟网进行管理, 并负责终端用户的虚拟网接入。网络虚拟化环境中的终端用户与当前互联网中的终端用户类似, 但在虚拟化环境中, 每个终端用户可以通过映射代理与多个 SP 同时

建立不同的连接, 从而可以根据业务需求获得与之相匹配的服务。

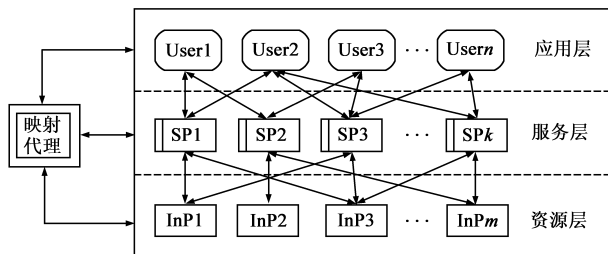


图3 网络虚拟化分层服务提供模型

3 虚拟网映射

虚拟网映射是构建虚拟网的重要过程, 是映射代理的核心功能, 也即根据 SP 的构建需求及 InP 当前的资源状况, 通过映射算法在构建需求与网络资源之间进行匹配, 以获得最佳的网络资源分配方案进行嵌入, 生成虚拟网(如图 1 和图 2 所示)。因此, 对于虚拟网映射问题, 映射代理需要执行的三大功能是接收并描述 InP 发布的资源信息, 接收并描述 SP 的虚拟网构建请求, 执行映射算法。

3.1 资源描述

对 InP 发布的网络资源信息, 可采用 NDL(Network Description Language)^[10]、INSADL^[11]、NML(Network Markup Language)^[12]等方式描述。资源描述中, 一个网络元素就是一个基本组件, 网络元素可以是节点、链路、接口和路径。每一个网络元素有一个标识符(或名字)、可用性参数及功能性或非功能性属性。功能属性定义了特征、属性及网络元素的功能(比如节点/链路类型、运行环境、虚拟化工具、操作系统、网络协议栈等)。非功能属性则定义了网络元素的标准和限制等。

每个节点都分为两类, 即物理节点和虚拟节点。一个物理节点可以包含一个或多个虚拟节点, 每个物理/虚拟节点有多个物理/虚拟接口, 包括以太网接口、ATM 接口、无线接口等类型。一个或多个物理/虚拟接口连接一个或多个物理/虚拟链路, 一个物理链路可以支持一个或多个虚拟链路, 每个链路有两个附加的特征, 即连接类型和 QoS 参数。

3.2 虚拟网构建需求描述

与物理网络规划需求类似, 虚拟网构建需求主要关注与拓扑结构、虚节点位置、虚链路带宽、端口类型、路径跳数限制及 QoS 参数配置等。此外, 虚拟网的构建与拆除, 本质上是根据业务需求对物理网络资源动态分配与释放的过程, 虚拟网运行的生命周期也是构建需求的重要参数。因此, 虚拟网的构建需求 $VNreq$ 可表示为:

$$VNreq = \{ \{ Node_i^v, Node_j^v, C_{ij}^v \}, (i, j = 1, 2, \dots, n), hn, \}$$

$port, OS, QoS, lifetime \}$

其中: $Node_i^v$ 为虚节点; C_{ij}^v 为 $Node_i^v$ 与 $Node_j^v$ 间虚链路 e_{ij}^v 的带宽需求; n 为虚节点数; hn 为映射到物理网络路径上跳数限制; $port$ 为端口类型; OS 为操作系统类型; QoS 为所需 QoS 参数; $lifetime$ 为虚拟网运行的生命周期。

3.3 虚拟网映射问题模型的描述

对于 $VNreq$ 中 $OS, port$ 类型等需求可以通过映射前预先对 lnP 提供的资源进行筛选实现, 映射问题的难点在于一方面要满足 $VNreq$ 中的节点、链路资源需求, 另一方面需要能高效地利用物理网络资源, 以期在资源有限的物理网络上能够生成尽可能多的虚拟网, 实现 lnP 利益的最大化。由于虚拟网构建需求的多样性、物理网络资源的有限性、虚拟网构建请求是动态到达且不可预知的、虚拟网请求到达后需要即时处理等问题, 使得虚拟网映射问题从理论和应用上来说都非常具有挑战性^[13]。

虚拟网映射问题可抽象为图论问题。即, 将一个或者多个 lnP 所提供的底层物理网络看作一个无向带权图 $G = (V, E, C)$, 其中:

$V = \{Node^S; Node^S \text{ 为物理网络节点} \}$

$E = \{e; e \text{ 为物理网络中的链路} \}$

$C = \{c(e); c(e) \text{ 为链路 } e \text{ 的带宽容量} \}$, 即为图中边的权值。

虚拟网则是在图 $G(V, E, C)$ 中构建的一个子图 $G^E = (V^E, P^E, C^E)$, 其中

$V^E = \{Node^E; Node^E \text{ 为嵌入到物理节点中的虚拟网节点} \}$, 是 V 的子集;

$P^E = \{p; p \text{ 为虚链路映射到物理网络中的路径} \}$;

记 $l(p)$ 为路径 p 的跳数, 则 $\forall p \in P^E, l(p) \leq hn$ 。

记 $x(p)$ 为路径 p 的带宽容量, 则 $\sum_{p \in P_i^E} x(p) = C_{ij}^v, P_i^v$

为 $Node_i^v$ 与 $Node_j^v$ 间虚链路 e_k^v 所映射到的物理路径集合。

物理网络 G 、虚拟网构建需求 $VNreq$ 、虚拟网 G^E 与映射算法 M 间的关系可表示为:

$$M: (G, VNreq) \mapsto G^E$$

3.4 映射算法的评价指标

由于虚拟网映射算法一方面要满足服务提供商的构建需求, 另一方面需要高效地利用基础设施提供商的物理网络资源, 因此映射算法的性能指标主要通过虚拟网映射成功率和网络资源利用率来衡量。

定义 1 构建成功率 $a = m_n/n$, 其中 m_n 为 n 个构建申请中映射成功的虚拟网数;

定义 2 网络资源利用率

$$U = \left(\sum_{e \in E} \frac{\sum_{k=1}^L x_k(e)}{c(e)} \right) / |E|$$

其中 $x_k(e)$ 为第 k 个虚拟网映射到链路 e 上所占用的总带宽。

提高物理网络资源的利用率, 关键是在满足当前虚拟网构建需求的前提下, 如何为后续虚拟网的构建提供合理的资源分布空间, 以便后续虚拟网的构建。由于虚拟网的构建需求是动态到达且不可预知的, 从统计上分析, 一个资源分布均衡的物理网络可提高后续虚拟网构建的成功率, 从而使得物理网络资源保持较高的利用率。

定义 3 资源分布均衡性 D 为物理网络上各链路负载强度的标准差;

$$D = \frac{\sqrt{\sum_e (\omega(e) - \bar{\omega})^2}}{|E|}$$

其中 $\bar{\omega} = \sum_e \omega(e) / |E|$

3.5 映射算法相关工作

由于资源分布均衡的物理网络能提高虚拟网构建成功率和网络资源的长期使用效率, 成为当前虚拟网映射问题研究的主要目标^[13~16]。Yong Zhu 等假设网络资源是无限的, 当构建一个虚拟网时, 多个虚链路的构建请求会同时到达, 综合考虑这些并发的请求以有效利用网络资源。使用最大链路负荷作为性能指标, 目标是最小化链路的最大负荷^[14]。Robert Ricci 等通过避开物理网络中的瓶颈链路来进行虚链路映射, 以提高后续虚拟网构建成功的概率, 并采用模拟退火算法来进行求解^[16]。Jens Lischka 等提出通过子图同构检测和回溯的方法将虚节点和虚链路同步映射到物理网络中^[17], 以提高虚拟网构建成功的概率。

由于虚拟网映射问题本质上与多商品流问题是一致的, 并且多商品流问题模型已得到了广泛的研究与应用, 因此, 基于多商品流问题模型可更好地解决虚拟网映射中的资源分布均衡性问题。W Szeto 基于多商品流问题中的最大并行流问题在物理网络中每个边缘节点对之间进行资源的预分配, 采用线性规划方法进行建模求解。当一个新的虚拟网构建需求到达后, 在预分配资源中对虚拟网所需资源进行实际分配^[15]。Minlan Yu 等提出了多径映射的方法, 通过将虚拟链路映射到多条物理路径上, 以提高物理网络的负载均衡和资源可利用率, 并基于多商品流问题来进行建模求解^[13]。

尽管多径映射方法与多商品流问题模型可更优化地解决虚拟网映射中的资源分布均衡性问题, 但却无法满足路径跳数限制要求, 从而只能采用单径映射方法满足面向业务、有延时约束需求的虚拟网构建需求。

本文针对该问题,采用多径映射方法,通过基于有效路径集的多商品流问题模型研究虚拟网映射问题,在满足用户虚拟网构建需求,尤其是路径跳数限制的前提下,优化物理网络资源分布的均衡性,提高网络资源的长期使用效率。

4 基于路径集多商品流问题模型的虚拟网映射算法 PBMC

4.1 算法设计思想

当前基于多商品流问题模型的虚拟网映射方法之所以无法解决路径跳数约束需求,根本原因在于这些方法是以链路作为数学建模和求解时的决策变量.当进行多径映射时,虚链路带宽在多个路径上的分配比例和路径跳数间的关系无法确定.基于此,本文将采用基于有效路径集的多商品流问题模型对虚拟网映射问题进行规划求解,提出 PBMC(Path Based Multi-Commodity)映射算法.首先根据 $VNreq$ 中各虚链路带宽需求及路径跳数限制条件等求得有效路径集,即满足跳数限制要求的物理路径构成的集合.然后以路径可用带宽为决策变量,以满足虚链路带宽要求为前提,以链路的最大负载强度最小化为优化目标,利用多径映射思想建立数学规划,并设计启发式算法对模型进行求解。

4.2 数学规划

定义 4 链路负载强度 $\omega(e)$ 为链路 e 上已占用带宽与链路带宽容量之比;

$$\omega(e) = \frac{u(e)}{c(e)} = \frac{\sum_{p \in P_e \in p} x(p)}{c(e)}$$

其中 $u(e)$ 为链路 e 被占用带宽; $x(p)$ 为路径 p 所占用带宽。

建立如下规划:

规划目标:

$\min \max_{e \in E} \{\omega(e)\}$ 即链路的最大负载强度最小化

约束条件:

虚链路带宽需求约束:

$$\sum_{p \in P_i} x(p) \geq u_i, \forall i, i = 1, 2, \dots, r$$

物理链路带宽容量约束:

$$\sum_{p \in P, e \in p} x(p) \leq c(e), \forall e \in E$$

带宽占用的正则性要求约束:

$$x(p) \geq 0, \forall p \in P$$

4.3 模型求解

由于上述规划是非标准数学规划,本质上该问题是 NP 难问题,直接采用规划方法求得全局最优解非常困难.因此,本文通过设计启发式算法以求得近似最优解.算法分为两个过程,首先求得初始可行解;在此基

础上,通过对初始可行解进行迭代以求得近似最优解。

4.3.1 初始可行解

定义 5 路径 p 的当前可用带宽容量为 $c^u(p)$, $c^u(p) = \min_{e \in p} \{c^u(e)\}$,

其中 $c^u(e) = c(e) - u(e)$, 为链路 e 的剩余带宽;

定义 6 路径 p 的脆弱度为 $a(p)$, $a(p) = \max_{e \in p} \{\alpha(e)\}$ 其中 $\alpha(e)$ 为链路 e 上通过的不同 P_i 中路径的数目,

$$\alpha(e) = \sum_{i=1}^k \delta_i(e), \delta_i(e) = \begin{cases} 1, & \text{if } p \in P_i, e \in p \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

初始可行解求解过程

①将 $VNreq$ 中的各虚链路 e_j^v 的带宽需求 C_j^v 按非增序排列;

②首先采用单径映射,在虚链路 e_j^v 所对应的路径子集 P_k 中选择一条路径 p 满足:

$$(1) c^u(p) \geq C_j^v; (2) \alpha(p) = \min_{p \in P_i} \{\alpha(p)\}$$

③若②中条件(1)不能满足,说明该虚链路采用单径映射不可行,应采用多径映射;则根据路径集 P_i 中各路径的 $a(p)$ 值按比例分配该虚链路所需带宽资源。

4.3.2 迭代优化

由于上述求解过程中只是考虑了虚链路映射时的局部均衡性问题,而未从整个虚拟网范围考虑,因此可对初始可行解进一步优化.其基本思想为寻找最大负载强度链路,将通过该链路的路径上的虚拟网迁移至其他路径,以降低链路负载强度.迁移量采用二分方法获得,通过动态设置调优目标,迭代若干次后达到收敛.具体如下:

迭代优化过程

①初始设调优目标 $\epsilon = 1$

①取链路 e^* 满足 $\omega(e^*) = \max_{e \in E} \{\omega(e)\}$;

②对于 e^* ,设通过其路径集为 $P^* = \{p: e^* \in p, p \in P\}$.取 $p^* \in P^*$,并设 $p' \in P_i$,取 $p' \in P_i$ 满足 $c^u(p') = \max_{p \in P_i} \{c^u(p)\}$;

③设 $\Delta = 0, \bar{\Delta} = c^u(p')$, $\Delta := \frac{1}{2}(\Delta + \bar{\Delta})$;

④ $\forall e \in p^* u(e) := u(e) - \Delta; \forall e \in p' u(e) := u(e) + \Delta$ 若 $\omega(e^*) \geq \max_{e \in E} \{\omega(e)\}$,转步骤⑥,否则转步骤⑤;

⑤ $u(e) := u(e) + \Delta, \forall e \in p^*, u(e) := u(e) - \Delta, \forall e \in p', \Delta := \frac{1}{2}(\Delta + \bar{\Delta})$,转步骤④;

⑥ 若 $\omega(e^*) - \max_{e \in E} \{\omega(e)\} \leq \epsilon$ 则 $\epsilon = (\omega(e^*) - \max_{e \in E} \{\omega(e)\})/2$,转步骤①;

否则达到收敛,迭代结束。

5 仿真试验

本文基于 Matlab 进行了仿真模拟实验,将 PBMC 算法与基于单径映射多商品流问题模型的 MC 算法进行了比较分析.仿真实验所采用的网络拓扑为 14 个节点、18 条链路的 NSFNET 骨干网拓扑结构(如图 4 所示),链路带宽为 10Gbps.虚拟网构建请求的虚节点数在区间

[2,8]中,虚链路带宽需求在区间[100mbps,1Gbps]中及跳数限制在区间[4,8]中均服从均匀分布.虚拟网申请的时间间隔均值为 50 个单位时间,生命周期均值为 350 个单位时间,均按 Poisson 分布产生.总共模拟了 2500 个虚拟网构建请求与映射过程.

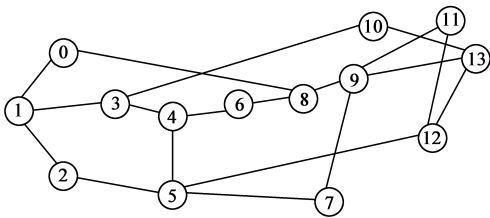


图4 NSFNET网络拓扑

仿真实验比较分析的指标除了构建成功率、资源利用率之外,还包括资源分布均衡性和运营商收益两个指标.

定义 6 运营商收益为 R ,

$$R = \sum_k \sum_{e_{ij}^v \in V/req_k} \alpha \cdot u_k(e_{ij}^v) \cdot lifetime_k - C$$

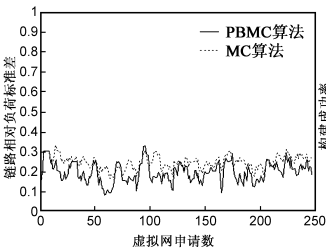


图5 物理网络链路负荷标准差

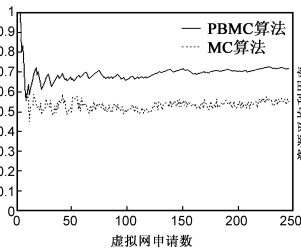


图6 虚拟网构建成功率

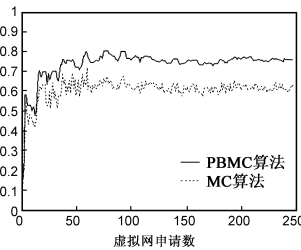


图7 网络资源利用率

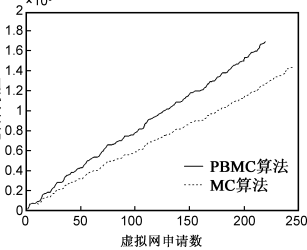


图8 物理网络运营商收益

6 结论

本文对虚拟网映射相关问题及映射算法研究现状进行了介绍,分析了当前虚拟网映射算法存在的不足,提出了一种解决路径跳数限制约束的虚拟网映射算法PBMC. PBMC采用多径映射方法、基于路径集多商品流问题模型建立数学规划. 针对求解该规划是一个NP难问题,本文设计了一个启发式算法,采用先求得可行解,再通过迭代求得优化解. 仿真实验结果表明PBMC算法在资源分布均衡性、构建成功率、资源利用率上均有明显提高,说明该算法能有效解决基于多径映射多商品流问题模型的映射方法与路径跳数限制间的问题.

参考文献

[1] Thomas Anderson, Larry Peterson, et al. Overcoming the internet impasse through virtualization[J]. IEEE Computer Magazine, 2005, 38(4): 34 – 41.

[2] David Taylor, Jonathan Turner. Towards a Diversified Internet [DB/OL]. <http://www.arl.wustl.edu/netv/contrib/diversifiedInternet.pdf>, 2004.

其中 C 为累计构建成本; $C = \sum_k \sum_{e \in E} \beta \cdot u_k(e) \cdot lifetime_k$; α 为收费单价; β 为成本单价.

仿真实验结果如图 5 ~ 图 8 所示.

从图 6 可以看出,与 MC 算法相比, PBMC 算法得到的物理网络上各链路负载强度的标准差更小,从而使得物理网络资源的分布均衡性更优. 由于资源分布均衡性更优,因此图 7 表明了当物理网络上运行的虚拟网个数达到一定规模后, PBMC 算法的构建成功率逐渐稳定在 0.7 左右,而 MC 算法的构建成功率只有 0.5 左右. 图 8 表明 PBMC 算法的资源利用率明显优于 MC 算法. 由于有更高的构建成功率和资源利用率,因此,图 9 表明采用 PBMC 算法,物理网络运营商可以获得更多的收益. 上述仿真实验结果表明相对于基于单径映射的 MC 算法,采用多径映射、基于路径集多商品流问题模型的 PBMC 算法在满足带路径跳数限制约束的虚拟网构建需求前提下,优化了网络资源分布均衡性,提高了网络资源的利用率.

[3] Nick Feamster, Lixin Gao, Jennifer Rexford. How to lease the internet in your spare time [J]. ACM SIGCOMM Computer Communications Review, 2007, 37(1): 61 – 64.

[4] GENI Project [DB/OL]. <http://www.geni.net/>, 2005.

[5] FIND Project [DB/OL]. <http://www.nets-find.net/index.php>, 2006.

[6] Future Internet Research & Experimentation Project [DB/OL]. http://cordis.europa.eu/fp7/ict/fire/overview_en.html#why_fire, 2009-01-25.

[7] 4ward Project [DB/OL]. <http://www.4ward-project.eu/>, 2008.

[8] AKARI Project [DB/OL]. <http://akari-project.nict.go.jp/>, 2008.

[9] 汪斌强, 邬江兴. 下一代互联网的发展趋势及相应对策分析[J]. 信息工程大学学报, 2009, 10(1): 1 – 10.

Wang Bin-qiang, Wu Jiang-xing. Development trends and associated countermeasures analysis for NGN [J]. Journal of Information Engineering University, 2009, 10(1): 1 – 10. (in Chinese)

[10] Network Description Language [DB/OL]. <http://www.sci>

ence.uva.nl/research/sne/ndl,2005.

- [11] 杨鹏,刘业.新型网络体系结构描述语言及其在分布式流媒体服务规约中的应用[J].电子学报,2007,35(1): 165 – 171.
Yang Peng, Liu Ye. A novel network architecture description language and its application to specify distributed streaming media service[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(1): 165 – 170. (in Chinese)
- [12] Network Mark-up Language [DB/OL]. http://www.ogf.org/gf/group_info/view.php?group=nml-wg, 2005.
- [13] Minlan Yu, Yung Yi, Jennifer Rexford, et al. Rethinking virtual network embedding: Substrate support for path splitting and migration[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(2): 17 – 29.
- [14] Yong Zhu, Mostafa Ammar. Algorithms for assigning substrate network resources to virtual network components[A]. IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)[C]. Barcelona: IEEE Press, 2006. 1 – 12.
- [15] W Szeto, Y Iraqi, R Boutaba. A multi-commodity flow based approach to virtual network resource allocation[A]. IEEE GLOBECOM[C]. San Francisco: IEEE Press, 2003. 3004 – 3008.
- [16] Robert Ricci, Chris Alfeld, Jay Lepreau. A solver for the net-

work testbed mapping problem[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2003, 33(2): 65 – 81.

- [17] Jens Lischka, Holger Karl. A virtual network mapping algorithm based on subgraph isomorphism detection[A]. Proc of 1st ACM SIGCOMM Workshop on VISA[C]. Barcelona: IEEE Press, 2009. 81 – 88.

作者简介



姜 明 男, 1974 年生, 江苏省如皋市人, 博士, 杭州电子科技大学计算机学院副教授. 2004 年毕业于浙江大学计算机应用专业, 获得工学博士学位, 主要研究方向为网络虚拟化、网络 QoS.



吴春明 男, 1967 年生于浙江萧山. 博士, 浙江大学计算机学院教授、博士生导师. 主要从事网络服务质量、可重构网络技术、网络虚拟化等方向的科学研究工作.

E-mail: wuchunming@zju.edu.cn