

## 一种基于区域划分的虚拟网映射新算法

吕博\* 杨帆 王振凯 陈建亚 刘韵洁  
(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室 北京 100876)

**摘要:** 目前多数启发式虚拟网映射算法是通过在限制性约束条件上构建映射优化目标函数,从而求得虚拟网映射次优解,存在映射匹配方程求解复杂、计算开销大、缺乏具体路径选择方法等问题。该文基于负载均衡路由和小区划分结构的思想设计一种虚拟网映射算法 VLB-VNE(Valiant Load-Balancing-Virtual Network Embedding),将核心/骨干网络划分为多个小区域,小区域内采用全互连逻辑拓扑及 VLB 式的负载均衡两跳路由方式,小区域间利用最短路径路由和贪婪式迭代匹配算法完成虚拟网映射。经理论推导和仿真实验验证: VLB-VNE 构建合理、易被映射的小区划分结构的现实网络,并将节点和链路的映射统一模块化,映射匹配简单、计算开销小、具有明确的低选路复杂度,并拥有负载均衡路由的优秀时延和吞吐量性能。

**关键词:** 核心/骨干网络; 路由算法; 负载均衡; 区域划分; 虚拟网映射

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2011)10-2347-06

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2011.00116

## A Novel Virtual Network Mapping Algorithm Based on Regionalization

Lü Bo Yang Fan Wang Zhen-kai Chen Jian-ya Liu Yun-jie  
(Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education,  
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** At present, virtual network mapping algorithms obtain suboptimal solution based on constraint condition, they still have the issues of solving mapping equations complicatedly, high computation cost and lack of specific path selection method. To address these issues, a novel virtual network mapping algorithm called Valiant Load-Balancing-Virtual Network Embedding (VLB-VNE) is proposed. VLB-VNE divides the nodes of core/backbone network into several regions. And the region has full mesh logical topological structure and valiant load-balancing routing scheme. VLB-VNE is based on greedy iterative algorithm in the region level. Theoretical analysis and simulation results prove that: VLB-VNE achieves a rational and mapping easily practical network, combines nodes and links mapping, reduces computation cost and possesses optimality of valiant load-balancing network in throughput delay and routing complexity.

**Key words:** Core/backbone network; Routing scheme; Valiant load-balancing; Region allocation; Virtual network mapping

### 1 引言

网络虚拟化是未来网络领域中备受瞩目的一个研究方向,目前世界多个发达国家和地区都已经开展了众多关于网络虚拟化及其实验环境的研究项目。网络虚拟化技术通过抽象、分配、隔离机制在一个公共物理网络(substrate network)上支持多个虚拟网络,单个虚拟网络之间不会产生影响,可以单独进行各具特色的网络技术创新和服务提升等研

究<sup>[1-5]</sup>。单个虚拟网络是根据需求由一组虚拟节点和虚拟链路连接而成,如何将这些虚拟节点和虚拟链路对应匹配到现实物理网络中的节点和链路是虚拟网映射技术需要解决的问题<sup>[6-14]</sup>。但由于虚拟网络需求的多样性,使得如何将多个不同的虚拟网匹配映射到一个公共物理网络中成为 NP-hard 问题。

目前,为解决虚拟网映射技术的 NP-hard 问题,国外很多研究者已经提出一些启发式虚拟网映射算法。这些虚拟网映射算法主要从降低映射复杂度、降低计算处理开销和提高网络资源利用率 3 个方面考量,提出求得映射匹配次优解的映射方法,其算法成果各有利弊。其中几种主要的算法方法和其存在问题如下:(1)节点和链路统一映射基于递归参数

2011-02-17收到, 2011-07-01改回

国家973规划项目(2007CB310701, 2011CB302900), 国家科技重大专项(2010ZX03004-002-02)和中央高校基本科研业务费专项资金(2009RC0125)资助课题

\*通信作者: 吕博 lvbo05@126.com

最优的映射方法。该方法基于最短路径思想,实现简单复杂度低,但未考虑带宽整合,网络利用率低,如文献[10]。(2)节点和链路分开映射基于路径迁移(path splitting and migration)的映射方法。该方法基于带宽整合和流量工程思想,网络利用率高,但操作计算量大并且方法描述缺乏具体的路径选择方法,如文献[11, 12]。(3)分布式分割协作的映射方法。该方法可实现网络分布式控制摆脱中心式分配,但算法计算复杂、互通协议繁多,大型网络中应用效果差,如文献[14]。

随着光通道(light path)、光电转换、隧道、中继等技术的发展,负载可以在核心/骨干网内直接穿越若干个光交换节点而不需要经过电交换层到达目的核心节点,在此基础上美国斯坦福大学研究者于2005年提出负载平衡 Valiant Load-Balancing(VLB)路由<sup>[15]</sup>。VLB 路由的基本思想是:核心/骨干网络中的所有核心节点都逻辑全互连(logical full mesh)<sup>[15]</sup>,第1跳核心节点负载通过逻辑链路(logical link)<sup>[15]</sup>平衡分散到核心/骨干网内所有核心节点,第2跳核心/骨干网内每个核心节点将收到的负载通过逻辑链路转发到相应的目的核心节点。VLB路由的调度算法简易,保证了网络资源的利用率,具有最优的抗毁能力,并减少拥塞时延。但VLB的所有节点全互连结构和全网级的负载分散无法适用于广泛的拓扑结构,在现实网络中是难以实现的。

受蜂窝网中小区划分结构思想的启发,我们将网络划分成多个区域。区域内采用VLB式的全互连结构和两跳负载平衡路由方式,区域间采用基于最短距离矢量路径路由算法的最短小区路径路由方式。通过这种结构依靠增多低选路复杂度的路由跳数,不仅解决了VLB路由中需要所有节点全互连和全网级负载分散的问题,并保持了VLB路由的低算法复杂度、最优的吞吐性能、时延性能、抗毁能力和网络资源利用率。同时我们发现,这种结构中的网络小区划分思想、资源模块化思想和保持VLB路由优点的特性也有助于解决虚拟网映射匹配求次优解过程中的虚拟网整体映射匹配复杂、计算开销大和资源利用率低的问题。由此,基于负载平衡路由和小区划分结构的思想,我们设计一种虚拟网映射算法:Valiant Load-Balancing-Virtual Network Embedding(VLB-VNE)。VLB-VNE将核心/骨干网络划分为多个小区域,小区内部由其内部的核心节点和逻辑链路连接组成,小区之间共享小区交界处的核心节点和逻辑链路,小区内所有核心节点都逻辑全互连并采用VLB式的负载平衡两跳路由方式。虚拟网根据最短小区路径选择占用小区,小区内网

络资源看成一个整体,虚拟网在小区层通过贪婪式迭代算法,即可完成与现实网络的映射匹配。VLB-VNE通过构建合理、易被映射的小区划分化的现实网络,将小区内的节点和链路映射统一化、资源模块化,实现操作简单、计算量小、无需复杂互通协议且有明确的低选路复杂度路由路径选择的虚拟网映射算法。

文章第2节介绍VLB-VNE算法的具体网络结构、映射方式和路由细节。第3节利用数学工具分别分析VLB-VNE算法线性规划方程、平均开销、平均跳数、平均传输距离、复杂度等性能。第4节利用NS2和Matlab软件对VLB-VNE算法与基于其他贪婪式迭代算法实现虚拟网映射的算法进行吞吐量和时延性的仿真对比和仿真结果分析。第5节是结论。

## 2 VLB-VNE 算法

VLB路由<sup>[15-18]</sup>基于负载平衡思想来实现核心/骨干网络寻路和资源分配。设一个含有 $N$ 个核心节点的核心/骨干网络,每个核心节点的吞吐量为 $r$ ,则网络中每条逻辑链路需要的容量为 $2r/N$ ,单个核心节点对外的逻辑链路总容量为 $(2r/N)(N-1)$ ,核心/骨干网络总的逻辑链路容量为 $2r(N-1)$ ,核心/骨干网络总的核心节点吞吐量为 $Nr$ ,使得核心/骨干网络设备容量设计不必遵循最坏性能(worst-case performance)<sup>[16]</sup>和轻载(over provisioning)<sup>[16]</sup>原则,减轻网络资源浪费。VLB路由的网络中链路或节点出现问题,损失压力也会被平均为原来的 $1/N$ ,具有最优的抗毁能力<sup>[19]</sup>。由文献[16]可知VLB路由通过加长传输路径和增大传输时延,使网络资源利用率提高,减少拥塞时延。

将核心/骨干网络划分为多个小区域,区域内采用VLB式的逻辑全互连,可以实现现实网络资源的规则模块化,并使得小区内节点和链路资源得以统一成一个整体,易于映射计算和资源分配。小区内采用VLB路由方式,小区间采用最短路径路由方式,路由路径固定,不需要额外的互通、调整。

### 2.1 VLB-VNE 网络结构

现实核心/骨干网络划分为多个逻辑全互连式的小区域,小区内,通过逻辑链路两两相连成全互连式的网络,相邻的小区之间,具有交迭核心节点和交迭逻辑链路。如图1所示,图中细线为小区内的核心节点和逻辑链路,粗线为相邻小区的交迭核心节点和交迭逻辑链路,边缘节点直接连到核心节点上。

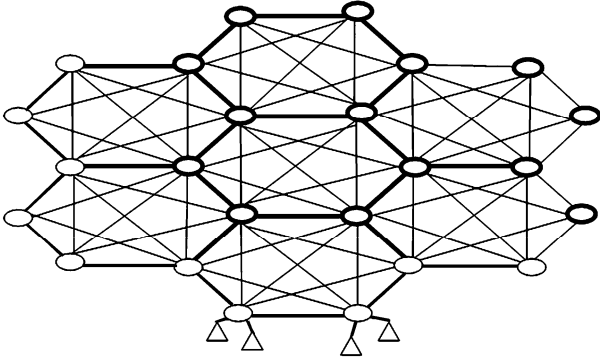


图 1 现实核心/骨干网小区逻辑划分图

2.2 VLB-VNE 映射方式和路由路径

虚网和现实网络都采用 hose 模型<sup>[20]</sup>，边缘节点直连到核心汇接节点，路由和资源分配只考虑核心汇接节点，使得需求和资源都得以量化。

VLB-VNE 算法的映射方式：VLB-VNE 算法映射采用贪婪式迭代法。

步骤 1 需求容量为  $C$  的虚拟网根据最短小区矢量路径选择其占用的小区；

步骤 2 当所选小区容量不足时，设其中容量最短缺的小区其剩余容量为  $V$ ，在虚网中减去容量  $V$  并在现实网中去掉其占用路径上的小区容量  $V$ ；

步骤 3 新的虚拟网容量  $C - V$ ，在剩余的小区重新根据最短小区路径选占用小区，若中间小区容量不足，则同步步骤 2；

步骤 4 迭代下去完成该虚拟网与现实网的映射匹配。

重复上述步骤 1-步骤 4 直到最终将全部虚拟网映射到现实网络中。如图 2 所示，不同符号标记的线条代表不同虚拟网占用的现实网络中的小区路径。

VLB-VNE 算法的路由过程：

步骤 1 选择虚拟网要占用的小区采用最短距离矢量路径的路由方式；

步骤 2 每个小区内都采用 VLB 式的负载均衡两跳路由方式：负载第 1 跳跳到小区内所有核

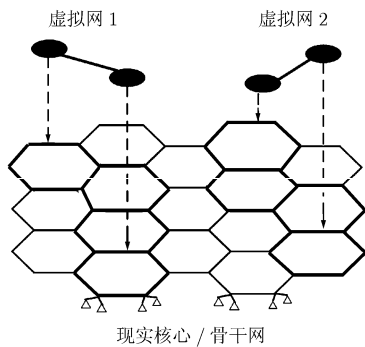


图 2 VLB-VNE 虚拟网映射图

心节点，第 2 跳平均跳到目的方向相邻小区的所有交迭核心节点；

步骤 3 当小区为负载目的节点所在小区时，负载均衡第 2 跳直接跳到目的核心节点。

现实网络小区划分模块化、贪婪式迭代映射方式、小区间最短距离矢量路径和小区内 VLB 路由方式使得 VLB-VNE 算法的映射考虑带宽整体分配、整合、利用率高且计算量小，路由路径明确且复杂度低。

3 VLB-VNE 算法性能分析

性能分析利用数学工具主要从 VLB-VNE 算法的线性规划方程、整个网络的平均计算开销、整个网络的路由平均跳数、平均传输距离和计算复杂度进行分析。

3.1 VLB-VNE 算法的线性规划

设有  $a, b, c$  3 个虚拟网，需求的节点容量分别为  $R_N^a, R_N^b, R_N^c$ ，需求的链路容量分别为  $R_L^a, R_L^b, R_L^c$ 。核心/骨干网络可划为  $M$  个小区域， $c_m^i$  为虚拟网  $i$  在小区  $m$  所占的节点容量大小， $l_m^i$  为虚拟网  $i$  在小区  $m$  所占的链路容量大小， $C_m$  为小区  $m$  的节点总容量， $L_m$  为小区  $m$  的链路总容量。 $w_N$  为节点权值， $w_L$  为链路权值。则根据贪婪式迭代法分配和小区资源模块化可得 VLB-VNE 的线性规划方程：

$$\begin{aligned} \text{Minimize } u &= w_N \frac{\sum_{i=a,b,c} \sum_m c_m^i}{\sum_m C_m} + w_L \frac{\sum_{i=a,b,c} \sum_m l_m^i}{\sum_m L_m}, \\ \text{s.t. } \sum_{i=a,b,c} \sum_m c_m^i &\geq R_N^i, \quad \sum_{i=a,b,c} \sum_m l_m^i \geq R_L^i, \\ \sum_{i=a,b,c} c_m^i &\leq C_m, \quad \sum_{i=a,b,c} l_m^i \leq L_m \end{aligned} \quad (1)$$

由于每个小区路由都采用 VLB 式的负载均衡两跳，故而根据文献[16]可有  $l_m^i \approx 2c_m^i$  和  $L_m \approx 2C_m$ ，则式(1)可简化为

$$\begin{aligned} \text{Minimize } u &= (w_N + w_L) \frac{\sum_{i=a,b,c} \sum_m c_m^i}{\sum_m C_m}, \\ \text{s.t. } \sum_{i=a,b,c} \sum_m c_m^i &\geq R_N^i, \quad \sum_{i=a,b,c} c_m^i \leq C_m \end{aligned} \quad (2)$$

由于小区数量和虚拟网个数都非常有限，可得 VLB-VNE 算法将虚拟网映射的 NP-hard 问题简化为一个可用对偶法求解的简单线性规划问题。并可通过权值设置的变化来获得任意的评判参数值。

### 3.2 VLB-VNE 算法的开销

(1)整体网络的计算开销 现存的虚拟网映射算法计算开销主要存在于两部分,节点信息处理开销和链路路径选择开销。我们用  $c_n$  表示节点  $n$  信息处理开销,用  $c_l$  表示链路  $l$  路径选择开销。

VLB-VNE 算法中,小区的计算开销可以看成是一个整体,用  $C_v$  表示小区的平均计算开销。单个小区的计算开销其实也是由节点信息处理开销和链路路径选择开销两部分组成,其中小区节点信息处理开销与小区中所有节点总的信息处理开销相等,而链路路径选择开销由 VLB-VNE 算法的算法复杂度可知远低于现存的虚拟网映射算法,于是可得

$$\frac{NC_v}{\left(\sum_n c_n + \sum_l c_l\right) + o(c)} \ll 1 \quad (3)$$

其中  $o(c)$  为修正量,  $N$  为 VLB-VNE 算法中的小区数。

由此可得 VLB-VNE 算法的计算开销远小于现存的虚拟网映射算法。

(2)整体网络的平均跳数 现存的虚拟网映射算法的平均跳数按理想最短矢量路径情况,包流  $P$  的跳数为  $P_p$ 。VLB-VNE 算法小区间路由采用最短小区路径和带宽整合,可以看成在小区级别满足理想情况下的最短矢量路径跳数,负载平衡下单个小区内包流的平均跳数为  $P_v$ 。则根据文献[16]中 VLB 路由的性质可得

$$\frac{NP_v}{\sum_P P_p + o(P)} \leq 2 \ll P_{wc} \quad (4)$$

其中  $o(P)$  为修正量,  $N$  为 VLB-VNE 算法中的小区数,  $P_{wc}$  表示最差性能情况的路径跳数。

由此可得 VLB-VNE 算法的平均最大跳数仅为最短矢量路径理想情况下跳数的 2 倍,远小于最差性能情况。

(3)整体网络的平均传输距离 现存的虚拟网映射算法的平均传输距离按理想最短矢量路径情况,包流  $P$  的传输距离为  $D_p$ 。VLB-VNE 算法负载平衡下单个小区内包流的平均传输距离为  $D_v$ 。则同理有

$$\frac{ND_v}{\sum_P D_p + o(D)} \leq 2 \ll D_{wc} \quad (5)$$

其中  $o(D)$  为修正量,  $N$  为 VLB-VNE 算法中的小区数,  $D_{wc}$  为最差性能情况的传输距离。

由此可得 VLB-VNE 算法的平均最大传输距离仅为最短矢量路径理想情况下传输距离的 2 倍,远小于最差性能情况。

### 3.3 VLB-VNE 算法的复杂度

由文献[21, 22]结论可得,现存网络映射分配算法在无环路分配情况下的复杂度最低为

$$O(Kn^3) \quad (6)$$

其中  $K$  为存在的较短的链路数,  $n$  为网络中节点数。

在 VLB-VNE 算法中,小区间小区的选择采用最短距离矢量路径路由算法。则在第  $k$  步选路时,要先做  $(N-K)$  次加法,再做  $(N-K)$  次比较,从而更新下一跳各小区的暂置值,之后再  $(N-K-1)$  次比较求得路由跳数的最小值,即求得一条最短路径需要  $(3(N-K)-1)$  次运算。其中  $N$  为网络小区数量。因此,小区间小区选择的总运算量为

$$\sum_{k=1}^N 3(N-k) = \frac{3}{2}N(N-1) \quad (7)$$

即复杂度为  $O(N^2)$ 。

VLB-VNE 算法在小区内,采用负载平衡两跳式 VLB 路由,复杂度仅仅为  $O(1)$ 。

由于小区的划分极为有限,从而有网络节点数  $n$  和网络小区数  $N$  之间满足:  $n \gg N$ 。则有

$$O(Kn^3) \gg O(N^2) \quad (8)$$

由式(6)和式(8)可得,相比较现存网络映射分配算法在无环路分配情况下,VLB-VNE 算法以很低的复杂度就实现了现存虚拟网映射中的带宽整合,提高网络利用率。

## 4 仿真分析

在 NS2 仿真软件中做源代码修改,构建一个虚拟网映射仿真平台。利用 Gawk 软件将仿真跟踪文件中的数据导入 Matlab 数学分析软件中处理,做出仿真结果图。图 3 和图 4 是基于最短矢量路径路由思想虚拟网映射(DV-VNE)、基于路径迁移思想虚拟网映射(TM-VNE)和基于负载平衡和小区划分思想虚拟网映射(VLB-VNE)3 种虚拟网映射算法在不同网络状况下吞吐量的仿真对比。图 5 和图 6 是它们之间在上述网络状况下时延性的仿真对比。

单一增大 1 对节点的负载量,形成网络拥塞情况,如图 3 所示,横轴为网络中所有发包源的总负载大小,纵轴为该对节点收包端的吞吐量。

将其它节点对的负载同时增大,使得网络形成处处都会出现拥塞的情况,得到图 4。

由图 3 和图 4 可得 VLB-VNE 具有 VLB 路由的优秀吞吐量性能,依靠增大传输路径,来减轻拥塞,使得其抗拥塞性能远好于另两种虚拟网映射算法。

图 5 和图 6 描述在上述两种拥塞情况下时延性能比较。其中横轴为网络中所有发包源的总负载大小,纵轴为收发节点对收包端的收到包的时延增长

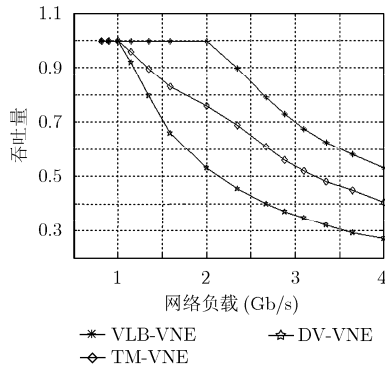


图 3 单对节点造成拥塞时的吞吐量图

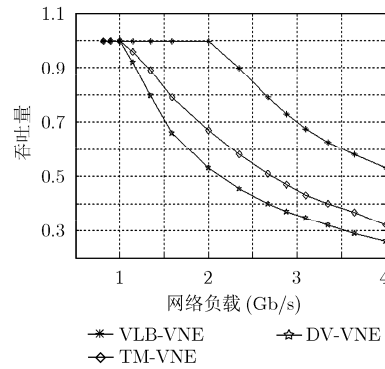


图 4 多对节点造成拥塞时的吞吐量图

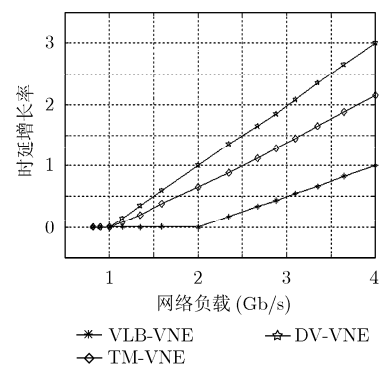


图 5 单对节点造成拥塞时的时延性能图

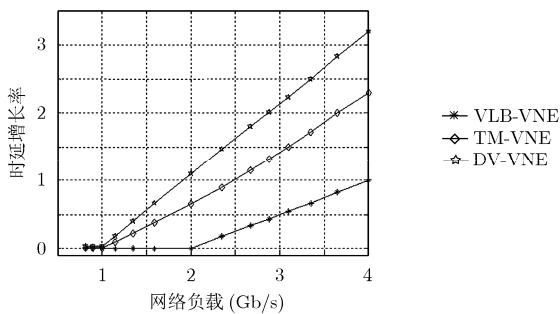


图 6 多对节点造成拥塞时的时延性能图

率。

由图 5 和图 6 可得 VLB-VNE 依靠其增大传播路径时延来减轻拥塞时延，获得了远好于另两种虚拟网映射算法的时延性能。

### 5 结论

本文基于负载均衡路由和小区划分结构的思想设计一种虚拟网映射算法 VLB-VNE，方案通过构建合理、易被映射的小区划分化的现实网络，将小区内的节点和链路映射统一化、资源模块化，简化了虚拟网映射匹配机制，降低了映射算法复杂度，且实现开销小。VLB-VNE 算法具有小区模块化、路由路径固定，无需复杂互通协议且有明确的低选路复杂度的优势，而小区内采用 VLB 负载均衡路由通过增大传播路径和传播时延亦显著提升了虚拟网映射算法的时延和吞吐量性能。

### 参 考 文 献

[1] Chowdhury N M M K and Boutaba R. A survey of network virtualization [J]. *IEEE Computer Networks*, 2010, 54(5): 862-876.  
 [2] Chowdhury N M M K and Boutaba R. Network virtualization: state of the art and research challenges [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(7): 20-26.  
 [3] Shin M K and Kim H J. Network virtualization: a way forward for accommodating multiple, heterogeneous

architectures in a single infrastructure [C]. International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Gangwon-Do, Korea, Feb. 7-10, 2010: 253-257.

[4] Anderson T, Peterson L, Shenker S, *et al.* Overcoming the Internet impasse through virtualization [J]. *IEEE Computer Magazine*, 2005, 38(4): 34-41.  
 [5] Turner J and Taylor D. Diversifying the Internet [C]. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), St. Louis, Missouri, USA, Nov. 28-Dec. 2, 2005: 755-760.  
 [6] Lischka J and Karl H. A virtual network mapping algorithm based on subgraph isomorphism detection [C]. Proceedings of the 1st ACM SIGCOMM Workshop on Virtualized Infrastructure Systems and Architectures, VISA 2009, Barcelona, Spain, Aug. 17, 2009: 81-88.  
 [7] Razzaq A and Rathore M S. An approach towards resource efficient virtual network embedding [C]. The Second International Conference on Evolving Internet (INTERNET), Valencia, Spain, Sep. 20-25, 2010: 68-73.  
 [8] Cai Zhi-ping, Liu Fang, Xiao Nong, *et al.* Virtual network embedding for evolving networks [C]. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), Miami, Florida, USA, Dec. 6-10, 2010: 6-10.  
 [9] Zhou Ye, Li Yong, Jin De-peng, *et al.* A virtual network embedding scheme with two-stage node mapping based on physical resource migration [C]. IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS), Singapore, Nov. 17-19, 2010: 761-766.  
 [10] Zhu Y and Ammar M. Algorithms for assigning substrate network resources to virtual network components [C]. IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), Barcelona, Catalunya, Spain, Apr. 23-29, 2006: 1-12.  
 [11] Chowdhury N M M K and Rahman M R. Virtual network embedding with coordinated node and link mapping [C]. IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), Rio de Janeiro, Brazil, Apr. 19-25, 2009: 783-791.

- [12] Yu Min-lan, Yi Yung, 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.
- [13] Lu J and Turner J. Efficient mapping of virtual networks onto a shared substrate[R]. Technical Report WUCSE-2006-35. Washington University, 2006.
- [14] Houdi I, Louati W, and Zeghlache D. A distributed virtual network mapping algorithm [C]. IEEE International Conference on Communications (ICC), Cape Town, South Africa, 2008: 5634-5640.
- [15] Liu Huan and Zhang Shen-ru. On direct routing in the valiant load-balancing architecture [C]. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), St. Louis, Missouri, USA, Nov. 28-Dec. 2, 2005: 721-726.
- [16] Zhang Shen-ru. Designing a predictable backbone network using valiant load-balancing [D]. Stanford University, 2007.
- [17] Zhang Shen-ru and McKeown N. Designing a fault-tolerant network using valiant load-balancing [C]. IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), Phoenix, Arizona, USA, Apr. 13-18, 2008: 2360-2368.
- [18] Zhang Shen-ru and McKeown N. Guaranteeing quality of service to peering traffic [C]. IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), Phoenix, Arizona, USA, Apr. 13-18, 2008: 1472-1480.
- [19] Babaioff M and Chuang J. On the optimality and interconnection of valiant load-balancing networks [C]. IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), Anchorage, Alaska, USA, May 6-12, 2007: 80-88.
- [20] Duffield N J, Goyal P, Greenberg A, *et al.* A flexible model for resource management in virtual private networks [J]. *SIGCOMM Computer Communication Review*, 1999, 29(4): 95-108.
- [21] Yen J Y and Lawler F L. A procedure for computing the K best solutions to discrete optimization problems and its application to the shortest path problem [J]. *Management Science*, 1972, 18(7): 401-405.
- [22] Shier D R. Computational experience with an algorithm for finding the K shortest paths in a network [J]. *Journal of Research National Bureau of Standards*, 1974, 78B(3): 139-165.
- 吕 博: 女, 1983 年生, 博士生, 研究方向为未来网络网络虚拟化技术.
- 杨 帆: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为新一代核心网络负载均衡技术.
- 王振凯: 男, 1974 年生, 副教授, 研究方向为下一代网络.