

## 均衡虚拟网构建算法研究

齐宁<sup>\*①</sup> 王保进<sup>①</sup> 汪斌强<sup>①</sup> 张栋<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(国家数字交换系统工程技术研究中心 郑州 450002)

<sup>②</sup>(浙江大学人工智能研究所 杭州 310027)

**摘要:** 如何在物理资源有限的条件下构建出满足用户需求的虚拟网是一个热点问题。该文针对虚拟网(Virtual Network, VN)的构建方法进行了论述,分析了虚拟网构建的数学模型,给出了构建策略的若干重要原则,为提高构网成功率,分别提出基于链路负载均衡度和节点负载均衡度的虚拟网构建算法,在此基础上提出了考虑均衡的自适应虚拟网构建算法(Balanced Adaptive VN Construction Algorithm, BACA)以及链路失效后的处理方法和迁移策略。最后,通过仿真实验,从虚拟网构建需求接收率和构建后整个网络的链路均衡度以及节点均衡度3个方面验证了BACA的优越性。

**关键词:** 网络虚拟化; 虚拟网; 构建算法; 自适应; 负载均衡

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)06-1301-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01130

## Research on Balanced Construction Algorithm of Virtual Network

Qi Ning<sup>①</sup> Wang Bao-jin<sup>①</sup> Wang Bin-qiang<sup>①</sup> Zhang Dong<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(National Digital Switching System Engineering and Technological Research Center, Zhengzhou 450002, China)

<sup>②</sup>(AI Institute of Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** How to construct Virtual Networks (VNs) which satisfies user's demand efficiently under the situation of limited resources is a hot issue. Mathematics model of VN construction is analyzed. Under some important principles of VN construction, balanced link load VN construction algorithm and balanced node load VN construction algorithm are given. Based on these two algorithms Balanced Adaptive VN Construction Algorithm (BACA) is proposed. The remapping of failure virtual links and VN reconfiguration are discussed when link failure occurs. The efficiency of BACA is evaluated by emulation experiment according to construction requirements acceptance ratio and link and node load balance ratio of the whole substrate network.

**Key words:** Network virtualization; Virtual Network (VN); Construction algorithm; Adaptive; Load balance

### 1 引言

随着科学技术的发展,传统互联网由于自身体系架构的缺陷,难以适应新兴业务不断发展的要求。究其原因:其一网络是僵化的<sup>[1]</sup>,只能依靠升级和扩展进行改造;其二网络资源是共享的,其上部署的服务彼此之间相互干扰。为此,提出了网络虚拟化(network virtualization)的概念,为未来互联网体系结构各种业务需求分配相互独立的虚拟网(Virtual Network, VN),虚拟网通过多个虚拟节点利用虚拟链路相连接而成<sup>[2]</sup>。核心网络运营商利用网络虚拟化,不仅能够便捷地在现有网络架构基础上

推出新兴服务,而且能够独立管理各个虚拟网,一方面加快了新服务的部署速度,另一方面降低了基础设施的投入成本,而且对QoS敏感的业务构建逻辑分离的VN,能够为其提供良好的QoS保证。

如何在资源有限的条件下有效地构建虚拟网,是虚拟网研究的热点问题。虚拟网构建与VPN设计<sup>[3]</sup>有相似之处,都是以源/目的的位置作为输入参数,在源/目的节点间寻找满足约束条件的路径。VPN设计中,一般解决的是静态路由问题,往往只是考虑链路的带宽利用率,而不考虑节点状态。

文献[4]研究了成本低的虚拟网构建问题,提出了基于收益的启发式算法的虚拟网构建方法;文献[5]利用混合整数规划,针对不同的应用场景,分别提出了确定型虚拟网映射算法(D-ViNE),以及随机虚拟网映射算法(R-ViNE)。文献[6]提出底层物理网络中的一条虚拟链路可以由多个分割的物理路径组

2010-10-20收到, 2011-02-14改回

国家863计划项目(2009AA01A334, 2008AA01A323, 2008AA01A326)

资助课题

\*通信作者: 齐宁 benqin@yahoo.com.cn

成, 并基于多商品流问题, 采用启发式算法进行路径集构建。文献[7]采用子图同构判定技术, 综合考虑虚拟网构建过程中的节点映射和链路映射, 将节点和链路映射同时进行。文献[8]研究了在构建成本预算有约束的情况下, 如何有选择性地满足部分用户的需求, 使得构建收益最大化的问题。文献[9]基于流量均衡实现虚拟网的拓扑设计, 采用子图分割以及节点优化策略构建虚拟网。文献[10]以路径上节点平均强度最小为目标构建虚拟网。

上述虚拟网构建方法, 主要针对虚拟网构建进行最小代价或最短路径优化, 没有考虑底层物理网络的整体均衡性。其不足之处在于, 一方面易导致物理网络上发生拥塞或者节点负载过重的问题, 尤其是在最短路径上, 从而降低网络传输性能; 另一方面, 由于构建后续虚拟网的关键路径很可能被占用, 导致其构建成功的概率大大下降。

针对上述虚拟网构建方法中存在的不足, 本文借鉴虚拟网构建算法<sup>[4,9]</sup>中将多源多汇问题简化为多个单源单汇问题进行求解的思想, 在构建虚拟网时充分考虑底层物理网络的均衡性, 以网络负载均衡和构建代价最小为原则进行优化, 分别提出基于链路负载均衡和节点负载均衡的构建算法, 在此基础上设计了考虑负载均衡的自适应虚拟网构建算法(Balanced Adaptive VN Construction Algorithm, BACA), 并通过仿真对该算法进行了验证与分析。

本文组织结构如下: 第 2 节对虚拟网构建问题进行分析与建模, 并提出虚拟网构建的若干重要原则; 第 3 节描述了基于链路负载均衡和节点负载均衡的虚拟网构建算法, 在此基础上提出自适应的虚拟网构建算法; 第 4 节对本文提出的算法进行仿真实验, 并分析实验数据; 第 5 节是结束语。

## 2 虚拟网模型分析

### 2.1 虚拟网构建模型

虚拟网构建的网络模型描述如下:

**物理承载网络模型** 将物理承载网络用无向图  $G^p = (N^p, E^p, C^p)$  表示, 其中  $N^p$  和  $E^p$  代表物理网络中节点和边的集合,  $C^p$  代表物理网络能够提供的能力, 如节点交换容量、链路带宽等。

**虚拟网需求模型** 将虚拟网构建需求用无向图  $G^v = (N^v, E^v, R^v)$  表示, 其中  $N^v$  和  $E^v$  代表虚拟网中虚节点和虚边的集合, 它们分别是  $N^p$  和  $E^p$  的子集, 虚拟网构建请求通常包含对物理节点和边的限制条件, 用  $R^v$  代表对虚节点和虚边的约束条件。图 1 给出一个虚拟网构建请求的例子。构建一个连接 3 个物理节点的虚拟网, 约束条件如下: A 和 B 的节点能力都要大于 30, AB 之间的虚拟链路的带宽要

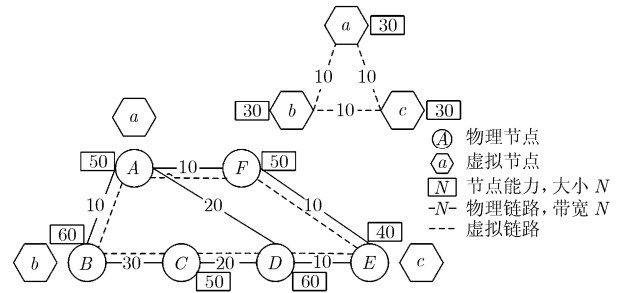


图 1 构建虚拟网的示例图

达到 10。

**虚拟网构建模型** 一个虚拟网构建问题可以描述成从  $G^v$  到  $G^p$  子集的一个满足  $G^v$  中约束条件  $R^v$  的映射, 表示如下:

$$M: G^v \mapsto G^s, G^s = (N^s, E^s, C^s) \quad (1)$$

其中  $N^s \subset N^p$ ,  $E^s \subset E^p$ ,  $C^s$  代表构建虚拟网的物理网络服务能力。

虚拟网构建可以分割成节点映射和边映射。

节点映射:

$$M^N: (N^v, R_N^v) \mapsto (N^s, C_N^s) \quad (2)$$

边映射:

$$M^E: (E^v, R_E^v) \mapsto (E^s, C_E^s) \quad (3)$$

其中  $R_N^v$  和  $R_E^v$  分别代表虚拟网中虚节点和虚边的约束条件,  $C_N^s$  和  $C_E^s$  分别代表构建虚拟网的物理节点和边所能提供的服务能力。

**目标** 由于虚拟网的虚节点大多由用户直接指定, 可以认为, 节点映射  $M^N$  已经确定, 于是虚拟网构建问题简化为链路映射过程。

本文将虚拟网构建的多源多汇问题简化为多个单源单汇问题进行求解, 将用户的虚拟网构建需求分解为虚拟网中虚节点和虚链路的需求, 由三元组  $(s, t, d)$  表示, 其中  $s$ ,  $t$  为源和目的节点,  $d$  为带宽需求, 每一个三元组称为一个元需求, 将所有元需求集合记为  $S^{\text{meta}}$ 。进行需求分解之后, 虚拟网构建问题简化为逐一求解元需求的过程, 从而将之前较大规模的全网映射问题转换为求解多个最优路径的映射问题。

节点映射  $M^N$  确定之后, 链路映射实质就是在  $G^p$  中寻找  $s$  和  $t$  之间的一条路径, 记为  $P_{s,t}$ , 满足

$$\forall e \in P_{s,t}, b(e) \geq d \quad (4)$$

其中  $b(e)$  表示连接相邻节点的链路带宽。

进行元需求映射之后, 剩余物理网络资源越多, 就能为更多虚拟网构建请求提供资源, 对物理网络资源的利用更加充分。因此, 对于所有满足式(4)的  $P_{s,t}$ , 占用网络资源越少越好, 式(4)进一步约束为

$$\text{Minimize } |P_{s,t}| \cdot d, \forall e \in P_{s,t}, b(e) \geq d \quad (5)$$

其中  $|P_{s,t}|$  表示路径  $P_{s,t}$  跳数。

从式(5)可知, 满足条件的  $P_{s,t}$  是  $s$  和  $t$  之间的最短路径。  $s$  和  $t$  之间的最短路径不只一条, 记它们之间所有最短路径的集合为  $\{P_{s,t}\}_{\min}$ 。因此, 虚拟网构建以满足用户业务需求为前提, 在资源有限的物理网络上, 以构建出尽可能多的虚拟网为优化目标。

## 2.2 虚拟网构建原则

构建的虚拟网不仅要满足用户的业务需求, 而且要尽可能高效地利用物理网络资源, 使得物理网络能够为更多的虚拟网提供服务; 另外, 要减少拥塞链路的产生, 避免因部分链路拥塞而导致虚拟网构建失败。通过 2.1 节分析, 提出以下几条构建虚拟网的原则。

**最短路径原则** 由于要在物理链路上根据需求分配带宽, 而虚边映射到最短路径时, 其占用物理网络资源的带宽最小, 因此, 利用单路或多路最短路径算法进行边映射, 是虚拟网构建的基本原则。

**负载均衡原则** 虚拟网构建成功与否不仅表现在是否能够构造出符合需求的拓扑, 还体现在网络资源分配的合理性方面。网络资源分配的合理性主要是指, 当前的资源分布和剩余资源分布能够直接影响后续虚拟网的构建效率。因此构建算法要遵循网络负载均衡原则。

## 3 虚拟网构建算法

### 3.1 基于链路负载均衡的构建算法

对于每个虚拟网构建元需求, 都有可能存在多条最短路径, 应该选择最均衡的路径作为备选路径, 为此, 提出链路负载均衡度的概念, 以虚拟网中链路负载大小和路径上链路负载平均大小作为判断依据, 从而更准确地刻画路径上链路的负载状况。

**定义1** 链路强度  $S_l$ : 链路上已经预约和使用的带宽与自身总带宽的比值。

**定义2** 路径链路平均强度  $\bar{S}_l$ : 路径上所有链路强度的数学期望  $\bar{S}_l = \frac{1}{N} \sum_1^N S_{l_i}$ 。

**定义3** 路径最大链路强度  $S_l^{\max}$ : 路径上所有链路中链路强度的最大值。

**定义4** 链路负载均衡度  $\omega_l$ : 路径上链路平均强度与最大链路强度的比值  $\omega_l = \bar{S}_l / (S_l^{\max} + \epsilon)$ ,  $\epsilon$  是无限小的正数, 为了避免除数为0。  $\omega_l$  越大路径上链路负载均衡程度越高。

对于候选的多条路径计算出链路均衡度  $\omega_l$ , 选择  $\omega_l$  最大的路径。

记最终选取的连接  $s$  和  $t$  之间的负载均衡最短路径为  $P_{s,t}^{\max \omega_l}$ , 满足

- (1)  $P_{s,t}^{\max \omega_l} \in \{P_{s,t}\}_{\min}$ ;
- (2)  $\forall P \in \{P_{s,t}\}_{\min}$ , 如果  $P \neq P_{s,t}^{\max \omega_l}$ , 则有  $(\omega_l)_P \leq (\omega_l)_{P_{s,t}^{\max \omega_l}}$ 。

为了得到  $s$  和  $t$  之间的链路负载均衡最短路, 首先需要找到连接  $s$  和  $t$  的所有最短路径的集合, 之后, 从最短路径集合中找出链路负载均衡度最大的路径。基于链路负载均衡的构建方法如表 1 所示。

表 1 基于链路负载均衡的构建方法

算法 1	BLLCA (Balanced Link Load VN Construction Algorithm)
输入:	$G^p, G^r$
输出:	$G^s$
(1)	$G^s$ 初始化为 NULL;
(2)	将虚拟网构建请求 $G^r$ 分解, 得到元需求集合 $S^{\text{meta}}$ ; 对 $S^{\text{meta}}$ 中每个 $(s, t, d)$ , 执行(3)到(7):
(3)	将 $P_{s,t}^{\max \omega_l}$ 初始化为 NULL;
(4)	在 $s, t$ 之间寻找一条没有标记且满足约束条件 $d$ 的路径 $P_{s,t}$ , 如果这样的路径不存在, 置 $G^s$ 为空, 跳转到(8);
(5)	若 $P_{s,t}^{\max \omega_l}$ 为空, 或者 $ P_{s,t}  <  P_{s,t}^{\max \omega_l} $ , 则标记 $P_{s,t}$ 并跳转到 6; 否则, 跳转回(4);
(6)	计算 $G^p$ 映射路径 $P_{s,t}$ 后的链路负载均衡度 $\omega_l$ , 若 $(\omega_l)_{P_{s,t}} \geq (\omega_l)_{P_{s,t}^{\max \omega_l}}$ , 则令 $P_{s,t}^{\max \omega_l} \leftarrow P_{s,t}$ ;
(7)	若 $P_{s,t}^{\max \omega_l}$ 不为空, $G_s \leftarrow G_s - P_{s,t}^{\max \omega_l}$ , $G^s \leftarrow G^s + P_{s,t}^{\max \omega_l}$ , 更新 $P_{s,t}^{\max \omega_l}$ 路径上节点和链路的剩余服务能力;
(8)	若 $G^s$ 非空, 则返回映射结果 $G^s$ ; 若 $G^s$ 为空, 无法构建虚拟网。

算法第(3)步到第(7)步计算  $s, t$  间的最短路径并从中选出链路负载均衡最短路  $P_{s,t}^{\max \omega_l}$ , 第 5 步比较当前路径和之前找到的路径, 若更短, 则标记当前路径为最短路径; 第 6 步保证  $P_{s,t}^{\min \bar{S}_l}$  是所有路径中链路负载均衡度最大的路径; 第 4 步到第 6 步保证最终记录的路径  $P_{s,t}^{\max \omega_l}$  为链路负载均衡最短路。

得到  $s$  和  $t$  之间的均衡最短路  $P_{s,t}^{\max \omega_l}$  之后, 将  $P_{s,t}^{\max \omega_l}$  加入到  $G^s$  中。对于分解后的每个源/目需求, 如果找不到均衡最短路, 则虚拟网构建失败。

### 3.2 基于节点负载均衡的构建算法

同理, 可以提出节点负载均衡度的概念, 刻画路径上节点的负载状况。

**定义5** 节点强度  $S_n$ : 节点上所承载的虚拟网带宽之和与节点交换容量的比值。

**定义6** 路径节点平均强度  $\bar{S}_n$ : 路径上所有节点强度的数学期望  $\bar{S}_n = \sum_1^N S_{n_i} / N$ 。

**定义7** 路径最大节点强度  $S_n^{\max}$ : 路径上所有节点中节点强度的最大值。

**定义8** 节点负载均衡度  $\omega_n$ : 路径上节点平均强度与最大节点强度的比值  $\omega_n = \bar{S}_n / (S_n^{\max} + \epsilon)$ ,  $\epsilon$  是无限小的正数, 为了避免除数为0。  $\omega_n$  越大路径上节点负载均衡程度越高。

对于候选的多条路径计算出节点均衡度  $\omega_n$ , 选

择  $\omega_n$  最大的路径。

记最终选取的连接  $s$  和  $t$  之间的最短节点负载均衡路为  $P_{s,t}^{\max \omega_n}$ ，满足

$$(1) P_{s,t}^{\max \omega_n} \in \{P_{s,t}\}_{\min};$$

$$(2) \forall P \in \{P_{s,t}\}_{\min}, \text{ 如果 } P \neq P_{s,t}^{\max \omega_n}, \text{ 则有}$$

$$(\omega_n)_P \leq (\omega_n)_{P_{s,t}^{\max \omega_n}}.$$

基于节点负载均衡的构建方法如表 2 所示。

表 2 基于节点负载均衡的构建方法

算法 2 BNLCA (Balanced Node Load VN Construction Algorithm)
输入: $G^p, G^v$
输出: $G^s$
(1) 将 $G^s$ 初始化为 NULL;
(2) 将虚拟网构建需求 $G^v$ 进行分解, 得到元需求集合 $S^{\text{meta}}$ ;
对 $S^{\text{meta}}$ 中每个 $(s, t, d)$ , 执行(3)到(7);
(3) 将 $P_{s,t}^{\max \omega_n}$ 初始化为 NULL;
(4) 在 $s, t$ 之间寻找一条没有标记且满足约束条件 $d$ 的路径 $P_{s,t}$ , 如果这样的路径不存在, 置 $G^s$ 为空, 跳转到(8);
(5) 若 $P_{s,t}^{\max \omega_n}$ 为空, 或者 $ P_{s,t}  <  P_{s,t}^{\max \omega_n} $ , 则标记 $P_{s,t}$ 并跳转到(6); 否则, 跳转回(4);
(6) 计算 $G^p$ 映射路径 $P_{s,t}$ 后的节点负载均衡度 $\omega_n$ , 若 $(\omega_n)_{P_{s,t}} \geq (\omega_n)_{P_{s,t}^{\max \omega_n}}$ , 则令 $P_{s,t}^{\max \omega_n} \leftarrow P_{s,t}$ ;
(7) 若 $P_{s,t}^{\max \omega_n}$ 不为空, $G_S \leftarrow G_S - P_{s,t}^{\max \omega_n}$ , $G^s \leftarrow G^s + P_{s,t}^{\max \omega_n}$ , 更新 $P_{s,t}^{\max \omega_n}$ 路径上节点和链路的剩余服务能力;
(8) 若 $G^s$ 非空, 则返回映射结果 $G^s$ ; 若 $G^s$ 为空, 无法构建虚拟网。

算法运行过程同 3.1 节基于链路负载均衡的构建算法类似。

### 3.3 考虑均衡的自适应虚拟网构建算法

上述两个算法仅仅考虑链路或节点上的负载均衡情况, 而没有将整个网络中资源的负载情况综合考虑, 容易引起局部节点负载过重或链路拥塞现象。结合链路和节点负载均衡构建算法, 提出考虑均衡的自适应虚拟网构建方法——BACA, 首先定义网络链路负载均衡度和网络节点负载均衡度。

网络链路负载均衡度  $\omega_l^s$  是整个底层物理网络上所有链路的平均强度与最大链路强度的比值, 即

$$\omega_l^s = \frac{\bar{S}_l^s}{S_l^{s \max} + \varepsilon} \quad (6)$$

其中  $\bar{S}_l^s$  表示整个底层物理网络上所有链路的平均强度,  $S_l^{s \max}$  表示底层物理网络上的最大链路强度,  $\varepsilon$  是无限小的正数, 为了避免除数为 0。  $\omega_l^s$  越大网络链路负载均衡程度越高。

同样, 定义网络节点负载均衡度  $\omega_n^s$  是整个底层物理网络上所有节点的平均强度与最大节点强度的比值, 即

$$\omega_n^s = \frac{\bar{S}_n^s}{S_n^{s \max} + \varepsilon} \quad (7)$$

BACA 算法根据网络负载状况, 自适应的调用 BLLCA 或 BNLCA 算法调节整个网络的均衡度。首先计算网络链路均衡度和网络节点均衡度, 若网络链路均衡度较小, 此时网络链路利用率较差, 执行 BLLCA 算法提高网络的链路均衡度, 减轻部分链路拥塞的现象; 反之, 由于网络节点均衡度较差, 执行 BNLCA 算法调节节点均衡度, 减轻部分节点负载过重的现象。算法流程如表 3 所示。

表 3 考虑均衡的自适应虚拟网构建方法

算法 3 BACA (Balanced Adaptive VN Construction Algorithm)
输入: $G^p, G^v$
输出: $G^s$
(1) 计算物理网络链路均衡度 $\omega_l^s$ 以及网络节点负载均衡度 $\omega_n^s$ ;
(2) 若 $\omega_l^s \leq \omega_n^s$ , 执行 BLLCA;
(3) 若 $\omega_l^s > \omega_n^s$ , 执行 BNLCA。

### 3.4 链路失效及迁移策略

当构建的虚拟网所映射的某条链路失效时, 根据最小代价的原则, 选择失效链路两个节点间的最短路径再次进行链路映射, 构建新的 VN。

随着时间的推移, 由于物理链路失效导致 VN 链路重映射可能会带来某些链路的使用不均衡, 即某些链路被过度使用而造成拥塞, 从而影响网络的均衡性。

为了解决上述问题, 可以对某些 VN 或者 VN 的某些链路进行迁移, 将虚链路重映射到链路负载较低的物理链路上, 从而最大效率的利用现有网络资源。针对如何选择 VN 进行迁移, 以及怎样迁移, 提出如下原则:

**链路占用带宽高优先原则** 对于链路占用带宽小的 VN, 其链路不做调整。这是因为调整这部分 VN 的链路给释放的带宽很小, 因此倾向于优先调整链路占用较高的 VN。

**代价最小原则** 有研究指出周期性进行虚拟网全网重构的代价  $C = \omega_1 \cdot R_{\text{recfg}} + \omega_2 \cdot R_{\text{node}} + \omega_3 \cdot R_{\text{path}}$  [9]。其中  $R_{\text{recfg}}$  是重构率, 即每个单位时间内重构事件发生的次数,  $R_{\text{node}}$  和  $R_{\text{path}}$  是节点和路径重构的频率,  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  是代价权重, 随着具体应用而不同。因此, 周期性迁移网络中所有链路会大大增加问题的复杂度, 而且可能会得不到全局最优解, 对于提高网络均衡性并不理想, 因此, 只有当 VN 构建失败时, 才进行迁移, 且每次最多选择一个 VN 或其一部分进行迁移。

基于上述原则, 可以设置阈值  $T$ , 当某个 VN 构建需求不能满足时, 按照链路占用带宽由大至小的顺序选择一个 VN 进行迁移, 若此时还不能满足构建需求, 则继续选择 VN 进行迁移, 直到满足需求为止; 若进行了  $T$  次迁移仍未成功, 则拒绝此次构建请求。

## 4 实验与数值分析

### 4.1 实验设定

实验在具备 2.4 GHz Intel Xeon X3430 CPU 和 2 G 内存的 IBM SystemX3200 机器上进行, 利用 BRITE 工具随机产生由 100 个节点组成的物理网络拓扑, BRITE 参数设置如下: HS=LS=100,  $N=100$ , Model=WaxMan, Node Placement=Random,  $\alpha=0.15$ ,  $\beta=0.2$ ,  $m=2$ , Growth Type=Incremental, BWdist=Unif, MaxBW=100, MinBW=50。因此, 节点的连接概率是 0.02, 带宽资源在 50 到 100 间均匀分布。虚拟网请求的到达过程服从时间单位为 100, 强度为 5 的泊松过程; 每个虚拟网的生存时间服从  $\theta = 400$  的指数分布。虚拟网节点需求个数在 2 到 10 之间均匀分布, 带宽需求和节点需求均在 0 到 50 之间均匀分布。鉴于 Matlab 具有强大的函数库, 仿真用 Matlab 编写完成, 为了使结果更准确, 仿真共进行十次, 取所有实验结果的平均值。

实验主要验证第 3 节提到的 3 种虚拟网构建算法的构建需求接收率, 以及虚拟网构建完成后整个底层物理网络的链路和节点均衡度, 并且与 Basic VNA<sup>[9]</sup>算法进行比较。

### 4.2 虚拟网构建需求接收率

虚拟网构建需求接收率是算法启动后虚拟网构建成功的个数占构建请求数的百分比, 即

$$C_{\text{accept}} = C_{\text{success}} / C_{\text{all}} \quad (8)$$

虚拟网构建需求接收率可以反映构建方法的资源利用效率, 接收率越高表明构建方法越有效, 图 2 是在虚拟网构建请求数从 0 到 300 时的需求接收率结果。

从实验数据可知, 当虚拟网构建请求数不多时, 几种算法的构建接收率都可以接近 100%, 但随着请求数逐渐增加, 由于各种算法资源分配方法的不同, 使构建接收率出现了不同的变化, 接近线性的下降过程。而随着请求数的进一步增加, 原来存在的虚拟网由于到达生存时间而不断释放网络资源, 因此, 构建接收率会逐渐达到稳态。Basic VNA 虽然考虑了节点及链路的最大负载强度, 但仅采用最短路径算法进行选路, 容易产生瓶颈链路, 因此构建接收

率并没有其他算法高; BACA 构建成功率在 60% 左右, 这是由于 BACA 算法在资源分配过程中考虑了整个网络的负载均衡情况, 较好地优化利用了网络资源, 为构建更多的虚拟网提供了保证, 构建接收率明显要高; BLLCA 和 BNLCA 由于只考虑链路或节点的负载均衡, 会造成局部节点负载过重或链路拥塞, 因此构建接收率介于 Basic VNA 和 BACA 之间。

### 4.3 网络链路负载均衡度

在虚拟网构建结束后, 链路负载均衡度可以反映出虚拟网构建中链路资源利用的有效性, 图 3 是虚拟网构建请求数从 0 到 300 时网络链路均衡度的实验数据。由实验数据可知, 对于到达的请求, 构建完成后, BLLCA 的链路均衡度是最好的, 这是因为 BLLCA 算法只针对链路均衡度进行优化; 而 BNLCA 由于只考虑节点均衡度, 容易造成局部链路拥塞的情况产生, 使得链路均衡度较差; Basic VNA 在链路映射时采用了最小化最大链路强度的算法, 较之 BNLCA 有改进; BACA 针对 BNLCA 算法运行时链路均衡度较差的情况会自适应调整, 从而使链路均衡度有所改善, 且改善效果优于 Basic VNA。

### 4.4 网络节点负载均衡度

在虚拟网构建结束后, 网络节点负载均衡度可以反映出虚拟网构建中节点资源利用的有效性, 图 4 是节点均衡度在构建请求数从 0 到 300 的实验结果。由实验结果可知, 对于到达的请求, 构建完成后, BNLCA 的节点均衡度是最好的, 这是因为 BNLCA 算法只针对节点均衡度进行优化; 而 BLLCA 由于只考虑链路均衡度, 容易产生局部节点负载过重的情况, 使得节点均衡度较差; Basic VNA 在节点映射时采用了最小化最大节点强度的算法, 较之 BLLCA 有改进; BACA 针对 BLLCA 算法运行时节点均衡度较差的情况会自适应调整, 从而使节点均衡度有所改善, 且改善效果优于 Basic VNA。

从上述实验数据可知, BACA 构建算法综合考虑了虚拟网构建后网络链路和节点的均衡情况, 需求接收率明显优于其他 3 种构建方法, 并且对网络链路均衡度和节点均衡度都有很高的保证。

## 5 结束语

网络虚拟化是未来网络发展的重要方向。本文针对虚拟网的构建方法进行了论述, 分析了虚拟网构建的数学模型, 给出了构建策略的若干重要原则和构建方法, 为虚拟网的构建提供了新的思路。为了提高网络利用率, 分别提出 BLLCA 构建算法和

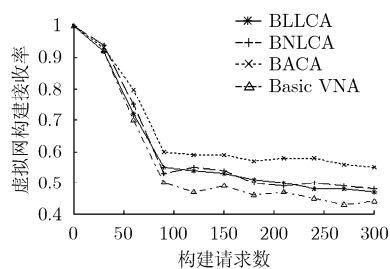


图 2 虚拟网构建需求接收率

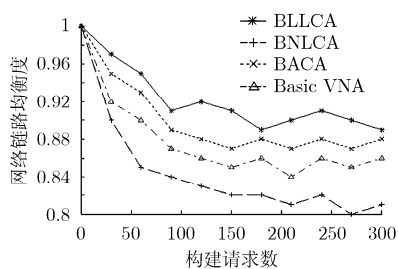


图 3 网络链路均衡度

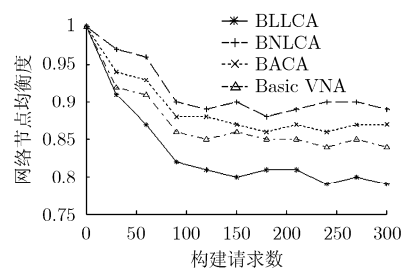


图 4 网络节点均衡度

BNLCA 构建算法, 在此基础上提出了考虑均衡的自适应虚拟网构建算法 BACA, 并且提出在物理链路失效时的处理方法以及对由此造成的不均衡进行 VN 迁移的原则。最后, 通过实验, 从虚拟网构建需求接收率和构建后整个网络的链路均衡度和节点均衡度 3 个方面验证了 BACA 算法的优越性。

虚拟网的构建方法还有很多问题有待研究与探索, 需进一步研究大规模跨域的虚拟网构建方法以及链路失效时的处理策略。

### 参 考 文 献

- [1] Turner J and Taylor D. Diversifying the internet[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Global Telecommunications. St. Louis, USA, 2005: 755-760.
- [2] Mosharaf Kablr Chowdhury N M and Raouf Boutaba. Network virtualization: state of the art and research challenges[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2009, 47(7): 20-26.
- [3] Gupta A, Kleinberg J, Kumar A, Rastogi R, and Yener B. Provisioning a virtual private network: a network design problem for multicommodity flow[C]. Proceedings of ACM Symposium on Theory Of Computing (STOC), Heraklion, Crete, Greece, 2001: 389-398.
- [4] Lu J and Turner J. Efficient mapping of virtual networks onto a shared substrate [R]. Washington University, Technical Report WUCSE-2006-35, 2006.
- [5] Mosharaf N M, Rahman Muntasir Raihan, and Boutaba Raouf. Virtual network embedding with coordinated node and link mapping[C]. Proceedings of the 28th Conference on Computer Communications, Rio de Janeiro, USA, IEEE, 2009: 783-791.
- [6] Yu Minlan, Yi Yung, Rexford J, and Chiang M. Rethinking virtual network embedding: substrate support for path splitting and migration[C]. Proceedings of ACM SIGCOMM on Computer Communication, Seattle, WA, USA, 2008: 17-29.
- [7] Jens L and Holger K. A virtual network mapping algorithm based on subgraph isomorphism detection[C]. Proceedings of the 1st ACM Workshop on Virtualized Infrastructure Systems and Architectures. Barcelona, Spain, 2009: 81-88.
- [8] Capone A, Elias J, and Martignon F. Routing and resource optimization in service overlay networks [J]. *Elsevier Computer Networks*, 2009, 53(2): 180-190.
- [9] Zhu Y and Ammar M. Algorithms for assigning substrate network resources to virtual network components[C]. Proceedings of IEEE INFOCOM, Barcelona, Catalunya, Spain, 2006: 1-12.
- [10] 王浩学, 汪斌强, 于婧, 姜明. 一体化承载网络体系架构研究 [J]. *计算机学报*, 2009, 32(3): 371-376.  
Wang Hao-xue, Wang Bin-qiang, Yu Jing, and Jiang Ming. Research on architecture of universal carrying network [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2009, 32(3): 371-376.

齐 宁: 男, 1983 年生, 博士, 研究方向为新一代网络、网络虚拟化。

王保进: 男, 1974 年生, 讲师, 博士, 研究领域为网络管控、嵌入式系统。

汪斌强: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 研究领域为宽带信息网络。

张 栋: 男, 1981 年生, 博士, 研究方向为 Ad hoc 网络、新一代网络。