DOI:10.20079/j.issn.1001-893x.220920002

# 面向动态环境的虚拟光网络资源优化算法\*

张顺利<sup>1</sup>,邵苏杰<sup>2</sup>

(1. 晋中学院信息技术与工程系,山西晋中030619;2. 北京邮电大学计算机学院,北京100876)

摘 要:为解决采用单个虚拟网特征重配置导致虚拟网接受率低的问题,基于资源竞争特征重构底 层网络模型,并基于此构建虚拟网映射线性规划模型。设计了无划分的随机舍入优化算法和有划分 的随机舍入优化算法,为每个虚拟网分配全局最优的底层网络资源。与现有算法相比,该算法下虚 拟网请求的平均接受率提升11%,节点资源平均利用率提升61%,链路资源平均利用率提升27%。 关键词:虚拟光网络;虚拟网;底层网络;资源分配

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中图分类号:TN929

文献标志码:A

## 5码:A 文章编号:1001-893X(2024)03-0409-07

# Resource Optimization Algorithm for Virtual Optical Networks under Dynamic Environment

ZHANG Shunli<sup>1</sup>, SHAO Sujie<sup>2</sup>

(1. Department of Information Technology and Engineering, Jinzhong University, Jinzhong 030619, China;2. School of Computer Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract**: In order to solve the problem of low acceptance rate of virtual network caused by reconfiguration of single feature of virtual network, the substrate network model is reconstructed based on resource competition characteristics, and a linear programming model of virtual network mapping is constructed. A random rounding optimization algorithm without partition and a random rounding optimization algorithm without partition and a random rounding optimization algorithm with partition are designed to allocate globally optimal substrate network resources for each virtual network. Compared with the existing algorithm, the average acceptance rate of virtual network requests under the proposed algorithm is increased by about 11%, the average utilization rate of node resources is increased by about 61%, and the average utilization rate of link resources is increased by about 27%.

 $Key \ words: {\it virtual \ optical \ network}; {\it virtual \ network}; {\it substrate \ network}; {\it resource \ allocation}$ 

### 0 引 言

随着 5G、设备到设备通信等技术的快速发展和 应用<sup>[1-3]</sup>,网络带宽的需求量快速增加。采用网络 虚拟化技术构建的新型弹性光网络(Elastic Optical Networks, EONs),逐渐成为下一代极具前景的光传 送网<sup>[4]</sup>。在 EONs 环境下,服务提供商(Service Provider, SP)通过从底层设施提供商(Infrastructure

Provider, InP)租用光网络资源,也称为底层网络 (Substrate Network, SN)资源,创建虚拟网络 (Virtual Network, VN)为最终用户提供定制服务,无 需对底层设施进行大量投资<sup>[5]</sup>。所以,EONs环境 下的资源分配是一个研究重点。文献[6]基于光纤 的并行传输特性,提高了光网络的资源利用率。文 献[7]采用动态定价策略,从经济学角度提升了资 源的经济收益。文献[8]针对空分复用弹性光数据 中心网络,提出了基于链路和节点特征的资源分配 算法。文献[9-11]分别从光路可靠性、多业务部署 维度提升了网络的可用性、安全性以及服务质量。 但是,随着 EONs 应用范围的增加,虚拟网络及其承 载服务的规模、数量、复杂度也快速增加。例如,部 分虚拟网服务的流量需求与日期、业务成熟度等因 素相关,文献[6-11]不能有效解决流量需求变化场 景下的资源分配问题。为解决所需资源与获得资源 不匹配问题,文献[12]设计了资源感知的虚拟网络 重构策略。为解决高密度网络环境下资源分配效率 低的问题,文献[13]根据容量和可行性比率构建虚 拟网链路缩减网络模型,提出了贪婪链路缩减算法。 但是,在虚拟网链路缩减阶段,需要多次迭代计算虚 拟网链路容量和可行性比率,时间复杂度较高。尤 其是在网络动态环境下,增加了资源分配算法的复 杂度。同时,当虚拟网络生命周期结束,网络资源的 数量和利用率都会发生动态变化,容易造成虚拟网 服务不可用、部分底层网络资源负载过重、网络资源 浪费等问题。

为解决此问题,本文提出了面向动态环境的虚 拟光网络资源优化算法 (Resource Optimization Algorithm for Virtual Optical Networks under Dynamic Environment, ROAVONDE)。为实现虚拟网络之间 更好的协调,获得最优化的虚拟网络映射拓扑,引入 人工链路来重建底层网络拓扑,并基于此将虚拟节 点连接到其等价类中选定的底层节点,提出随机舍 入优化算法对虚拟节点最优迁移策略进行求解。为 降低算法时间复杂度,充分利用节点之间的竞争关 系,提出一种虚拟网络划分算法,将所有虚拟网络拓 扑划分为 k 个子 VN。与已有算法的比较结果验证 了本文算法较好地提升了底层网络的资源利用率和 虚拟网的映射成功率。

#### 问题描述 1

#### 1.1 底层网络

使用带权无向图  $G^{s} = (N^{s}, E^{s})$  对底层网络进行 建模,其中 N<sup>s</sup> 表示底层节点集, E<sup>s</sup> 表示底层链路 集。使用 Path(s,t)表示从源节点s到目的节点t的 底层路径。每个底层节点  $n^s \in N^s$  具有 CPU 容量值  $c(n^s)$ 和地理位置值 loc( $n^s$ )。底层节点  $n_i^s$ 和  $n_i^s$ 之 间的每条底层链路  $e^{s}(i,j) \in E^{s}$  具有带宽容量值 b(e<sup>s</sup>)。在图1中有1个底层网络,图中链路上的数 字代表可用带宽,矩形中的数字代表可用 CPU 资源。



Fig. 1 Virtual network resource allocation

#### 1.2 虚拟网络请求

使用带权无向图  $G^{V} = (N^{V}, E^{V})$  对虚拟网络进行 建模,其中  $N^{V}$  表示虚拟节点集, $E^{V}$  表示虚拟链路 集。每个虚拟节点  $n^{V} \in N^{V}$ 具有 CPU 容量值 $c(n^{V})$ 和地理位置值  $loc(n^{V})$ 。虚拟节点的位置值  $loc(n^{V})$ 与可承载当前虚拟节点的底层节点位置间 的距离约束使用  $D(n^{V})$ 表示。虚拟节点  $n_{i}^{V}$ 和  $n_{i}^{V}$ 之 间的每条虚拟链路  $e^{V}(i,j) \in E^{V}$ 具有带宽容量值  $b(e^{V})$ 。例如,图 1 中有 2 个虚拟网请求(Virtual Network Request, VNR) .

底层节点  $n^{s}$  的剩余 CPU 容量  $R_{N}(n^{s})$  和底层链 路  $e^s$  的剩余带宽容量  $R_{E}(e^s)$  定义如公式(1) 和公 式(2)所示:

$$R_N(n^S) = c(n^S) - \sum_{\forall n^V \perp n^S} c(n^V)$$
(1)

$$\mathbf{R}_{E}(e^{S}) = b(e^{S}) - \sum_{\forall e^{V} \mid e^{S}} b(e^{V})$$
(2)

式中: $n^{V} \downarrow n^{s}$ 表示  $n^{V}$ 的资源由  $n^{s}$ 分配; $e^{V} \downarrow e^{s}$ 表示  $e^{V}$ 的资源由  $e^{S}$ 分配。

#### 1.3 资源分配

虚拟网络映射定义如公式(3)所示,表示虚拟  $(M^{V}, E^{V})$ 资源由底层网络  $G^{S}(N^{S}, E^{S})$ 分配。虚 拟网络映射可分解为节点映射和链路映射<sup>[12-13]</sup>。

$$M: G^{V}(N^{V}, E^{V}) \Longrightarrow G^{S}(N^{S}, E^{S})$$
(3)

节点映射的形式化描述如公式(4)所示,约束 条件如公式(5)和公式(6)所示,其中 dis(i,j)表示 两个节点 i 和 i 位置之间的物理距离。

$$M^{N}(n^{V}) \in N^{S} \tag{4}$$

$$c(n^{V}) \leq R_{N}(M^{N}(n^{V}))$$
(5)

$$\operatorname{dis}(\operatorname{loc}(n^{V}),\operatorname{loc}(M^{N}(n^{V})))) \leq D(n^{V}) \qquad (6)$$

链路映射的形式化描述如公式(7)所示,约束 条件如公式(8)所示。约束(8)表示 Path( $M^{N}(n_{i}^{V})$ ,  $M^{N}(n_{j}^{V})$ )中每个  $e^{s}$ 的可用带宽容量大于  $b(e^{V})$ 。

$$M^{E}(e^{V}(i,j)) \subseteq \operatorname{Path}(M^{N}(n_{i}^{V}), M^{N}(n_{j}^{V}))$$
(7)  
$$b(e^{V}) \leq \min_{e^{S} \in \operatorname{Path}(M^{N}(n_{i}^{V}), M^{N}(n_{i}^{V}))} R_{E}(e^{S})$$
(8)

#### 2 线性规划模型

#### 2.1 网络重构

虚拟节点选择底层节点的约束包括资源约束和 位置约束。为协调所有虚拟网络以获得最优的虚拟 网络映射拓扑结构,以虚拟节点的位置和资源需求 为约束来重构底层网络<sup>[14-15]</sup>。本文以位置约束作 为资源竞争特征,为每个虚拟节点构建等价类,从而 为每个虚拟节点选择最优的底层节点。

重构底层网络和虚拟网络包括以下两个关键步骤:①利用虚拟节点的位置要求为每个虚拟节点寻找等价类,虚拟节点 $n^{v}$ 的等价类 $EC(n^{v})$ 定义如公式(9)所示;②使用人工链路 $e^{A} = \{n^{v}, n^{v}_{EC} \mid n^{v}_{EC} \in EC(n^{v})\} \in E^{A}(n^{v})$ 将每个虚拟节点 $n^{v} 与 EC(n^{v})$ 内的底层节点相连,人工链路带宽容量值设为无穷大, $E^{A}(n^{v})$ 表示虚拟节点 $n^{v}$ 的人工链路集合。因此,重建底层网络和虚拟网络后的新网络为 $G^{s}' = (N^{s'}, E^{s'})$ ,其中 $N^{s'} = N^{s} \cup N^{v}, E^{s'} = E^{s} \cup E^{A}, E^{A}$ 表示所有虚拟节点的人工链路集合。

 $EC(n^{V}) = \{n^{S} \in N^{S} | \operatorname{dis}(\operatorname{loc}(n^{V}), \operatorname{loc}(n^{S})) \leq D(n^{V}) \}$ (9)

#### 2.2 线性规划模型

虚拟网映射拓扑优化问题可以表述为线性规划 商品流问题。一个具有源节点  $s_i \in N^v$  和目的节点  $t_i \in N^v$  的商品流就等于一条虚拟链路  $e^v(i,j) \in E^v$ 。 最优 VN 映射拓扑的线性规划公式(Linear Programming Formulation for Optimal VN mapping Topologies, LPF\_OVNT)的目标函数如公式(10) 所示:

$$\min \sum_{w \in N^{S}} \sum_{w \in N^{S}} \frac{\sum_{w \in N^{V}} \delta_{wm} c(w)}{R_{N}(m) + \varepsilon} + \sum_{w \in E^{S}} \frac{\sum_{e^{V} \in E^{V}} f_{w}^{e^{V}}}{R_{E}(u,v) + \varepsilon}$$
(10)

s. t. C1: 
$$R_N(m) \ge \delta_{wm} c(w)$$
,  $\forall w \in N^V$ ,  $\forall m \in N^S$   
C2:  $f_{uv}^{e^V} \le R_E(u,v)$ ,  $\forall u, v \in N^{S'}$   
C3:  $\sum_{e^V} f_{uv}^{e^V} = b(e^V)$ ,  $\forall u, v \in N^{S'} \setminus \{s_i, t_i\}$ 

$$\begin{aligned} \mathrm{C4:} & \sum_{v \in N^{S}} f_{uv}^{e^{V}} = \sum_{v \in N^{S}} f_{uv}^{e^{V}}, \ \forall \ u \in N^{S'} \setminus \{ s_{i}, t_{i} \} \\ \mathrm{C5:} & f_{uv}^{e^{v}} \ge 0, \ \forall \ u, v \in N^{S} \\ \mathrm{C6:} & \delta_{um} \ge 0, \ \forall \ w \in N^{V}, m \in N^{S} \end{aligned}$$

公式(10)中, $f_{uv}^{v}$ 表示流量变量,即虚拟链路  $e^{v}$ 在底层链路(u,v)上从 u 到 v 的流量; $f_{um}^{v}>0$ 表示决 策变量  $\delta_{um}$ 大于 0,否则决策变量  $\delta_{um}$  被设置为 0; IVNI表示底层网络上已映射 VN 的数量; $\epsilon \rightarrow 0$  是一 个非常小的正常数,可以避免被零除。目标函数 (10)通过最小化所有虚拟节点在  $P(M^{N}(j),$  $M^{N}(k)$ )底层路径上的中间节点数量,可以实现最小 化所有嵌入虚拟网络的成本和 SN 负载均衡的目 标。约束 C1 表示节点容量边界,约束 C2 表示链路 容量边界,约束 C3 表示调节每个源节点发送的流 量需求总量,约束 C4 表示通过网络中任何节点的 传入和传出流量需求的平衡,约束条件 C5 和 C6 分 別表示对变量 $f_{uv}^{v}$ 和 $\delta_{um}$ 的约束。

#### 3 优化算法

资源优化算法包括无划分的随机舍入优化算法、带划分的随机舍入优化算法两种,下面进行详细 描述。

#### 3.1 无划分的随机舍入优化算法

无划分的随机舍入优化算法(ROAVONDEwithout-Divide)以所有映射的虚拟网络为输入,对这 些虚拟网络进行优化以获得最优的底层网络资源, 包括4个关键步骤:①通过公式(10)求解找到满足 LPF\_OVNT约束的所有节点的解(第1~2行);②将 现有分配结果与公式(10)求解的结果进行比较,找 到不需要迁移的节点(第3~4行);③为每个迁移虚 拟节点找到底层节点(第5~14行)(此步骤根据每 个虚拟节点等价类  $EC(n_m^v)$ 中底层节点的流量大小 来选择底层节点,被选择的底层节点是 $p_x$ 取值最大 的底层节点);④对虚拟链路进行映射时(第15 行),使用多商品流算法映射迁移的虚拟节点对应 的虚拟链路。

无划分的随机舍入优化算法具体描述如下: 1 重建底层和虚拟网络,得到新网络 $G^{s'} = (N^{s'}, E^{s'})$ 2 使用模拟退火算法求解满足 LPF\_OVNT 约束的公式(10) 的解

3 找到不需要迁移的虚拟节点 n<sub>U</sub><sup>v</sup>,并放入已映射节点集 合 N<sub>U</sub><sup>v</sup> 4 需要迁移的虚拟节点集合为  $N_M^V$ ,其中  $N_M^V = N^V - N_U^V$ 

5 for  $n_m^V \in N_M^V$  do

- 6 for  $x \in EC(n_m^V)$  do
- 7  $p_x \leftarrow \delta_{mx} f_{mx}^{e^v}$
- 8 end for
- 9  $p_{sum} \leftarrow \sum_{x \in EC(n^V)} p_x$
- 10 for  $x \in EC(n_m^V)$  do
- 11  $p_x \leftarrow \frac{p_x}{p_{sum}}$
- 12 end for

13 使用 $p_x$ 取值最大的底层节点为当前虚拟节点分配资源 14 end for

15 使用多商品流算法映射迁移的虚拟节点的虚拟链路

16 更新 SN 剩余资源容量

ROAVONDE-without-Divide 的目标是在迁移节 点数最少的情况下获得最优的虚拟网映射拓扑,可 以在步骤 2 中实现。因为节点迁移会造成开销,所 以应该尽量减少节点迁移。在时间复杂度方面,求 解公式(10)运行时间使用  $T_{LP}^{all}$  表示,  $T_{LP}^{all} \approx N!$  •  $T_{LP}$ ,其中 N 表示 VN 的数量,  $T_{LP}$  表示运行每个 VN 的线性规划时间。所以,算法的运行时间比较长,需 要寻找一种启发式的方法来解决这个问题。

如果根据虚拟节点竞争关系将所有虚拟网络划 分为k个子虚拟网络,那么时间复杂度变为 $k \cdot T_{LP}^{p}$ , 并且 $k \cdot T_{LP}^{p} \ll T_{LP}^{all} \approx N! \cdot T_{LP}, T_{LP}^{p}$ 表示划分网络后 每个子 VN 的映射时间。因为当 $k \approx N$ 时 $T_{LP}^{p} \approx T_{LP}$ , 所以 $k \cdot T_{LP}^{p} \ll N! \cdot T_{LP}$ ,又因为 $T_{LP}^{all} \approx N! \cdot T_{LP}$ ,所 以 $k \cdot T_{LP}^{p} \ll T_{LP}^{all}$ 。

#### 3.2 带划分的随机舍入优化算法

为了利用小型拓扑的灵活性,将所有 VN 分解 为多个子虚拟网络(subVN)。为实现这个目标,本 文将有资源竞争的 VN 节点放置在同一个 subVN 中,提出带划分的随机舍入优化算法(ROAVONDEwith-Divide)(subVN 的数量设置为 *k*)。

带划分的随机舍入优化算法包括 4 个关键 步骤:

步骤1为虚拟节点生成备选底层节点集合(算 法第1~7行)。首先根据节点坐标范围为每个虚拟 节点寻找底层节点集,然后按照资源容量对每个底 层节点集进行排序。

步骤2将所有虚拟节点划分为k个子网(算法 第8~24行):①根据资源的竞争关系,连接所有虚 拟节点。每个链路的权重表示两个虚拟节点的竞争 ·412· 实力。因为两个底层节点在各自集合中的序号之和 表示链路的权重。序号越小,表明这两个节点在各 种集合的顺序越前。所以链路的权重越小,竞争力 越强(第8~14行)。②将虚拟节点划分为 k 个集合 (第15~24行)。首先,将所有虚拟节点按节点度数 递减排序,然后取出度数最大的虚拟节点和它的连 接节点,创建一个新的集合并放入其中。重复这样 做,直到创建了 k 个新集合。最后,将剩余的虚拟节 点根据与 k 个集合中所有中心节点的距离放入最近 的集合中。

步骤 3 将虚拟链路放入相关子网(算法第 25~29行)。将属于单个子网的链路放入对应的子网内,将不属于单个子网的链路放入待映射链路集合 *E*<sub>rest</sub>。

步骤 4 执行节点映射和链路映射 (第 30~33 行),根据无划分的随机舍入优化算法为每个 subVN 分配底层网络资源,最后使用多商品流算法映射 *E*<sub>rest</sub>中的虚拟链路。

带划分的随机舍入优化算法具体描述如下:

步骤1 为虚拟节点生成备选底层节点集合

1 for  $n_i^V \in N^V$ 

- 2 for  $n^s \in N^v$
- 3 if  $|\operatorname{loc}(n^{s}) \operatorname{loc}(n^{v}_{i})| \leq D(n^{v})$
- 4 将  $n^s$  放入备选集合  $S_{\text{candidate}}^{n_i^s}$
- 5 end for
- 6 end for

7 根据资源容量对 S<sup>n<sup>i</sup></sup><sub>candidate</sub> 中的节点进行降序排列
 步骤 2 将所有虚拟节点划分为 k 个子网

8 for  $S_{\text{candidate}}^{n_i^V}$  中的每个底层节点 for  $S_{\text{candidate}}^{n_{j\neq i}^{V}}$  中的每个底层节点 9 if 这两个底层节点是相同的 10 11 X=这两个底层节点在各自集合中的序号之和 12 连接  $n_i^V$  和  $n_i^V$ ,并设置链路权重为 X end for 13 14 end for 15 for m = 0 to k-116 根据度数对  $n_i^{V} \in N^{V}$  降序排列,得到新的集合  $Q_{n^{V}}$ 17 将 Q\_V 中第一个节点定义为中心节点 n<sup>m</sup><sub>center</sub> 并放入集合  $S_{center}^m \neq$ 18 取值与 $S_{center}$ 直连的虚拟节点放入集合 $S_{center}^{m}$ 中 19 *k*++; 20 end for 21 for 队列  $Q_V$  中剩余的底层节点  $n_i^V \in N^V$ 

22 查找与 $n_{center}^m$ 距离最近的节点 $n_i^V$ 

23 将 $n_i^V$ 放入 $S_{center}^m$	表 1 评估算法 Tab. 1 Evaluation algorithms	
24 end for		
<b>步骤</b> 3 将虚拟链路放入相关子网	算法名称	算法描述
25 for $e^{V}(n_{i}^{V}, n_{j}^{V}) \in E^{V}$ 26 if $n^{V}$ 和 $n^{V}$ 属于相同的集合 S <sup>m</sup>	ROAVONDE-without-Divide	本文提出的无划分的随机 舍入优化算法
25 连接 $n_i^v$ 和 $n_j^v$ 生成 $e^{V(n_i^v, n_j^v)}$	ROAVONDE-with-Divide	本文提出的带划分的随机 舍入优化算法
27 else 28 将 $e^{v}(n_{i}^{v}, n_{j}^{v})$ 放入待映射链路集合 $E_{rest}$ 29 end for	RDVNFE	文献[13]提出的降低虚拟 网密集度的高效资源分配 算法
<b>步骤</b> 4 执行节点映射和链路映射 30 for each subVN 31 使用无划分的随机舍入优化算法分配资源 32 end for	RDVNFEO	在文献[13]基础上,周期 性地对利用率超过阈值的 底层资源上承载的虚拟网 络资源进行重配置
33 使用多商品流算法映射 E 中的虚拟链路		

### 4 仿真与分析

#### 4.1 仿真环境

本文实现了一个 VN 嵌入模拟器来评估算法。 底层和虚拟拓扑以及 VN 到达过程参数与已有研究 类似[13-15]。随机舍入优化算法中的线性规划问题 使用 GLPK 来解决。使用 GT-ITM 拓扑生成器来生 成网络拓扑<sup>[16]</sup>。从边等于 100 的正方形区域中随 机提取底层网络的位置。底层网络配置为每次实验 有 100 个节点,每对底层节点以 0.5 的概率随机连 接。节点的 CPU 和链路的带宽资源遵循 50~100 个单位的均匀分布。每个 VN 请求中,从边等于 100 的正方形区域中随机抽取虚拟网络的位置。VN 节 点的数量由 2~10 之间的均匀分布随机确定,每对 虚拟节点以 0.5 的概率随机连接,节点上的 CPU 资 源遵循1~20的均匀分布。链路上的带宽资源遵循 1~50的均匀分布。VN请求的到达服从泊松分布, 每个请求的平均时间窗口为 1.5,请求的持续时间 遵循平均20个时间窗口的指数分布,每个时间窗口 的时长为10 s。

表1列出了用于性能分析对比的4种算法。算法 ROAVONDE-without-Divide 和算法 ROAVONDE-without-Divide 和算法 ROAVONDE-with-Divide 用于分析基于资源竞争特征重构底层网络以及网络划分对算法性能的影响,算法 RDVNFE (Reducing Dense Virtual Networks for Fast Embedding)是根据网络特征进行网络重构的最新研究成果<sup>[13]</sup>,算法 RDVNFEO (Reducing Dense Virtual Networks for Fast Embedding and Optimization)在文献[13]的基础上采用经典的优化策略对网络资源进行优化。

#### 4.2 算法运行时长分析

将虚拟网划分为 3~6 个子网络,分析算法 VONROADE-with-Divide 的性能可知,划分数量为 4 时算法的性能较优。算法 RDVNFE 不对底层网络 上的资源进行重新优化,算法 RDVNFEO 周期性地 对利用率超过阈值的底层资源上承载的虚拟网络资 源进行重分配,不需要对网络进行重构和求解,所 以,将划分数量为 4 的算法 VONROADE-with-Divide 与算法 VONROADE-without-Divide 进行比较,分析 虚拟网划分对网络优化时长的影响。

算法运行时长结果如图 2 所示,可知随着虚拟 节点数量的增加两种算法的运行时长都在增加,说 明虚拟节点数量增加后,需要优化的网络资源数量 也快速增加;算法 VONROADE-without-Divide 的运 行时间较长,而且随着网络规模增加,运行时间增加 较快;算法 VONROADE-with-Divide 运行时间较短, 而且随着网络规模增加,运行时间的增加比较缓慢, 说明算法 VONROADE-with-Divide 可以降低网络优 化的时间开销。



Fig. 2 Algorithm runtime analysis

### 4.3 网络优化性能分析

对于每个网络场景,性能分析的结果是 20 个随 机实例的平均值。算法性能指标与时间的关系如图 3~7 所示。平均收益是所有已映射的虚拟网计算 资源和带宽资源的加权求和与时长的比值,平均开 销是为完成虚拟网资源分配而使用所有底层网络的 计算资源和带宽资源加权求和与时长的比值。平均 收益、平均开销的单位都使用"a.u."(arbitrary units 的缩写),表示任意单位。



图 3 随时间变化的 VN 请求接受率

Fig. 3 VN request acceptance rate over time



图 4 资源分配的平均收益

Fig. 4 Average revenue on resource allocation



图 5 资源分配的平均开销 Fig. 5 Average cost of resource allocation



图 6 随时间变化的节点资源平均利用率

Fig. Average utilization rate of node resources over time



图 7 随时间变化的链路资源平均利用率 Fig. 7 Average utilization rate of link resources over time

通过对实验结果的分析,本文总结了下面5个 主要观察结果:

1)算法 ROAVONDE-without-Divide 和算法 ROAVONDE-with-Divide 通过协调所有虚拟网络获 得最优的虚拟网络映射拓扑,可以获得更高的接受 率和收益。从图3可以看出,本文算法 ROAVONDE-without-Divide下虚拟网请求的平均接 受率收敛均值约62%,算法 RDVNFE 的平均接受率 收敛均值约56%,所以算法 ROAVONDE-without-Divide 的平均接受率比算法 RDVNFE 提升了约 11%。更高的收入和更好的接受率表明本文算法可 以将底层网络资源分配给更多的虚拟网络请求。

2) 在图 3~5 中, 成本增加率低于 VN 请求接受 率 和 平 均 收 益 的 增 加 率。由于本 文 算 法 ROAVONDE-without-Divide 和 算 法 ROAVONDEwith-Divide 可以协调所有虚拟网络以获得最优的虚 拟网络映射拓扑, 使得虚拟网络能够被分配到最优 的底层网络资源, 从而降低了底层网络资源的成本。

3) 从图 6 和图 7 可以看出,本文算法提高了网络资源的利用率。本文算法 ROAVONDE-without-Divide 和 算 法 ROAVONDE-with-Divide 比 算 法 RDVNFE 和算法 RDVNFEO 提高了节点利用率和链路利用率,原因是本文算法 ROAVONDE-without-Divide 和算法 ROAVONDE-with-Divide 提高了 VN 请求接受率,使用了更多的底层网络资源。相比现 有算法 RDVNFE,本文算法 ROAVONDE-without-Divide 下节点资源均利用率提升了约 61%,链路资 源平均利用率提升了约 27%,说明本文算法 ROAVONDE-without-Divide 可以为虚拟网络分配更 加优化的链路资源。

4)算法 ROAVONDE-with-Divide 在 VN 请求接 受率和平均收益方面不如算法 ROAVONDE-without-Divide,但算法 ROAVONDE-with-Divide 在 VN 请求 接受率和平均收益方面优于算法 RDVNFE 和 RDVNFEO。在算法运行时间方面,算法 ROAVONDE-with-Divide优于算法 ROAVONDEwithout-Divide。因此,如果网络规模较大,可以使用 算法 ROAVONDE-with-Divide 提升虚拟网映射的 效率。

#### 5 结束语

在 EONs 环境下,为解决动态环境下底层网络 资源利用率低的问题,本文提出了一种面向动态环 境的虚拟光网络资源优化算法,通过仿真实验验证 了该算法在虚拟网请求接受率、底层网络资源利用 率方面优于现有算法。

由于资源分配的竞争关系与价格相关,下一步 工作将基于本文研究成果,进一步从经济学的角度 分析具有价格竞争关系的资源分配策略。

#### 参考文献:

- [1] XU Y, GUI G, GACANIN H, et al. A survey on resource allocation for 5G heterogeneous networks:current research, future trends, and challenges [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2021, 23(2):668–695.
- [2] 赵文,田永春,曾浩洋. 5G 安全架构分析[J]. 电讯 技术,2020,60(8):876-882.
- $\begin{bmatrix} 3 \end{bmatrix} XU Y, GU B, LI D, et al. Resource allocation for secure SWIPT-enabled D2D communications with <math display="inline">\alpha$  fairness  $\begin{bmatrix} J \end{bmatrix}.$  IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 71(1):1101-1106.
- LIU H L, DU J D, CHEN Y, et al. A coordinated virtual optical network embedding algorithm based on resources availability-aware over elastic optical networks [J]. Optical Fiber Technology, 2018, 45:391-398.

- [5] YANG S, LI F, TRAJANOVSKI S, et al. Recent advances of resource allocation in network function virtualization
   [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2020, 32(2):295-314.
- [6] FAN W, XIAO F, CHEN X, et al. Efficient virtual network embedding of cloud-based data center networks into optical networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2021, 32(11):2793-2808.
- [7] XIAO X C,ZHENG X W, WEI Y, et al. A virtual network resource allocation model based on dynamic resource pricing[J]. IEEE Access, 2020, 8:160414-160426.
- [8] CHEN Q, CHEN B, ZHENG W, et al. Virtual optical network mapping approaches in space-division-multiplexing elastic optical data center networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(12):3515-3529.
- [9] 刘焕淋,胡会霞,马敬,等.光路可靠性和频谱整合因 子感知的虚拟光网络生存性映射[J].电子学报, 2021,49(4):744-749.
- [10] 赵季红,冯晴,王智,等. 面向多业务场景的端到端网络切片安全部署算法[J]. 电子与信息学报,2022,44
   (4):1421-1428.
- [11] 李悦,任春莉,章国安.车联网中网络切片资源分配 方案[J].电讯技术,2023,63(1):85-92.
- [12] LIU H, WEN M, CHEN Y, et al. Virtual optical network embedding of time-varying traffic in elastic optical networks[J]. Optics Communications, 2022(508):1-9.
- [13] MANO T, INOUE T, MIZUTANI K, et al. Reducing dense virtual networks for fast embedding[J]. IEICE Transactions on Communications, 2020, 103(4):347-362.
- [14] CHOWDHURY M, RAHMAN M R, BOUTABA R. Vineyard: virtual network embedding algorithms with coordinated node and link mapping [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2011, 20(1):206-219.
- [15] BANNOUR F, SOUIHI S, MELLOUK A. Distributed SDN control:survey,taxonomy,and challenges[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017, 20(1): 333-354.
- [16] ZEGURA E W, CALVERT K L, BHATTACHARJEE S. How to model an internetwork [C]//Proceedings of 1996 IEEE International Conference on Computer Communications. San Francisco: IEEE, 1996:594-602.

#### 作者简介:

**张顺利** 男,1981 年生于山西运城,2012 年获博士学位,现为高级工程师,主要从事网络虚拟化、边缘计算技术研究。

**邵苏杰** 男,1985 年生于陕西汉中,2015 年获博士学位,现为讲师,主要从事能源互联网、边缘计算与物联网研究。