

虚拟网络可生存的启发式可靠映射算法

朱强, 王慧强, 马春光, 冯光升, 吕宏武

(哈尔滨工程大学 计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对虚拟网络可靠映射问题, 引入虚拟网络可生存约束条件, 确保在底层网络单节点失效情况下, 被映射虚拟网络剩余部分仍保持连通, 最大程度确保虚拟网络的完整性和服务的连续性。以最小化底层网络映射开销为目标函数, 建立虚拟网络可靠映射的整数线性规划模型, 提出一种虚拟网络可生存的启发式可靠映射算法 RHM-SVN 并进行求解。实验结果表明, 该算法能够有效降低资源平均利用率, 提高映射成功率、底层网络平均收益和虚拟网络恢复成功率。

关键词: 云计算; 虚拟网络可生存; 虚拟网络可靠映射; 整数线性规划; 蚁群算法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Reliable heuristic mapping method for survivable virtual network

ZHU Qiang, WANG Hui-qiang, MA Chun-guang, FENG Guang-sheng, LV Hong-wu

(College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: For reliable virtual network mapping problem, virtual network survivability constraints are introduced to ensure that the rest of the mapped virtual network remains connected under a single node failure condition in the substrate network, which makes sure the completeness of the virtual network and continuity of services. In order to reduce cost of the substrate network, the reliable heuristic mapping problem is considered as an integer linear programming model and a reliable heuristic mapping method for survivable virtual network is proposed to solve the problem. The simulation results show that average usage of links is reduced and the success rate, average revenue of mapping, recovery success rate of virtual network are increased compared with the existing reliable mapping algorithms.

Key words: cloud computing; survivable virtual network; network virtualization embedding; integer linear programming; colony optimization algorithm

1 引言

受到当前互联网体系结构影响, 云计算在服务多样性提供等方面面临诸多挑战, 而网络虚拟化技术正是解决该问题的有效技术手段^[1,2]。网络虚拟化技术通过在同一底层物理网络上建立多个相互独立的虚拟网络, 快速、低成本地开展特定类型的业务和新型网络技术的部署, 如 IPTV、VoIP 等采用

特殊的带宽和流量控制协议, 满足客户对视频、语音通话等 QoS 敏感业务的需求。用户产生的虚拟网络请求, 通常由带有资源约束条件的虚拟节点和虚拟链路组成。如何为虚拟网络提供合理的底层网络资源分配称作虚拟网络映射, 目前已证明是 NP-hard 问题^[3,4]。

现有的虚拟网络映射算法大多关注无故障网络环境下的请求接受率、底层资源利用率和平均收

收稿日期: 2014-10-13; 修回日期: 2014-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61370212, 61402127); 教育部博士点优先发展基金资助项目 (20122304130002); 黑龙江省自然科学基金重点基金资助项目 (ZD201102); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目 (HEUCF100601, HEUCFZ1213)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61370212, 61402127); The Research Foundation for the Doctoral Program of Higher Education of China (20122304130002); The Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (ZD201102); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (HEUCF100601, HEUCFZ1213)

益, 如 Chowdhury 等^[5]提出的基于增强图的 ViNEYard 算法, Cheng 等^[6]提出的基于拓扑感知节点排名的 RW-BFS 算法, Houidi 等^[7]提出的基于分布式协作的映射算法, Lischka 等^[8]提出的基于子图同构检测的映射算法, Shen 等^[9]提出的跨域映射算法以及基于群智能的映射算法^[10-12]等, 却没有考虑被映射虚拟网络的可靠性问题。然而, 在实际情况下底层网络的节点和链路受内外因素的影响, 如遭受恶意攻击或者自身软硬件损坏, 不可避免地会发生失效, 破坏虚拟网络服务提供的连续性, 导致服务提供商违反与虚拟网络请求用户签订的服务协议, 造成损失。进而服务提供商会对其租用设备的基础设施提供商失去信任。因此, 如何保障虚拟网络的可靠映射是基础设施提供商亟待解决的问题。

针对虚拟网络的可靠映射问题, 目前主要采用保护机制解决。Rahman 等^[13]提出一种主动的基于混合策略的启发式链路备份生存性算法, 在虚拟网络映射时预先为虚拟链路分配好冗余链路作为备份, 当底层链路发生失效时将其切换到备份链路。为了减少备份资源的冗余量, Yu 等^[14]提出一种在不同区域为虚拟网络请求提供节点和链路备份的方法, 该方法需要定时向备份节点传送当前虚拟节点的状态信息, 会加剧底层网络资源的消耗。与上述预先单独分配备份资源不同, Yeow 等^[15]提出一种基于优化冗余池的资源共享机制, 动态地为多个虚拟网络请求分配备份资源, 能够一定程度降低冗余资源对底层网络资源的消耗, 提高虚拟网络映射的各项指标。综上所述, 目前保护机制采取的措施是预先为虚拟网络分配好备用的底层网络资源, 当底层网络的节点或者链路发生失效, 采用备用的资源对虚拟网络服务进行恢复。其缺点是带来底层网络资源的过度消耗, 影响映射的成功率和底层网络的长期收益。此外, Butt 等^[16]提出一种节点迁移与重映射方法, Oussama^[17]提出一种基于协调博弈的重映射方法。这 2 种方法无需为虚拟网络提供后备资源, 在节点或链路发生失效后, 对失效所影响的虚拟节点和链路进行迁移, 并进行节点和链路的重新分配, 恢复虚拟网络服务。该方法属于恢复机制, 尽管无需提供冗余资源, 但在底层空闲资源较少时恢复的成功率较低。

与传统的保护机制和恢复机制不同, 受文献[18]中波分复用 (WDM, wavelength division multiplex-

ing) 光网络路由可生存思想的启发, 本文在不利用底层资源进行备份的前提下, 针对底层网络单节点失效提出了一种虚拟网络可生存的启发式可靠映射算法。WDM 光网络将底层网络的波长资源分配给不同的逻辑网络, 而底层网络故障会导致大量业务中断。WDM 光网络路由可生存是指, 当底层网络发生故障时, 受影响的光网络保持最大程度的连通, 维持可容忍的服务水平, 并能够快速恢复, 最后通过重路由技术恢复整个网络的连通。与 WDM 光网络路由可生存仅考虑链路资源映射不同, 本文所提出的虚拟网络可生存还需要考虑虚拟节点的映射, 难度更大。当某一底层节点发生故障后, 被映射的虚拟网络剩余部分仍然保持连通, 在最大程度确保虚拟网络服务连续性的前提下不对底层网络资源产生多余的占用, 最后通过节点迁移与链路重映射方法对虚拟网络进行修复。

本文以最小化底层网络开销为目标, 引入虚拟网络可生存约束条件, 并建立虚拟网络可生存的整数线性规划模型, 提出一种虚拟网络可生存的启发式可靠映射算法 RHM-SVN。该算法对去除单节点的虚拟网络子图求取主割集, 通过蚁群算法对节点和链路进行选择, 使主割集中的边要优先选择不经过去除的虚拟节点映射到底层网络节点, 有效地降低了资源平均利用率, 提高了映射的成功率、底层网络的平均收益和虚拟网络的恢复成功率。

2 虚拟网络可靠映射资源分配问题

本文所述的可靠虚拟网络映射是把虚拟网络请求按照可生存规则部署到底层网络上, 并为其分配资源的过程。可靠虚拟网络映射资源分配问题主要由底层网络 (substrate network)、虚拟网络请求 (virtual network request) 建模, 虚拟网络映射问题建模和虚拟网络可生存性分析 3 部分构成。

2.1 网络模型

底层网络。底层网络使用加权无向图 $G^s = (N^s, E^s, A_n^s, A_e^s)$ 描述。其中, N^s 表示底层网络节点集, E^s 表示底层网络链路集。 A_n^s 是底层网络节点的属性集合, 节点 $n^s \in N^s$ 的属性取剩余 CPU 资源 $cpu(n^s)$ 和位置 $loc(n^s)$ 。 A_e^s 为节点 i 和 j 之间链路 $e_{ij}^s \in E^s$ 的属性集, 链路的属性取剩余带宽 $b(e^s)$ 。此外, A_n^s 和 A_e^s 也可通过扩展分别加入内存和链路时延等其他属性。在链路映射的过程中, 令

P^s 表示底层网络所有节点之间无环路径的集合, $P^s(i, j)$ 表示底层网络节点 i 和 j 之间无环路径的集合。底层网络路径 $p \in P^s$ 的可用带宽 $b(p)$ 是底层网络节点 i 和 j 之间沿着该路径剩余带宽的最小值 $\min_{e_{ij} \in p} b(e_{ij}^s)$ 。

虚拟网络请求。虚拟网络请求 $G^v = (N^v, E^v, C_n^v, C_e^v, T)$ 也使用加权无向图表示。其中, N^v 表示虚拟网络请求的节点集, E^v 表示虚拟网络请求的链路集。 C_n^v 表示虚拟网络请求对节点属性的约束, 包括 CPU 资源需求 $cpu(n^v)$ 和位置需求 $loc(n^v)$ 。 C_e^v 表示虚拟网络请求对链路属性的约束, 为带宽需求 $b(e^v)$ 。此外, T 代表虚拟网络请求运行的持续时间。

2.2 虚拟网络映射问题建模

虚拟网络的映射过程是将虚拟网络请求 G^v 部署到底层网络 G^s 的子集 $G^{s'}$ 上, 并且符合 G^v 对节点 CPU、位置和链路带宽约束的过程。映射过程通常可以划分为节点映射 f_N 和链路映射 f_E 这 2 部分。

1) 节点映射

$$f_N : (N^v, C_n^v) \rightarrow (N^{s'}, A_n^s)$$

其中, $N^{s'} \subset N^s$ 。 f_N 将虚拟网络请求中的每一个节点 $n^v \in N^v$ 按照其 CPU 和位置约束映射到不同的物理节点 $n^s \in N^{s'}$ 上, 记为 $f_N(n^v) = n^s$ 。

2) 链路映射

$$f_E : (E^v, C_e^v) \rightarrow P^{s'}$$

其中, $P^{s'} \subset P^s$ 。 f_E 将虚拟链路映射到满足其带宽资源约束的底层网络无环路径上。

2.3 虚拟网络可生存性分析

文献[17]证明了在 WDM 光网络中, 在单节点 i 失效的前提下, 对于底层网络 G^s 和连通度大于 2 的虚拟网络 G^v , G^v 具备路由可生存性的充要条件是: 对于除去失效虚拟节点 i 的虚拟网络子图 $G^{v,i}$, 其主割集 $PCS_{G^{v,i}} < S, N^{v,i} \setminus S >$ 至少存在一条边没有映射到相应底层失效节点连接的底层链路上。其中, $N^{v,i} = N^v - \{i\}$, $< S, N^{v,i} \setminus S >$ 是 G_v 的一个割, 将顶点集合 $N^v - \{i\}$ 分成 2 个子集 S 和 $N^{v,i} \setminus S$ 。割集 $CS_{G^{v,i}} < S, N^{v,i} \setminus S > = \{(p, q) | (p, q) \in E \wedge (p \in S) \wedge (q \in N_{v,i} \setminus S)\}$ 。主割集 $PCS_{G^{v,i}} < S, N^{v,i} \setminus S >$ 的特点是其顶点集合 S 和 $N^{v,i} \setminus S$ 形成的 2 个子图均连通。该结论同样可以对虚拟网络链路映射的可靠选择

提供依据。同时, 与该文献中仅考虑底层链路资源不同, 虚拟网络映射问题还要考虑底层网络节点资源的分配。

图 1 所示为 2 个成功的虚拟网络映射方案。首先, 方案 1 和 2 均满足虚拟网络中节点和链路的约束条件。方案 1 的节点映射方案为 $a \rightarrow C, b \rightarrow E, c \rightarrow B$, 链路映射方案为 $(a, b) \rightarrow \{(C, D), (D, E)\}$, $(a, c) \rightarrow \{(C, A), (A, B)\}$ 和 $(b, c) \rightarrow \{(E, B)\}$; 方案 2 的节点映射方案为 $a \rightarrow F, b \rightarrow E, c \rightarrow B$, 链路映射方案为 $(a, b) \rightarrow \{(F, E)\}$, $(b, c) \rightarrow \{(E, F), (F, B)\}$ 和 $(a, c) \rightarrow \{(F, B)\}$ 。映射方案 1 是一个可靠映射方案, 当 a, b, c 任何一个节点发生故障时, 被映射的虚拟网络的剩余部分仍然保持连通, 最大程度确保虚拟网络连通性, 具备可生存能力。对于方案 2, 如果节点 a 发生故障, 则剩下的节点均不连通, 不具备可生存性。

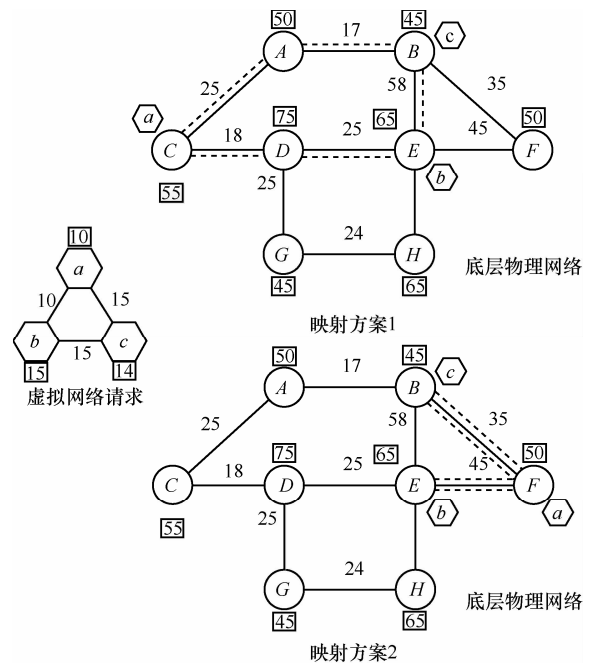


图 1 虚拟网络分配到底层物理网络

3 虚拟网络可靠映射评价指标

基础设施提供商存在的目的是通过向服务提供商提供可租用的底层网络设备获取利润^[19]。从基础设施提供商的角度出发, 虚拟网络映射算法的主要目标是: 在长期运营过程中, 如何接受更多的虚拟网络请求、最大化运营收益、减少底层网络的资源占用, 以及提高虚拟网络恢复的成功率。

1) 虚拟网络请求接受率

底层网络长时间运行过程中, 虚拟网络请求接受率 η_{accepted} 代表成功映射虚拟网络的情况。

$$\eta_{\text{accepted}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T VNR_{\text{accepted}}}{\sum_{t=0}^T VNR + \delta} \quad (1)$$

其中, $\sum_{t=0}^T VNR_{\text{accepted}}$ 为 0 到 T 时间段内成功映射的虚拟网络请求的个数; $\sum_{t=0}^T VNR$ 为 0 到 T 时间段内到达的虚拟网络请求的个数。 δ 为一无限趋近于 0 的正数。

2) 底层网络的平均收益

底层网络运营的平均收益 η_{revenue} 为

$$\eta_{\text{revenue}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T R(G^v, t)}{T + \delta} \quad (2)$$

$$R(G^v, t) = \alpha \sum_{n^v \in N^v} \text{cpu}(n^v) + \beta \sum_{e^v \in E^v} b(e^v) \quad (3)$$

其中, $\sum_{t=0}^T R(G^v, t)$ 为 0 到 T 时间段内虚拟网络请求映射的收益总和。基础设施提供商可以通过 α 和 β 分别控制 CPU 资源和带宽资源的权重, 调整自身的收益情况。

3) 底层网络的负载强度

底层网络的负载强度表示底层节点和链路的占用情况, 是已占用资源与总资源的比值。与虚拟链路映射到不同长度的底层链路所消耗的资源有所区别不同, 虚拟节点映射到底层节点占用的资源是不变的。因此, t 时刻的底层网络的负载强度 $\eta_{\text{ratio}}(t)$ 由底层链路的平均使用情况表示

$$\eta_{\text{ratio}}(t) = \frac{1}{|E^s|} \sum_{e_i^s \in E^s} \left(\frac{b(e_i^s)}{\max b(e_i^s)} \right) \quad (4)$$

4) 虚拟网络恢复成功率

虚拟网络恢复成功率是评价虚拟网络可靠映射的重要指标, 是成功恢复的虚拟网络数与因底层资源损坏受影响的虚拟网络数的比值。

$$\eta_{\text{success}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^{F(T)} \gamma'(t)}{\sum_{t=0}^{F(T)} \gamma(t) + \delta} \quad (5)$$

其中, $F(T)$ 表示 0 至 T 时刻底层网络发生失效的

次数, $\gamma(t)$ 表示 $t_i \in (0, 1, \dots, F(T))$ 时刻发生失效所影响的虚拟网络的个数, $\gamma'(t)$ 则为受到影响的虚拟网络中恢复成功的虚拟网络个数。

4 虚拟网络可靠映射问题整数线性规划模型

本文以最小化虚拟网络映射的开销为目标函数, 建立虚拟网络可生存的可靠映射问题整数线性规划模型, 具体如下。

4.1 变量说明

1) η_i^m : 0-1 变量, 代表节点的映射关系。当虚拟节点 m 映射到底层节点 i 时, η_i^m 的值为 1, 否则为 0。

2) ϕ_{ij}^m : 0-1 变量, 代表链路的映射关系。当虚拟链路 (m, n) 被映射到底层链路 (i, j) 时, ϕ_{ij}^m 的值为 1, 否则为 0。

4.2 目标函数

对于映射虚拟网络请求所需的底层节点和链路资源的使用情况, 前文评价指标对底层网络负载强度的描述中已经提到, 虚拟网络节点映射到底层节点占用的资源是不变的。因此, 计算底层网络中链路带宽的使用情况能够衡量底层资源的开销情况。整数线性规划模型的目标函数为最小化底层网络链路带宽使用成本

$$\min \sum_{(i,j) \in A_i^s} \sum_{(m,n) \in C_i^s} \phi_{ij}^m b(e_{mn}) \quad (6)$$

4.3 节点约束条件

底层节点 i 的剩余可用 CPU 资源需要满足虚拟节点 m 的需求, 如式 (7) 所示。此外, 底层节点 i 的位置 $loc(i)$ 也要在虚拟节点位置 $loc(m)$ 的距离范围 $D(m)$ 内, 用 $\|loc(m) - loc(i)\|$ 表示 m 和 i 之间的欧氏距离, 如式 (8) 所示。对于同一个虚拟网络请求中的每个虚拟节点, 只能被分配到一个底层节点上; 同一个虚拟网络请求的 2 个不同节点不能同时被分配到相同的底层节点上; 不同虚拟网络请求的虚拟节点可以分配到相同的底层节点上, 如式(9)和式(10)所示。节点映射的约束条件为

$$\forall i \in N^s, \forall m \in N^v, \eta_i^m \text{cpu}(m) \leq \text{cpu}(i) \quad (7)$$

$$\forall i \in N^s, \forall m \in N^v, \eta_i^m \|loc(m) - loc(i)\| \leq D(m) \quad (8)$$

$$\forall i \in N^s, \forall m \in N^v, \eta_i^m \in \{0, 1\}$$

$$\forall i \in N^s, \sum_{m \in N^v} \eta_i^m \leq 1 \quad (9)$$

$$\forall m \in N^v, \sum_{i \in N^s} \eta_i^m = 1 \quad (10)$$

4.4 链路约束条件

首先，底层网络链路的剩余带宽需要满足虚拟链路的带宽要求，虚拟链路才能够被映射到底层链路上，如式(11)所示。此外，还需要考虑链路的连接性约束，如式(12)所示。如果虚拟节点 m 和 n 分别被映射到底层节点 i 和 j 上，虚拟链路 (m, n) 被映射到 i 和 j 之间的路径 $p \in P^s(i, j)$ 。

1) 当 i 为源节点时， m 映射到 i 上， $\eta_i^m = 1$ ，则有

$$\begin{aligned} \sum_{(j,i) \in E^s} \varphi_{ji}^{mn} &= \sum_{(j,i) \in E^s} \varphi_{ji}^{mm} = 0 \\ \sum_{(i,j) \in E^s} \varphi_{ij}^{mn} - \sum_{(j,i) \in E^s} \varphi_{ji}^{mn} &= 1 \end{aligned}$$

因此，源节点流出的量为 1，流入的量为 0。

2) 当 i 为目的节点时， n 映射到 i 上，有 $\eta_i^n = 1$ ，则有

$$\begin{aligned} \sum_{(i,j) \in E^s} \varphi_{ij}^{mn} &= \sum_{(i,j) \in E^s} \varphi_{ij}^{nn} = 0 \\ \sum_{(i,j) \in E^s} \varphi_{ij}^{mn} - \sum_{(j,i) \in E^s} \varphi_{ji}^{mn} &= -1 \end{aligned}$$

因此，目的节点流出的量为 0，流入的量为 1。

3) 对于路径上的其他节点，则有

$$\begin{aligned} \sum_{(i,j) \in E^s} \varphi_{ij}^{mn} &= \sum_{(j,i) \in E^s} \varphi_{ji}^{mn} = 0 \\ \sum_{(i,j) \in E^s} \varphi_{ij}^{mn} - \sum_{(j,i) \in E^s} \varphi_{ji}^{mn} &= 0 \end{aligned}$$

因此，流出的量为 0，流入的量为 0。

$$\forall (i, j) \in N^s, \forall (m, n) \in N^v, \varphi_{ij}^{mn} b(e_{mn}) \leq b(e_{ij}) \quad (11)$$

$$\forall i \in N^s, \forall (m, n) \in E^v,$$

$$\sum_{(i,j) \in E^s} \varphi_{ij}^{mn} - \sum_{(j,i) \in E^s} \varphi_{ji}^{mn} = \begin{cases} 1, & \eta_i^m = 1 \\ -1, & \eta_i^n = 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

4.5 可生存性约束条件

$|PCS(S, N^{v,i} \setminus S)|$ 表示除去节点 i 子图的主割集中虚拟链路的数量。对于除去节点 i 的虚拟网络，每一个主割集中的所有虚拟链路被映射到同一条底层链路上的数量要小于主割集中虚拟链路的数量，这说明同一主割集的虚拟链路不会被映射到同一条底层链路上。假如映射到同一链路上，当单节

点失效后，则经过该节点的所有链路均失效，即去掉主割集中的所有边，图不再连通。该过程可以表达为

$$\forall i \in N^s, \forall N_{v,i} \in N^v, \sum_{(m,n) \in CS(PCS(S, G_{v,i} \setminus S))} \varphi_{ij}^{mn} + \varphi_{ji}^{mn} < |PCS(S, N_{v,i} \setminus S)| \quad (13)$$

5 启发式虚拟网络可靠映射算法

对于虚拟网络可靠映射的整数线性规划问题，问题规模较小时可以快速求取近似最优解，但随着问题规模的增大，求解难度会成指数级增长，难以直接进行全局最优解的求取。为此，本文提出一种启发式的虚拟网络可靠映射算法 RHM-SVN，采用 Dorigo 提出的具备全局寻优能力的蚁群算法^[20]求取近似最优解。RHM-SVN 算法主要包括 2 个部分：首先，当虚拟网络请求 G^v 到达时，采用 Tsukiyama 等提出的具有线性时间复杂度的枚举策略^[21]对虚拟网络中除去任一节点的子图求取割集，并依据文献[17]的方法对主割集进行筛选，为后续的链路生存性映射提供依据。然后，以降低网络整体映射开销为目标，使用蚁群算法对虚拟节点和虚拟链路计算最佳的生存映射方案。采用的策略是，当一个虚拟节点被映射到底层网络时，对于除去该节点的子图，主割集中的边要优先选择不经过该虚拟节点的路径，目的是当该节点失效后，在保证虚拟网络可生存的同时，使因该失效节点导致的失效链路的数量最小化。

5.1 节点和链路的选择方法

1) 节点选择策略

步骤 1 按照虚拟节点 m 对底层节点 i 的位置约束，确定虚拟节点 m 的可映射节点集合 $\theta(m) = \{i \in N^s \mid \|loc(m) - loc(i)\| \leq D(m)\}$ 。其中， $\theta(m)$ 是以 $loc(m)$ 为圆心、 $D(m)$ 为半径的圆内底层节点的集合。

步骤 2 计算 $\Omega(m) = \theta(m) \cap \{i \in N^s \mid \eta_i^m = 1\}$ 值。如果 $\Omega(m) = \emptyset$ ，表明底层网络可映射节点集合的节点不满足虚拟节点 m 的约束条件，该虚拟网络请求被拒绝；否则，转到步骤 3。

步骤 3 对集合 $\Omega(m)$ 中所有的底层网络节点 i' ，计算 $H(i')$ 值

$$H(i') = \omega_1 cpu(i') + \omega_2 \sum_{j \in \Omega(m)} b(P_{ij'}) \quad (14)$$

其中, P_{ij} 为与 i' 相邻节点 j 之间的路径。 ω_1 和 ω_2 分别为剩余 CPU 和剩余链路带宽的权值。

步骤 4 将 $\theta(m)$ 中的底层节点依据 $H(i')$ 值递减的顺序分配给虚拟节点 m 。

2) 链路选择策略

定义 1 最短路径提供最佳带宽资源因子。传统的链路分配通常采用减少链路分配时的跳数来减少占用底层网络带宽, 进而达到降低整个映射开销的目的。Dijkstra 算法能够快速求取节点之间的最短路径, 但缺点是仅考虑路径的跳数, 没有考虑路径带宽的使用情况, 容易造成局部节点过载, 影响映射效率。为此, 提出最短路径提供最佳带宽资源因子 $\psi(p)$ 来解决此问题。

$$\psi(p) = \frac{\text{length}(p)}{\min_{e_{ij}^s \in p} b(e_{ij}^s)} \quad (15)$$

步骤 1 当虚拟网络节点 m 分配到底层网络节点 i 时, 计算虚拟网络除去节点 m 的主割集 $PCS_{G^v, m} < S, N^{v, m} \setminus S >$ 。

步骤 2 对于主割集中的虚拟链路 (p, q) , 假设 p 和 q 分别被分配到到底层节点 p' 和 q' , 从底层网络无环路径集合 $P^s(p', q')$ 中选取路径。如果存在路径 $p \in P^s(p', q')$ 不经过节点 i , 并且满足链路的约束条件(11)~(13), 则对这些路径 p 依据 $\psi(p)$ 值递增的顺序为 (p, q) 分配路径。如果主割集中的所有边均不能满足不经过节点 i , 那么该虚拟网络不具备可生存性, 对该虚拟网络节点 m 进行标记, 并对 $P^s(p', q')$ 中的路径依据 $\psi(p)$ 值递增的顺序为 (p, q) 分配路径 p' , p' 需要满足链路的约束条件(11)和(12)。

5.2 基于蚁群的节点和链路的映射算法

蚁群算法 (ACO, ant colony optimization) 是一种模拟蚂蚁觅食, 通过迭代来完成寻优过程的一种并行随机搜索算法。与同类智能优化算法相比, 蚁群算法基于正反馈原理有利于收敛于全局最优解, 并且具有寻优能力强、顽健性强等优点^[20]。在蚁群算法中, 蚂蚁寻找食物时会在其所经过的路径上释放信息素, 信息素有一定的作用范围, 能够引起其他蚂蚁的察觉。如果离食物的距离较短, 蚂蚁在该条路径的来回次数较多, 留下的信息素就越多, 因此该路径被选择的概率就越大。利用蚁群算法求解映射问题, 需要对蚁群中适应度函数、转移概率、信息素浓度等进行重新定义。

定义 2 适应度函数。蚁群算法的适应度函数 fit 与可靠映射问题整数线性规划模型中的目标函数有关, 是底层网络链路资源映射的成本。

$$fit = \sum_{(m, n) \in A_c^s} \sum_{(i, j) \in C_c^v} \varphi_{ij}^{mn} b(e_{mn}) \quad (16)$$

定义 3 转移概率。 t 时刻蚂蚁的转移概率与信息素的浓度有关, 转移概率代表虚拟节点 m 映射到底层节点 i 的概率。

$$p_{mi} = \frac{\tau_{mi}(t)}{\sum_{x \in N^s} \tau_{mx}(t)} \quad (17)$$

定义 4 信息素浓度调整。每完成一次迭代, 虚拟节点 m 映射到底层节点 i 的信息素更新做出如下调整。

$$\tau_{mi}(t+1) = (1 - \rho)\tau_{mi}(t) + \Delta\tau_{mi}^{\text{best}} \quad (18)$$

$$\Delta\tau_{mi} = \frac{Q}{f(s^{\text{best}})} \quad (19)$$

其中, ρ 为信息素的挥发程度, $0 < \rho < 1$, s^{best} 为当前迭代的最优解, Q 为一正常数。

为了使映射算法能够正常执行, 对底层节点的选择需要满足式(7)~式(10)中对底层节点可用 CPU 和映射范围的约束。对映射链路进行选择需要满足式(11)和式(12)中对剩余可用带宽以及流量的约束。 fit 是适应度函数, 代表映射的收益情况。

RHM-SVN 算法描述如下。

步骤 1 初始化蚂蚁种群 SN 和总迭代次数 N 。

步骤 2 根据信息素更新虚拟节点对底层节点的映射概率, 依据映射概率按照 5.1 节的节点分配策略对节点进行映射, 同时使用链路选择策略进行链路映射。

步骤 3 计算蚂蚁的适应度函数 f , 若当前的适应度值更低, 表明新的映射方案要优于原方案, 则用新的映射方案取代原最优方案 s^{best} 。

步骤 4 记录当前最优的方案, 并对信息素浓度进行调整, 若当前的迭代次数小于 N , 跳转至步骤 2; 否则, 算法结束。

5.3 失效节点和链路恢复策略

底层网络节点 i 发生失效时, 映射到 i 上的所有虚拟节点 $m_i, i \in \{1, 2, \dots, N\}$ 均发生失效。对于具备可生存能力的虚拟网络, 虚拟节点 m_i 失效后, 虚拟网络的其他部分均连通, 因此只需修复该节点以及与该节点相连的链路即可。首先依据 5.2 节中节点选择

策略步骤 4 重新进行节点的选取，并对虚拟网络中所有与 m_i 相关联的链路按照链路选择策略的步骤 2 进行重新选择。如果底层网络节点和链路没有符合失效虚拟网络节点和链路的约束条件，则修复失败，并将该虚拟网络请求移动到队列的尾部，等待下一轮修复。如果虚拟节点 m_i 失效后，虚拟网络不具备可生存能力，则采用文献[16]提出的基于拓扑感知的节点迁移与链路重映射方法进行重新分配，链路重映射时也采用最短路径提供最佳带宽资源因子，确保底层网络的负载均衡。如果修复失败，该虚拟网络请求也会被移动到队列的尾部，等待下一轮修复。

5.4 算法时间复杂度分析

虚拟网络可生存的启发式可靠映射算法首先需要虚拟网络中除去任一节点的子图求取割集，采用 Tsukiyama 等提出的具有线性时间复杂度的枚举策略时间复杂度为 $O((|N^v| + |E^v|)(\mu + 1))$ ， $|N^v|$ 和 $|E^v|$ 分别为虚拟网络中节点和链路的数目， μ 为割集的数目。节点映射策略的时间复杂度为 $O(|N^v| \cdot |N^s|)$ ，链路选择策略的时间复杂度为 $O(|N^v|^2)$ 。带有节点映射策略和链路映射策略的蚁群算法时间复杂度为 $O(N \cdot SN \cdot |N^v|^3 |N^s|)$ ， N 为迭代次数， SN 为种群规模。RHM-SVN 的时间复杂度为 $O((|N^v| + |E^v|)(\mu + 1)N \cdot SN \cdot |N^v|^3 |N^s|)$ 。

6 实验及结果分析

6.1 实验环境设置

本次实验在配置 Intel(R) 至强 E3-1230 v2 CPU 3.3 GHz, 8 GB RAM 的主机上进行，算法采用 C++ 语言编程实现。在 Ubuntu 12.04 操作系统上使用 GNU 线性编程工具包 GLPK 对整数线性规划问题进行建模和求解，同时使用 GT-ITM 拓扑生成器生成底层网络和虚拟网络的拓扑。底层网络设置为具有 200 个节点，节点之间连通概率为 0.5 的初始拓扑。底层节点的剩余 CPU 资源和链路的剩余带宽符合 [50, 100] 的均匀分布。虚拟网络请求方面，每个虚拟网络请求的到达强度符合每 100 个时间单元到达 4 个的泊松分布，生存时间符合 1 000 个时间单元的指数分布。每个虚拟网络请求的节点数目符合 [4, 10] 的均匀分布，并且节点之间的连通概率为 0.5。链路带宽资源的需求符合 [0, 20] 的均匀分布。单节点的失效符合每 100 个时间单元到达 2 次的泊松分布。位置的横纵坐标符合 [0, 100] 的均匀分布，

位置信息 D 符合 [50, 100] 的均匀分布。资源权重 α 和 β 均取 1， ω_1 和 ω_2 均取 1。对于蚁群算法，种群规模 SN 取 50、总迭代次数 N 取 100，信息素浓度 τ_{m_i} 取 5，信息素的挥发程度 ρ 取 0.8， Q 取 10 000。

表 1 给出参与对比的算法及其描述^[15,16]。RHM-SVN-Simple 算法是在本文提出的 RHM-SVN 基础上，去掉最短路径提供最佳带宽资源因子 $\psi(p)$ ，并采用最短路径方法分配路径，目的是验证 $\psi(p)$ 对映射算法的影响。SVNE-ORP 和 SVNE-TAP 分别为基于保护机制和恢复机制的可靠映射算法。

表 1 对比算法

算法名称	算法描述
RHM-SVN	本文提出的虚拟网络可生存的启发式可靠映射算法
RHM-SVN-Simple	在本文提出的 RHM-SVN 基础上，去掉最短路径提供最佳带宽资源因子 $\psi(p)$ ，采用最短路径方法分配路径
SVNE-ORP	文献[15]中基于优化冗余池的资源共享机制
SVNE-TAP	文献[16]中基于拓扑感知的节点迁移与链路重映射方法

6.2 实验结果分析

图 2 对不同时刻 4 种算法的虚拟网络请求接受率进行了比较。由于采用基于最短路径提供最佳带宽资源因子的链路选择策略，以及蚁群算法具有较强的寻优能力，随着时间的推移和虚拟网络请求的不断到来，与其他 3 种对比算法相比，RHM-SVN 算法能够获得较高虚网映射成功率，并且维持在 0.75 左右。与 SVNE-TAP 算法相比，本文提出的 RHM-SVN 算法并没有因加入了可生存策略使得虚拟网络的映射效率降低。SVNE-TAP 算法和 RHM-SVN-Simple 算法都因在对链路进行选择时，仅考虑路径的跳数，没有考虑路径带宽的使用情况，随着映射的虚拟网络不断增多，底层网络容易形成局部节点过载，进而影响了映射的效率。而 SVNE-ORP 因需要对映射的虚拟网络提供冗余资源，使底层网络的资源消耗过快，难以应对后续虚拟网络请求的不断到来。图 3 描述了底层网络在不同时刻的平均收益情况。由于 RHM-SVN 算法的虚拟网络请求接受率最高，因此单位时间内映射成功的虚拟网络最多，底层网络的平均收益也会增多，稳定在 27 左右。SVNE-ORP 算法为了保证其虚拟网络恢复的成功率，对虚拟网络提供大量的冗余资源，因此其长期的平均收益最差。

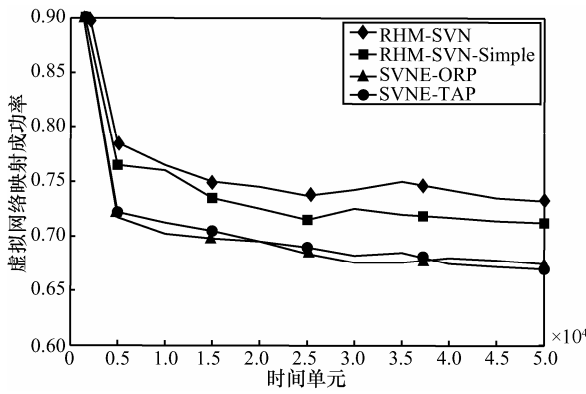


图2 虚拟网络请求接受率

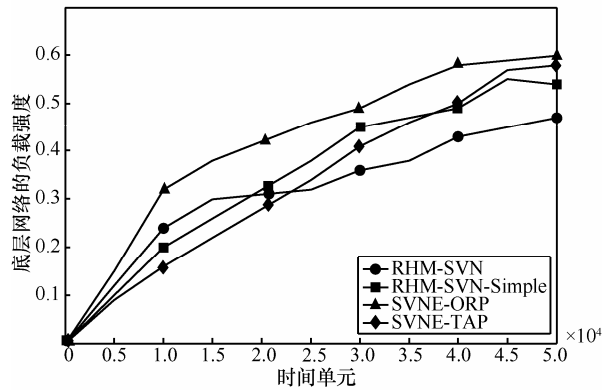


图4 底层网络的负载强度

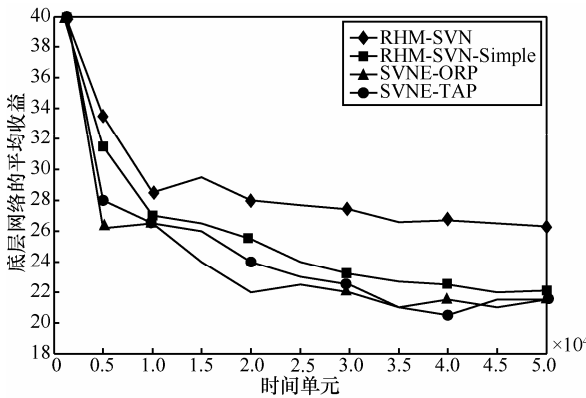


图3 底层网络的平均收益

图4描述了底层网络的链路负载强度情况。如图4所示，在前20000个时间单元，使用SVNE-TAP算法和RHM-SVN-Simple算法导致的底层网络负载强度均略低于RHM-SVN，而SVNE-ORP效果最差。而从第20000个时间单元之后，RHM-SVN算法持续以较大优势领先其他3种对比算法。这是因为在第20000个时间单元之前，RHM-SVN算法对映射部分虚拟网络使其具有可生存性能力时，原本主割集中的边选择的最优路径是经过该节点的，但是为了生存性考虑选择了不经过该虚拟节点的次优路径，这样会对底层网络的链路资源产生多余的占用，但保证了该算法的恢复成功率。同时，由于处于映射的起始阶段，底层网络的资源比较充足，SVNE-TAP算法和RHM-SVN-Simple算法暂时不会产生过载，因此其导致的底层网络负载强度要低于RHM-SVN算法。但第20000个时间单元之后，这2种算法由于采用最短路径算法，没有避免局部节点过载的措施，导致底层网络的资源使用不均衡，进而对随后的虚拟链路选择产生影响，导致其负载强度持续增加。此外，由于SVNE-ORP算法要为每一个虚拟网络的链路提供冗余资源，因此其导致的负载强度从实验起始时就最大。

图5为对因受节点失效而受影响的虚拟网络进行恢复的成功率情况。由实验结果可知，在前17000个时间单元，使用SVNE-ORP算法获得的恢复效率最高，RHM-SVN次之。而在剩余的时间段内，使用RHM-SVN算法获得的恢复效率最高。这是因为当映射刚开始时，到达的虚拟网络总数量较小，底层网络留有大量的剩余资源供SVNE-ORP算法为节点和链路提供冗余资源，因此SVNE-ORP算法在初期的恢复率较高。而对于RHM-SVN算法，优于所映射的算法不全具备可生存性，对于具备可生存性的虚拟网络可以快速恢复，但对不具备可生存性的虚拟网络请求，需要对节点和链路进行迁移和重新映射。重新映射时，节点和链路的容量约束较易得到满足，但是多个节点受其位置 $loc(i)$ 约束，可选择的底层节点会受到很大限制，导致前期的恢复率会低于SVNE-ORP算法。但随着底层网络资源不断被占用，SVNE-ORP算法能够提供的冗余资源较少，因此恢复的成功率会快速降低。而RHM-SVN算法在映射时对其可生存性进行考虑并且进行链路选择时采取避免底层网络出现局部过载节点措施，因此随着底层剩余资源的不断降低，恢复的成功率也会出

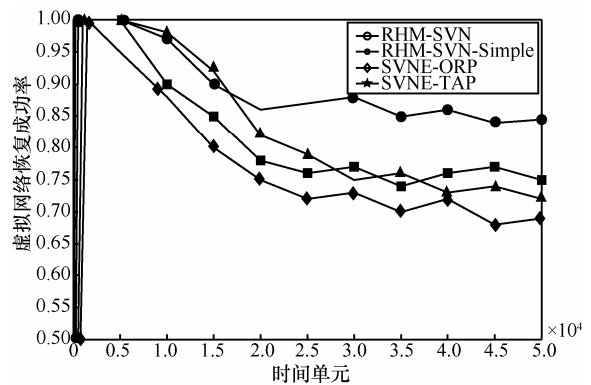


图5 虚拟网络恢复成功率

现一定程度的降低，但较为缓慢，最终保持在 0.85 的水平，从长期运行来看优于其他 3 种对比算法。

图 6 描述了映射同一个虚拟网络 4 种算法所需要的时间情况。随着虚拟网络节点数量的增多，4 种算法映射该虚拟网络所消耗的时间都在不断增大，SVNE-TAP 的时间消耗最小，RHM-SVN 的时间消耗最大。RHM-SVN 要对主割集以及最短路径提供最佳带宽资源因子 $\psi(p)$ 进行计算，带来了较多的时间开销。但是，与其他 3 种对比算法相比，RHM-SVN 处理虚拟网络请求同样也是秒级的，并且能够在保持较低负载强度的情况下，带来更高的

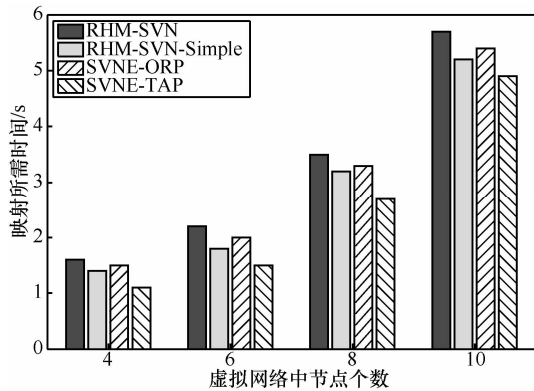


图 6 单个虚拟网络映射需要的运行时间

请求接受率、平均收益和恢复成功率，满足基础设施运营商对虚拟网络请求的处理需要。

此外，为了更进一步验证算法的有效性，本文采用文献[22]真实拓扑结构 USANET 作为底层网络，如图 7 所示。在节点连通概率、剩余 CPU 资源和链路的剩余带宽 3 方面采用与模拟底层网络拓扑结构实验相同的参数设置。

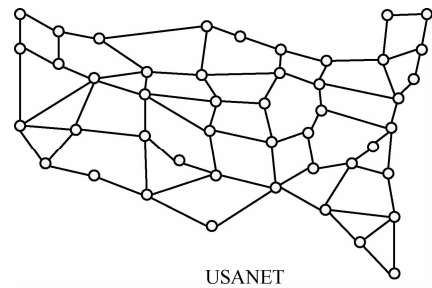
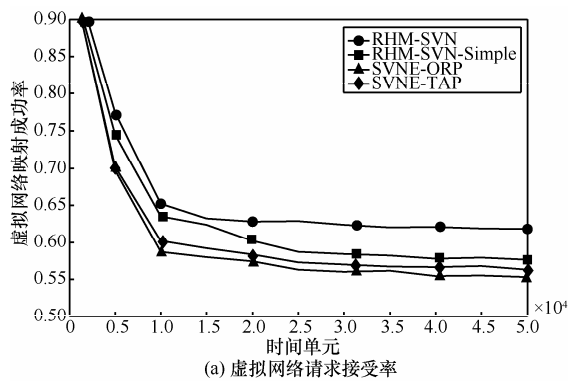
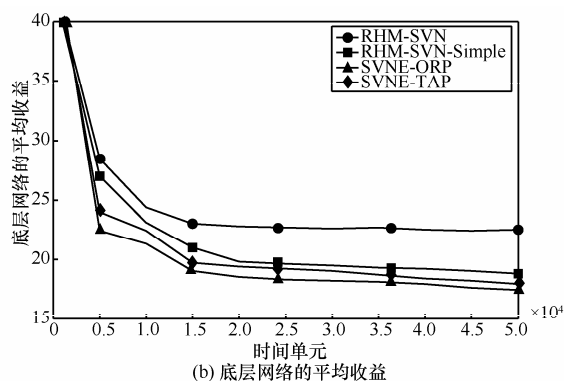


图 7 真实的底层网络拓扑结构 USANET

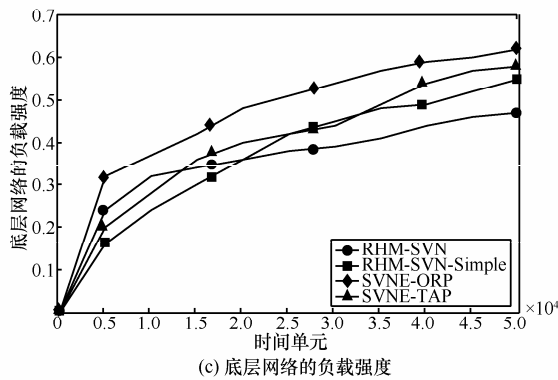
图 8 描述了 4 种对比算法在真实拓扑结构下的运行情况。由于 USANET 拓扑结构的节点数量小于模拟实验中设置的 200 个节点数量，4 种对比算法在请求接受率、底层网络平均收益和恢复成功率上都有一定程度的降低，在负载强度上有所增加。但是，与其他 3 种算法相比，RHM-SVN 算法仍然



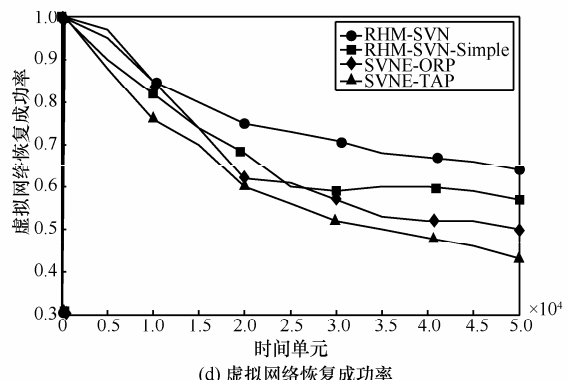
(a) 虚拟网络请求接受率



(b) 底层网络的平均收益



(c) 底层网络的负载强度



(d) 虚拟网络恢复成功率

图 8 USANET 网络拓扑结构下实验结果

有明显优势。仅在底层网络负载强度实验的前 17 000 个时间单元中, RHM-SVN 算法为了对映射部分虚拟网络使其具有可生存性能力, 对底层网络的链路资源产生多余的占用。这是因为原本主割集中的边选择的最优路径是经过某节点的, 但是为了生存性考虑选择不经过该节点的次优路径, 虽然占用了多余的资源, 但是保证了该算法的恢复成功率, 这也与之前的模拟实验结果相吻合。

7 结束语

本文围绕云计算环境下虚拟网络的可靠映射问题展开讨论。与传统基于冗余的保护机制以及恢复机制不同, 本文将 WDM 光网络路由可生存思想与虚拟网络的可靠映射算法进行融合, 提出一种虚拟网络可生存的启发式可靠映射算法。将虚拟网络可生存的虚拟网络资源分配问题抽象为一个整数线性规划模型, 并对虚拟网络的可生存策略进行描述, 使用蚁群算法对该模型进行求解, 最后对失效节点和链路进行恢复。为了验证算法的有效性, 使用当前本领域公认的仿真环境进行实验, 仿真结果表明, 在底层网络长期运行的情况下, RHM-SVN 算法能够有效地降低资源平均利用率, 提高映射的成功率、底层网络的平均收益和虚拟网络的恢复成功率。下一步的工作将围绕如何进一步优化底层网络节点和链路的选择策略展开, 进一步降低映射的时间开销, 以及如何将单节点失效的方案扩展到多底层节点失效并影响到单虚拟网络中 2 个以上节点的情况, 对多节点失效情况下虚拟网络可生存性理论进行证明。

参考文献:

- [1] FEAMSTER N, GAO L, REXFORD J. How to lease the Internet in your spare time[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(1): 61-64.
- [2] CHOWDHURY N M M K, BOUTABA R. A survey of network virtualization[J]. Computer Networks, 2010, 54(5): 862-876.
- [3] ANDERSEN D G. Theoretical approaches to node assignment[EB/OL]. <http://www.cs.cmu.edu/~dga/papers/index.html>, 2002.
- [4] 蔡志平, 刘强, 吕品等. 虚拟网络映射模型及其优化算法[J]. 软件学报, 2012, 23(4): 864-877.
CAI Z P, LIU Q, LV P, *et al.* Virtual network mapping model and optimization algorithms[J]. Journal of Software, 2012, 23(4): 864-877.
- [5] CHOWDHURY N M M K, RAHMAN M R, BOUTABA B. ViNE-Yard: virtual network embedding algorithms with coordinated node and link mapping[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 20(1): 206-219.
- [6] CHENG X, SU S, ZHANG Z B, *et al.* Virtual network embedding through topology-aware node ranking[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41(2): 39-47.
- [7] HOUIDI I, LOUATI W, DJAMAL Z, *et al.* A distributed virtual network mapping algorithm[A]. Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Communications[C]. Beijing, China, 2009. 5634-5640.
- [8] LISCHKA J, KARL H. A virtual network mapping algorithm based on subgraph isomorphism detection[A]. Proceedings of the 1st ACM SIGCOMM Workshop on Virtualized Infrastructure Systems and Architectures[C]. New York, USA, 2009.81-88.
- [9] SHEN M, XU K, YANG K, *et al.* Towards efficient virtual network embedding across multiple network domains[A]. Proceedings of the 2014 IEEE 22nd International Symposium of Quality of Service[C]. 2014. 61-70.
- [10] FAJJARI I, AITSAADI N, PUJOLLE G, *et al.* VNE-AC: virtual network embedding algorithm based on ant colony metaheuristic[A]. Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Communications[C]. Kyoto, Japan, 2011.1-6.
- [11] 程祥, 张忠宝, 苏森等. 基于粒子群优化的虚拟网络映射算法[J]. 电子学报, 2011, 39(10): 2240-2244.
CHENG X, ZHANG Z B, SU S, *et al.* Virtual network embedding based on particle swarm optimization[J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 39(10): 2240-2244.
- [12] 朱强, 王慧强, 冯光升等. VNE-AFS: 基于人工鱼群的网络虚拟化映射算法[J]. 通信学报, 2012, 33(Z1): 170-177.
ZHU Q, WANG H Q, FENG G S, *et al.* VNE-AFS: virtual network embedding based on artificial fish swarm[J]. Journal on Communications, 2012, 33(Z1): 170-177.
- [13] RAHMAN M, BOUTABA R. SVNE: survivable virtual network embedding algorithms for network virtualization[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2013, 10(2): 105-118.
- [14] YU H F, QIAO C M, ANAND V, *et al.* Survivable virtual infrastructure mapping in a federated computing and networking system under single regional failures[A]. Proceedings of 2010 IEEE Global Telecommunications Conference[C]. Miami, USA, 2010.1-6.
- [15] YEOW W L, WESTPHA C, KOZATL U C. Designing and embedding reliable virtual infrastructures[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41(2): 57-64.
- [16] BUTT N F, CHOWDHURY M, BOUTABA R. Topology-awareness and reoptimization mechanism for virtual network embedding[A]. Proceedings of 2010 Networking Conference[C]. Chennai, India, 2011. 27-39.

- [17] SOUALAH O, FAJJARI I, AITSAADI N, *et al.* A reliable virtual network embedding algorithm based on game theory within cloud's backbone[A]. Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Communications[C]. Sydney, Australia, 2014.2975-2981.
- [18] TODIMALA A, RAMAMURTHY B. A scalable approach for survivable virtual topology routing in optical WDM networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(6): 63-69.
- [19] 卿苏德, 廖建新, 朱晓民等. 网络虚拟化环境中虚拟网络的嵌套映射算法[J]. 软件学报, 2012, 23(11): 3045-3058.
QING S D, LIAO J X, ZHU X M, *et al.* Virtual network embedding algorithms in the network virtualization environment[J]. Journal of Software, 2012, 23(11): 3045-3058.
- [20] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1996, 26(1): 29-41.
- [21] TSUKIYAMA S, SHIRAKAWA I, OZAKI H, *et al.* An algorithm to enumerate all cutsets of a graph in linear time per cutset[J]. Journal of the Association for Computing Machinery, 1980, 27(4): 619-632.
- [22] SUN G, YU H, ANAND V, *et al.* A cost efficient framework and algorithm for embedding dynamic virtual network requests[J]. Future Generation Computer Systems, 2013, 29(5): 1265-1277.



王慧强 (1960-), 男, 河南周口人, 哈尔滨工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为云计算、信息安全、自律计算与可信计算、认知网络。

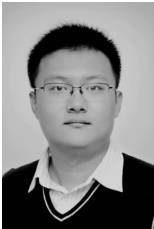


马春光 (1974-), 男, 黑龙江双鸭山人, 哈尔滨工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为密码学、无线传感器网络等。

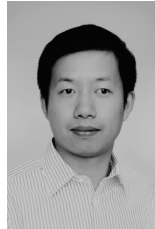


冯光升 (1980-), 男, 山东禹城人, 哈尔滨工程大学讲师, 主要研究方向为云计算和认知网络。

作者简介:



朱强 (1986-), 男, 山东招远人, 哈尔滨工程大学博士生, 主要研究方向为网络虚拟化和云计算。



吕宏武 (1983-), 男, 山东日照人, 哈尔滨工程大学讲师, 主要研究方向为云计算、性能评价和进程代数。