

跨域虚拟网络映射问题研究

贾伟* 夏靖波

(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

摘要: 该文研究网络虚拟化环境下的跨域虚拟网络映射问题, 提出一种集中式管理、分布式控制的分层分域虚拟网络资源管理架构。在此基础上, 构建了一种有效的虚拟网络跨域映射框架, 在此框架下将涉及到跨域的虚拟网络请求进行划分, 并以最小化虚拟网络映射开销为目标, 基于优化的人工蜂群算法进行最优划分方案的求解。仿真结果表明该方法在平均划分时间、虚拟网络请求接受率和平均额外映射等方面相比传统方法具有更好的性能。

关键词: 网络虚拟化; 跨域映射; 优化的人工蜂群算法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)03-0728-07

DOI: 10.11999/JEIT150656

Research on Virtual Network Embedding Across Multiple Domains

JIA Wei XIA Jingbo

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Virtual network embedding is researched across multiple domains under network virtualization environment. A hierarchical virtual resource provisioning architecture with centralized management and distributed control is proposed. On this basis, an effective virtual network embedding across multiple domains framework is built, and virtual network request is divided, which aims to minimize the embedding cost. An Optimal Artificial Bee Colony (OABC) algorithm is proposed to address this problem. Simulation results show that the performances of the proposed method are better than some other methods on average divide time, acceptance of virtual network request, and average extra embedding cost.

Key words: Network virtualization; Embedding across multiple domains; Optimal Artificial Bee Colony (OABC) algorithm

1 引言

网络虚拟化是为了解决互联网的僵化问题而提出的一种有效的解决方案, 它可以有效满足未来日益丰富的网络服务需求^[1]。在网络虚拟化环境中, 底层物理网络资源被抽象成为虚拟资源池, 用户的业务需求被抽象为不同的虚拟网络, 各个虚拟网络可以共享底层物理网络资源。虚拟网络映射主要解决网络虚拟化过程中的虚拟网络的构建问题。目标是将虚拟网络中的虚拟节点和链路在满足资源约束的前提下映射到底层物理网络的物理节点和链路上并保证资源的有效利用^[2]。目前该问题受到了学术界的广泛关注, 文献[3]同时考虑了链路和节点负载均衡的虚拟映射。文献[4]提出了基于人工鱼群的虚拟网络映射算法, 降低了底层网络开销和求解时间。文

献[5]以提高底层网络资源的利用率和收益为目标, 通过构建整数线性规划模型, 基于混合粒子群算法和遗传算法进行映射求解。文献[6]主要针对多个虚拟网络请求, 以降低链路负载、加快映射速度、提高资源利用率为目标, 基于离散粒子群算法进行求解。上述虚拟网络映射主要是针对单域的情况, 没有考虑跨域情况下的虚拟网络映射问题。

文献[7]基于 MAX-2-SAT 和 3-multiway cut 问题实现虚拟网络请求的划分, 并构建跨域映射的混合整数线性规划模型进行求解。文献[8]基于公开的边界节点信息, 给出了一种虚拟网络请求划分方法 LID。该方法构建了准确的问题模型且减少了跨域映射的开销。文献[9]提出了分布式的分层管理体系和资源管理机制, 设计了基于令牌传递的分布式域间承载网构建方法。文献[10]设计了一种跨域映射框架 PolyViNE, 将虚拟网络请求中无法被单域映射的部分交给相邻的区域进行映射, 但没有专门针对跨域映射的算法。文献[11]基于竞价的思想进行跨域映射, 提出了 V-Mart 竞价策略, 但没有相应的映射算法。文献[12]将虚拟网络映射问题转化为一个分层

收稿日期: 2015-06-02; 改回日期: 2015-12-04; 网络出版: 2016-02-03

*通信作者: 贾伟 william-1282008@163.com

基金项目: 陕西省自然科学基金(2012JZ8005)

Foundation Item: Shaanxi Provincial Natural Science Foundation (2012JZ8005)

线性规划问题进行求解，并设计了全局和本地映射算法。但没有考虑自私性。文献[13]提出了基于知识的跨域映射方法，并以最小化映射开销为目标基于遗传算法实现虚拟网络请求的划分。

本文主要研究虚拟网络资源管理架构以及跨域的虚拟网络映射问题。具体组织结构如下：第 2 节构建虚拟网络管理架构；第 3 节对跨域映射问题进行具体描述；第 4 节提出跨域映射的具体策略；第 5 节仿真验证文中跨域构建方法并进行分析；第 6 节为结束语。

2 虚拟网络管理架构

网络虚拟化环境下基础设施和网络服务改变了以往紧密耦合的特点，分离形成基础设施提供者和服务提供者。如图 1 所示。

2.1 基础设施提供者

底层基础设施是各种异构网系相互融合的复杂巨网络，它的覆盖范围广、结构复杂，要实现如此

大规模的资源管理和维护是相当困难的。为此将其划分为不同的自治域，每个自治域负责管理维护区域内的通信资源。各个自治域之间不存在利益冲突，它们共同协作以实现各种网络业务的可靠保障。

2.2 服务提供者

服务提供者是上层用户和底层资源之间的“桥梁”。本文构建集中式管理、分布式控制的层次化分层分域架构，将服务提供者分为区域服务代理和全局服务代理两种类型。不同类型的服务提供者具有不同的功能和职责。

2.2.1 区域服务代理 区域服务代理作为区域通信资源的代理实时掌握本区域通信资源的状态(拓扑、使用情况等)。同时接收区域内用户的业务请求，完成用户业务请求的虚拟资源向底层物理资源的映射。当某一区域通信服务代理出现故障，则相邻的区域服务代理可以接替进行保障。

2.2.2 全局服务代理 全局服务代理是为了实现集

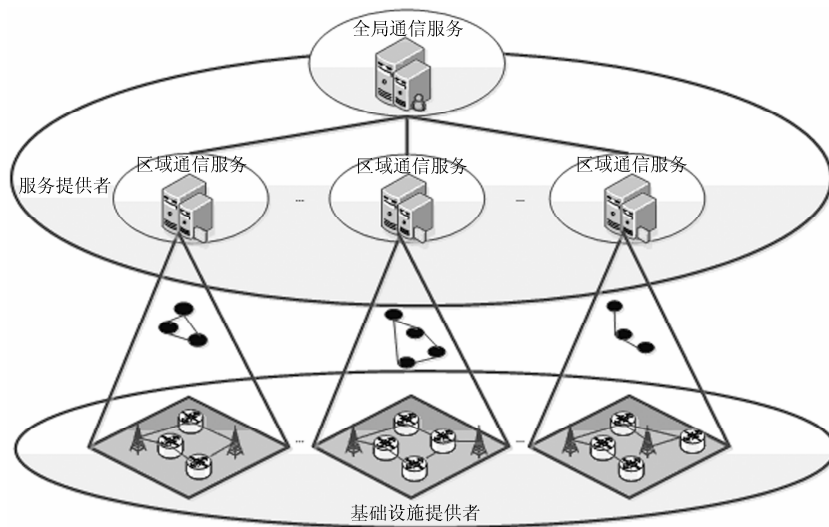


图 1 虚拟网络资源管理架构

中式管理的需要，负责管理区域通信服务代理的加入或退出。并实时掌握域内边界节点以及域间链路的拓扑连接关系及使用情况。当出现跨域的通信业务请求时协调区域服务代理进行协同处理。

3 跨域虚拟网络映射问题描述

在上节的架构中，底层物理网络为了满足集中式管理、分布式控制的需求被划分为不同的自治域。本节的跨域虚拟网络映射研究正是基于此进行的，服务代理根据用户的业务需求以及网络资源状态完成虚拟网络的构建，从而实现业务需求与资源的有效匹配。如图 2 所示。

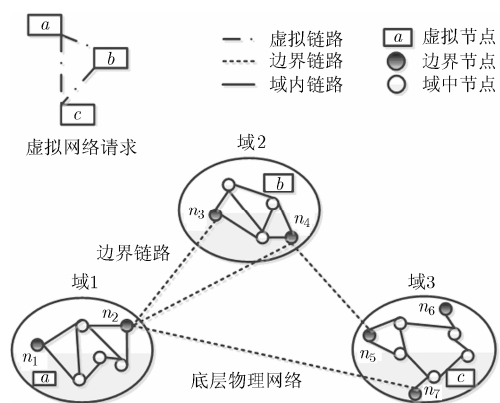


图 2 底层物理网络与虚拟网络请求

3.1 底层物理网络

底层物理网络被划分为 D 个不同的自治域(图2中 $D = 3$), 用加权无向图表示为 $G_S = (N_S, L_S) = \bigcup_{i=1}^D G_S^k (1 \leq k \leq D)$. N_S 表示底层网络中的节点集合, 这其中包括域内节点 N_{Sy} 集合和边界节点 N_{Sb} 集合; L_S 表示底层物理网络中的链路集合, 包括域内链路 L_{Sy} 和域间链路 L_{Sb} . 在上节的虚拟网络管理架构下, 借鉴体系结构中多视图的思想, 将整个底层物理网络分为全局视图和区域视图。区域视图是每个自治域内的物理网络拓扑, 相当于整个底层物理网络拓扑的子拓扑; 全局视图用 $G_{Sb} = (N_{Sb}, L_{Sb})$ 表示, N_{Sb} 表示由边界节点组成的节点集合, L_{Sb} 表示连接边界节点形成的链路集合。如图3所示。

3.2 虚拟网络请求

虚拟网络请求包括虚拟网络拓扑、请求到达时刻和请求持续时间, 形式化表示为: $VNR=(G_V, t_a, t_d)$. 其中 G_V 表示虚拟网络拓扑, 用加权无向图表示为 $G_V = (N_V, L_V, C_{N_V}, C_{L_V})$. N_V 和 L_V 代表虚拟节点和虚拟链路集合。 C_{N_V} 表示一个虚拟节点的资源约束(地理位置 $Loc(N_V)$ 、计算资源需求 $Cpu(N_V)$ 等), C_{L_V} 表示一条虚拟链路的资源约束(带宽需求 $B(L_V)$ 、时延约束 $Dealy(L_V)$ 等)。虚拟网络请求具有一个从到达建立再到拆除的生命周期, t_a 表示虚拟网请求的到达时刻, t_d 表示虚拟网络持续时间。

3.3 虚拟网络映射

单域虚拟网络映射是将虚拟节点及链路根据一定的约束条件及映射目标映射到底层物理网络上, 形式化表示为: $M : G_V(N_V, L_V) \rightarrow G_S(N_S, P_S)$. 而跨域虚拟网络映射不同于单域虚拟网络映射, 因为在

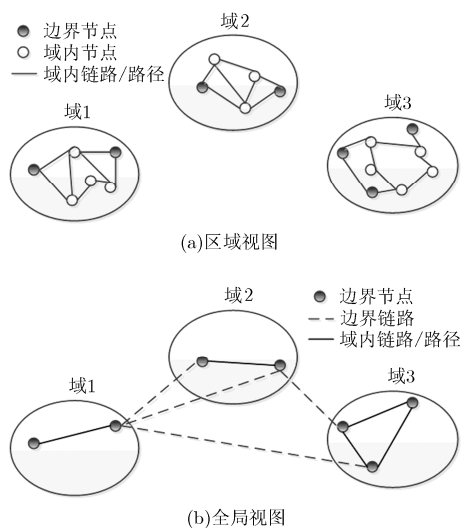


图3 底层物理网络多层次视图

单域映射中域内的物理拓扑以及资源状态都是可知的, 而对于跨域映射, 不同自治域之间信息都是不公开的, 这就需要采取分布式的映射机制, 实现域内映射和域间映射的协同, 有效满足映射需求并实现网络资源的充分利用。

4 跨域虚拟网络映射策略

4.1 跨域虚拟网络映射框架

在第2节的虚拟网络管理架构下, 为了提高构建成功率, 简化处理过程, 跨域映射采取分层协同的策略, 实现域间映射和域内映射的有效结合。映射框架如图4所示, 具体处理流程如下:

(1) 用户就近向区域服务代理发出业务请求, 区域服务代理将用户需求解析为虚拟网络构建请求, 并判断是域间还是者域内构建, 并放置于相应的集合中: $ym\{\}$ 和 $yj\{\}$;

(2) 域内构建请求集合由各个区域服务代理进行独立处理, 并根据构建需求进行虚拟网络映射。各区域服务代理可以并行地处理所属域内的映射请求, 从而提高构建效率;

(3) 由于各个域之间的网络资源信息是不公开的, 因此域间构建请求需要由各区域服务代理向全局服务代理发出域间构建请求。全局服务代理则根据掌握的全局资源信息以及域间构建请求的资源约束进行相应规划, 将域间构建请求划分为多个不同的域内构建请求, 并交由各个区域服务代理进行处理;

(4) 为了避免全局服务代理出现过载以及域间请求处理的冲突问题, 这里采用轮询的方式, 由全局服务代理周期性地对各个区域服务代理进行询问, 只有被询问到的区域服务代理才能向全局服务代理发出域间构建请求;

(5) 接收到域间构建请求后, 全局服务代理按照 FIFO 方式串行处理, 并向涉及到的其它区域服务代理发出协同处理请求。当所有相关域内构建完成后, 各区域服务代理向全局服务代理反馈构建成功的信息。

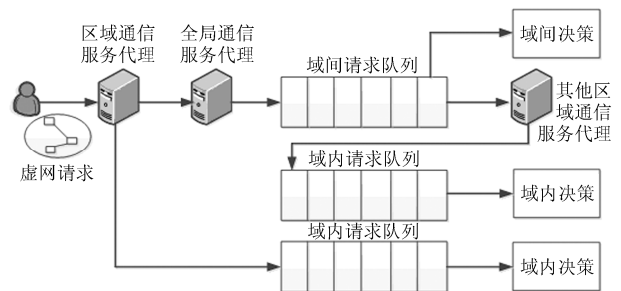


图4 跨域虚拟网络映射框架

4.2 基于优化的人工蜂群算法的域间构建请求划分

对于域内的虚拟网络构建请求的相关研究很多,这里不作过多描述。本文重点关注的域间构建请求,根据4.1节跨域映射框架,域间请求需要被划分为不同的域内请求。而如何去进行划分是本文研究的重点。相关研究证明虚网请求划分问题是NP难问题。因此可以采用智能优化算法求取近似最优解。本文考虑结合人工蜂群(Artificial Bee Colony, ABC)算法来进行求解,并针对实际问题对人工蜂群算法进行优化,提出优化的人工蜂群(Optimal Artificial Bee Colony, OABC)算法。

4.2.1 人工蜂群算法 人工蜂群算法是一种模拟蜂群采蜜行为的智能优化算法。它由文献[14]于2005年首次提出。算法由于控制参数少、计算简便、易于实现等特点,被广泛应用于组合优化问题、整数规划问题和图像处理等领域。在人工蜂群算法中蜜源的位置代表优化问题的解,蜜源的好坏代表了解的质量。算法中包含雇佣蜂、观察蜂和侦察蜂3种角色。雇佣蜂负责采集花蜜,并将蜜源信息通过“跳舞”行为传递给观察蜂。观察蜂根据舞蹈信息以一定的(跟蜜源质量相关)概率选择雇佣蜂,协助其在现有蜜源邻域内进行搜索。雇佣蜂在蜜源开采完后变为侦察蜂寻找新蜜源。其中涉及到两个重要的公式如式(1)和式(2)所示。

$$v_{ij} = x_{ij} + r_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (1)$$

$$p_i = \frac{\text{fit}(X_i)}{\sum_{i=1}^{\text{SN}} \text{fit}(X_i)} \quad (2)$$

其中, v_{ij} 表示新的蜜源; r_{ij} 是服从[-1,1]上均匀分布的随机数,控制 x_{ij} 的邻域范围, SN 表示种群的总数。 k 表示[1,SN]中一个随机整数。式(1)表示雇佣蜂和观察蜂的搜索方式。式(2)表示观察蜂选择蜜源的方式。

4.2.2 整数线性规划模型构建

(1)变量定义。定义虚拟节点与边界节点的关系矩阵 \mathbf{H} , 它为 $m \times n$ 的矩阵。其中 m 表示虚拟网络请求中的虚拟节点的个数, n 表示物理网络中边界节点的个数。矩阵的取值表示了虚拟节点与不同域之间的映射关系,定义如式(3)所示。

$$\mathbf{H}_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{虚拟节点 } i \text{ 映射到边界节点 } j \\ 0, & \text{虚拟节点 } i \text{ 未映射到边界节点 } j \\ -1, & \text{边界节点 } j \text{ 不在虚拟节点 } i \text{ 的范围内} \end{cases} \quad (3)$$

这里边界节点并不承载虚拟节点,只是为了表明虚拟节点划分到该边界节点所在的区域中。矩阵 \mathbf{H} 的取值表示了一个可行的映射方案。表1表示了

一个可行的映射方案。从中可以看出虚拟节点 a 映射到了边界节点 $N_{\text{Sb}1}$, 边界节点 $N_{\text{Sb}5}$ 不在虚拟节点 a 的映射范围内。其它虚拟节点同理。

表1 一种可行的虚拟节点映射方案

	$N_{\text{Sb}1}$	$N_{\text{Sb}2}$	$N_{\text{Sb}3}$	$N_{\text{Sb}4}$	$N_{\text{Sb}5}$
a	1	0	0	0	-1
b	0	1	0	-1	0
c	0	-1	0	1	0
d	0	0	1	0	0
e	1	0	0	-1	0
f	0	0	-1	0	1

(2)一个虚拟网络请求是由多个虚拟节点和连接它们的链路组成的。这里将其分解为多个元请求,用三元组表示为: $(i, j, d(l_{ij}))$ 。其中 i 和 j 为连接链路的两个端节点, $d(l_{ij})$ 表示虚拟链路的带宽需求。根据变量定义(1)中的矩阵 \mathbf{H} 可以判断虚拟链路的类型。这里定义变量 x_i 来表示链路的类型,如式(4)所示。

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{链路 } l_{ij} \text{ 为域内链路} \\ \beta, & \text{链路 } l_{ij} \text{ 为域间链路且 } \beta > 1 \end{cases} \quad (4)$$

4.2.3 目标函数 不同的划分方案会带来不同的映射开销,这里要保证映射开销的最小化。对于虚拟网络映射虚拟节点的映射开销是一定的,不同的是由于承载路径的不同所带来的不同带宽开销。因此定义目标函数如式(5)所示:

$$\min : \sum_{l_{ij} \rightarrow p(l_{ij}), l_s \in p(l_{ij})} x_i \cdot u_L(l_s) \text{BW}(l_{ij}) + \lambda \text{DL}(l_s) \quad (5)$$

其中 $p(l_{ij})$ 表示虚拟链路 l_{ij} 实际映射的底层物理路径。 l_s 表示路径 $p(l_{ij})$ 中的物理链路。 $u_L(l_s)$ 表示物理链路的单位代价。 $\text{BW}(l_{ij})$ 表示虚拟链路的带宽需求。 $\text{DL}(l_s)$ 表示物理链路 l_s 的时延。 λ 表示保持时延与带宽开销保持同一数量级。

4.2.4 约束条件

$$\sum_{j=1}^n \mathbf{H}_{ij} \leq 1, \forall i \in N_V \quad (6)$$

$$\text{BW}(l_{ij}) \leq r \text{BW}(l_s) \quad (7)$$

$$\sum_{l_s \in p(l_{ij})} \text{DL}(l_s) \leq \text{DL}(l_{ij}) \quad (8)$$

式(6)表示矩阵中每一行之和只能取1或者0,这是因为一个虚拟节点一次只能被映射到一个域中。式(7)表示虚拟链路的带宽需求不超过物理链路的剩余可提供的带宽能力。式(8)表示承载虚拟链路的时延不超多虚拟链路的时延约束。

4.2.5 优化的人工蜂群算法相关定义及流程 根据算法的原理结合虚拟网络构建请求划分问题, 这里作出如下定义:

(1)蜜源位置: 蜜源的位置对应虚拟网络划分问题的解, 一个蜜源对应一个雇佣蜂, 形式化表示为: $\mathbf{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})^T$ 。其中 i 表示第 i 个蜜源; m 对应于虚拟网络构建请求中虚拟节点的个数; x_{ij} 是一组行向量, 表示虚拟节点与边界节点的映射关系。

(2)蜜源的适应度: 蜜源 \mathbf{X}_i 的适应度反映了蜜源的好坏, 这里与虚拟网络划分的目标函数相关。如式(9)所示:

$$\text{fit}(\mathbf{X}_i) = \frac{1}{1 + \sum_{l_j \rightarrow p(l_j), l_s \in p(l_j)} x_i \cdot u_L(l_s) \text{BW}(l_{ij}) + \lambda \text{DL}(l_s)} \quad (9)$$

蜜源的适应度值越高, 目标函数的取值越小, 划分方案越好。

(3)雇佣蜂和观察蜂的搜索机制: 在基本的人工蜂群算法中, 搜索只是针对单维变量进行的, 忽略了其它维变量的影响, 导致算法收敛速度的降低。这里结合粒子群算法中粒子位置更新方式, 引入蜜蜂个体的历史最佳位置信息来进行搜索。如式(10)所示。

$$v_{ij} = x_{ij} + r_{ij}(x_{ibj} - x_{ij}) + \varphi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (10)$$

(4)观察蜂的蜜源选择机制: 在基本的人工蜂群算法中, 观察蜂是根据轮盘赌的方式进行蜜源的选择的, 并根据蜜源适应度占有所有蜜源适应度之和的比例来选择蜜源, 这样容易导致蜂群向较优的蜜源的聚集, 从而破坏了蜂群的多样性, 使得算法陷入早熟。因此这里重新定义选择机制, 如式(11)所示。

$$p_i = \frac{e^{-\text{fit}(\mathbf{X}_i)}}{\sum_{i=1}^{SN} e^{-\text{fit}(\mathbf{X}_i)}} \quad (11)$$

根据式(11)进行蜜源的选择会保证适应度值低的蜜源的开发, 使得迭代不会快速向适应度值高的蜜源集中, 从而保证种群的多样性。

(5)观察蜂的随机搜索机制: 观察蜂在经过多次邻域搜索后适应度值变化低于阈值时会进行随机搜索。这里结合差分进化算法中的变异、交叉和选择操作进行搜索^[15]。

(a)变异。根据式(12)产生变异个体。

$$\mathbf{X}_{va} = \mathbf{X}_{r1} + F(\mathbf{X}_{r2} - \mathbf{X}_{r3}) \quad (12)$$

对当前代的所有蜜源根据适应度值的大小进行排序, 并将其分为 3 组(较好、中间和较差), \mathbf{X}_{r1} , \mathbf{X}_{r2} , \mathbf{X}_{r3} 分别从 3 组蜜源中产生。 F 为缩放比例因子, 用于控制差向量的影响。

(b)交叉。对当前的蜜源 \mathbf{X}_i 与产生的变异个体进行交叉操作。

(c)选择。根据贪婪策略选择适应度值高的蜜源。

算法的具体流程如下:

(1)初始化生成 SN 个蜜源, 每个蜜源对应一个雇佣蜂, 雇佣蜂与观察蜂个数相同。最大迭代次数 NI, 最大搜索次数 It 以及阈值 ε ;

(2)计算蜜源的适应度值 $\text{fit}(\mathbf{X}_i)$, 并进行排, 然后将其分为较好、中间和较差 3 组;

(3)雇佣蜂在蜜源的邻域根据改进的式(10)寻找其它蜜源, 并计算新蜜源的适应度值。如果 $\text{fit}(\mathbf{X}_{\text{New}}) > \text{fit}(\mathbf{X}_i)$, 则用新蜜源代替旧蜜源。否则保留原蜜源;

(4)观察蜂根据雇佣蜂传递的信息以式(11)进行蜜源选择, 并在蜜源附近以同于雇佣蜂的方式进行搜索;

(5)观察蜂如果经过限定的 It 次搜索后蜜源适应度值的变化小于阈值 ε , 则当前个体变为侦察蜂根据定义(5)进行变异、交叉和选择操作;

(6)判断总迭代次数是否达到 NI, 若满足条件, 则迭代中止, 输出最优解。否则跳转至步骤(2)。

5 性能评估与分析

5.1 实验环境配置

仿真实验环境配置在 Pentium(R)Dual-Core CPU E5400 @ 2.70 GHz 和 2.69 GHz 3 GB 内存的 PC 机上进行。底层物理网络划分为 10 个自治域。每个域内用 GT-ITM^[9]拓扑生成工具生成物理网络拓扑, 拓扑由 50 个节点组成, 包括 2 个边界节点, 边界节点之间全连接, 域内节点之间的连接概率为 0.5。链路的单位开销服从 1~10 的均匀分布。虚拟网络请求到达率服从 100 个时间单元到达 4 个的泊松分布, 虚拟网络请求的生存时间服从指数分布, 平均生存时间为 1000 个时间单元。每个虚拟网络请求中虚拟节点的数目服从 1~8 的均匀分布, 平均节点连接度为 0.5。链路带宽需求服从 1~50 的均匀分布。仿真运行 3000 个时间单元, β 值取 2, 最大迭代次数 NI 值为 20, 种群规模 SN 为 30, F 值取 0.9, 搜索次数 It 取 30, 阈值 ε 取 0.02。

5.2 结果分析

5.2.1 和其他算法的性能对比 在分析中将本文算法 OABC 与 PolyViNE^[10], LID^[8]和 GA^[13]的性能进行对比。几种算法的域内映射算法都采用贪婪算法。从平均划分时间、虚拟网络请求接受率和平均额外映射开销 3 方面进行分析。

(1)从图 5 中可以看出, 4 种方法的平均划分时间都随着虚拟节点的数目增加而增加。PolyViNE 和 LID 方法要明显高于其他两种算法, 其中 LID 由于需要根据已知的边界信息来规划边界链路导致其划分时间最长。OABC 和 GA 方法在平均划分时间上小于其它两种方法几个数量级。而 OABC 由于对基本人工蜂群算法进行改进, 具有更好的寻优能力, 因此具有最小的平均划分时间。

(2)从图 6 中可以看出, OABC 具有最优的接收率。这是因为对于跨域映射请求采取了集中式管理机制, 由全局服务代理以轮询的方式进行请求接收, 保证了不同请求之间的公平性, 也避免了多个请求同时到来造成资源分配冲突问题。从而保证域间请求得到有效的处理。同时基于改进人工蜂群算法的请求划分保证了开销的最小化, 从而可以接收更多的虚网请求。

(3)本文只关注链路开销。同文献[11]外映射开销定义为

$$eCost(M) = \frac{Cost(M) - Cost(LID)}{Cost(LID)} \quad (13)$$

式中, $eCost(M)$ 表示方法的额外映射开销, $Cost(M)$ 表示算法的具体开销, $Cost(LID)$ 表示以 LID 算法的开销作为基准。

从图 7 中可以看出, GA 和 OABC 在平均额外开销方面明显优于 PolyViNE。PolyViNE 由于边界

节点的信息是未知的, 并未考虑降低跨域的开销。OABC 和 GA 均在边界节点信息已知的情况下进行规划, 两者开销均小于 5%, 并且 OABC 略优于 GA。这是由于改进后的人工蜂群算法具有更好的寻优能力, 保证的开销的最小化。

5.2.2 本文算法的稳定性分析 算法的稳定性分析通过设置不同物理网络拓扑来进行。由前面性能对比时设置边界节点连接为全连接, 这是为了方便对比不具有代表性。这里设置不同连接概率 0.2, 0.5 和 1.0(全连接)以表示算法的稳定性。

不同的连接概率对应于不同的物理拓扑。从图 8 中可以看出, 在不同的连接概率下算法在平均划分时间和平均额外映射开销方面变化不大, 保持了较好的稳定性。

6 结束语

本文研究了跨域虚拟网络映射问题。提出了一种集中式管理、分布式控制的分层分域虚拟资源管理架构, 在此基础上针对跨域映射问题提出了一种基于轮询的跨域映射策略, 然后针对跨域虚拟网络的划分问题提出了基于人工蜂群算法的跨域映射算法, 并针对人工蜂群算法存在的不足进行了改进。仿真结果证明, 相比传统跨域映射方法本文提出的方法具有更好的性能。下一步工作考虑结合网络资源的生存性问题进行进一步研究。

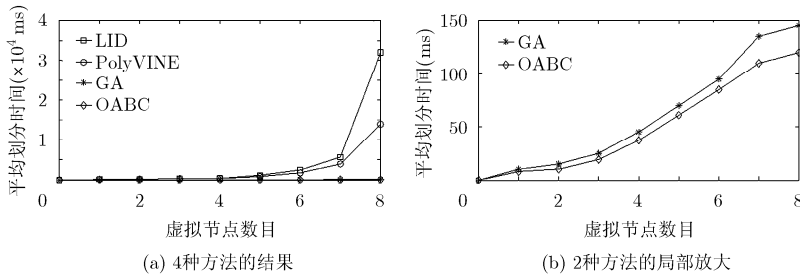


图 5 虚拟网络请求平均划分时间

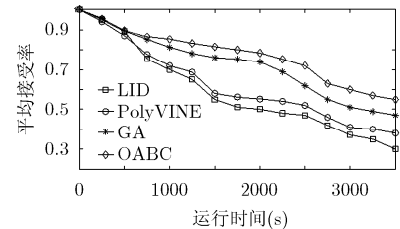


图 6 虚拟网络请求的平均接受率

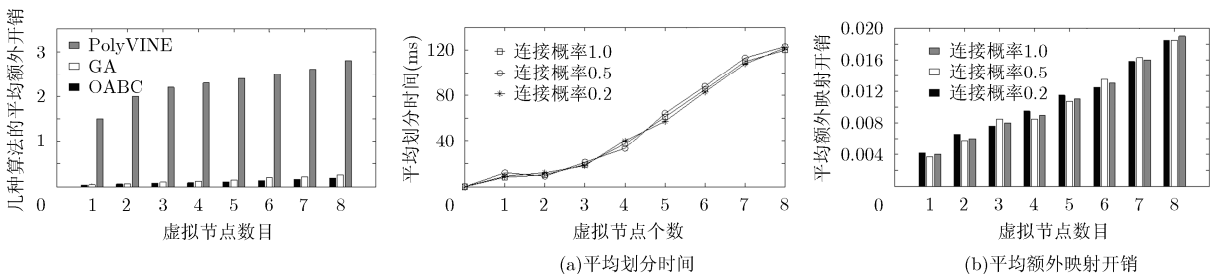


图 7 平均额外映射开销

图 8 不同连接概率下的算法稳定性

参考文献

[1] WANG A, IYER M, DUTTA R, et al. Network virtualization:

Technologies, perspectives, and frontiers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(4): 523-547. doi: 10.1109/jlt.

- 2012.2213796.
- [2] ALKMIM G P, BATISTA D M, and DA FONSECA N L S. Mapping virtual networks onto substrate networks[J]. *Journal of Internet Services and Applications*, 2013. doi: 10.1186/1869-0238-4-3.
- [3] 黄彬彬, 林荣恒, 彭凯, 等. 基于粒子群优化的负载均衡的虚拟网络映射[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(7): 1753-1759. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01212.
- HUANG Binbin, LIN Rongheng, PENG Kai, *et al.* Load-balancing based on particle swarm optimization in virtual network mapping[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(7): 1753-1759. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01212.
- [4] 朱强, 王慧强, 吕宏武, 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. doi: 10.3939/j.issn.1000-436x.2012.z1.022.
- ZHU Qiang, WANG Huiqiang, Lü Hongwu, *et al.* VNE-AFS: Virtual network embedding based on artificial fish swarm[J]. *Journal on Communications*, 2012, 33(Z1): 170-177. doi: 10.3939/j.issn.1000-436x.2012.z1.022.
- [5] 王文钊, 汪斌强, 王志明, 等. 基于混合群智能优化的虚拟网络映射算法[J]. 计算机应用, 2014, 34(4): 930-934. doi: 10.11772/j.issn.1001-9081.2014.04.0930.
- WANG Wenzhao, WANG Binqiang, WANG Zhiming, *et al.* Virtual network embedding algorithm based on a hybrid swarm intelligence optimization[J]. *Journal of Computer Applications*, 2014, 34(4): 930-934. doi: 10.11772/j.issn.1001-9081.2014.04.0930.
- [6] 苑迎, 王翠荣, 王聪, 等. 基于DPSO负载可控的虚拟网络映射算法[J]. 东北大学学报(自然科学报), 2014, 35(1): 10-14. doi: 10.3969/j.issn.1005.3026.2014.01.003.
- YUAN Ying, WANG Cuirong, WANG Cong, *et al.* Load controllable virtual network embedding algorithm based on discrete particle swarm optimization[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2014, 35(1): 10-14. doi: 10.3969/j.issn.1005.3026.2014.01.003.
- [7] HOUIDI I, LOUATI W, BEN-AMEUR W, *et al.* Virtual network provisioning across multiple substrate networks[J]. *Computer Networks*, 2011, 55(4): 1011-1023. doi: 10.1016/j.comnet.2010.12.011.
- [8] DIETRICH D, RIZK A, and APADIMITRIOU P. Multi-domain virtual network embedding with limited information disclosure[C]. Proceedings of The IFTP Networking Conference, Germany, 2013: 1-9.
- [9] 齐宁, 汪斌强, 袁博, 等. 面向ReFlexNet的域间嵌入式承载网构建[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(9): 2225-2230. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00026.
- QI Ning, WANG Binqiang, YUAN Bo, *et al.* Inter-domain embedded carrying network construction in ReFlexNet[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(9): 2225-2230. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00026.
- [10] CHOWDHURY M, SAMUEL F, and BOUTABA R. PolyViNE: policy-based virtual network embedding across multiple domains[C]. Proceedings of 2nd ACM SIGCOMM VISA 2010, New Delhi, India, 2010: 49-56.
- [11] FIDA-E Z, JIN Xiao and RAOUF B. Multi-provider service negotiation and contracting in network virtualization[C]. Proceedings of IEEE/IFTP Network Operations and Management Symposium, Osaka, Japan, 2010: 471-478.
- [12] 张旻, 吴春明, 王滨, 等. 跨域逻辑承载网映射方法研究[J]. 通信学报, 2012, 33(8): 200-207.
- ZHANG Min, WU Chunming, WANG Bin, *et al.* Research on mapping method of logical carrying network across multiple domains[J]. *Journal on Communications*, 2012, 33(8): 200-207.
- [13] 肖蔼玲, 王颖, 孟洛明, 等. 基于知识描述和遗传算法的跨域虚拟网络映射[J]. 软件学报, 2014, 25(10): 2189-2205. doi: 10.13328/j.cnki.jos.004680.
- XIAO Ailing, WANG Ying, MENG Luoming, *et al.* Knowledge description and genetic algorithm based multi-domain virtual network embedding[J]. *Journal of Software*, 2014, 25(10): 2189-2205. doi: 10.13328/j.cnki.jos.004680.
- [14] KARABOGA D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization[R]. Kayseri: Erciyes University, 2005.
- [15] 黄玲玲, 刘三阳, 高卫峰. 具有人工蜂群搜索策略的差分进化算法[J]. 控制与决策, 2012, 27(11): 1644-1648.
- HUANG Lingling, LIU Sanyang, and GAO Weifeng. Differential evolution with the search strategy of artificial bee colony algorithm[J]. *Control and Decision*, 2012, 27(11): 1644-1648.
- 贾伟: 男, 1986年生, 博士生, 研究方向为网络虚拟化.
夏靖波: 男, 1963年生, 教授, 研究方向为网络管理.