

基于多维属性的跨域虚拟网络映射算法

张治中, 朱磊*, 冯琳琳, 刘利兰

(重庆邮电大学通信网与测试技术重点实验室 重庆 南岸区 400065)

【摘要】基于一种支持多类型业务的跨域融合网络架构, 提出了一种基于动态拓扑感知和资源属性的跨域虚拟网络映射算法。基于网络局部和全局角度, 分析虚拟网络和物理网络中节点的拓扑信息, 结合网络扩展资源, 建立节点多属性评价模型, 并基于该模型利用主成分分析法和逼近理想解排序法度量节点的映射优先级, 随后依据链路资源成本分析网络负载状态。仿真结果表明, 该算法提高了多域虚拟网络请求的构建成功率, 网络收益开销比增大, 并能减小网络映射时延。

关键词 跨域融合网络; 网络中心性; 拓扑感知; 无线网络虚拟化

中图分类号 TN92 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2019.02.003

Virtual Network Embedding in Cross-Domain Network Based on Multi-Dimensional Attributes

ZHANG Zhi-zhong, ZHU Lei*, FENG Lin-lin, and LIU Li-lan

(Key Laboratory on Communication Network and Testing Technology,

Chongqing University of Posts and Telecommunications Na'an Chongqing 400065)

Abstract this paper proposes a cross-domain virtual network embedding algorithm based on dynamic topology perception and resource attributes in the multi-domain converged network architecture. By analyzing the topological property of nodes within virtual network and physical network from the local and global perspective, we establish a node multi-attribute evaluation model combined with the expand network resource. Based on this model, the principal component analysis method and TOPSIS (technique for order preference by similarity to an ideal solution) are introduced to measure the embedding priority of nodes. Then the network load condition is analyzed with link resource price. The simulation results depicts that this algorithm improves the construction success rate of multi-domain virtual network requests, increases the network revenue to cost ratio, and could reduce the network embedding delay.

Key words cross-domain converged network; network centrality; topology awareness; wireless network virtualization

跨域底层网络由异构无线接入网、光网络骨干网和数据中心网构成, 各层网络拥有不同的物理资源。传统的网络架构各层之间彼此独立封闭, 无法满足5G新兴业务的需求。如何增强跨域底层网络的层间融合和物理资源的协同管理是目前研究面临的关键挑战^[1]。

为了解决当前互联网结构的“僵化”问题, 文献[2]提出网络虚拟化的思想。通过虚拟化技术, 多个并行运行且彼此隔离的虚拟网络共享同一底层网络, 每张虚拟网可以测试和部署差异化的协议, 实现资源共享, 降低网络能耗和运营开销。现有网络架构被划分为底层网络(substrate network, SN)和虚

拟网络(virtual network, VN)。网络服务提供商拆分为基础设施提供商(infrastructure provider, InP)和服务提供商(service provider, SP)。InP负责底层设施和资源的管理维护, SP向InP租赁物理设施和资源来构建虚拟网络^[3]。

跨域跨技术网络虚拟化技术为目前的多域底层网络提供了一种高效的管理方式^[4], 通过将多域物理资源进行抽象, 形成资源共享池, 有利于多域资源的统一管理和调度, 提高物理资源的利用率, 从而实现多域底层网络的融合与共存^[5-6]。

跨域虚拟网络映射问题(cross-domain virtual network embedding, CD-VNE)的本质是根据业务资

收稿日期: 2017-11-13; 修回日期: 2018-04-02

基金项目: 国家863计划(2015AA01A705); 重庆高校创新团队项目(KJTD201312)

作者简介: 张治中(1972-), 男, 博士, 教授, 主要从事网络虚拟化方面的研究。

通信作者: 朱磊, E-mail: 1372477058@qq.com

源需求和物理资源约束, 在跨域底层网络中为多域虚拟网络请求(multi-domain virtual network request, MD-VNR)选取合适的物理节点和物理路径, 实现MD-VNR的承载和资源分配^[7-8]。

已有一些研究方案被用来解决VNE问题。文献[9]提出了一种静态虚拟网络请求的映射方案。文献[10]改进马尔科夫随机游走模型分析节点的映射优先级, 并建立ILP模型优化映射过程。文献[11]采用接近中心性度量节点的映射优先级。文献[12]利用节点的度值和聚集系数对节点映射排序, 但忽略了节点的拓扑和资源属性之间的关系。文献[13]提出了基于LTE的跨域网络虚拟化方案, 减少了网络功耗和传输时延。文献[14]中基于5G异构网络环境, 建立

ILP研究模型, 提出了一种跨域虚拟网络分层映射方案, 然而, ILP方法只能局限于小规模网络使用。

针对跨域虚拟网络映射存在的问题, 本文的贡献有: 基于跨域融合网络架构, 研究跨域虚拟网络映射问题; 利用网络中心性分析节点拓扑属性, 引入主成分分析法和逼近理想解排序法度量节点的映射优先级; 依据链路资源成本分析网络负载分布, 确保链路部署阶段的负载均衡。

1 系统模型与问题描述

1.1 网络模型

图1描述了跨域融合网络映射架构。

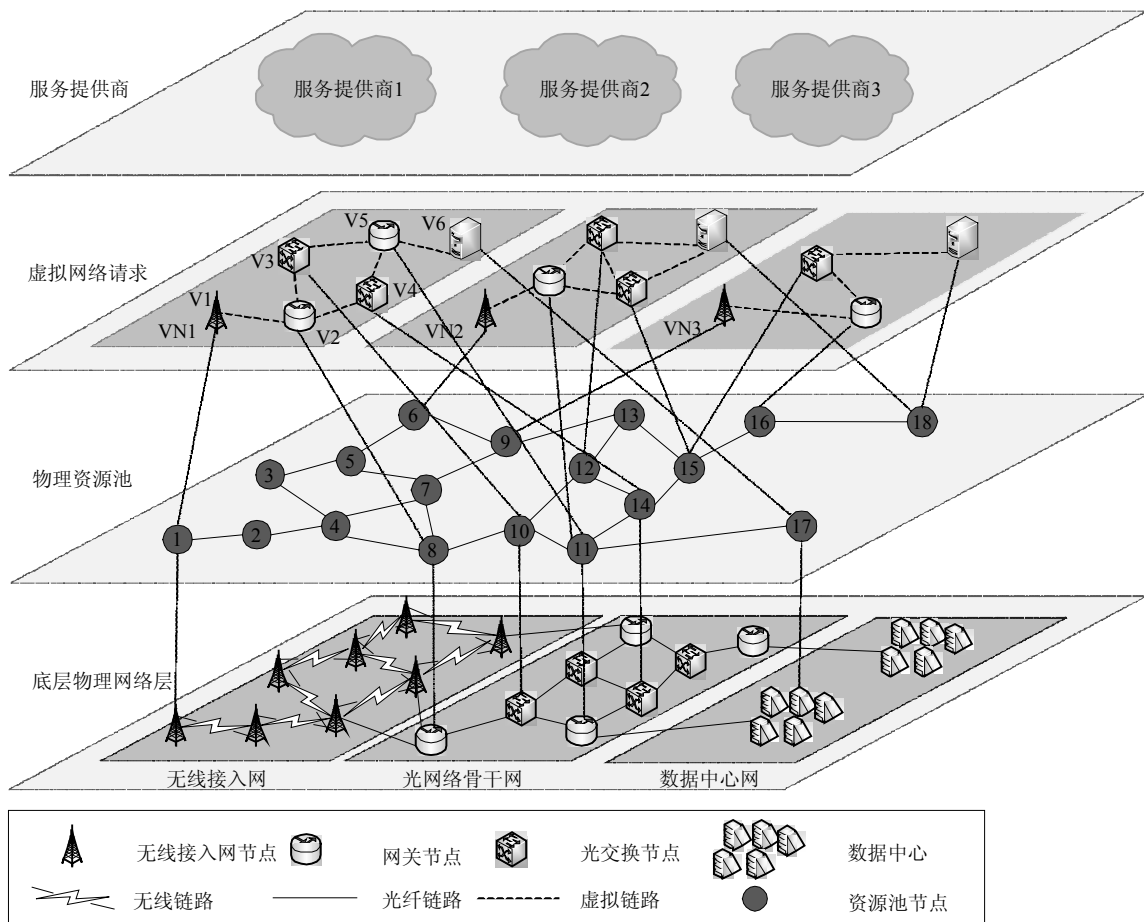


图1 跨域融合网络映射架构

1) 跨域融合底层网络模型

底层跨域融合网络表示为带权无向图 $G^S = (N^S, L^S, C_N^S, C_L^S)$, 其中 N^S 为物理节点集, 包括无线接入网节点集 N_{AP}^S 、骨干网节点集 N_{OS}^S 和数据中心节点集 N_{DC}^S , 且 $N^S = N_{AP}^S \cup N_{OS}^S \cup N_{DC}^S$; L^S 为物理链路的集合, 分为无线回程链路集 L_{WL}^S 和光纤链路集 L_{OL}^S , 且 $L^S = L_{WL}^S \cup L_{OL}^S$; C_N^S 与 C_L^S 分别为物

理节点 $n^S (n^S \in N^S)$ 与物理链路 $l^S (l^S \in L^S)$ 所具有的属性。物理节点 n^S 的属性包括无线节点资源块 $RB(n_{AP}^S)$ 、骨干网节点计算资源 $CPU(n_{OS}^S)$ 、数据中心节点计算资源 $CPU(n_{DC}^S)$ 。节点的地理位置为 $Loc(n^S)$ 。物理链路 l^S 的属性包括无线回程链路的带宽 $BW(l_{WL}^S)$ 和光纤链路的频谱资源 $BW(l_{OL}^S)$, 且 $BW(l^S) = BW(l_{WL}^S) \cup BW(l_{OL}^S)$ 。底层网络的通路路径

表示为 P^S , $l^p (l^p \in P^S)$ 由多条物理链路 l^S 组成。

2) 多域虚拟网络请求

多域虚拟网络拓扑表示为带权无向图 $G^V = (N^V, L^V, R_N^V, R_L^V)$, 其中 N^V 为虚拟节点集, 即 $N^V = N_{AP}^V \cup N_{OS}^V \cup N_{DC}^V$; L^V 为虚拟链路集, 即 $L^V = L_{WL}^V \cup L_{OL}^V$; R_N^V 与 R_L^V 分别为虚拟节点 $n^V (n^V \in N^V)$ 与虚拟链路 $l^V (l^V \in L^V)$ 的业务需求。虚拟节点的业务需求分为虚拟无线接入网节点的无线资源块请求 $RB(n^V)$ 、虚拟骨干网交换节点和虚拟数据中心节点的计算资源需求 $CPU(n^V)$ 、虚拟节点的地理位置 $Loc(n^V)$ 、虚拟节点的可映射范围 $D(n^V)$ 、虚拟链路的业务需求为带宽资源需求 $BW(l^V)$ 。

1.2 问题分析

MD-VNE可表示为从虚拟网络 G^V 到物理网络 G^S 子集的映射, 定义为: $M: G^V(N^V, R^V) \rightarrow G^S(N^S, C^S)$ 。虚拟节点 n^V 映射到物理节点 n^S 上为 $n^V \uparrow n^S$ 。虚拟链路 l^V 映射到物理链路 l^S 上为 $l^V \uparrow l^S$ 。虚拟链路 l^V 映射到物理路径 l^p 上为 $l^V \uparrow l^p$ 。为了简化映射复杂度, 分两步映射: 1) 在虚拟节点中选取满足其资源约束的承载节点; 2) 为虚拟链路选择满足其资源约束的承载路径。不同VN的节点可以部署到相同底层节点上, 同一VN的节点不能部署到相同底层节点。

节点的邻近链路资源会影响节点属性, 定义节点扩展资源为其邻接链路带宽资源总和除以邻接链路条数, 分为虚拟节点的扩展资源需求量 $E(n^V)$ 和物理节点的扩展资源剩余量 $E(n^S)$:

$$E(n) = \frac{\sum_{l \in L(n)} BW(l)}{a_l(n)} \quad (1)$$

式中, $L(n)$ 是节点的邻接链路集合; $a_l(n)$ 为节点的邻接链路条数。

带宽资源的倒数定义为链路单位资源成本, 资源多的物理链路单位资源成本系数小:

$$\text{price}(l^S) = \frac{\eta}{BW(l^S)} \quad (2)$$

式中, η 为链路资源成本调节系数, 本文取为1。

CD-VNE需要满足约束条件:

$$\sum_{n^V(u) \uparrow n^S(i)} CPU(n^V(u)) \leq CPU(n^S(i)) \quad (3)$$

$$\text{dis}(Loc(n^V), Loc(n^S)) \leq D(n^V) \quad (4)$$

$$\sum_{l^V(u,w) \uparrow l^S(i,j)} BW(l^V(u,w)) \leq BW(l^S(i,j)) \quad (5)$$

式中, $n^V(u) \uparrow n^S(i)$ 表示虚拟节点 $n^V(u)$ 映射到物理节点 $n^S(i)$ 上; $l^V(u,w) \uparrow l^S(i,j)$ 表示虚拟链路 $l^V(u,w)$ 映射到物理链路 $l^S(i,j)$ 上; $\text{dis}()$ 为计算节点之间的距离。

1.3 性能指标

CD-VNE的主要目标是尽量减小物理资源的消耗, 部署更多的MD-VNR, 最大化运营收益^[15]。

$M_a^V(t)$ 表示在 t 时刻接受的一个MD-VNR, 其映射收益定义为该 $M_a^V(t)$ 的节点资源需求与链路资源需求之和:

$$\text{Revenue}(M_a^V(t)) = \sum BW(l^V) + \sum (RB(n^V) + CPU(n^V)) \quad (6)$$

在 t 时刻接受一个MD-VNR的开销可定义为底层网络分配给该多域虚拟网络请求的资源:

$$\text{Cost}(M_a^V(t)) = \sum \text{hop}(l^V) BW(l^V) + \sum (RB(n^V) + CPU(n^V)) \quad (7)$$

式中, $\text{hop}(l^V)$ 是指虚拟链路 l^V 映射成功需要的底层物理网络链路数量。

收益开销比表示网络资源的分配有效性。长期平均收益开销比为:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t \in T} \text{Revenue}(M_a^V(t))}{\sum_{t \in T} \text{Cost}(M_a^V(t))} \quad (8)$$

底层网络负载强度表示物理节点和链路的资源使用情况, 为网络中已消耗资源与总资源的比值。 t 时刻底层节点的负载强度为:

$$\text{Load}(N^S, t) = \frac{1}{|N^S|} \sum_{n^S \in N^S} \left(\frac{\sum_{n^V \uparrow n^S} R(n^V)}{C(n^S)} \right) \quad (9)$$

式中, $|N^S|$ 表示物理节点个数。

t 时刻底层链路的负载强度为:

$$\text{Load}(L^S, t) = \frac{1}{|L^S|} \sum_{l^S \in L^S} \left(\frac{\sum_{l^V \uparrow l^S} BW(l^V)}{BW(l^S)} \right) \quad (10)$$

式中, $|L^S|$ 表示物理链路条数。

虚拟网络请求的映射时延主要考虑虚拟链路映射到物理路径的路由时延。路由时延与物理路径长度及其带宽资源有关, 定义为:

$$\text{Delay}(l^V) = \sum_{l^V \uparrow l^p, l^p \in L^S} \frac{\text{length}(l^S)}{BW(l^S)} \quad (11)$$

式中, $\text{length}(l^S)$ 为物理链路 l^S 的长度。

成功映射的多域虚拟网络请求在所有到达的多

域虚拟网络请求中所占的比例称为虚拟网络请求接受率。用 $M^V(t)$ 表示在时刻 t 到达的VNR个数, 则长期平均请求接受率可表示为:

$$\text{Acceptance ratio} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t \in T} M_a^V(t)}{\sum_{t \in T} M^V(t)} \quad (12)$$

2 网络节点多属性特征分析

CD-VNE问题一般分为节点映射和链路映射两阶段。节点映射阶段的主要目标是为虚拟节点选择合适的物理节点进行承载, 从而满足虚拟节点的资源请求。此外, 合理的节点部署有利于链路映射阶段的选择, 从而整体减少映射成本。本文利用网络中心性理论评价节点的重要性。

网络中的重要节点是能更加显著地影响网络功能与整体结构的节点。节点中心性能够反映节点在网络中的重要程度^[16]。评价指标主要有: 度中心性、中介中心性和紧密中心性。

度中心性(degree centrality, DC)定义为与该节点的邻接边数。度中心性刻画节点的本地影响力, 度值越大的节点能直接作用的邻居节点越多, 也越重要。度中心性指标的缺点是仅考虑了节点最局部的信息, 没有分析周围邻居节点的影响。

中介中心性(betweenness centrality, BC)定义为网络中所有节点对的最短路径中经过该节点的路径数目占最短路径总数的比例。中介中心性的计算需要网络的全局拓扑信息, 能够反映节点在网络信息传输时负载的能力。

紧密中心性(closeness centrality, CC)描述节点信息传递给其他节点的难易程度。紧密中心性较高的节点更容易同网络中其他节点建立通信链接, 因此可以在一定程度上降低数据传输时延。

2.1 虚拟网络请求的节点多属性分析

在虚拟网络请求中, 虚拟节点的度中心性刻画了节点在网络局部范围内的重要性, 度值更大的虚拟节点拥有更多的邻近节点和邻近链路, 在业务请求中可能承载更多的资源需求, 对其优先映射, 有利于后续虚拟节点的映射。虚拟节点的度值为与节点相连的链路数目, 定义为:

$$\text{DC}(n^V) = \sum_{l^V \rightarrow n^V} l^V \quad (13)$$

式中, $l^V \rightarrow n^V$ 表示虚拟链路 with 虚拟节点连接。

中介中心性能够体现虚拟节点在请求中的全局

重要性, 虚拟节点的中介中心度越高, 将可能承载整个业务请求中越多的资源需求, 在虚拟网络中处于更关键的位置, 对虚拟请求映射成功率的影响也就越大。虚拟节点的中介中心度定义为:

$$\text{BC}(n^V) = \frac{p(n^V)}{p(N^V)} \quad (14)$$

式中, $p(n^V)$ 为虚拟网络请求中节点间所有最短路径经过虚拟节点 n^V 的数量; $p(N^V)$ 为该请求中节点间所有最短路径的数量。

基于以上分析, 综合考虑虚拟节点的拓扑属性和资源属性, 影响虚拟节点重要性的指标有 $R(n^V)$ 、 $E(n^V)$ 、 $\text{DC}(n^V)$ 和 $\text{BC}(n^V)$ 。

主成分分析法(principal component analysis, PCA)通过对多指标进行降维处理, 可以避免主观因素影响, 同时客观地刻画出样本指标间的权重关系^[17]。下面介绍基于PCA的虚拟节点多属性综合评价算法。

1) 设有 m 个需要评估的虚拟节点, 建立虚拟节点的多属性评价指标矩阵 \mathbf{MP}^V 为:

$$\mathbf{MP}^V = \begin{bmatrix} R_{11}^V & E_{12}^V & \text{DC}_{13}^V & \text{BC}_{14}^V \\ R_{21}^V & E_{22}^V & \text{DC}_{23}^V & \text{BC}_{24}^V \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{m1}^V & E_{m2}^V & \text{DC}_{m3}^V & \text{BC}_{m4}^V \end{bmatrix} \quad (15)$$

2) 用Z-score法对矩阵 \mathbf{MP}^V 中的数据进行标准化处理得到标准化矩阵 \mathbf{Z} 。

3) 对标准化矩阵 \mathbf{Z} 求相关系数矩阵 $\mathbf{R} = (r_{ij})_{n \times n} = \frac{\mathbf{Z}^T \mathbf{Z}}{n-1}$ 。

4) 根据 $|\lambda \mathbf{I} - \mathbf{R}| = 0$ 计算矩阵 \mathbf{R} 的特征值 $\lambda_j (j=1, 2, \dots, n)$ 和特征向量 $\mathbf{b}_j = (b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{mj})$ 。

5) 根据 $\sigma = \left(\frac{\sum_{j=1}^p \lambda_j}{\sum_{j=1}^n \lambda_j} \right) \geq 0.9$ 计算主成分

分累积方差贡献率, 确定主成分个数 p , 使信息有效率在90%以上。

6) 第 i 个主成分在原指标上的载荷为 $l_{ij} = \sqrt{\lambda_i} m p_{ij}$, ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$)。结合主成分的因子载荷和初始指标矩阵 \mathbf{MP}^V , 得到虚拟节点的主成分指标矩阵 \mathbf{H}^V 为:

$$\mathbf{H}^V = \begin{bmatrix} \text{mp}_{11} & \text{mp}_{12} & \cdots & \text{mp}_{1n} \\ \text{mp}_{21} & \text{mp}_{22} & \cdots & \text{mp}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{mp}_{m1} & \text{mp}_{m2} & \cdots & \text{mp}_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1p} \\ l_{21} & l_{22} & \cdots & l_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n1} & l_{n2} & \cdots & l_{np} \end{bmatrix} \quad (16)$$

逼近理想解排序法 (technique for order

preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS) 可以求解多属性的评价问题^[18], 利用TOPSIS计算虚拟节点的映射优先级值的步骤如下。

1) 主成分 h_i 的贡献率即主成分权重为 $q_i^V = \lambda_i / \sum_{j=1}^n \lambda_j, i=1,2,\dots,p$, 则带权重的主成分评价指标矩阵 W^V 为:

$$W^V = \begin{bmatrix} h_{11}q_1 & h_{12}q_2 & \cdots & h_{1p}q_p \\ h_{21}q_1 & h_{22}q_2 & \cdots & h_{2p}q_p \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1}q_1 & h_{m2}q_2 & \cdots & h_{mp}q_p \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中, $w_{ij} = h_{ij}q_j, i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,p$ 。

2) 根据 $w_{ij}^* = \frac{1}{w_{ij}}$ 对矩阵 W^V 进行极性一致化处理, 并对其元素作归一化运算, 得到矩阵 Y^V 。

3) 计算主成分指标的正理想解 $Z^+ = \max(y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{ip})$ 和负理想解 $Z^- = \min(y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{ip})$ 。

4) 计算各指标值与正理想解的距离 D_i^+ 和与负理想解的距离 D_i^- 。

5) 计算各指标元素与距离 D_i^+ 和 D_i^- 的相对接近程度 $C_i^V = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+}, 0 \leq C_i^V \leq 1$ 。 C_i^V 越接近1, 则表示节点重要性越高。

令 $EP(n^V) = C_i^V$, 则 $EP(n^V)$ 即为虚拟节点的映射优先级值。

2.2 底层网络的节点多属性分析

紧密中心度较高的节点不一定是处于整个网络中心位置的节点, 但与网络中其他节点的连接性更好。链路映射取决于已部署的物理节点, 连接性更好的节点在链路部署过程中有更丰富的选择。因此, 在节点映射阶段, 优先映射到距离网络中其他节点连接性较高的物理节点, 这样选取的节点间的请求带宽需求更容易得到满足, 降低链路带宽开销。

物理节点的度值为节点邻接链路数, 定义为:

$$DC(n^S) = \sum_{l^S \rightarrow n^S} l^S \quad (18)$$

式中, $l^S \rightarrow n^S$ 表示物理链路与物理节点连接。

综合考虑物理节点可用资源、节点间最短连接距离、本地扩展带宽资源的实时拓扑属性, 将物理节点的紧密中心度的计算模型修改为:

$$CC(n_i^S) = \frac{1}{DC(n_i^S)} \left(\sum_{j=1}^n C(n_j^S) e^{-\left(\frac{d(n_i^S, n_j^S)}{\text{Min}(\text{BW}(p^S(i, j)))}\right)^2} \right) \quad (19)$$

式中, $C(n_j^S)$ 为节点 n_j 的可用资源; $d(n_i^S, n_j^S)$ 是 n_i 和 n_j 之间最短路径的连接距离; $\text{Min}(\text{BW}(p^S(i, j)))$ 是 n_i 和 n_j 之间最短路径的实时可用带宽资源。

设有 t 个物理节点, x 为已映射的物理节点个数, 综合考虑 $C(n^S)$ 、 $E(n^S)$ 、 $DC(n^S)$ 、 $CC(n^S)$ 以及已映射节点的距离 $DI(n^S)$, 有 k 个评估指标, $k=4+x$, 则物理节点的多属性评价指标矩阵 MP^S 为:

$$MP^S = \begin{bmatrix} C_{11}^S & E_{12}^S & DC_{13}^S & CC_{14}^S & DI_{1k}^S \\ C_{21}^S & E_{22}^S & DC_{23}^S & CC_{24}^S & DI_{2k}^S \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{t1}^S & E_{t2}^S & DC_{t3}^S & CC_{t4}^S & DI_{tk}^S \end{bmatrix} \quad (20)$$

基于矩阵 MP^S 运用PCA算法确定带权重的主成分指标矩阵 W^S 。然后根据TOPSIS算法计算各指标与理想解的相对接近度 C_i^S , 即可根据 C_i^S 对物理节点的重要性进行排序。

令 $EP(n^S) = C_i^S$, 则 $EP(n^S)$ 为物理节点的映射优先级值。

3 跨域虚拟网络映射算法

在对网络中心性及资源属性分析的基础上, 本文提出了一种基于动态拓扑感知和资源属性的跨域虚拟网络映射算法 TARA(cross-domain virtual network embedding algorithm based on dynamic topology awareness and resource attributes)。TARA算法分为两阶段: 节点映射和链路映射。

首先部署虚拟节点, 将虚拟节点按映射优先级 $EP(n^V)$ 降序排列, 选出队列首位的虚拟节点。将此虚拟节点的备用物理节点集按映射优先级 $EP(n^S)$ 降序排列。选择 $EP(n^S)$ 值最大且满足虚拟节点资源需求的底层节点进行部署。算法1为节点映射的实现。

算法 1: TARA 节点映射阶段

Sort the VNRs in time window by revenue in descending order;

for the VNRs in the order do

Create multiple-attributes evaluation matrix of virtual nodes;

Calculate $EP(n^V)$ of virtual nodes;

Sort virtual nodes in VNRs in descending order with $EP(n^V)$;

for each unmapped virtual node do

```

Calculate the candidate substrate nodes of the
    virtual node with  $Loc(n^V)$  and  $Loc(n^S)$ ;
Create multiple-attributes evaluation matrix of
    substrate nodes;
Calculate  $EP(n^S)$  of substrate nodes;
Sort the substrate nodes in descending order
    with  $EP(n^S)$ ;
Map the virtual node with largest  $EP(n^V)$  to the
    substrate node with largest  $EP(n^S)$ ;
if virtual node cannot be mapped
    Return Node unsuccessfully mapped;
end if
end for
end for
    
```

在完成请求中所有虚拟节点的部署后, 以链路带宽资源成本为权重, 采取 k -最短路径算法, 选择一条满足虚拟链路带宽需求且跳数最小的物理路径部署虚拟链路。链路映射的实现如算法2所示。

算法 2: TARA 链路映射阶段

```

for  $l^V(u, w) \in L^V$  do
while do
     $k=5$ ;
    Search the  $k$ -shortest paths  $p^S(i, j)$  between
        nodes  $n_i$  and  $n_j$ ;
    if no  $k$ -shortest path  $p^S(i, j)$ 
        Return failure;
    else if  $BW(l^V(u, w)) \leq BW(p^S(i, j))$ 
        Embed  $l^V(u, w) \uparrow p^S(i, j)$ ;
        Break;
    else
         $k++$ ;
    end if
end while
end for
    
```

4 模拟仿真与结果分析

本节利用Matlab对TARA算法进行仿真。为了更好地验证TARA算法的性能, 更改TARA算法在 k 条最短路径中选取路径带宽最大的物理路径进行映射得到TARA-bw算法。此外, 本节采取基本的G-SP算法^[9]进行对比。仿真实验主要依据1.3节中7个性能指标进行验证分析。

4.1 仿真参数设置与建模

分区域随机生成50个异构无线接入网节点, 10个光网络骨干网节点, 5个数据中心节点, 节点之间以0.5的概率生成物理链路。物理资源按表1所示的取值均匀分布生成。

为了更灵活高效地映射差异化业务的多域虚拟网络请求, 本文根据时延特征、资源请求和SLA请求将业务进行分类, 业务请求资源按表2所示的取值均匀分布生成。

表1 物理网络资源

资源类型	无线资源块数/目/块/	无线回程带宽/Mb·s ⁻¹	骨干网CPU/unit	光纤频谱/Mb·s ⁻¹	数据中心CPU/unit
资源大小	50~70	60~80	120~140	140~160	200~240

设定每100个时间单元内VNR的到达率服从均值为5的泊松分布, 每个VNR服务时间均为1 000个时间单元。虚拟节点数服从[3,8]的均匀分布, 节点之间以0.5的概率连接为虚拟链路。每次仿真运行时间为20 000个时间单元。

表2 业务请求类型

层级&请求类别	无线资源块请求/块	无线回程带宽请求/Mb·s ⁻¹	骨干网CPU请求/unit	光纤频谱请求/Mb·s ⁻¹	数据中心CPU请求/unit	
移动互联网层	流类/会话类	1~5	1~5	3~5	1~5	5~10
	交互类	3~5	3~7	5~10	3~7	10~15
大规模物联网	采集类	10~15	5~7	5~10	5~7	10~15
	控制类	5~10	7~10	10~15	7~10	15~20
高可靠低时延	车联网	10~15	13~17	10~15	13~17	15~20
	远程医疗	5~10	10~15	5~10	10~15	10~15

4.2 仿真结果与性能分析

图2描述映射接受率的对比。TARA算法的请求映射接受率比TARA-bw算法平均高5%, 比G-SP算法平均高20%。TARA算法从局部和全局综合考虑了节点的拓扑连接性和资源属性, 为虚拟节点选择位置更加合理且资源充足的物理节点。另外依据算法实时链路资源成本优先选择跳数最少且资源足够多的物理路径, 有效减小资源消耗, 提高了整个虚拟网络请求映射的接受率。

图3为映射收益成本比的对比。TARA算法收益成本比平均高于TARA-bw算法10%, 平均高于G-SP算法20%。TARA算法基于网络实时拓扑和资源属性对虚拟节点和物理节点的重要性进行评价, 使节点映射阶段的选择更有利于后续虚拟链路的映射, 从

而有效提高网络收益成本比。

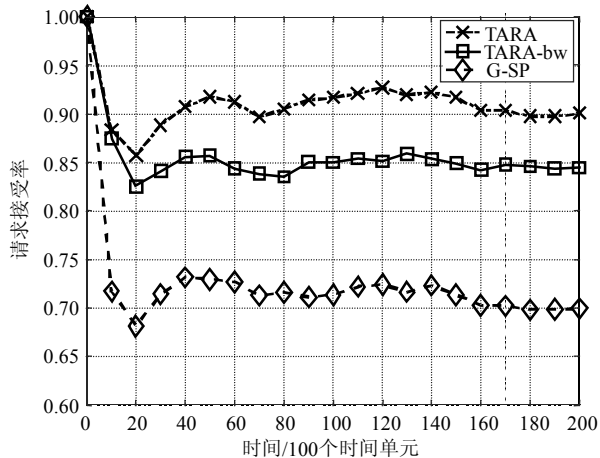


图2 请求接受率

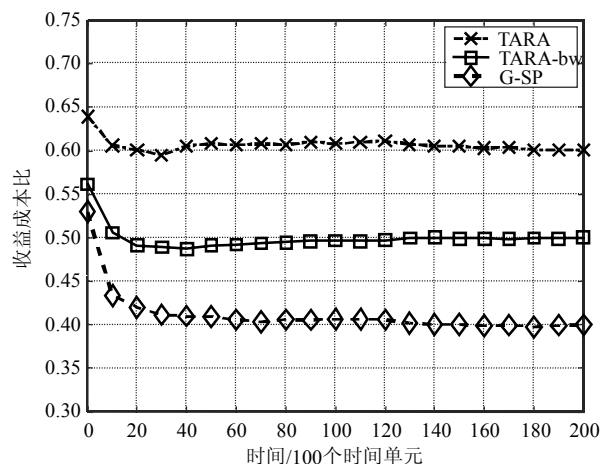


图3 收益成本比

图4对3种算法的节点负载强度进行了对比。由于TARA算法与TARA-bw算法的请求接受率较高，因此可以部署更多的虚拟网络请求，需要占用较多的物理节点，节点资源消耗较多，导致节点平均负载更高，基本维持在0.3~0.4之间。

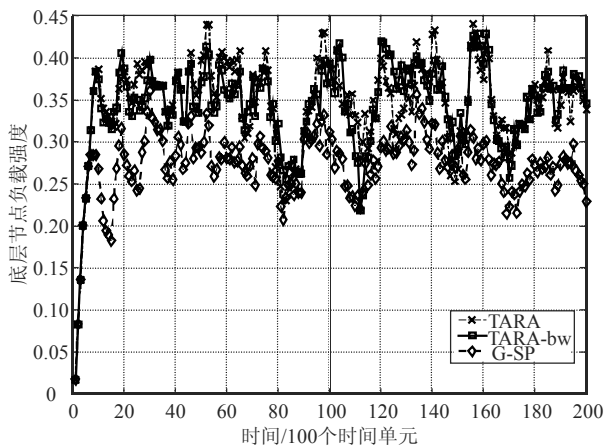


图4 节点负载强度

图5描述了链路负载强度对比。TARA算法能够

使链路负载强度维持在0.2~0.4之间，仅在个别时间点与TARA-bw算法及G-SP算法持平，其余时间均低于另外两种算法。TARA算法在虚拟链路映射阶段选择跳数更少且路径资源更丰富的物理路径进行部署，节省了底层带宽资源。

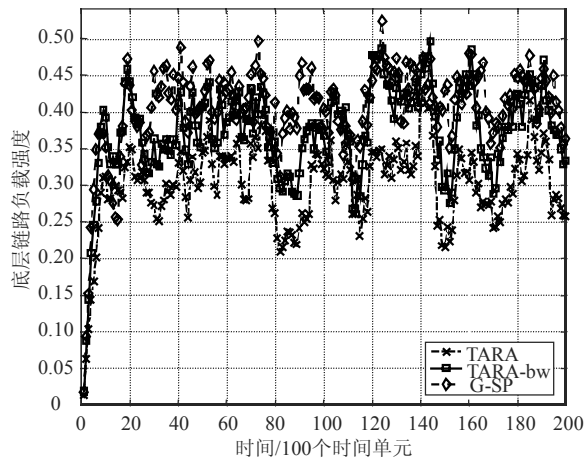


图5 链路负载强度

最后，图6描述了映射时延。TARA算法的映射时延比TARA-bw算法平均降低5个单位，比G-SP算法平均降低60个单位。TARA算法依据网络中心性和资源属性建立节点映射优先性评价模型，节点部署位置更加合理，有利于虚拟链路选择跳数更少且带宽更多的映射路径。由于映射时延与链路带宽及路径跳数有关，从而有效降低映射时延。

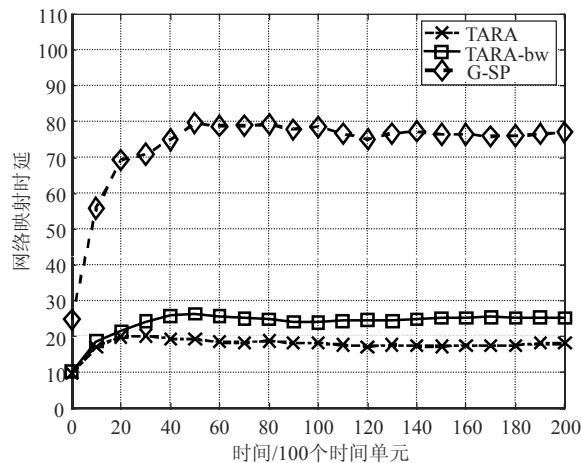


图6 网络映射时延

5 结束语

为了支持5G全网基础设施的资源共享和虚拟化，本文提出了一种基于拓扑感知和资源属性的跨域虚拟网络映射算法。该算法从局部和全局角度分析物理网络和虚拟网络中节点的拓扑信息，并结合网络资源属性建立节点多属性评价模型，随后引入

PCA和TOPSIS度量节点的映射优先级值, 从而为虚拟节点部署更优的承载节点。此外, 依据链路资源成本分析链路负载分布, 为虚拟链路选择跳数更少资源更丰富的承载路径。仿真结果表明, TARA算法提高了请求接受率, 网络收益开销比增大, 降低了映射时延, 确保底层网络的负载均衡。

参 考 文 献

- [1] MIJUMBI R, SERRAT J, BOUTABA R, et al. Network function virtualization: State-of-the-art and research challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(1): 236-262.
- [2] FISCHER A, BOTERO J, HESSELBACH X, et al. Virtual network embedding: a survey[J]. *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, 2013, 15(4): 1888-1906.
- [3] HAN B, GOPALAKRISHNAN V, JI L, et al. Network function virtualization: Challenges and opportunities for innovations[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(2): 90-97.
- [4] ZHANG Ning, YANG Peng, SHEN Xue-min, et al. Software defined networking enabled wireless network virtualization: Challenges and solutions[J]. *IEEE Network.*, 2017, 31(5): 42-49.
- [5] LIANG Cheng-chao, YU F R. Wireless network virtualization: a survey, some research issues and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(1): 358-380.
- [6] ONF. Applying SDN architecture to 5G slicing[EB/OL]. [2017-11-2]. https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/technical-reports/Applying_SDN_Architecture_to_5G_Slicing_TR-526.pdf.
- [7] DINH H T, LEE C, WANG P, et al. A survey of mobile cloud computing: Architecture, applications, and approaches[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2013, 13(18): 1587-1611.
- [8] TZANAKAKI A, ANASTASOPOULOS M P, SIMEONIDOU D, et al. Wireless-optical network convergence: Enabling the 5G architecture to support operational and end-user services[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(10): 184-192.
- [9] ZHU Yong, AMMAR M. Algorithms for assigning substrate network resources to virtual network components[C]//25th IEEE International Conference on Computer Communications. Barcelona, Spain: IEEE, 2006: 1-12.
- [10] CHENG Xiang, ZHANG Zhong-bao, SU Sen, et al. Virtual network embedding based on particle swarm optimization[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(10): 2240-2244.
- [11] WANG Zi-hou, HAN Yan-ni, TANG Hui, et al. Topology-aware virtual network embedding based on closeness centrality[J]. *Frontiers of Computer Science*, 2013, 7(3): 446-457.
- [12] ZHANG Pei-ying, YAO Hai-peng, LIU Yun-jie. Virtual network embedding based on the degree and clustering coefficient information[J]. *IEEE Access*, 2016, 4(1): 8572-8580.
- [13] TZANAKAKI A, ANASTASOPOULOS P M, SIMEONIDOU D, et al. Virtualization of heterogeneous wireless-optical network and IT support of cloud and mobile services[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(8): 155-161.
- [14] YU Cun-qian, HOU Wei-gang, GUO Peng-xing, et al. Virtual 5G network embedding in a heterogeneous and multi-domain network infrastructure[J]. *China Communications*, 2016, 13(10): 29-43.
- [15] HAN Peng-chao, GUO Lei, HAN Xu, et al. A new virtual network embedding framework based on QoS satisfaction and network reconfiguration for fiber-wireless access network[C]//2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2016: 1-7.
- [16] FREEMAN C L. The development of social network analysis: a study in the sociology of science[J]. *Empirical Press Vancouver*, 2004, 50(1): 148-151.
- [17] KIM K, PARK S, BAE M, et al. A fast minimum variance beamforming method using principal component analysis[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2014, 61(6): 930-945.
- [18] CHEN Shyi-ming, HONG Jia-an. Fuzzy multiple attributes group decision-making based on ranking interval type-2 fuzzy sets and the TOPSIS method[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2014, 44(12): 1665-1673.

编辑 叶芳