

基于子图同构的 vEPC 虚拟网络分层协同映射算法

刘彩霞 李凌书* 汤红波 王晓雷 卢千强

(国家数字交换系统工程技术研究中心 郑州 450002)

(移动互联网安全技术国家工程实验室 北京 100876)

摘要: 5G 及未来移动通信网络虚拟化的场景下,资源的管理与编排是实现虚拟化演进分组核心网(vEPC)业务高效部署的关键问题。vEPC 中业务功能的载体是服务功能链(SFC),不同服务功能链的控制信令与多媒体数据流呈现负载差异化特点。该文针对传统算法资源定比分配所导致的负载不均问题,提出服务功能链的控制层和转发层解耦的映射模型,解耦后不同层的服务链可以独立地扩容和缩容,实现资源精准按需切片。拓扑映射阶段引入图相似理论,提出一种基于子图同构的虚拟网络映射算法 VF2-H,依据节点的全局资源度优选映射子网,通过图特征分析设置剪枝条件,采用回溯机制进行启发式搜索。仿真结果表明,该算法在租户请求接收率、长期收益开销比等方面均具有良好的性能。

关键词: 网络虚拟化; 5G; 虚拟化演进分组核心网; 虚拟网络映射; 子图同构

中图分类号: TN915.81

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)05-1170-08

DOI: 10.11999/JEIT160642

Hierarchical Coordination Strategy for vEPC Virtual Network Embedding Based on Subgraph Isomorphism

LIU Caixia LI Lingshu TANG Hongbo WANG Xiaolei LU Ganqiang

(National Digital Switching System Engineering and Technological R&D Center, Zhengzhou 450002, China)

(National Engineering Laboratory for Mobile Network Security, Beijing 100876, China)

Abstract: In 5G and the future mobile communication network, resource management and scheduling are the key issues to achieve efficient service deployment of virtual Evolved Packet Core (vEPC) network. Service deployment in vEPC is based on Service Function Chain (SFC), in which signaling streams and forwarding streams have a big difference. On account of traffic differentiation of mobile network, the proposed model decouples the control layer and transfer layer of SFC. Different layers can make expansion and contraction independently to achieve accurate resources on-demand slice. Utilizing graph similarity theory, a virtual network embedding strategy called VF2-H is put forward in accordance with subgraph isomorphism. Firstly, candidate substrate subnet is preliminary selected on the basis of global resources capacity. Secondly, pruning condition is formulated based on the graph characteristics. Finally, collaborative search strategy is designed according to the characters of vEPC mapping. The simulation results validate the performance of the proposed algorithm in request accepting rate and long-term revenue-to-cost rate.

Key words: Network Virtualization (NV); 5G; virtual Evolved Packet Core (vEPC) network; Virtualized network embedding; Subgraph isomorphism

1 引言

虚拟化技术通过服务、资源的抽象屏蔽底层网

络复杂性,以解决传统移动网络架构的僵化、紧耦合问题,成为 5G 网络的关键技术^[1]。软件定义网络(Software Defined Network, SDN)和网络功能虚拟化(Network Function Virtualized, NFV)是 5G 移动通信网虚拟化的驱动力量。SDN 从“水平”方向上实现虚拟化,路由转发策略集中化控制,提供更灵活的资源调度;NFV 从“垂直”方向上实现虚拟化,变革传统电信网网元的实现方式,实现虚拟网络功能的统一编排和管理。SDN 与 NFV 互不依赖、自成体系,又相互补充、相互融合,共同驱动网络的

收稿日期:2016-06-16; 改回日期:2016-12-09; 网络出版:2017-02-09

*通信作者:李凌书 llsjdkn@sjtu.edu.cn

基金项目:国家 863 计划(2014AA01A701), 国家自然科学基金(61521003), 科技部支撑计划(2014BAH30B01)

Foundation Items: The National 863 Program of China (2014AA01A701), The National Natural Science Foundation of China (61521003), The Ministry of Science and Technology Support Plan (2014BAH30B01)

虚拟化变革。基于云数据中心的网络架构是 5G 及未来移动通信网的发展趋势, 实现云数据中心资源(计算、存储等)和网络资源(带宽、延迟等)的联合编排与优化是网络架构创新的必然需求。现有的演进虚拟化架构创新方案一般采用 Overlay 方式建立跨数据中心的大二层网络, 实现端到端的业务管理; 而革命的虚拟化架构创新方案如基于网络即服务(NaaS)的第 3 类网络, 旨在实现更彻底的资源抽象和网络管理^[2,3]。虚拟化的演进分组核心(virtualized Evolved Packet Core, vEPC)网已成为信息通信技术(ICT)融合发展下运营商网络转型的重要切入点。

虚拟网络映射(Virtualized Network Embedding, VNE)是虚拟化的支撑技术之一, 即将虚拟网络请求(Virtualized Network Request, VNR)有效地分配到物理网络上。文献[4]指出在数据中心进行虚拟网络映射时实现负载均衡需要实例化更多的虚拟网络功能(Virtualized Network Function, VNF), 其结合整数线性规划和启发式算法, 实现提高资源利用率和负载均衡的双目标优化。文献[5]考虑一个物理节点上承载多个 VNF, 将服务功能链(Service Function Chain, SFC)的部署问题转化为 VNF 部署和底层节点拓扑生成两个子问题, 提出一种闭环反馈算法进行 VNF 聚合和 SFC 映射, 有效提高了资源利用率和可靠性。文献[6]提出用资源亲密度的概念来表征不同业务功能对多维资源需求的关系, 针对用户定制化需求实现资源的精准按需切片, 但其并未提出具体的映射策略。文献[7]根据企业 IT 服务的周期性特征, 提出在时间维度上实现资源动态的共享策略, 提高了虚拟网络的接受率和基础设施的长期收益。文献[8]将 vEPC 部署在分布式云数据中心上, 拓扑优化策略充分考虑了网元间功能的差异性, 但其将网络功能链高度聚合成两条链, 将 10000 多个 eNodeB 汇聚到一个流量聚合节点(Traffic Aggregation Point, TAP)上, 导致回传开销增大。文献[9]针对大量资源约束下的虚拟网络, 提出一种基于子图同构的映射策略, 通过优化回溯机制降低资源开销和时间开销, 但该算法不能将多个网络功能映射到同一个物理节点上。

IT 业务为计算密集型, 主要考虑计算、存储资源, 故传统的两阶段 VNE 算法先映射节点再映射链路, 注重节点资源的寻优; 但电信业务是 IO 密集型, 网络资源十分关键, 需要统筹考虑节点资源和链路资源。两阶段算法的研究现已较为成熟, 但缺少支持 vEPC 环境下多对一映射的一阶段高效映射算法。此外, vEPC 中已有的 VNF 部署方法均以“网元”作为资源分配的粒度, 忽视各个网元功能对多

维资源的差异化需求, 导致物理资源不能充分利用。针对上述问题, 本文在图匹配算法 VF2 的基础上, 提出 vEPC 网络中一种基于子图同构的分层协同映射算法 VF2-H。首先, 不同于传统算法中服务功能链控制面和数据面紧耦合的模型, 本算法对服务链进行进一步解耦, 实现控制层和数据层独立灵活的扩容和缩容; 其次, 考虑到网元内部的通信, 分层协同的映射方式保证了算法的有效性; 最后, VF2-H 是一种一阶段的映射方法, 基于拓扑特征设置剪枝条件, 能有效避免过长虚拟链路的产生, 保证映射的高效性。

2 网络模型与问题描述

2.1 vEPC 网络架构

当前 5G 虚拟化网络架构的研究, 其移动核心网部分一般沿用 3GPP LTE EPC 的网络架构, 并通过引入 SDN 和 NFV 技术进行革新。根据 EPC 的通信流程, 虚拟网络请求必须由完整的 EPC 服务功能链承载。服务功能链是具有一定服务功能的虚拟网络功能的有序排列, 在 vEPC 模型中一般根据业务量聚合出多条 SFC, 按需为 SFC 分配切片资源和优化 VNF 位置部署是本文关注的重点。基于 NFV 可以实现服务链和网元两个级别的解耦, 从服务链级别看, 运用 SDN 技术辅助组网, 将 SFC 控制面功能上升到云数据中心形成逻辑上的集中控制, 用户面对转发设备进行升级使其支持 GTP 协议隧道通信, 实现标准化分组转发, EPC 分层虚拟化架构如图 1 所示。该架构一方面从功能上对 SFC 的控制面和转发面进行解耦, 增强部署和运维的灵活性; 另一方面从资源配置上实现不同的底层网络切片独立承载解耦后的 SFC, 一个物理节点的计算资源和网络资源也可以被多个切片网络所共享^[10], 实现物理基础设施的高效利用。

从网元级别看, 无论是服务网关(S-GW), PDN 网关(P-GW)等数据转换相关的网元, 还是移动性管理实体(MME)等进行网络会话控制的网元, 均兼有计算处理和数据转发两方面的需求。如 P-GW, 一方面有 UE IP 地址分配、数据转发的功能, 又有包过滤、合法侦听等功能。一个虚拟化的归属签约用户服务器(vHSS)网元架构如图 2 所示。一个 vHSS 可分为虚拟资源层、业务控制层和管理与编排层, 每层之间通过标准化接口协议进行通信, 资源的池化和接口的标准化提供了网络可编程能力, 移动通信网可以根据虚拟网络请求灵活实例化相应的网元功能和链路连接。这种虚拟化网元松耦合的资源组织形式为精细化网络切片提供了可能。

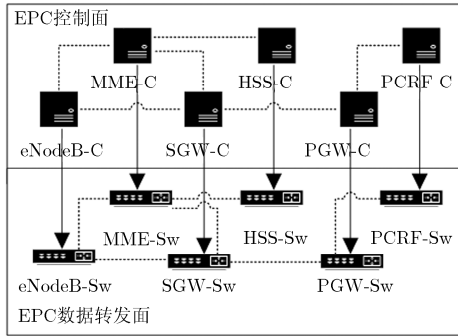


图 1 基于 SDN 的 EPC 分层虚拟化架构

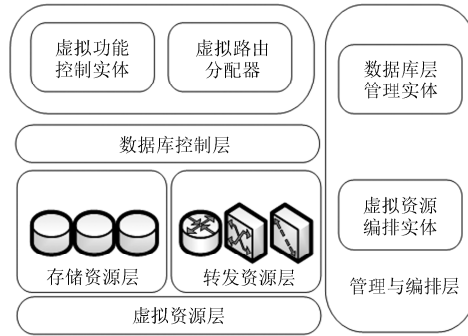


图 2 虚拟化网元 HSS 架构

多样性的业务类型和差异化的网络流量是 5G 网络的重要特点。网络运营中，一方面像手机 QQ、手机微博、微信等应用的兴起，带来大规模小数据量的频繁交互，该类业务建立和释放的控制码一般是通过信令信道承载，周期性地向应用服务器发送报文将已释放的连接重建以保证用户永远在线，大量“心跳”消息拥塞控制信道，而此时数据面负载较轻。另一方面，高清视频、实况转播、实时手机游戏等应用迅速发展，这类大数据量业务需要高带宽、低时延的网络服务，往往数据面资源耗尽而控制面负载较轻。由此可见，差异化的网络需求要求移动网能弹性地分配网络资源，实现按需定制切片^[1]。为细粒度区分控制面服务链和数据面服务链，SFC 中虚拟网络功能的部署可分为两个部分：每个物理节点上实例化一个虚拟 Switch 作为多端口网桥，其职能相对单一可以灵活扩容和缩容，从全网来看 vSwitch 实现分布式且平坦的分布；每个物理节点上实例化一个或多个虚拟 HOST，在其上实现 vEPC 网元功能，形成逻辑有序的控制面，一个 HOST 可对临近 vSwitch 进行控制和下发流表，实现统一的资源调度。

2.2 虚拟网络映射问题描述

2.2.1 网络模型的特征 在虚拟网络映射(VNE)问题中，当基础设施提供商(Infrastructure Providers, InPs)收到并接受一个 VNR，必须满足其对节点和带宽资源的需求，且在 VNR 离开时释放相应的资源。引入虚拟化技术的优势在于借助资源切片和多租户技术，不同虚拟网络的节点可以映射到同一个资源充足的物理节点上。如图 3 所示，虚拟网络 A 和虚拟网络 B 映射到同一个物理网络上，节点 a 和 a' 同时映射到物理节点 2 上。VNE 包括节点映射和链路映射两个关键步骤，图 3 中节点映射为 {a → 2, b → 3, c → 5, d → 8}，链路映射为 {(a, b) → (2, 3), (b, c) → (3, 5), (c, d) → (5, 8), (a, d) → (2, 8)}。

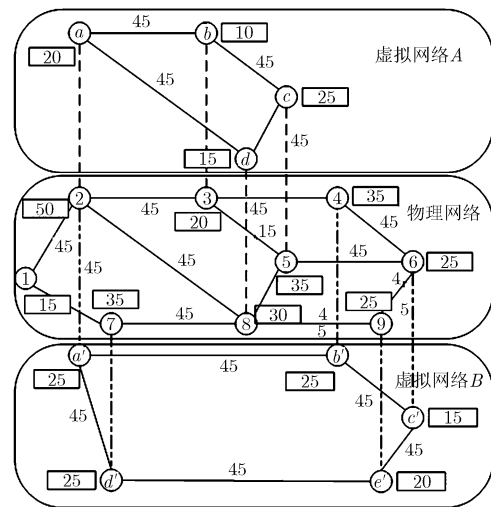


图 3 服务链功能部署模型

底层网络可以表示为一个无向带权图 $G^S = (N^S, E^S, \eta_n^S, \eta_e^S)$ ，其中 N^S 和 E^S 分别代表底层节点集合和底层链路集合。 η_n^S 表示底层节点 $n^S \in N^S$ 的属性集合 $\eta_n^S = \{\sigma_n^S, \tau_n^S, v_n^S, Loc_n^S\}$ ，包含节点计算资源 σ_n^S 、节点存储资源 τ_n^S ，节点网络资源 v_n^S 和节点位置 Loc_n^S ， η_e^S 表示底层链路带宽。同样将虚拟网络请求表示为一个无向带权图 $G^V = (N^V, E^V, \eta_n^V, \eta_e^V, \tau_l)$ 。其中， N^V 表示虚拟网络功能的集合，如 $N^V = \{TAP, MME, HSS, SGW, PGW\}$ 。 E^V 表示虚拟链路的集合，一条 SFC 的链路可以表示为 $f = \{TAP \leftrightarrow MME, MME \leftrightarrow HSS, MME \leftrightarrow SGW, TAP \leftrightarrow SGW, SGW \leftrightarrow PGW\}$ ， $f \subseteq E^V$ 。一个 VNR 中可以包含几条服务功能链 $F = (f_1, f_2, \dots, f_Q)$ 。 η_n^V 表示虚拟网络功能属性的集合，与物理网络类似， η_n^V 表示虚拟网络功能 $n^V \in N^V$ 的属性集合 $\eta_n^V = \{\sigma_n^V, \tau_n^V, v_n^V, Loc_n^V\}$ ， η_e^V 是表示虚拟链路带宽， τ_l 表示 VNR 的生存周期。将 VNF 映射到底层网络的过程表示为 $M_N : \{N^V \rightarrow N^S, E^V \rightarrow E^S\}$ 。

2.2.2 子图同构问题 上述 VNE 问题可以抽象为图论中无向图的子图同构问题。子图是指节点集和边集分别是某一图的节点集和边集的子集的图，所谓子图同构是指一个图与某一图的一个子图的关联关系完全相同，具体参见下文的定义 1。如果能找到一个子图的点集和边集与另一张图满足一一映射关系，则将这个子图称为一个嵌入，具体参见下文的定义 2。如果能在底层网络中找到与虚拟网络请求拓扑相同的嵌入，那么就能够用寻找同构子图的方式实现虚拟网络的映射。

定义 1 (子图同构) 给定一个查询图 $Q = (N, E, L)$ 和一个数据图 $G = (N', E', L')$ ， N 代表节点集合， E 代表边的集合， L 代表节点权值的集合。如果存在一个单射函数 $M: Q \rightarrow G$ 使得 $\forall(n \in N), L(n) \subseteq L'(M(n))$ 且 $\forall(n_i, n_j) \in E, (M(n_i), M(n_j)) \in E'$ ，那么 Q 与 G 的一个子图是同构的，记为 $Q \subseteq G$ 。

定义 2 (嵌入) 给定一个数据图 G 和一个查询图 Q ，且图 G 和 Q 是子图同构的，则图 G 中与图 Q 完全匹配的子图称为图 Q 在图 G 中的嵌入。

子图同构问题是一个 NP 完全问题，可以定义为：给一个查询图 Q 和一个数据图 G ，在数据图 G 中找到查询图 Q 的所有存在差异的嵌入。现有的精确子图匹配算法分为图索引算法和图搜索算法，由于虚拟网络映射问题中允许多个虚拟节点映射到同一个物理节点，允许不直接相邻的节点之间通过多跳中继的方式连接，图编码和图索引难以反映拓扑结构信息。VF2 算法是一种常用的图搜索算法，改进 VF2 算法的搜索策略可解决上述问题，但会扩大搜索空间，而 VF2 算法的最差时间复杂度是 M^N ，故计算复杂度是一个重要问题。但一方面限于 vEPC 的网络拓扑规模， M 和 N 的值一般比较小；另一方面，顶点和链路标签信息的引入和优化的剪枝策略可以有效降低计算复杂度，一般不会出现理论上的最差情况。实际上子图搜索过程中常采用 Top- k 准则，即只需要找到前 k 个嵌入就可以终止搜索输出最优的可行解。

2.2.3 约束条件 在映射算法执行过程中，剩余的可用 CPU 资源表示为 $R_N(n^S) = c(n^S) - \sum_{n^V | M_N(n^V) = n^S} c(n^V)$ ，即全部 CPU 资源 $c(n^S)$ 减去已被占用的 CPU 资源 $\sum_{n^V | M_N(n^V) = n^S} c(n^V)$ 。类似地，剩余可用带宽资源

$$R_E(e^S) = b(e^S) - \sum_{e^V | M_E(e^V) = e^S} b(e^V)$$

式中， $b(e^S)$ 为总链路带宽， $\sum_{e^V | M_E(e^V) = e^S} b(e^V)$ 为已占用带宽。虚拟网络所请求的节点资源、带宽资源要小于宿主网络的剩余量：

$$\left. \begin{aligned} c(n^V) &\leq R_N(M_N(n^V)) \\ b(e^V) &\leq R_E(M_E(e^V)) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由于 EPC 网元功能和实际部署的原因，部分节点的映射除了资源约束之外还要考虑其他因素。如 S-GW 常作为异构小区间 Inter RAT 切换和重选的锚点，P-GW 是核心网连接分组数据网的锚点，其部署受到地理空间的限制，表征为

$$\text{Loc}(n^S, n^V) = \begin{cases} 1, & \text{可部署} \\ 0, & \text{不可部署} \end{cases} \quad (2)$$

2.2.4 开销与收益模型 如果嵌入满足约束条件，那么称之为一个有效的映射。对于一个虚拟请求可能存在多个有效映射，我们关心如何选取一种嵌入使整体的收益达到最佳。根据不同的经济模型，虚拟服务提供商映射虚拟网络的成本与收益有所不同。类似文献[12,13]中的模型，VNE 的收益定义为

$$R(G^V) = \alpha \sum_{n^V \in N^V} C(n^V) + (1 - \alpha) \sum_{e^V \in E^V} B(e^V) \quad (3)$$

VNE 的成本定义为

$$C(G^V) = \alpha \sum_{n^V \in N^V} C(n^V) + (1 - \alpha) \sum_{e^V \in E^V} B(e^V) \cdot \text{length}(e^V) \quad (4)$$

其中， α 用来调节节点资源与链路资源的相对权重， $\text{length}(e^V)$ 表示每条虚拟链路映射到物理网络上无环链路的长度。用 $C(n^V)$ 表征标准化的节点资源：

$$\begin{aligned} C(n^V) &= \lambda_1 \sum_{\text{VNF} \in N^V} \left(C_0 \sum_{n^S \in N^S} x_{\text{VFN}, n^S} + \alpha B^{\text{VNF}} \right) \\ &+ \lambda_2 \sum_{\text{VNF} \in N^V} \left(S_0 \sum_{n^S \in N^S} x_{\text{VFN}, n^S} + \beta B^{\text{VNF}} \right) \\ &+ \lambda_3 B_0 \sum_{u, v \in N^S} x_{u, v} \end{aligned} \quad (5)$$

其中，第 1 项表示虚拟网络请求占用底层网络的节点计算资源，第 2 项表示占用的节点存储资源，第 3 项表示占用通信资源。权重系数 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 满足条件 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \in (0, 1), \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ 。

此外，收益开销比 $\omega = R(G^V) / C(G^V)$ 常被用来衡量一个映射策略的优劣。高效的在线 VNE 算法能够最大化网络的长期收益开销比，实现资源的合理调度，减少额外的通信延迟。

3 VF2-H 算法描述

如图 4，传统映射方式中服务链的控制面和数据面是紧耦合绑定映射的。为区分频繁交互类业务和定向传输类业务，对 vEPC 中 SFC 的控制面与转发面进行解耦，用两个资源切片来承载一条 SFC 的两方面功能；同时，考虑到同一网元的控制部分

与转发部分之间往往存在更多的信息交互，应兼顾其物理拓扑相关性，因此需要一种分层协同的映射算法。VF2 算法是一种效率较高主流图匹配算法，但在 vEPC 网络中，传统 VF2 算法既不支持 VNF 到物理节点的多对一映射，也不允许节点间的多跳连接，限制了资源按需切片的能力，不能充分利用资源拓扑进行最优化设计。针对以上问题，本文改进 VF2 算法使其支持多对一映射和多跳映射，并在此基础上提出改进的 VF2-H 算法以支持分层协同的映射模式。

基于 2.2.1 节中的架构模型，一个虚拟节点中至少有一个 vSwitch(转发层节点)和一个 vHost(控制层节点)。对于控制层节点要考虑服务链中 VNF 的有序映射；职能单一的转发层节点依附于控制层节点，要考虑灵活扩容和缩容，故在控制层节点临近区域按需进行实例化。

由于搜索策略的特点，映射开始阶段宿主物理节点的选择基本决定了该虚拟网络在物理网络中的资源分配区域。为了减少局部资源耗尽和拥塞，提高网络接受率和网络鲁棒性，本文使用全局资源度 $r(u)$ 来表征节点的综合资源能力，优先选择资源丰富、负载较轻的子区域进行映射。全局资源度定义为

$$r(u) = (1-d) \cdot c_u + d \sum_{v \in N(u)} \frac{b(u,v)}{\sum_{x \in N(v)} b(x,v)} \cdot c(v) \quad (6)$$

其中， d 是一个取值范围为 (0,1) 的阻尼常量， c_u 是节点中各种资源(计算、存储、网络资源)的标准化评价参数， $N(u)$ 是节点 u 所有邻居节点的集合， $b(u,v)$ 表示节点 u, v 之间的标准化链路带宽。对于每个虚拟网络请求，以其资源需求最大的节点作为映射锚点，计算相应候选物理节点以 G^V 平均距离

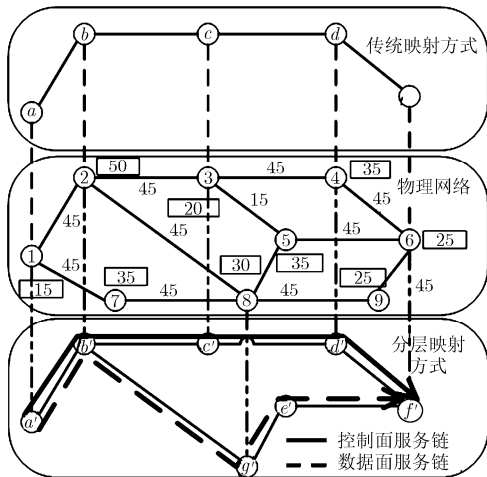


图4 虚拟网络分层映射模型

的一半为半径之内所有节点 $r(u)$ 值的总和，优先选择和值最大的节点作为宿主。

算法核心框架见表1的算法1。由定义1可知，虚拟网络 G^V 为查询图 Q ，物理网络 G^S 为数据图 G ， G_{sub}^V 为 G^V 在 G^S 上的当前部分映射状态，算法目标是找到 G^V 在 G^S 中的嵌入。每次新节点映射时由函数 $\text{Genneigh}(G_{\text{sub}}^V, G^V, G^P(M(G_{\text{sub}}^V)))$ 生成候选节点对 (n_p, n_v) 的集合 C 进行排序。然后通过 $\text{Valid} \cdot (M(G_{\text{sub}}^V), (n_v, n_p), G^P)$ 函数对每一个候选匹配对进行剪枝，之后迭代的过程类似深度优先搜索过程，直到当前匹配状态包含所有 G^V 中所有的节点，则完成映射。在图搜索的过程中，控制层的服务链和转发层的服务链是交替协同映射的，即为一个 VNF 分配了所有所需资源后再进行下一个 VNF 的资源选取。

下面介绍算法中两个关键函数 $\text{Genneigh}(G_{\text{sub}}^V, G^V, G^P, M(G_{\text{sub}}^V))$ 和 $\text{Valid}(G^V, G^S, C)$ ，见表2的算法2，表3的算法3。 $\text{Genneigh}(G_{\text{sub}}^V, G^V, G^P, M(G_{\text{sub}}^V))$

表1 算法核心框架

算法1 VNMF($G_{\text{sub}}^V, M(s), G^V, G^S$)

输入：物理网络 G^S ，虚拟网络 G^V ，初始匹配状态 s_0 且 $M(s_0) = \phi$ ，部分匹配子图 G_{sub}^V 。

输出：映射关系 $M(s)$ 。

(1) 生成控制面候选匹配对

$$S_C = \text{Genneigh}(G_{\text{sub}}^V, G^V, G^P, M(G_{\text{sub}}^V))$$

(2) for each (n_v, n_p) in S_C do

(3) if $\text{Valid}(M(G_{\text{sub}}^V), (n_v, n_p), G^P)$ then

(4) 生成转发面候选匹配对

$$S_F = \text{Genneigh} \cdot (G_{\text{sub}}^V, G^V, G^P, M(G_{\text{sub}}^V), (n_v, n_p))$$

(5) for each (n'_v, n'_p) in S_F do

(6) if $\text{Valid}(M(G_{\text{sub}}^V), (n'_v, n'_p), G^P)$

(7) 加入 (n_v, n_p) ， (n'_v, n'_p) ，更新 G_{sub}^V 和 $M(s)$ ，得到 G_{sub}^V 和 $M(s')$ 。

(8) end if

(9) end for

(10) 迭代，VNMF($G_{\text{sub}}^V, M(s'), G^V, G^P$)

(11) end if

(12) end for

(13) if $M(s)$ 包含所有 G^V 的节点 $G_{\text{sub}}^V == G^V$ then

(14) return $M(G_{\text{sub}}^V)$

(15) end if

(16) end VNMF($G_{\text{sub}}^V, M(s), G^V, G^S$)

是候选匹配对生成函数， $N_s^t / M(G_{\text{sub}}^V)$ 表示当前映射物理节点的邻居节点集合。映射开始时 $N_s^t / M(G_{\text{sub}}^V) = \phi$ ，在全图范围内根据节点资源度和值 $\sum r(u)$ 生成候选节点对。在之后的迭代过程中，选择当前匹配点的邻居节点生成候选节点对。传统的 VF2 算法中匹配节点对集合生成是根据约束选择一个虚拟节点集合 N_v^t 和物理节点集合 N_s^t (t 为迭代次数)，计算两者的笛卡尔乘积 $C = N_v^t \times N_s^t$ 来生成候选匹配对集合。考虑到 SFC 的各个 VNF 之间存在一定逻辑顺序，所以每次映射时只选择下一个要映射的虚拟节点生成匹配对。即只选择 N_v^t 中的一个点(而不是 N_v^t 中所有点)跟 N_s^t 中的点组合，生成候选匹配对集合，递归的过程中 N_v^t 中的其他点还是会在 N_v^{t+1} 中，依然可以遍历整个搜索空间，并让每次生成的候选匹配对数量缩减为传统 VF2 算法的 $1/|N_v^t|$ 。CheckLabel(G^V, G^S, C) 检查新加入的匹配对中的物理节点是否满足式(1)中的资源约束和式(2)中的位置约束。Sort(C) 函数根据物理节点资源量对节点对进行升序排序，这样每次尝试新的匹配对时采用 MAX-MIN 准则，即优先选择满足资源约束且剩余资源量最接近 VNR 所请求资源量的节点进行映射。

表 2 函数 Genneigh($G_{\text{sub}}^V, G^V, G^P, M(G_{\text{sub}}^V)$)

算法 2 候选匹配对生成函数

Genneigh($G_{\text{sub}}^V, G^V, G^P, M(G_{\text{sub}}^V)$)

输入：虚拟网络 G^V ，物理网络 G^S ，部分匹配子图 G_{sub}^V 。

输出：候选匹配对 C 。

- (1) if $N_s^t / M(G_{\text{sub}}^V) = \emptyset$ then
- (2) 生成候选匹配对 $C = n_v^t \times N_s^t$
- (3) else
- (4) 生成候选匹配对集合 $C = n_v^t \times N_s^t / M(G_{\text{sub}}^V)$
- (5) end if
- (6) CheckLabel(G^V, G^S, C)
- (7) Sort(C)
- (8) return(C)

有效性检测函数 Valid(G^V, G^S, C) 是一个布尔类型的函数，用于检测新加入的节点对是否符合要求，并通过分析节点度数信息提前对候选节点对集进行筛选和剪枝。CheckwithMappedNode($G^V, G^S, C, G_{\text{sub}}^V$) 保证加入新的匹配对 $p = (n_s, n_v)$ 后，两个子图仍然是同构的。即只要虚拟网络中 n_v 节点与已映射的节点存在连接，物理网络中必须有相应的连接。

Pruning($G^V, G^S, C, G_{\text{sub}}^V$) 是剪枝策略函数，其包含两条剪枝依据，一是物理网络中的 n_s 节点度的大小必须大于等于虚拟网络中 n_v 节点度的大小，二是必须满足资源约束和位置约束。如果不满足即说明虚拟网络中 n_v 的邻居个数大于物理网络中 n_s 的邻居个数的，最终必然无法完全匹配虚拟网络中所有的点。CheckFurther($G^V, G^S, C, G_{\text{sub}}^V$) 考虑的邻居是已映射节点的两步邻居，是跟当前新的匹配对 p 中节点相邻的邻居，即保证匹配对 p 搜索方向的两步邻居节点中，存在符合资源约束和节点度约束的节点。这种 look-head 方法可以实现细粒度剪枝，从而提高搜索效率。

表 3 函数 Valid(G^V, G^S, C)

算法 3 有效性检测函数 Valid(G^V, G^S, C)

输入：虚拟网络 G^V ，物理网络 G^P ，部分匹配子图 G_{sub}^V ，候选匹配对 C 。

输出：有效性标志。

- (1) for each (n_s, n_v) in C do
- (2) if (!CheckwithMappedNode($G^V, G^S, C, G_{\text{sub}}^V$)) return false;
- (3) if (!Pruning($G^V, G^S, C, G_{\text{sub}}^V$)) return false;
- (4) if (!CheckFurther($G^V, G^S, C, G_{\text{sub}}^V$)) return false;
- (5) return true;

4 实验结果及分析

为了评估模型可行性及算法有效性，本文采用服务请求的处理时间、接受率、底层网络的收益和开销比作为性能评价指标，并与算法 TA^[14]和算法 GRC^[15]进行比较，这两种算法各自提出评价参数来衡量底层网络资源，在节点映射阶段考虑剩余全局资源，根据评价参数采用贪婪法进行节点映射，基于最短路法进行虚拟链路映射。

4.1 实验环境

实验仿真使用 Intel(R) Pentium(R) 3.40 GHz CPU, 4 GB 内存的 PC 机，所有算法基于 Java 实现，并使用 Matlab 工具对实验结果进行分析。采用网络虚拟化技术研究常规使用的仿真模型^[3,14]，底层物理网络拓扑和虚拟网络请求都通过网络生成器 NS3 随机生成，任何两个节点之间以概率 p 生成一条链路，节点资源大小和链路带宽服从均匀分布。每个 VNR 由一个或多个 VNF 组成，数量服从 2 到 5 的均匀分布。每个 VNR 的虚拟节点个数在 4 到 10 之间随机生成。假定虚拟网络请求 R_t 动态到达，服从强度为 $\lambda \in (200, 800)$ 的泊松分布，虚拟网络存

在的生命周期符合 $1/\mu = 500$ 的负指数分布, 虚拟网络负载表示为 λ/μ 。

4.2 性能分析

图 5 显示了各算法的请求接受率曲线, 从图中可以看出随着时间推移, 当物理网络承载较多虚拟网络时, VF2-H 算法较好地提高了请求接受率, 这说明本文提出的分层映射方式可以提高碎片资源的利用率。从图 6 可以看到, VF2-H 算法长期平均收益开销比优于传统算法。因为传统两阶段的映射方式导致经常因链路带宽耗尽而映射失败, 同时由于对资源没有统筹管理, 易产生大量的资源碎片, VF2-H 算法由于统筹考虑节点和链路资源的负载均衡, 网络利用更加高效。值得注意的是 VF2 与 VF2-H 的收益开销比曲线有一个交点, 这是因为当节点连通率较低时, VF2-H 算法倾向于产生更多的多跳链路增大了开销, 而当节点连通率较高时, VF2-H 算法一方面更容易找到低开销的网络拓扑, 另一方面能接受更多的 VNR, 导致长期平均收益开销比优于 VF2 算法。

VF2-H 算法性能与链路最大允许跳数 k 有关。从图 7 可以看出, 在节点连通率为 0.6、网络负载强度较低的情况下, k 值越大, 链路映射约束越松弛, 虚拟网络请求接受率越高; 另一方面, 长虚拟路径的实例化造成更多的资源消耗, 导致长期受益开销比下降。

我们在同样的物理网络上映射虚拟网络来比较每种算法的平均运行时间, 见图 8。可以看出 VF2

算法和 VF2-H 算法的运行时间要比其他算法减少 10%到 20%。这是因为剪枝策略预先剔除了了一部分无效的搜索方向, 使得映射更加高效。VF2-H 算法由于对网络请求进行了更细粒度的划分, 所生成虚拟网络拓扑节点数更多, 联合映射的迭代过程更复杂, 故运行时间长于 VF2 算法。

5 结束语

面向新型网络下应用服务的流量差异化特征, 要建立以开放 API 为基础、产业链上下游联合创新的业务经营模式, vEPC 的资源虚拟化和虚拟网络功能部署成为亟待解决的问题。本文主要研究了虚拟化环境下业务请求的虚拟化部署问题, 提出一种基于子图同构的分层协同映射算法 VF2-H, 并验证了其有效性。VF2-H 算法依据全局资源度作为指标选择资源域子区域, 并根据拓扑特征进行合理剪枝, 实现业务的高效部署。同时, 该算法对控制链和转发链进行一定程度的解耦, 不仅实现网络资源细粒度的调用, 而且使得算法模型在感知到业务变化后, 能够随业务负载调整数据面服务链的容量分配, 实现了网络的动态切片和业务可定制。在迭代搜索过程中, 算法优选资源量最接近业务需求的节点进行映射, 减少资源碎片的产生。实验表明, 该算法可实现服务请求的快速响应, 提高了服务请求接受率和成本效率, 可实现网络的优化部署, 增强用户的服务体验, 实现业务全生命周期的灵活编排。

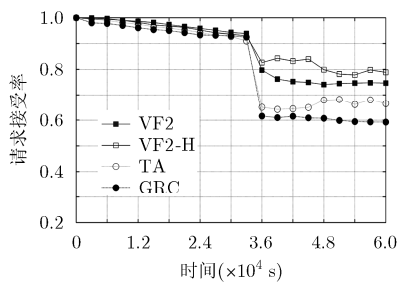


图 5 网络请求接受率变化图

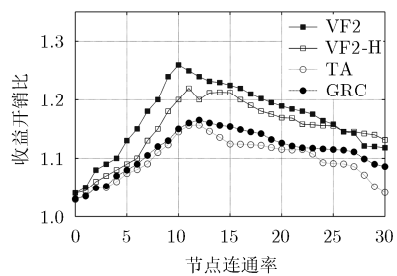
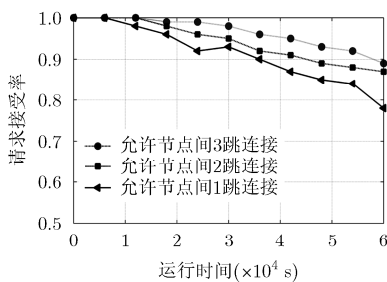
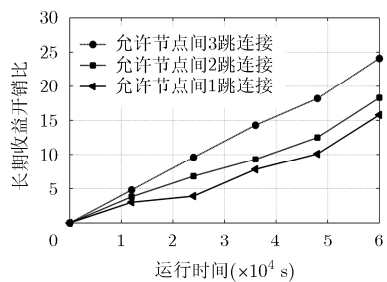


图 6 不同节点连通率下的收益开销比变化图



(a) 不同链路最大允许跳数 k 下网络请求接受率



(b) 不同链路最大允许跳数 k 下收益开销比

图 7 不同链路最大允许跳数 k 下网络请求接受率和收益开销比

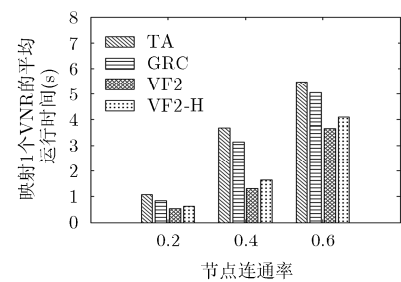


图 8 不同节点连通率下各算法的平均运行时间

参考文献

- [1] OSSEIRAN A, BOCCARDI F, BRAUN V, *et al.* Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(5): 26–35. doi: 10.1109/MCOM.2014.6815890.
- [2] BARBAROSSA S, SARDELLITTI S, and DI LORENZO P. Communicating while computing: Distributed mobile cloud computing over 5G heterogeneous networks[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, 31(6): 45–55. doi: 10.1109/MSP.2014.2334709.
- [3] HSU W H and SHIEH Y P. Virtual network mapping algorithm in the cloud infrastructure[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2013, 36(6): 1724–1734. doi: 10.1016/J.JNCA.2013.02.028.
- [4] FANG W, ZENG M, LIU X, *et al.* Joint spectrum and IT resource allocation for efficient VNF service chaining in inter-datacenter elastic optical networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(8): 1539–1542. doi: 10.1109/LCOMM.2016.2580151.
- [5] YE Z, CAO X, WANG J, *et al.* Joint topology design and mapping of service function chains for efficient, scalable, and reliable network functions virtualization[J]. *IEEE Network*, 2016, 30(3): 81–87. doi: 10.1109/MNET.2016.7474348.
- [6] YOUSAF F Z and TALEB T. Fine-grained resource-aware virtual network function management for 5G carrier cloud[J]. *IEEE Network*, 2016, 30(2): 110–115. doi: 10.1109/MNET.2016.7437032.
- [7] GARG S, DWIVEDI R K, and CHAUHAN H. Efficient utilization of virtual machines in cloud computing using synchronized throttled load balancing[C]. *IEEE Next Generation Computing Technologies*, Dehradun, India, 2015: 77–80. doi: 10.1109/IADCC.2015.7154687.
- [8] BAUMGARTNER A, REDDY V S, and BAUSCHERT T. Mobile core network virtualization: A model for combined virtual core network function placement and topology optimization[C]. *IEEE Conference on Network Softwarization*, London, United Kingdom, 2015: 1–9. doi: 10.1109/NETSOFT.2015.7116162.
- [9] LISCHKA J and KARL H. A virtual network mapping algorithm based on subgraph isomorphism detection[C]. *ACM Workshop on Virtualized Infrastructure Systems and Architectures*, Beijing, China, 2009: 81–88. doi: 10.1145/1592648.1592662.
- [10] FAN Z, CHOI B, XU J, *et al.* Asymmetric structure-preserving subgraph queries for large graphs[C]. *IEEE 31st International Conference on Data Engineering*, Seoul, Korea, 2015: 339–350. doi: 10.1109/ICDE.2015.7113296.
- [11] ROSA R V, ESTEVE ROTHENBERG C, and MADEIRA E. Virtual data center networks embedding through software defined networking[C]. *IEEE Network Operations and Management Symposium*, Krakow, Poland, 2014: 1–5. doi: 10.1109/NOMS.2014.6838352.
- [12] GONZALEZ A, BARRA E, BEGHELLI A, *et al.* A sub-graph mapping-based algorithm for virtual network allocation over flexible grid networks[C]. *IEEE Transparent Optical Networks*, Budapest, Hungary, 2015: 1–4. doi: 10.1109/ICTON.2015.7193484.
- [13] CAO Y, FAN W, and MA S. *Virtual Network Mapping: A Graph Pattern Matching Approach*[M]. Berlin, Germany, Springer International Publishing, 2015: 49–61. doi: 10.1007/978-3-319-20424-6_6.
- [14] HOSSAIN E and HASAN M. 5G cellular: Key enabling technologies and research challenges[J]. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2015, 18(3): 11–21. doi: 10.1109/MIM.2015.7108393.
- [15] GONG L, WEN Y, ZHU Z, *et al.* Toward profit-seeking virtual network embedding algorithm via global resource capacity[C]. *IEEE International Conference on Computer Communications*, Toronto, Canada, 2014: 1–9. doi: 10.1109/INFOCOM.2014.6847918.
- 刘彩霞: 女, 1974年生, 研究员, 研究方向为移动通信网络、新型网络体系结构。
- 李凌书: 男, 1992年生, 硕士生, 研究方向为移动通信网络、网络功能虚拟化。
- 汤红波: 男, 1968年生, 教授, 研究方向为移动通信网络、新型网络体系结构。
- 王晓雷: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为移动通信网络、软件定义网络。
- 卢干强: 男, 1990年生, 硕士生, 研究方向为移动通信网络、网络功能虚拟化。