

文章编号:1671-6833(2021)05-0050-06

一种基于业务感知和可调节跳数的虚拟化层构建算法

马 丁^{1,2}, 费 选¹, 慕小武²

(1.河南工业大学 人工智能与大数据学院,河南 郑州 450001; 2.郑州大学 数学与统计学院,河南 郑州 450001)

摘 要:在网络功能虚拟化环境中,网络拓扑抽象是构建一致性视图、屏蔽底层无关细节的重要保证。针对服务功能链的映射问题,从网络拓扑抽象化的角度出发,提出一种基于业务感知和可调节跳数的虚拟化层构建算法。通过分析服务功能链功能需求,建立节点映射,通过可调节跳数的非冗余链路映射方法进行链路映射。仿真实验在所构建的虚拟化层上使用分层图算法映射服务功能链,测试不同跳数约束下的映射性能,数据显示:与跳数约束为2时相比,当跳数约束增加至3时,各项性能指标均有显著的提升,但是当跳数约束继续增加至4和5时,虚拟化层的构建开销分别增加约27%和52%,而性能指标几乎没有提升。仿真结果表明:所提出的算法能够有效地承载服务链请求,并能够在特定规模的物理网络上构建性价比最优的虚拟化层。

关键词:网络功能虚拟化;虚拟网络功能;虚拟化层;服务功能链;跳数约束

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2021.05.009

0 引言

近年来,随着网络流量的迅速增长,多样化应用的不断涌现,传统中间盒(middlebox)的设备架构已经难以满足现有的需求,网络功能虚拟化(network function virtualization, NFV)正是在此背景下应运而生^[1-2]。VNF(virtual network function)将网络功能与物理设备解耦,然后将网络功能软件化,抽象为虚拟网络功能。VNF可以部署在通用x86平台上,极大增加了核心网络的灵活性和可扩展性,降低了网络企业的硬件投资成本和运维成本^[3-4]。

为了满足业务的需求,网络数据流从源端系统到目的端系统通常需要以特定的顺序依次经过一系列VNFs。其中,通过特定顺序链接起来的VNFs逻辑序列被称为服务功能链(service function chain, SFC)。目前,针对SFC映射的研究较多集中在5G、互联网、光网络等多样化网络场景中VNF实例(virtual network function instance, VNFI)的部署与映射。其中,Sahhaf等^[5]将高层VNF分解为多个子图,通过分组和建立集

群的方式进行映射,提高了资源利用率,降低了开销。胡宇翔等^[6]针对已有研究未考虑具有高性能数据处理需求的服务链VNF部署问题,提出一种支持硬件加速的VNF部署模型。Ye等^[7]基于5G网络背景,提出了一种面向多路数据流SFC映射的端到端数据包时延模型。Cao等^[8]针对虚拟网服务提供中的资源利用率问题,提出了一种动态VNF的映射和调度方法。Pei等^[9]针对云系统地理位置分散的特点,对动态VNF放置以及SFC的映射问题进行了研究。Abujoda等^[10]提出了一个分布式的SFC映射框架,使不同提供商既能够合作完成映射,又能够维持各自的隐私和自治。Hu等^[11]从网络安全角度出发,通过SFC的柔性组合,构建安全保证的端到端路径。Fu等^[12]针对动态、复杂的物联网环境,提出一种基于深度学习方法的SFC映射机制。Sun等^[13]针对能量感知的在线SFC映射方法展开了研究。

然而,上述研究均未涉及中间虚拟化层的构建细节。本文尝试对NFV环境下的虚拟化层构建方法进行研究,探究面向业务感知的节点集合构建方法和高性能低开销的链路集合构建方法。

收稿日期:2020-11-04;**修订日期:**2020-12-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61772173);河南省博士后科研资助项目(001703069);河南工业大学高层次人才科研启动基金项目(2017BS013);省属高校基本科研业务费专项资金(2017QNJH01)

作者简介:马 丁(1978—),男,河南郑州人,河南工业大学讲师,博士,主要从事网络功能虚拟化技术研究,E-mail: mardingzz@163.com。

并通过分层图算法对所构建的虚拟化层的服务提供能力进行了模拟仿真。

1 问题模型与描述

1.1 虚拟化层

网络拓扑的抽象对于有效地进行 SFC 映射是至关重要的^[10]。例如,网络功能提供商(network function provider, NFP)的信息发布策略是不同的:互联网服务提供商(internet service provider, ISP)通常发布简化的 PoP (point of presence) 级别的拓扑^[14];云服务提供商(如亚马逊)可以跨越不同区域广告其所能够提供的资源。对网络拓扑的抽象可以隐藏 NFPs 认为是机密的信息。

虚拟化层(virtualization layer, VL)是对底层物理网络拓扑的抽象,是介于物理网络与 SFC 请求的业务类型进行感知,对网络拓扑进行抽象,构建业务一致性视图,隐藏业务无关细节,隐藏 NFPs 的隐私信息。

SFC 请求在虚拟化层进行映射的过程分为两个阶段,如图 1 所示,其中,彩色的椭圆表示 NFP 部署的 VNF,白色圆圈表示 PoP。

(1)分析 SFC 请求的业务类型,选择匹配该类业务的 VL;

(2)根据 SFC 请求,选择 SFC 映射算法在 VL 上进行 VNF 和逻辑链路的映射,构建源端系统到目的端系统的服务路径,如图 1 中的红色箭头线段序列所示。

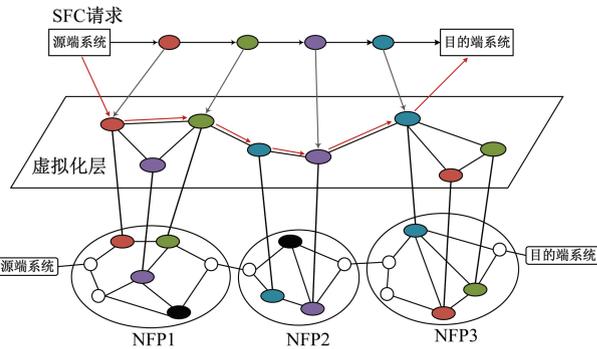


图 1 基于虚拟化层的 SFC 映射

Figure 1 Virtualization layer based SFC mapping

1.2 问题描述

1.2.1 物理网络

物理网络拓扑可以用带权无向图表示,标记为 $G=(N, L)$,其中 N 和 L 分别表示物理网络节点和链路的集合。VNFI 可以部署在物理网络的

任意功能节点上。功能节点 $n(n \in N)$ 的 CPU 容量(CPU capacity) 标记为 $C(n)$;该节点上部署的 VNFI 集合标记为 $S(n)=\{S_k|节点 n 部署有 VNFI S_k\}$,如果 $S(n) \neq \emptyset$,该节点为功能节点,否则为交换节点,只进行数据包的转发。物理链路 $l(l \in L)$ 的带宽标记为 $B(l)$ 。 \mathcal{P} 表示物理网络无环路径的集合, $n_i, n_j \in N$ 之间的无环路径集合标记为 $\mathcal{P}(n_i, n_j)$, $P \in \mathcal{P}$ 表示物理网络中的一条无环路径, $H(P)$ 表示路径 P 的跳数(hop count),即长度。

1.2.2 服务功能链请求

服务功能链请求(service function chain request, SFCR)可以使用带权有向图表示,标记为 $G^R=(N^R, L^R)$,其中, N^R 和 L^R 分别表示逻辑节点和逻辑链路的集合。逻辑节点 $n^R(n^R \in N^R)$ 的 VNF 需求标记为 $S(n^R)$,CPU 资源需求标记为 $\mu(S(n^R))$,逻辑链路 $l^R(l^R \in L^R)$ 的带宽需求标记为 $\mu(l^R)$ 。

1.2.3 虚拟化层

VL 的拓扑也可以用带权无向图表示,标记为 $G^V=(N^V, L^V)$,其中 N^V 和 L^V 分别表示 VL 的节点集合和链路集合。

VL 的构建问题定义:根据 SFCR 中的 VNF 需求,建立从 G^V 到 G 的子集 $G_f=(N_f, \mathcal{P}_f)$ 的映射:

$$M: G^V(N^V, L^V) \mapsto G_f=(N_f, \mathcal{P}_f), N_f \subset N, \mathcal{P}_f \subset \mathcal{P}^s. \quad (1)$$

整个构建过程包括节点集合 N^V 的构建与链路集合 L^V 的构建。

(1)节点集合构建。首先需要分析业务的 VNF 需求,将已部署相应 VNF 的功能节点集合 N_f 作为 VL 的候选节点集合,建立物理功能节点与 VL 节点之间的映射:

$$M_N: N^V \mapsto N_f, \forall n^v, m^v \in N^V, M_N(n^v) \in N_f. \quad (2)$$

如果 $M'_N(n^v)=M'_N(m^v)$, 当且仅当 $n^v=m^v$, 即不同的 VL 节点不能由相同的功能节点映射。

同时建立 N^V 与 N_f 之间的逆映射:

$$M'_N: N_f \mapsto N^V, \forall n, m \in N_f, M'_N(n) \in N^V. \quad (3)$$

如果 $M'_N(n)=M'_N(m)$, 当且仅当 $n=m$, 即每个功能节点只能托管一个 VL 节点,即 N^V 和 N_f 是一一对一映射。

映射完成之后,VL 的节点集合构建完成。

(2)链路集合构建。VL 节点之间的链路构建可以采用节点间最短路径的构建方法,即计算 $\forall n^v, m^v \in N^V, M_N(n^v)$ 与 $M_N(m^v)$ 之间的最短路径,然后再将 VL 链路 (n^v, m^v) 映射其上,建

立链路映射 M_L :

$$M_L(n^V, m^V) \subseteq \mathcal{P}_i(M_N(n^V), M_N(m^V)). \quad (4)$$

映射完成之后, VL 的链路集合构建完成。

(3) 构建开销。VL 的构建开销 $C(G^V)$ 包括构建节点集合 N^V 所需要的 CPU 资源开销和构建链路集合所需要的带宽资源开销, 定义如下:

$$C(G^V) = \sum_{n^V \in N^V} C(n^V) + \sum_{l^V \in L^V} H(P^S) \cdot B(l^V). \quad (5)$$

$P^S \in M_L(L^V)$

式中: $C(n^V)$ 是映射 VL 节点所分配的 CPU 资源; $B(l^V)$ 是映射 VL 链路所分配的带宽资源。

VL 构建的目标是在保证 SFC 承载能力的基础上最小化构建开销 $C(G^V)$ 。

2 虚拟化层构建算法

在 1.2 节描述问题的同时给出了构建节点集合与链路集合的基本思路。首先在节点映射时考虑了 SFCR 的 VNF 需求, 因此映射完毕后所有与该类业务无关的 VNF 不再出现在 VL 中, 实现了业务感知。但是, 在链路映射后构建出的 VL 拓扑是完全图, 冗余链路过多, 由式(5)可知, 链路数量越多, 带宽开销越大, 因此必须要进行冗余链路的识别与消除。而链路数量与 VL 的服务提供能力是成正比的, 因此在进一步优化链路数量、减少带宽开销的同时, 需要保证 SFC 请求的映射性能。

2.1 定义冗余链路

在该链路所映射的物理路径中, 至少存在一条物理链路, 使该物理链路的两个顶点逆映射后为 VL 的已有顶点。

$\forall n^V, m^V \in N^V$, $M_N(n^V)$ 与 $M_N(m^V)$ 之间的最短路径记为 $P_{\text{shortest}}(M_N(n^V), M_N(m^V))$, (n^V, m^V) 为冗余链路, 需要同时满足条件:

- (1) $H(P_{\text{shortest}}(M_N(n^V), M_N(m^V))) > 1$;
- (2) $\forall (n_{i_j}, n_{i_{j+1}}) \in P_{\text{shortest}}(M_N(n^V), M_N(m^V))$,

$\exists n_{i_x}, n_{i_{x+1}}, M'_N(n_{i_x}), M'_N(n_{i_{x+1}}) \in N^V$ 。

2.2 面向业务感知和可调节跳数的构建算法

本文提出一种可调节跳数的非冗余链路映射方法(non-redundant link mapping method with adjustable hop count, NRLMAH)。首先, 在映射链路时, 选择相应功能节点之间有效路径长度在跳数约束内且无冗余的链路。其次, 由低至高调整候选路径的跳数约束, 随着跳数增加, VL 的链路数量增加, 服务提供能力增加, 开销也随之增加, 当跳数约束达到阈值时, 继续增加跳数, 开销继续

增加, 但服务提供能力趋于稳定。

整合面向业务感知的节点映射方法和 NRLMAH, 提出一种面向业务感知和可调节跳数的 VL 构建算法(visualization layer constructing algorithm based on VNF-aware and adjustable hop count, VLC-VAAH)如下。

算法 1 VLC-VAAH。

输入: 物理网络拓扑 $G = (N, L)$, SFCR $G^R = (N^R, L^R)$, 跳数约束 hop ;

输出: VL 拓扑 $G^V = (N^V, L^V)$, 映射结果 M_N 和 M_L 。

① **for all** $n \in N$ **do**

② **if** 节点 n 部署有 SFCR 所需的 VNF1

③ 创建节点 $n^V \in N^V$;

④ 创建节点 n^V 与节点 n 之间的映射 $M_N(n^V)$ 及逆映射 $M'_N(n)$;

⑤ **else if**

⑥ 将 n 纳入非候选功能节点集合 Q ;

⑦ **end if**

⑧ **end for** // 节点映射结束

⑨ **for all** $n^V \in N^V$

⑩ 以 $M_N(n^V)$ 为根, 不断添加节点 n , 建立高度为 $hop+1$ 的 BFS 树 $T(M_N(n^V))$ 。为确保无冗余链路, 需进行以下处理: 当 $n \notin Q$ & $M'_N(n) \neq n^V$, 将 n 添加为树的叶子节点; 如果 $n \in Q$, 则以 n 为子树的根继续生成 BFS 树;

⑪ **for all** 叶子节点 $n_{\text{leaf}} \in T(M_N(n^V))$

⑫ **if** $n_{\text{leaf}} \notin Q$

⑬ 计算从根节点 $M_N(n^V)$ 到 n_{leaf} 的路径 $P(M_N(n^V), n_{\text{leaf}})$;

⑭ **if** $(n^V, M'_N(n_{\text{leaf}})) \notin L^V$

⑮ 创建链路 $(n^V, M'_N(n_{\text{leaf}})) \in L^V$, 创建映射:

$$M_L(n^V, M'_N(n_{\text{leaf}})) = \{P(M_N(n^V), n_{\text{leaf}})\};$$

⑯ **else**

⑰ 将 $P(M_N(n^V), n_{\text{leaf}})$ 与现有路径比较;

⑱ **if** 比现有路径的长度短或带宽高(路径长度相同时)

替换已有映射;

⑲ **end if**

⑳ **end for**

㉑

- ② **end if**
- ③ **end for**
- ④ **end for** //链路映射结束

在算法 VLC-VAAH 中,VL 的节点数量为 $|N^V|$,在物理网络构建 BFS 树的时间复杂度为 $O(|N|+|L|)$,因此 VLC-VAAH 算法的时间复杂度为 $O(|N^V|(|N|+|L|))$ 。

3 实验及分析

本文使用所提出的虚拟化层构建算法建立跳数约束为 2、3、4、5 的虚拟服务层,并在其上分别运行分层图算法^[15]映射 SFC 请求,满足最小化时延的需求。通过服务请求接受率、收益、开销、收益开销比^[16]等性能指标对虚拟层服务提供能力进行仿真实验研究。

3.1 仿真环境设置

物理网络拓扑利用 GT-ITM 随机生成,包含 50 个节点和约 123 条链路。节点 CPU 容量和链路带宽容量在 $[2\ 500, 5\ 000]$ 区间均匀分布,每个节点可以部署 1~5 个 VNF。根据文献[5],将 VNF 的执行时延和链路传输时延の設定在 $[1, 10]$ 区间,VL 节点与链路的资源分配系数设定为 0.2,因此 VL 的节点 CPU 容量和链路带宽容量在 $[50, 100]$ 区间均匀分布。

SFC 请求需求的 VNF 数量设定为 3,类型随机选择,其中每个 VNF 的计算资源需求在 $[1, 25]$ 区间均匀分布,VNF 之间的链路带宽需求在 $[1, 50]$ 区间均匀分布。SFC 请求的到达时间服从泊松分布,平均 100 个时间单位内到达 5 个,每个请求的服务时间服从平均 1 000 个时间单位的指数分布。每次仿真的时间约为 50 000 个时间单位,从 0 开始每间隔 2 000 个时间单位采集一次数据。

3.2 仿真结果分析

图 2 表明,当跳数约束等于 3、4、5 时,平均请求接受率较为接近,但与跳数约束为 2 相比,至少提高了 15%。图 3 和图 4 表明,当跳数约束等于 3、4、5 时,长期平均收益和开销也非常接近,比跳数为 2 时分别至少提高 33% 和 19%。进一步从图 5 中可以看出,与跳数为 2 时相比,跳数等于 3、4、5 时的长期收益开销比分别提高了 12%、13.5% 和 15.5%。分析其原因,当跳数为 2 时,链路数量过少,难以建立有效的链路映射,请求接受率较低,收益开销比较低。当跳数约束提高为 3 时,链路数量增多,可映射路径选择增多,服务提

供能力提升,各项指标均得到大幅提升。当继续增加跳数约束值时,VL 构建开销持续增加,与跳数为 3 时相比,跳数为 4 和 5 的构建开销分别增加约 27% 和 52%,如表 1 所示。然而性能提升却趋于平缓,例如,与跳数为 3 时相比,跳数为 4 和 5 的平均请求接受率,分别增加约 0.7% 和 1.2%,其他指标的增加与之类似。仿真结果表明,VLC-VAAH 算法是有效的,能够在特定规模的物理网络上构建性价比最优的 VL。

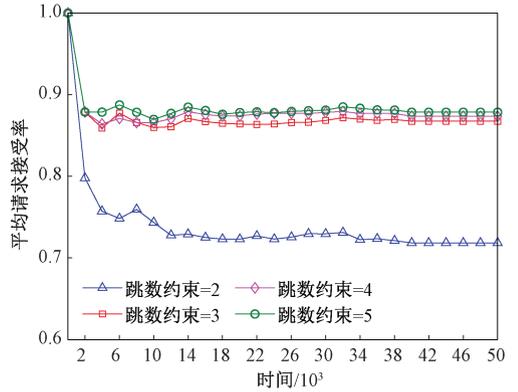


图 2 SFC 平均请求接受率比较

Figure 2 Comparison of average request acceptance ratio

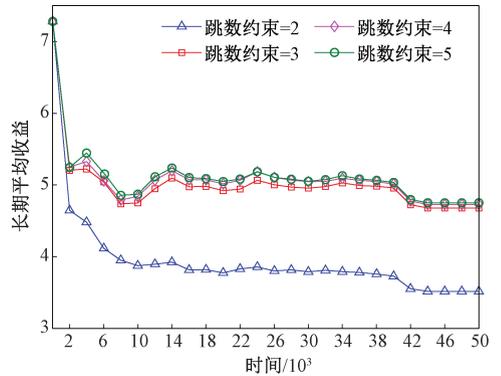


图 3 长期平均收益比较

Figure 3 Comparison of long-term average revenue

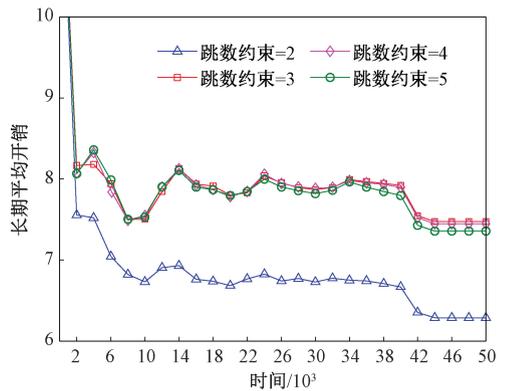


图 4 长期平均开销比较

Figure 4 Comparison of long-term average cost

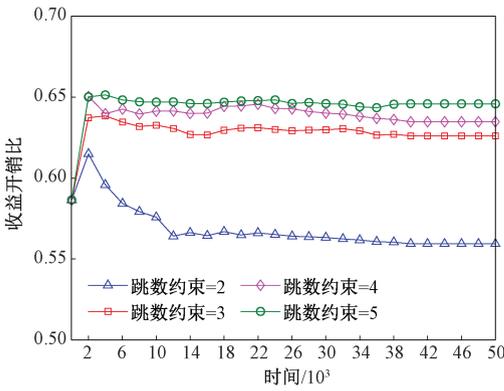


图5 长期平均收益开销比比较

Figure 5 Comparison of long-term revenue/cost ratio

表1 VL构建开销对比

Table 1 Comparison of cost of VL

跳数约束	构建开销数
2	15 404
3	37 092
4	47 176
5	56 242

4 结论

(1)在物理网络与SFC请求之间构建VL可以生成业务一致性视图,屏蔽底层无关细节,隐藏NFPs的隐私信息。

(2)可调节跳数的非冗余链路映射方法能够有效地消除VL上的冗余链路,同时能够通过跳数的调节有效地均衡VL的构建开销与服务提供能力。

(3)所提出VLC-VAAH算法是有效的,能够在特定规模的物理网络上构建性价比最优的VL,所构建的VL能够有效地进行SFC映射。

(4)如何针对5G网络的不同应用场景构建特定的VL,并进行跨域的资源编排是下一阶段研究的问题。

参考文献:

- [1] MIJUMBI R, SERRAT J, GORRICO J L, et al. Network function virtualization: state-of-the-art and research challenges[J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2016, 18(1): 236-262.
- [2] YI B, WANG X W, LI K Q, et al. A comprehensive survey of network function virtualization[J]. Computer networks, 2018, 133: 212-262.
- [3] 周伟林, 杨荒, 徐明伟. 网络功能虚拟化技术研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(4): 675-688.
- [4] 王进文, 张晓丽, 李琦, 等. 网络功能虚拟化技术研究进展[J]. 计算机学报, 2019, 42(2): 185-206.
- [5] SAHHAF S, TAVERNIER W, ROST M, et al. Network service chaining with optimized network function embedding supporting service decompositions[J]. Computer networks, 2015, 93: 492-505.
- [6] 胡宇翔, 范宏伟, 兰巨龙, 等. 一种支持硬件加速的虚拟网络功能部署模型[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(8): 1893-1901.
- [7] YE Q, ZHUANG W H, LI X, et al. End-to-end delay modeling for embedded VNF chains in 5G core networks[J]. IEEE internet of things journal, 2019, 6(1): 692-704.
- [8] CAO H T, ZHU H B, YANG L X. Notice of violation of IEEE publication principles: dynamic embedding and scheduling of service function chains for future SDN/NFV-enabled networks[J]. IEEE access, 2019, 7: 39721-39730.
- [9] PEI J N, HONG P L, XUE K P, et al. Efficiently embedding service function chains with dynamic virtual network function placement in geo-distributed cloud system[J]. IEEE transactions on parallel and distributed systems, 2019, 30(10): 2179-2192.
- [10] ABUJODA A, PAPADIMITRIOU P. DistNSE: distributed network service embedding across multiple providers[C]//2016 8th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS). Piscataway: IEEE, 2016: 1-8.
- [11] HU Y X, LI Y F, ZING C, et al. Providing customized security based on network function composition and reconfiguration[J]. China communications, 2016, 13(增刊1): 177-189.
- [12] FU X Y, YU F R, WANG J Y, et al. Dynamic service function chain embedding for NFV-enabled IoT: a deep reinforcement learning approach[J]. IEEE transactions on wireless communications, 2020, 19(1): 507-519.
- [13] SUN G, ZHOU R, SUN J, et al. Energy-efficient provisioning for service function chains to support delay-sensitive applications in network function virtualization[J]. IEEE internet of things journal, 2020, 7(7): 6116-6131.
- [14] SPRING N, MAHAJAN R, WETHERALL D, et al. Measuring ISP topologies with rocketfuel[J]. IEEE/ACM transactions on networking, 2004, 12(1): 2-16.
- [15] HUANG X, GANAPATHY S, WOLF T. Evaluating algorithms for composable service placement in computer networks[C]//2009 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE, 2009: 1-6.
- [16] 马丁, 庄雷, 兰巨龙. 一种求解服务链映射问题的离散粒子群优化算法[J]. 小型微型计算机系统, 2017, 38(8): 1811-1817.

A VNF-aware Virtualization Layer Constructing Algorithm Based on Adjustable Hop Count

MA Ding^{1,2}, FEI Xuan¹, MU Xiaowu²

(1.School of Artificial Intelligence and Big Data, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2.School of Mathematics and Statistics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In network function virtualization environment, topology abstractions are crucial to create unified topology view and conceal underlying details. To map service function chain effectively, a VNF-aware virtualization layer constructing algorithm based on adjustable hop count is proposed considering network topology abstraction. Firstly, virtual nodes mapping is implemented via analyzing the virtual network functions required in service function chain request. Secondly, virtual links mapping is implemented via proposed non-redundant link mapping method with adjustable hop count. To evaluate the performance under different hop count, the layered graph algorithm is used as the service function chain mapping algorithm which is executed over the constructed virtualization layer. The experimental results show that: when the value of hop count equals 3, compared to the situation in which the value of hop count equals 2, the overall performance is improved significantly; when the value of hop count increased to 4 and 5, compared to the situation in which the value of hop count equals 3, the cost of constructing virtualization layer increases by 27% and 52%, respectively. However, the overall performance improves slightly. Finally, simulation experiments show that the proposed algorithm can effectively map service function chain requests and determine the optimal virtualization layer in terms of performance and cost for the specific physical network.

Key words: network function virtualization; virtual network function; virtualization layer; service function chain; hop constraint

(上接第 36 页)

Research on Improved Local Path Planning of Artificial Potential Field Based on Active Safety

ZHANG Sanchuan, MING Zhu

(School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Local path planning is the key to the active safety of intelligent driving vehicles. In order to solve the theoretical problems of local minimum and unreachable target existing in the traditional artificial potential field method, in this paper the distance between the experimental vehicle and the obstacle is introduced as the repulsive force regulator based on the measurement function of the azimuth (θ_0) of the obstacle by millimeter-wave radar, which makes sure that the repulsive forces near the target point are not too large. At the same time, the additional force of target gravity is introduced with direction angle $\theta (>\theta_0)$ and controlled by target distance $k \cdot S(M, M_g)$, which makes experimental vehicle break away from the minimum point. The numerical simulation results of MATLAB show that: when the gain coefficient of the additional force (k) is between 5~7, a stable and safe local planning path can be obtained, and no minimum point appears. The variation of the peak value of repulsive force and resultant force in the improved artificial potential field decreases exponentially with the increase of the distance between the obstacle and the starting point of path planning, the repulsive force of the experimental vehicle near the target point attenuates to 0, and the target is reachable; Compared with the traditional artificial potential field, the single-step calculation time is slightly increased, but there is no oscillation interval for the planned path. The simulation time is 0.26 s, and the timelessness is basically the same. The safety index is increased from 0.018 8 of the traditional artificial potential field method to 0.305 0, which greatly improves the safety of local path planning.

Key words: intelligent network vehicle; local path planning; improved artificial potential field; local minimum; additional force