

引用本文: 韩禄, 袁俊岭, 申浩阳. 一种用于 IDC-EON 优化 VNF-SC 部署的联合多段路径算法[J]. 光通信技术, 2022, 46(5): 34–39.

一种用于 IDC-EON 优化 VNF-SC 部署的联合多段路径算法

韩禄, 袁俊岭*, 申浩阳

(郑州轻工业大学 计算机与通信工程学院, 郑州 450000)

摘要: 在虚拟网络功能服务链(VNF-SC)中, 当用户申请服务请求, 网络运营商为请求分配频谱和互联网技术(IT)资源后, 由于业务请求、释放资源时间均不相同, 经常出现频谱资源利用率低、产生频谱碎片和阻塞后续 VNF-SC 请求的情况。提出了一种用于数据中心间的弹性光网络(IDC-EON)优化 VNF-SC 部署的联合多段路径算法, 该算法以数据中心为边界, 将每个端到端路径划分为多个路径段, 考虑频谱资源开销和利用率对每个路径段的影响, 选择目标函数值最小的端到端路径部署 VNF-SC。仿真结果表明, 所提出的算法比现有算法阻塞率更低。

关键词: 光通信; 网络功能虚拟化; 服务链; 数据中心; 联合多段路径算法

中图分类号: TN91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)05-0034-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.05.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Joint multi-segments path algorithm for IDC-EON optimization of VNF-SC deployment

HAN Lu, YUAN Junling*, SHEN Haoyang

(College of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In the virtual network functions service chain(VNF-SC), When a user applies for a service request and the network operator allocates spectrum and Internet technology(IT) resources for the request, due to the different service requests and resource release times, the spectrum resource utilization is often low, spectrum fragments are generated, and subsequent VNF-SC requests are blocked. A joint multi segment path algorithm for optimizing VNF-SC deployment in elastic optical network (IDC EON) between data centers is proposed. The algorithm divides each end-to-end path into multiple path segments with the data center as the boundary, and considers the impact of spectrum resource overhead and utilization on each path segment, selects the end-to-end path with the smallest objective function value to deploy the VNF-SC. The simulation results show that the proposed algorithm has a lower blocking probability than existing algorithms.

Key words: optical communication, network function virtualization, service chain, data center, joint multi-segments path algorithm

0 引言

随着云计算、第五代(5G)移动通信和虚拟化等技术的快速发展, 数据量呈指数级增加, 网络功能虚拟

化(NFV)技术和数据中心(DC)越来越受到网络运营商的青睐^[1-2]。虚拟网络功能(VNF)通常以规定顺序^[5]部署在高性能 DC 服务器上^[4], 用户请求服务时, 不同类型的 VNF 单元通过虚拟路径连接。这种用户请求被称为虚拟网络功能服务链(VNF-SC)^[5-11]。

文献[5]针对 DC 资源不受限场景中基于最长公共子序列(LCS)概念, 最大限度重用已部署的 VNF 策略, 提出了采用 LCS 算法联合分配频谱和信息技术(IT)资源, 并针对路由和频谱分配(RSA)问题依据最小化最大频片索引(MFSI), 选择合适的端到端路径。文献[12]将服务请求方式分为线性和多分支数据密集型 2 种 VNF-SC 请求, 针对前者以最小化服务完成时

收稿日期: 2021-01-20。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61971380)资助; 河南省科技攻关项目(212102210171, 212102210089)资助。

作者简介: 韩禄(1995—), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 现就读于郑州轻工业大学计算机与通信工程学院计算机科学与技术专业, 主要研究方向为光网络技术, 并针对网络功能虚拟化、虚拟网络功能服务链部署问题进行了研究。

* 通信作者: 袁俊岭(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为光网络技术、无线网技术。



间为目标提出了基于动态规划的 VNF-SC 部署和业务调度算法,针对后者以最小化平均服务完成时间为目标进行优化部署。这种算法和优化部署方式都能够降低数据密集型 VNF-SC 请求的平均服务完成时间。文献[13]针对优化传统组播服务链(MSC),提出了合并组播服务链(MSC-M)模型;通过最小化 VNF 部署和合并链路的花费,设计了一种启发式算法来确定 VNFs 的部署和路由信息。与 MSC 模型相比, MSC-M 模型降低了服务链部署的总花费和完成时间。文献[14]在针对 DC 间 VNF-SC 部署问题的基础上额外考虑了网络中 DC 的数量和位置问题,提出了一个双层规划模型,并基于该模型设计了一种高效的双层混合模因算法(BiHMA),降低了网络中 DC 数量,确定了 VNF-SC 请求的最佳部署路径信息。文献[15]提出了一种高效的 VNF 过度部署和迁移算法,这种算法能够在满足用户请求资源的前提下提高网络中的资源利用率。文献[16]提出了一种在边缘网络场景下的 VNF 需求预测方法,通过将支持向量回归(SVR)和门控循环单元(GRU)神经网络模型组合,达到降低预测误差提高预测准确率的效果。文献[17]针对频谱资源和 DC 处理能力有限的问题提出了延迟和容量感知的 VNF 部署算法(H-LCA),将 VNF 部署过程中的延迟和容量感知与路由策略相结合,提高了 VNF 部署效率,降低了阻塞率。

在 DC 中 IT 资源不受限场景下,上述算法虽然最大化重用了网络中已部署的 VNF,但是未考虑如何合理分配光路上的频谱资源。随着业务不断请求与释放,光路上将会产生大量频谱碎片,导致业务阻塞率增加。因此,本文在相同场景下提出一种用于 DC 间的弹性光网络(IDC-EON)优化 VNF-SC 部署的联合多段路径(JMP)算法。

1 网络模型与问题描述

1.1 网络模型

本文用有向图 $G(V, E)$ 表示 IDC-EON, V 表示节点集, E 表示链路集; $E_p = \{l_{ij} | v_i, v_j \in V\}$ 表示在路径 p 上的链路集, l_{ij} 表示路径 p 上节点 v_i 和节点 v_j 之间的链路; 链路上的频片集 $F_s = \{p_1, p_2, \dots, p_f\}$, f 表示频片总数; DC 节点集 $D = \{D_1, D_2, \dots, D_d\}$, $d(d < V)$ 表示 DC 数量,即每个 DC 必须部署在一个节点上,但某些节点可能没有 DC;第 i 个 VNF-SC 请求 $R_i = \{s_i, d_i, B_i, SC_i\}$, 其中, s_i 和 d_i 分别表示源节点和目的节点, B_i 表示 VNF-

SC 请求频片数(路径长度不同,导致不同路径请求的频片数也不同); B 表示 VNF-SC 请求频谱块; SC_i 表示 VNF-SC 请求的 VNF 类型。

1.2 路由、调制和频谱分配(RMSA)问题

为了进一步提高网络整体性能,本文基于 RSA 问题考虑了另一个因素:根据不同路径长度选择调制格式。将 RSA 问题转变为 RMSA 问题,目的是为不同长度的端到端路径选择合适的调制等级来提高频谱利用率,并确保传输信号的质量。文献[18]首次提出了距离自适应频谱分配方法,为不同长度的路径选择调制格式(BPSK、QPSK、8QAM、16QAM),即较短路径采用相对较高的调制格式可以有效提高频谱利用率;相反,较长路径采用较低的调制格式可以减少信号失真。假设链路上频片带宽是 C_{slice} ,第 k 条 VNF-SC 请求的数据传输容量是 C_k ,调制等级是 u_k ,则 VNF-SC 请求所需的最小频片数 C_{request} 计算公式为

$$C_{\text{request}} = \left\lceil \frac{C_k}{C_{\text{slice}} \cdot u_k} \right\rceil + S_g \quad (1)$$

其中, S_g 表示相邻 VNF-SC 请求之间保护带宽的数量, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。

2 JMP 算法

当 DC 中的 IT 资源不受限时,提高频谱资源利用率是 VNF-SC 部署考虑的重点。因此,本文提出了 JMP 算法。JMP 算法将端到端的路径以 DC 为边界划分为多段路径,根据不同路径长度选择相应的频谱资源开销和频谱资源利用率,为其分配合适的频谱资源;通过最小化目标函数,选择合适的端到端路径来部署 VNF-SC。

2.1 频谱资源开销

在 IDC-EON 中,高效的业务请求路径可以降低网络运营商频谱资源开销。本文的频谱资源开销定义如下:假设第 k 条 VNF-SC 请求通过式(1)计算至少需要 Y 个频片,并且端到端路径包含 N 条链路,则端到端路径上频谱资源开销 K 的计算公式为

$$K = Y \times N \quad (2)$$

由于网络中相同节点(包括 DC 节点)之间不需要路径连接,因此相同节点之间无频谱资源开销,即 $K=0$ 。

2.2 频谱资源利用率

为了确保业务请求成功,传输路径需要提供至少能够满足当前请求的频片数。若路径上空闲频片越集中,则成功建立 VNF-SC 的可能性越大。本文将 2 个

韩祿,袁俊岭,申浩阳;一种用于 IDC-EON 优化 VNF-SC 部署的联合多段路径算法

连续的空闲频片看成空闲频谱块,并采用邻接度差值(第 i 个 VNF-SC 占用频谱块前后链路或路径邻接度差值)来衡量频谱资源利用率。

2.2.1 链路邻接度

假设链路 e 上空闲频片数为 I_e , 空闲频谱块数为 b_e , 则链路邻接度 A_e 可以表示为

$$A_e = \frac{b_e}{I_e - k} \quad (3)$$

在实际部署期间,由于不同端到端路径的长度不同,因此采用的调制格式和服务请求的频片数量也不同。 $M=1,2,3,4$ 表示不同调制格式(BPSK、QPSK、8QAM、16QAM)下空闲频片与空闲频谱块包含频片数(2、3、4、5)之间的关系。另外,链路频片状态存在 2 种极端情况:如果所有频片是空闲的,那么空闲频谱块数 $b_e = I_e - k$, 链路邻接度 $A_e = (I_e - k) / (I_e - k) = 1$; 如果没有空闲频片或所有空闲频片不连续, 那么空闲频谱块数为 0, 链路邻接度 $A_e = 0 / (I_e - k) = 0$ 。因此,链路邻接度范围在 $[0, 1]$ 之间。链路 e 上第 i 个频片的状态用 $S_e[i]$ 表示为

$$S_e[i] = \begin{cases} 0, & \text{链路空闲} \\ 1, & \text{链路忙碌} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $i=0, 1, 2, \dots, f-1$ 。

链路邻接度 A_e 中空闲频片数 I_e 、空闲频谱块数 b_e 的计算式分别如式(5)、式(6)所示。

$$I_e = \sum_{i=0}^{f-1} S_e[i] - k \quad (5)$$

$$b_e = \frac{\sum_{i=k}^{f-1} \sum_{j=0}^k S_e[i-j-1] \times S_e[i-j]}{k} \quad (6)$$

式(6)中,分子的内层求和函数用来判断该频谱块是否为连续空闲频谱块,外层求和函数则用来对连续空闲频谱块进行累加, j 表示在仿真中控制连续空闲频谱块的迭代次数。

2.2.2 路径邻接度

一般地,一条路径至少包含一条链路。路径上第 i 个频片状态由路径上包含所有链路的第 i 个频片状态决定。如果所有链路上第 i 个频片空闲,则路径上第 i 个频片空闲;否则,路径上第 i 个频片被占用。

假设路径 p 上空闲频片数为 I_p , 空闲频谱块数为 b_p , 则路径邻接度 A_p 可表示为

$$A_p = \frac{b_p}{I_p - k} \quad (7)$$

假设路径 p 上的链路集为 $E_p = \{l_j | v_i, v_j \in V_p\}$, 路径 p 上第 i 个频片的状态 $S_p[i]$ ($i=0, 1, 2, \dots, f-1$) 表示为

$$S_p[i] = \prod_{e \in E_p} S_e[i] \quad (8)$$

式(7)中路径邻接度 A_p 的空闲频片数 I_p 、空闲频谱块数 b_p 的计算式分别如式(9)、式(10)所示。

$$I_p = \sum_{i=0}^{f-1} S_e[i] - k = \sum_{i=0}^{f-1} \prod_{e \in E_p} S_e[i] - k \quad (9)$$

$$b_p = \frac{\sum_{i=k}^{f-1} \sum_{j=0}^k S_p[i-j-1] \times S_p[i-j]}{k} = \frac{\sum_{i=k}^{f-1} \sum_{j=0}^k S_e[i-j-1] \times \prod_{e \in E_p} S_e[i-j-1] \times \prod_{e \in E_p} S_e[i-j]}{k} \quad (10)$$

由式(8)可知,如果路径上第 i 个频片空闲,则该路径所包含的所有链路上第 i 个频片空闲。因此,式(9)中求和函数计算路径上所有链路同时空闲的频片数;式(10)中,分子的内层求和函数用来判断该频谱块在路径包含所有链路上是否为连续空闲频谱块,外层求和函数则用来对该路径上连续空闲频谱块进行累加。

2.2.3 链路、路径邻接度降低

当空闲频谱块被 VNF-SC 请求占用时,空闲频谱资源将减少。然而,由于业务请求到达和释放的时间不同,导致满足用户请求的空闲频谱块在路径和链路上分布不均匀。在占用频谱块之后,链路邻接度和路径邻接度的值可能会增加或减少,从而链路邻接度降低(LCR)和路径邻接度降低(PCR)为负增长或正增长。

LCR: 假设 VNF-SC 首次占用频谱块 B 前后的链路邻接度分别为 A_e 与 $A_e(B)$, 则占用频谱块 B 之后, LCR 的计算式 $A_{LCR}(B)$ 为

$$A_{LCR}(B) = A_e - A_e(B) \quad (11)$$

链路 e 首次占用频谱块表示为 $B = [i_1(B), i_2(B)]$, $i_1(B)$ 和 $i_2(B)$ 分别是开始和结束索引,则占用频谱块 B 之后的链路邻接度计算式为

$$A_e(B) = \frac{b_e - [i_2(B) - i_1(B)] - [\varphi_{e,1}(B) + \varphi_{e,2}(B)]}{I_e - [i_2(B) - i_1(B) + 1] - k} \quad (12)$$

其中, $\varphi_{e,1}(B)$ 和 $\varphi_{e,2}(B)$ 分别表示校验频谱块起始索引与 $i_1(B) - k$ 和 $i_2(B) + k$ 能否形成空闲频谱块的布尔变量。如果频谱块开始索引 $i_1(B) \neq k-1$, 且在占用频谱块 B 之前, $i_1(B)$ 和 $i_1(B) - k$ 在链路 e 上形成空闲频谱块时, $\varphi_{e,1}(B) = 1$, 否则 $\varphi_{e,1}(B) = 0$; 相同地, 如果频谱块结束索引 $i_2(B) \neq F-k$, 且在占用频谱块 B 之前, $i_2(B)$ 和 $i_2(B) + k$ 在链路 e 上形成空闲频谱块时, $\varphi_{e,2}(B) = 1$, 否则 $\varphi_{e,2}(B) = 0$ 。

PCR: 假设 VNF-SC 首次占用频谱块 B 前后的路径邻接度分别为 A_p 与 $A_p(B)$, 则占用频谱块 B 之后, PCR 的计算式 $A_{PCR}(B)$ 为

$$A_{\text{PCR}_p}(B) = A_p - A_p(B) \quad (13)$$

路径 p 首次占用频谱块为 $B = [i_1(B), i_2(B)]$, I_p 和 b_p 分别是空闲频片和频谱块的数量, 则占用频谱块 B 之后的路径邻接度为

$$A_p(B) = \frac{b_p - [i_2(B) - i_1(B)] - [\varphi_{p,1}(B) + \varphi_{p,2}(B)]}{I_p - [i_2(B) - i_1(B) + 1] - k} \quad (14)$$

其中, $\varphi_{p,1}(B)$ 和 $\varphi_{p,2}(B)$ 与式(12)中定义的 $\varphi_{e,1}(B)$ 和 $\varphi_{e,2}(B)$ 有相同的含义, 分别表示校验频谱块起始索引与 $i_1(B) - k$ 和 $i_2(B) + k$ 能否形成空闲频谱块的布尔变量。两者的区别是 $\varphi_{e,1}(B)$ 和 $\varphi_{e,2}(B)$ 为链路参数, $\varphi_{p,1}(B)$ 和 $\varphi_{p,2}(B)$ 为路径参数。

2.3 目标函数

本文针对不同路径段, 联合考虑频谱资源开销和利用率 2 个指标, 计算业务请求在不同路径段上的频谱资源开销与频谱资源利用率乘积并求和, 获得不同端到端路径中目标(Objective)函数的最小值 P_0 , 则该条路径就是部署该业务请求的最佳路径。 P_0 的表达式为

$$P_0 = \text{Min} \left[\sum_{i=1}^U K_i \cdot (A_{\text{PCR}_i} + \beta \cdot A_{\text{LCR}_i}) \right] \quad (15)$$

其中, U 表示端到端路径被划分后的路径段数, l 表示不同路径段(源节点至数据中心、数据中心之间、数据中心至目的节点), K_i 表示不同路径段上频谱资源开销, A_{LCR_i} 、 A_{PCR_i} 分别表示不同链路段的 LCR 值、不同路径段的 PCR 值。 β 是一个很小的数(仿真时设置为 0.001), 在选择最优路径时, 用来减少 LCR 在目标函数中的权重。

2.4 算法流程

算法 1 是 JMP 算法在 DC 中 IT 资源不受限场景下的主要算法框架, 算法 2 和算法 3 是嵌入在算法 1 中的某一个过程。

JMP 算法实现过程如算法 1 所示。输入一条 VNF-SC 请求 $R_i = [s_i, d_i, F_i, (vnf_1, vnf_2)]$, 从源节点 s_i 到目的节点 d_i 需求 2 种类型 VNF 的业务请求, F_i 表示每条路径段请求频片数; 输出一条端到端路径 $PATH$ 。

在算法 1 中, 第 1 行初始化频谱资源开销(COST)、LCR 和 PCR、目标函数值 P_0 。当无用户申请时, 光路上的频谱资源都是空闲的, 因此把 PCR 和 LCR 初始值设为 0。第 3 行~第 5 行表示通过算法 2 查找当前路径段是否存在可用的频谱块。第 6 行~第 14 行表示通过式(2)、式(13)计算, 选择目标函数最小的端到端路径来建立 VNF-SC。第 15 行表示返回一条合适的端到端路径 $PATH$ 。

算法 1 JMP 算法

输入: 带有源节点 s , 目的节点 d 、需求频片数和 VNF 类型的一个 VNF-SC 请求 $R_i = [s_i, d_i, F_i, (vnf_1, vnf_2)]$

输出: 一条端到端路径 $PATH$

```

1 初始化  $COST=0$ 、 $A_{\text{PCR}_i}=0$ 、 $A_{\text{LCR}_i}=0$ 、 $P_0=0$ 
2 获得不同路径段的最短路
3 for  $i=0$  to  $(F-1)$  do
4   通过算法 2 查找路径段是否存在可用频谱块
5 end for
6 if 存在可用频谱块 then
7   通过式(2)计算不同路径段的  $COST$ 
8   通过式(13)和算法 3 计算 PCR 和 LCR
9   计算 Objective 并加入  $LIST$ 
10   $PATH = \text{Path\_Segment} (LIST.index (\min (LIST)))$ 
11 else 没有可用频谱块 then
12   VNF-SC 被阻塞
13    $PATH = \text{empty}$ 
14 end if
15 return  $PATH$ 
```

算法 2 查找路径段是否存在可用频谱块

```

1 初始化  $S_p[i] = 1$ 、 $COUNT = 0$ 
2 for each  $e \in E_p$  do
3    $S_p[i] = S_p[i] \cdot S_e[i]$ 
4   if  $S_p[i] = 1$  then
5      $COUNT++$ 
6     if 找到可用频谱块 then
7       return  $COUNT$ 
8     else 没有找到可用频谱块 then
9       return  $NULL$ 
10    end if
11  end if
12 end for
```

算法 3 计算路径段上所有链路的邻接度降低值

```

1 初始化  $A_{\text{LCB}_e} = 0$ 
2 for each  $e \in E_p$  do
3   通过式(11)计算  $A_{\text{LCB}_e}(B)$ 
4    $A_{\text{LCB}_e} = A_{\text{LCB}_e} + A_{\text{LCB}_e}(B)$ 
5 end for
```

3 性能评估

3.1 仿真设置

本文使用 14 节点 NSFNet 网络拓扑(如图 1 所示)和 11 节点 Cost239 网络拓扑(如图 2 所示)来评估

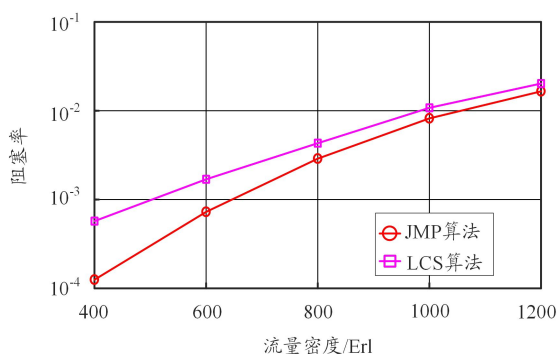


图3 NSFNet 拓扑网络中不同算法在不同流量密度下的阻塞率

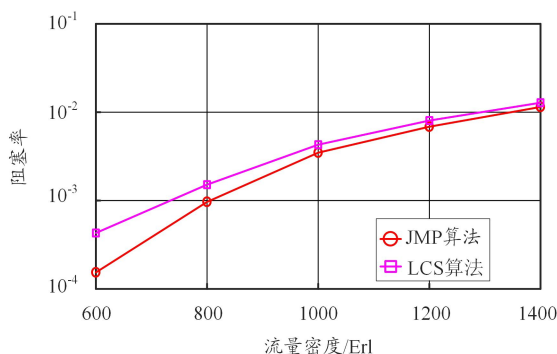


图4 Cost239 拓扑网络中不同算法在不同流量密度下的阻塞率

4 结束语

本文针对 DC 中 IT 资源不受限场景研究 VNF-SC 部署问题,将端到端路径以 DC 为边界划分为多段路径,不同路径段所请求频片数量不同。在此基础上,考虑频谱资源开销和利用率对不同路径段的影响,提出了 JMP 算法。该算法通过最小化目标函数来选择合适的端到端路径部署 VNF-SC。仿真结果表明:与 LCS 算法相比,JMP 算法在 2 种网络拓扑、不同流量密度下阻塞率更低。我们今后将针对 DC 中 IT 资源受限场景研究 VNF-SC 部署问题。

参考文献:

- [1] HERRERA J G, BOTERO J F. Resource allocation in NFV: a comprehensive survey [J]. IEEE Transactions on Network & Service Management, 2017, 13(3): 518–532.
- [2] 王佳. 数据中心网络中服务功能链的部署方案研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2021.
- [3] MIJUMBI R, SERRAT J, GORRICHIO J, et al. Network function virtualization: state-of-the-art and research challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(1): 236–262.

- [4] URGUN Y, KAVAK A. SDN/NFV-based QoS mechanism for cellular core networks [C]// IEEE. Proceedings of 24th Telecommunications Forum Telfor. New York: IEEE, 2016: 1–4.
- [5] 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: A publication of the IEEE Communications Society, 2016, 20(8): 1539–1542.
- [6] ZENG M, FANG W, ZHU Z. Orchestrating tree-type VNF forwarding graphs in inter-DC elastic optical networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(14): 3330–3341.
- [7] MOHARRAMIM, FALLAHPOUR A, BEYRANVAND H, et al. Resource allocation and multicast routing in elastic optical networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(5): 2101–2113.
- [8] 李丹. NFV 环境下服务功能链部署关键技术研究[D]. 郑州:战略支援部队信息工程大学,2018.
- [9] YIN Y, LEI L, PROIETTI R, et al. Software defined elastic optical networks for cloud computing[J]. IEEE Network, 2017(1): 12–18.
- [10] 林飞煊. 弹性光网络环境下 VNF 服务链部署研究[D]. 深圳:深圳大学,2020.
- [11] CHEN X, ZHU Z, PROIETTI R, et al. On incentive-driven VNF service chaining in inter-datacenter elastic optical networks: a hierarchical game-theoretic mechanism [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2018, 16(1): 1–12.
- [12] ERAMO V, MIUCCI E, AMMAR M, et al. An approach for service function chain routing and virtual function network instance migration in network function virtualization architectures [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2017, 25(4): 2008–2025.
- [13] XUAN H, WEI S, FENG Y, et al. Bi-level programming model and algorithm for VNF deployment with data centers placement [J]. IEEE Access, 2019(99): 1–1.
- [14] KHATIRI A, MIRJALILI G. Resource balanced service chaining in NFV-enabled inter-datacenter elastic optical networks[C]//NSS. Proceedings of 12th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST). Hong Kong: NSS, 2020: 168–171.
- [15] FU J, LI G. An efficient vnf deployment scheme for cloud networks[C]//IEEE. Proceedings of 11th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN). New York: IEEE, 2019: 497–502.
- [16] 黄宏程, 鲍晓萌, 胡敏. 边缘网络中一种 VNF 需求预测方法[J]. 电讯技术, 2021, 61(12): 1476–1483.
- [17] HMAITY A, SAVI M, ASKARI L, et al. Latency-and capacity-aware placement of chained virtual network functions in FMC metro networks[J]. Optical Switching and Networking, 2020, 35(1): 100536-1–100536-12.
- [18] KOZICKI B, TAKARA H, SONE Y, et al. Distance-adaptive spectrum allocation in elastic optical path network (SLICE) with bit per symbol adjustment [C]// IEEE. Proceedings of Conference on Optical Fiber Communication, collocated National Fiber Optic Engineers Conference. New York: IEEE, 2010: 1–3.