

关于数据中心间弹性光网络中虚拟网络功能配置的问题建模及优化算法

宣贺君^{1,2*}, 魏士伟³, 郭华平^{1,2}, 郭颂^{1,2}, 冯岩^{1,2}

¹信阳师范学院计算机与信息技术学院, 河南 信阳 464000;

²信阳师范学院河南省教育大数据分析与应用重点实验室, 河南 信阳 464000;

³桂林航天工业学院计算机科学与工程学院, 广西 桂林 541000

摘要 网络功能虚拟化技术能有效地降低网络投资成本,且能够提高网络服务的灵活性。而虚拟网络功能配置是网络功能虚拟化中需要解决的一个关键问题。为解决弹性光网络中虚拟网络功能服务链的选路和虚拟网络功能配置问题,建立了一个以网络中最大占用频段号、网络中占用频段数,以及配置的虚拟网络功能数目最小化为目标的全局约束优化模型。将虚拟网络功能划分为具有依赖关系的虚拟网络功能和不相互依赖的虚拟网络功能两种类型。为高效地求解所建立的模型,设计了具有高效编码方法、交叉算子,以及变异算子的遗传算法。在不同的网络拓扑和参数下进行了仿真实验,实验结果表明所设计的算法能够得到对比算法更优的虚拟网络功能服务链的选路方案和虚拟网络功能配置方案。

关键词 光通信; 弹性光网络; 虚拟网络功能配置; 选路; 全局约束优化

中图分类号 TN915.03; TP393

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.210601

Modeling and Optimization Algorithm for Virtual Network Function Deployment in Inter-Datacenter Elastic Optical Networks

Xuan Hejun^{1,2*}, Wei Shiwei³, Guo Huaping^{1,2}, Guo Song^{1,2}, Feng Yan^{1,2}

¹School of Computer and Information Technology, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000, China;

²Henan Key Laboratory of Analysis and Application of Education Big Data, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000, China;

³School of Computer Science and Engineering, Guilin University of Aerospace Technology, Guilin, Guangxi 541000, China

Abstract The network function virtualization (NFV) technology can significantly reduce the capital expenditure and improve the flexibility of network serves. The virtual network function (VNF) deployment problem is one of the key problems that should be addressed in NFV. A global constrained optimization model is established to minimize the maximum index of the used frequency slots, the number of used frequency slots, and the number of initialized VNFs, thereby solving the issues of routing and VNF deployment for service chains in inter-datacenter elastic optical networks. VNFs are divided into VNFs with and without dependency, respectively. To ensure the effectiveness of the proposed model, an efficient genetic algorithm based on highly efficient encoding, crossover operators, and mutation operators is designed. Several simulation experiments are conducted using different network topographies with different parameters. The experimental results denote that the proposed algorithm can obtain improved routing

收稿日期: 2018-12-26; 修回日期: 2019-01-06; 录用日期: 2019-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(61572417, 61702438, 61802329)、广西自然科学基金(2016GXNSFAA380226)、河南省高校科技创新团队支持计划(19IRTSTHN014)、河南省重点研发与推广专项资助项目(182102210537, 182102210132)、河南省高等教育教学改革资助项目(2017SJGLX389)、河南省教师教育课程改革研究资助项目(2017-JSJYZD-022)、河南科技智库调研资助项目(HNKJZK-2018-33)、信阳师范学院“南湖学者奖励计划”青年项目

* E-mail: xuanhejun0896@126.com

and deployment schemes for service chains in the VNF when compared with other algorithms.

Key words optical communications; elastic optical networks; virtual network function deployment; routing; global constrained optimization

OCIS codes 060.4510; 350.4600; 060.4256

1 引言

在传统网络中,为了提供各种各样的网络服务,需要部署各种不同的网络功能,如监视器、负载均衡器、防火墙,以及入侵检测系统等^[1-4]。这些网络功能(NF)一般都需借助于物理部署的特定设备来实现。需要穿过具有某些网络功能的网络数据流被称为网络功能链。网络功能虚拟化(NFV)技术是利用虚拟化技术将网络功能从专用硬件中分离出来,然后把虚拟网络功能映射到通用服务器、交换机或存储器中以形成虚拟网络功能(VNF)。NFV技术不仅能够降低网络建设和运营的成本,而且还能提高网络的灵活性。因此,需要穿过具有某些虚拟网络功能的网络数据流就被称为虚拟网络功能链(VNF-SC)^[5]。而如何解决好虚拟网络功能链中的虚拟网络功能配置问题是解决网络功能虚拟化问题的一个关键^[6-8]。

为解决虚拟网络功能链的选路和虚拟网络功能的在线配置问题,文献[9]提出了一种贪心策略以实现动态的虚拟网络功能链的选路和虚拟网络功能的配置。为最小化数据中心间弹性光网络中虚拟网络功能配置、多播选路,以及频谱分配所消耗的代价,文献[10]建立了一种混合整数线性规划模型,提出了启发式虚拟网络功能配置、多播选路,以及频谱分配策略。为最大限度降低网络中的能量消耗,文献[11]设计了一种基于 back-to-back 策略的算法以实现虚拟网络功能链的选路和虚拟网络功能的配置。为解决虚拟网络功能服务链的配置和资源分配问题,文献[12]提出了一种混合整数线性规划模型,并提出了一种包含单跳最优业务调度问题和虚拟网络功能服务链的启发式算法,以实现虚拟网络功能服务链的配置和资源分配。文献[13]将虚拟网络功能服务链的虚拟网络功能配置问题进行了简化,并建立了一个整数线性规划模型,为能够在较短时间内得到近似解,提出了一种基于模拟退火算法的启发式算法。为满足不同用户的需求及最大化提供商的收益,文献[14]的基于分解的方法解决了弹性光网络和云环境中虚拟网络功能配置问题。为最小化网络中占用频隙的最大频隙号和配置的虚拟网络功能的数目,文献[15]建立了一个整数线性规划模型,提出了一种基于最长公共子序列的算法,以确定选

路和虚拟网络功能配置方案。此外也有一些其他的文献对软件定义网络或数据中心间弹性光网络中虚拟网络功能服务链的选路、虚拟网络功能配置,以及频谱分配等问题进行了研究^[16-18]。

虽然针对虚拟网络功能服务链的选路、虚拟网络功能配置,以及频谱分配等问题进行研究的文献越来越多,但并未考虑不同虚拟网络功能之间的依赖关系。本文将虚拟网络功能服务链所需的虚拟网络功能划分为具有相互依赖关系和无依赖关系两种类型,且实现网络中的最大占用频隙号、网络中占用的频隙数,以及网络中配置的虚拟网络功能数目最小化的三个目标。为求解所建立的优化模型,设计了具有高效编码方法、交叉算子,以及变异算子的遗传算法。

2 问题描述及建模

2.1 问题描述

无向图 $G=(V,E)$ 表示一个网络拓扑,其中 V 和 E 分别为网络中网络结点的集合和网络链路的集合。 $V=\{V_1,V_2,\dots,V_{N_V}\}$, N_V 为网络中结点的数目。网络结点指的是网络中的设备,如网关、路由器、交换机等。这些结点只具有网络转发功能,不具有监视器、负载均衡器、防火墙,以及入侵检测系统的功能。网络拓扑中的部分网络结点上连有数据中心,可以部署一些软件实现相关的功能。因此,网络中的结点 V_i 可用二元组 $V_i=\{i,\Omega_i\}$ 表示,其中 i ($i=1,2,\dots,N_V$) 为结点的编号, Ω_i 表示第 i 个结点 V_i 上是否连有数据中心的标记, $\Omega_i=1$ 表示结点上连有数据中心, $\Omega_i=0$ 表示结点 V_i 上未连有数据中心。在任意的数据中心上都能实现所有的虚拟网络功能,虚拟网络功能可用集合表示为 $V_{NF}=\{V_{NF1},V_{NF2},\dots,V_{NF_{N_{vnf}}}\}$,其中 N_{vnf} 为虚拟网络功能的数目。 $E=\{l_{ij}|V_i,V_j\in V,1\leq i,j\leq N_V\}$ (i,j 为结点的编号), $l_{ij}=l_{ji}=1$ 表示网络结点 V_i 与 V_j 之间有链路,否则 $l_{ij}=l_{ji}=0$ 。每条链路上均有 N_F 个频隙,编号分别为 $1,2,\dots,N_F$ 。

$R=\{R_1,R_2,\dots,R_{N_R}\}$ 为 N_R 个虚拟网络功能服务链的集合,其中 $R_k=\{s_k,d_k,V_{NF,D,k},V_{NF,1,k},B_k\}$ ($k=1,2,\dots,N_R$) 为第 k 个虚拟网络功能服务链。 s_k 和 d_k 分别为虚拟网络功能服务链 R_k 的源

结点和宿结点; $V_{NF,D,k}$ 为虚拟网络功能服务链 R_k 所需相互依赖的虚拟网络功能的集合, 表示为 $V_{NF,D,k} = \{V_{NF,D,k_1}, V_{NF,D,k_2}, \dots, V_{NF,D,k_i}, \dots, V_{NF,D,k_{N_D}}\}$, 因此有 $V_{NF,D,k} \subset V_{NF}$, 其中 N_D 为相互依赖的虚拟网络功能服务链的数目。 $V_{NF,D,k}$ 中的虚拟网络功能必须按照固定的顺序来实现, 不可交换次序, 即对于任意的 V_{NF,D,k_i} 和 V_{NF,D,k_j} , 如果有 $i < j$, 则 V_{NF,D,k_i} 必须先于 V_{NF,D,k_j} 被实现。 $V_{NF,I,k}$ 为虚拟网络功能服务链 R_k 所需不相互依赖的虚拟网络功能的集合, 表示为 $V_{NF,I,k} = \{V_{NF,I,k_1}, V_{NF,I,k_2}, \dots, V_{NF,I,k_i}, \dots, V_{NF,I,k_{N_I}}\}$, 类似地, 有 $V_{NF,I,k} \subset V_{NF}$, 其中 N_I 为相互依赖的虚拟网络功能服务链的数目。与 $V_{NF,D,k}$ 中的虚拟网络功能不同的是 $V_{NF,I,k}$ 集合内的虚拟网络功能被实现的次序是任意的, 即任意两个虚拟网络功能无相互依赖关系。 $B_k = (b_k, B_{D,k}, B_{I,k})$, 其中 b_k 为虚拟网络功能服务链 R_k 未实现任何虚拟网络功能时所需要占用的频隙数, $B_{D,k} = \{b_{D,k_1}, b_{D,k_2}, \dots, b_{D,k_{N_D}}\}$ 为虚拟网络功能服务链 R_k 实现相应地相互依赖的虚拟网络功能后所占用频隙数与未实现该虚拟网络功能时所占用频隙数的比值。类似地, $B_{I,k} = \{b_{I,k_1}, b_{I,k_2}, \dots, b_{I,k_{N_I}}\}$ 为虚拟网络功能服务链 R_k 实现相应地不相互依赖的虚拟网络功能后所占用频隙数与未实现该虚拟网络功能时所占用频隙数的比值。

数据中心间弹性光网络中的静态虚拟网络功能服务链的选路及虚拟网络功能配置问题可以归结为: 当一批虚拟网络功能服务链到来时, 为每一个虚拟网络功能服务链选择合适的路径, 将其所需的虚拟网络功能配置在相应的数据中心上实现, 并为其分配合适的频隙以达到某种目标最优。

2.2 问题建模

旨在得到一种能够最小化网络中最大占用频隙号、网络中占用的频隙数和所有数据中心上部署的虚拟网络功能的数目的全局优化模型, 以解决虚拟网络功能链的选路、虚拟网络功能的配置, 以及频谱分配方案中存在的问题。本文采用加权求和法将三目标优化问题转化为了单目标约束优化问题, 并对优化目标进行了归一化处理, 所建立的优化模型的优化目标可以表示为

$$\min f(x, y, z) =$$

$$\min \left\{ \alpha \frac{N_{M,F}}{N_F} + \beta \frac{N_{U,F}}{N_F N_E} + \gamma \frac{N_{1,vnf}}{N_{DC} N_{vnf}} \right\}, \quad (1)$$

式中: $N_{M,F}$ 、 $N_{U,F}$ 以及 $N_{1,vnf}$ 分别为网络中占用频隙

的最大频隙号、网络中占用的频隙数, 以及网络中配置的虚拟网络功能的数目; N_{DC} 为网络中数据中心的数目; α 、 β 和 γ 为权重系数, 且有 $\alpha > 0$ 、 $\beta > 0$ 、 $\gamma > 0$ 、 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。由于 $N_{M,F} \leq N_F$ 、 $N_{U,F} \leq N_F N_E$ 及 $N_{1,vnf} \leq N_{DC} N_{vnf}$, 因此有 $0 \leq f \leq 1$ 。 x 、 y 和 z 分别表示虚拟网络功能链的选路、虚拟网络功能的配置, 以及频谱分配方案。进行虚拟网络功能链的选路、虚拟网络功能的配置, 以及频谱分配时需要满足一定的约束条件:

1) 任一虚拟网络功能服务链 R_k ($\forall R_k \in R$) 只能占用候选路径集中的一条路径, 即有

$$\sum_{q=1}^{N_Q} \lambda_{q,k} = 1, \quad k = 1, 2, \dots, N_R, \quad (2)$$

式中: N_Q 为虚拟网络功能服务链 R_k ($\forall R_k \in R$) 的候选路径集中路径的数目。当且仅当虚拟网络功能服务链 R_k 占用其候选路径集 $Q_k = \{Q_{1,k}, Q_{2,k}, \dots, Q_{q,k}, \dots, Q_{N_Q,k}\}$ 中的第 q 条路径时, $\lambda_{q,k} = 1$, 否则 $\lambda_{q,k} = 0$ 。

2) 链接到虚拟网络功能服务链 R_k ($\forall R_k \in R$) 所占用路径上的数据中心能够实现 R_k 所需实现的所有虚拟网络功能, 则有

$$V_{NF,D,k} \cup V_{NF,I,k} \subseteq \bigcup_{V_i \in V_k^q} V_{NF,k}^i, \quad k = 1, 2, \dots, N_R, \quad (3)$$

式中: V_k^q 为虚拟网络功能服务链 R_k 候选路径集中路径 Q_k^q 中连有数据中心的结点的集合; $V_{NF,k}^i$ 为连有数据中心的结点 V_i 上实现的虚拟网络功能的集合。

3) 链接到虚拟网络功能服务链 R_k ($\forall R_k \in R$) 所占用路径上的数据中心能够满足 R_k 所需实现的所有虚拟网络功能的依赖关系, 即有

$$V_{NF,D,k_i} \in \bigcup_{V_i \in V_k^q(t')} V_{NF,k}^i, \quad \forall \langle V_{NF,D,k_i}, V_{NF,D,k_{i'}} \rangle, \quad (4)$$

式中: V_{NF,D,k_i} 和 $V_{NF,D,k_{i'}}$ 分别为 $V_{NF,k}^i$ 中两个不同虚拟网络功能服务链, t 和 t' 为虚拟网络功能服务链 V_{NF,D,k_i} 及 $V_{NF,D,k_{i'}}$ 在 $V_{NF,D,k}$ 中的序号; $\langle V_{NF,D,k_i}, V_{NF,D,k_{i'}} \rangle$ 为虚拟网络功能集合 $V_{NF,D,k}$ 中的两个虚拟网络功能 V_{NF,D,k_i} 和 $V_{NF,D,k_{i'}}$, 且有 $V_{NF,D,k_{i'}}$ 依赖于 V_{NF,D,k_i} , 即 $V_{NF,D,k_{i'}}$ 必须先于 V_{NF,D,k_i} 被实现; $V_k^q(t')$ 为虚拟网络功能服务链 R_k 所占用的路径上位于 V_{NF,D,k_i} 所在数据中心所连的结点之前的结点的集合, 包含 $V_{NF,D,k_{i'}}$ 所在数据中心所连的结点。

4) 链接到虚拟网络功能服务链 R_k ($\forall R_k \in R$) 所需要实现的任意一个虚拟网络功能只能配置在一个数据中心上, 则有

$$\sum_{V_i \in V_{NF}^k} \varphi_{kt}^i = 1, \forall V_{NF,t} \in (V_{NF,D,k} \cup V_{NF,I,k}), \quad (5)$$

式中： φ_{kt}^i 为网络功能服务链 R_k 所需的虚拟网络功能 $V_{NF,t}$ 是否配置在与结点 V_i 相连的数据中心上的标记。 R_k 所需的虚拟网络功能 $V_{NF,t}$ 配置在与结点 V_i 相连的数据中心上时， $\varphi_{kt}^i = 1$ ，否则 $\varphi_{kt}^i = 0$ 。

由于拟采用首次适应策略进行频谱分配，因此分配方案均满足频谱分配时的频隙一致性和频隙连续性等约束条件，故不再给出频谱分配所需满足约束条件的形式化描述。结合给出的目标函数和约束条件，建立的优化模型为

$$\begin{aligned} \min f(x, y, z) = & \\ \min \left\{ \alpha \frac{N_{M,F}}{N_F} + \beta \frac{N_{U,F}}{N_F N_E} + \gamma \frac{N_{I,vnf}}{N_{DC} N_{vnf}} \right\}, & \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{q=1}^{N_Q} \lambda_q^k = 1, k = 1, 2, \dots, N_R \\ V_{NF,D,k} \cup V_{NF,I,k} \subseteq \bigcup_{V_i \in V_{NF}^k} V_i \\ V_{NF,D,k_t} \in \bigcup_{V_i \in V_{NF}^k(t')} V_i, \forall \langle V_{NF,D,k_t}, V_{NF,D,k_t'} \rangle \\ \sum_{V_i \in V_{NF}^k} \varphi_{kt}^i = 1, \forall V_{NF,t} \in (V_{NF,D,k} \cup V_{NF,I,k}) \end{array} \right. & \end{aligned} \quad (6)$$

由于所建立的模型为离散的、非凸的优化模型，虽然传统的利用导数等信息的优化方法已不再适用于求解该模型，但遗传算法等不依赖于函数的导数等信息的群智能优化模型却更适合于求解所建立的模型。因此，为高效地求解所建立的模型，本文设计了具有良好性能的编码方法、交叉算子，以及变异算子的遗传算法。

3 双种群全局优化遗传算法

3.1 编码

为使优化目标最优，需要确定最优的虚拟网络功能链的选路、虚拟网络功能的配置，以及频谱分配方案。拟采用首次适应策略进行频谱分配，因此无需对频谱分配方案进行编码，只需对虚拟网络功能链的选路方案和虚拟网络功能的配置方案进行编码。

$x \in \{x_1, x_2, \dots, x_{N_R}\}$ 为虚拟网络功能链的选路种群中的一个个体， x_k 为第 k 个虚拟网络功能服务链 R_k 的选路方案，当且仅当虚拟网络功能服务链 R_k 占用其候选路径集中的路径 Q_q^k 时， $x_k = q$ 。

$y \in \{y_1, y_2, \dots, y_{N_R}\}$ 为虚拟网络功能链的虚拟

网络功能配置种群中的一个个体， y_k 为第 k 个虚拟网络功能服务链 R_k 的虚拟网络功能配置方案，假设图 1 为种群中的一个个体，第 1 列表示的是 R_1 的不具有依赖关系的 3 个虚拟网络功能配置方案分别配置在与结点 V_2, V_2 和 V_4 相连的数据中心上。第 2 列表示的是 R_1 的具有依赖关系的 2 个虚拟网络功能配置方案分别配置在与结点 V_4 和 V_5 相连的数据中心上。

	R_1		R_2		R_3		R_4		} scheme of VNF deployment
	3	2	2	3	1	2	4	2	
	2	4	1	1	5	4	3	1	
	2	5	3	3	0	6	5	3	
	4	0	0	4	0	0	6	0	
	0	0	0	0	0	0	6	0	

图 1 虚拟网络功能配置编码示例

Fig. 1 Example of encoding for VNF deployment

3.2 交叉算子

由于有虚拟网络功能链的选路和虚拟网络功能配置两个种群，且两个种群编码方式不同，故采用两种不同的交叉算子。对于虚拟网络功能链的选路个体，采用差分进化中产生新个体的方法可以得到新的虚拟网络功能链的选路个体。对于虚拟网络功能配置个体，采用图 2 所示的算法 1 对虚拟网络功能配置个体进行交叉可以得到新的虚拟网络功能配置个体。

Algorithm 1: Crossover operator VNF deployment individual

Input: VNF deployment individual $y = \{y_1, y_2, \dots, y_{N_R}\}$;

Output: New VNF deployment individual $y' = \{y'_1, y'_2, \dots, y'_{N_R}\}$;

Let $y' = y \circ \theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{N_R}\}$ is selected randomly in VNF deployment population;

For $k = 1, 2, \dots, N_R$

If η is an odd number (η is generated randomly)

$y'_k(:, 2k-1) \leftarrow \theta_k(:, 2k-1)$;

Else

$y'_k(:, 2k) \leftarrow \theta_k(:, 2k)$;

END

If $f(x, y, z) \leq f(x, y', z)$

$y'_k \leftarrow y_k$;

End

End

图 2 VNF 配置个体的交叉算子

Fig. 2 Crossover operator for VNF deployment individual

3.3 变异算子

与交叉算子类似，也有两种不同的变异算子。对于虚拟网络功能链的选路个体，采用单点变异的方法可以得到新的虚拟网络功能链的选路个体。对

于虚拟网络功能配置个体,采用图 3 所示的算法 2 对虚拟网络功能配置个体进行交叉可以得到新的虚拟网络功能配置个体。

```

Algorithm 2: Mutation operator VNF deployment individual
Input: VNF deployment individual  $y = \{y_1, y_2, \dots, y_{N_v}\}$ ;
Output: New VNF deployment individual  $y' = \{y'_1, y'_2, \dots, y'_{N_v}\}$ ;
Let  $y' = y$ ;
For  $k=1, 2, \dots, N_R$ 
  If  $\eta$  is an odd number ( $\eta$  is generated randomly)
     $\mu(1 \leq \mu \leq N_D)$  is randomly generate randomly;
    A node  $\omega$ , which satisfy the relationship of dependent in paths' set, is selected;
     $y'_k(\mu+1, 2k-1) \leftarrow \omega$ ;
  Else
     $\mu(1 \leq \mu \leq N_D)$  is randomly generate randomly;
    A node  $\omega$  is selected randomly;
     $y'_k(\mu+1, 2k) \leftarrow \omega$ ;
  END
  If  $f(x, y, z) \leq f(x, y', z)$ 
     $y'_k \leftarrow y_k$ ;
End
End
    
```

图 3 VNF 配置个体的变异算子

Fig. 3 Mutation operator for VNF deployment individual

4 实验结果与分析

4.1 仿真参数设置

为验证算法的有效性,在两个被广泛采用的网络拓扑中进行了仿真实验:具有 14 个结点和 22 条链路的国家自然科学基金网络(NSFNET)^[19]及具有 27 个结点和 44 条链路的美国

骨干网(USBackbone)^[20]。网络的每条链路上拥有的频隙数为 1000,即 $N_F=1000$ 。实验中分别采用了 8 组不同数量(100, 200, ..., 800)的业务请求数据,每组虚拟网络功能服务链请求的初始占用频隙数在区间[1, 10]中随机产生,占用频隙数改变比例分别在区间[0.5, 2]内随机产生。假设共有 10 种虚拟网络功能,即 $N_{vnf}=10$,每个虚拟网络功能链所需的虚拟网络功能个数在区间[1, 10]内产生,且随机地划分为有依赖关系和相互独立的两类虚拟网络功能。在遗传算法中的种群规模为 $P_s=100$,交叉概率和变异概率分别为 0.8 和 0.1,进化代数 $G_m=10000$ 。

4.2 仿真实验结果

通过与其他两种算法的横向比较,验证了本文算法的有效性。其中的对比算法 1 为文献[16]提出的算法,用 LBA 表示。对比算法 2 为 LBA 算法与文献[18]提出的最小优先策略结合的算法,用 LF-LBA 表示。图 4 和图 5 分别给出了在 $N_{DC}=N_V/2$ 的情况下,当 $\alpha=1, \beta=1, \gamma=1$ 和 $\alpha=\beta=\gamma=1/3$ 时,NSFNET 网络和 US Backbone 网络中的实验结果。图 6 和图 7 分别给出了在 $N_{DC}=3N_V/4$ 的情况下,当 $\alpha=1, \beta=1, \gamma=1$ 和 $\alpha=\beta=\gamma=1/3$ 时,NSFNET 网络和 US Backbone 网络中的实验结果。

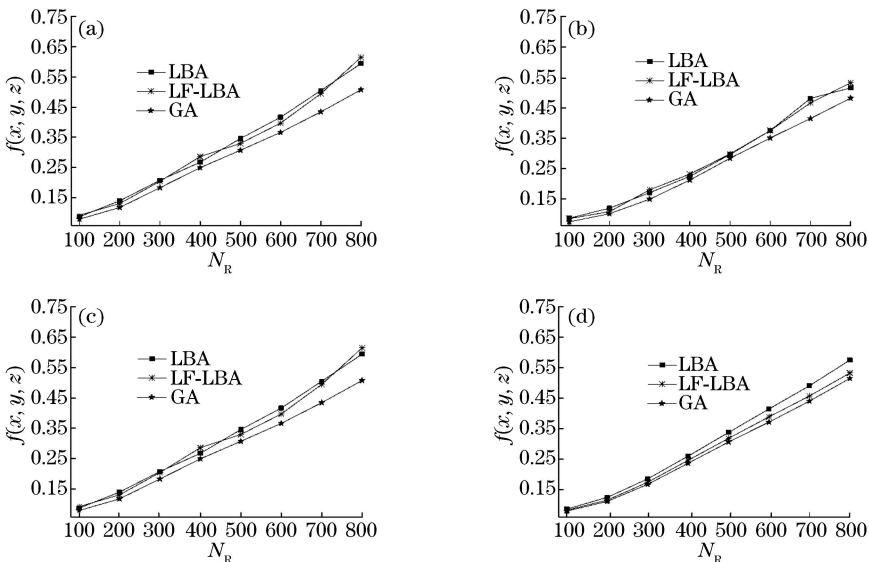


图 4 $N_{DC}=N_V/2$ 情况下 NSFNET 网络中的实验结果。(a) $\alpha=1$ 时的实验结果;(b) $\beta=1$ 时的实验结果;(c) $\gamma=1$ 时的实验结果;(d) $\alpha=\beta=\gamma=1/3$ 时的实验结果

Fig. 4 Experimental results of NSFNET network when $N_{DC}=N_V/2$. (a) Experimental results obtained when $\alpha=1$; (b) experimental results obtained when $\beta=1$; (c) experimental results obtained when $\gamma=1$; (d) experimental results obtained when $\alpha=\beta=\gamma=1/3$

4.3 实验结果分析

当 $\alpha=1$ 时,优化的目标即为最小化网络中占用

频隙的最大频隙号。由图 4~7 中的子图(a)可以看出:随着虚拟网络功能服务链数目的增加,网络中占

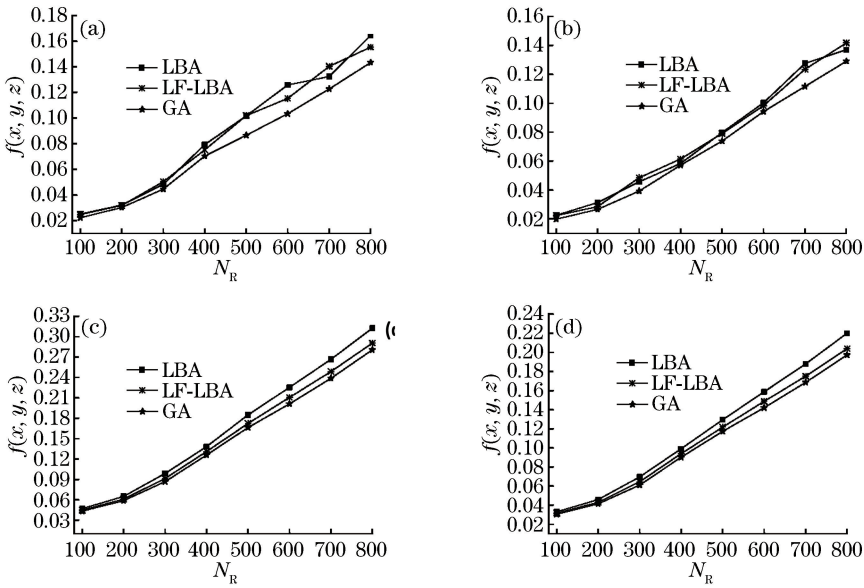


图 5 $N_{DC} = N_V/2$ 情况下 US Backbone 网络中的实验结果。(a) $\alpha=1$ 时的实验结果；(b) $\beta=1$ 时的实验结果；
(c) $\gamma=1$ 时的实验结果；(d) $\alpha=\beta=\gamma=1/3$ 时的实验结果

Fig. 5 Experimental results of US Backbone network when $N_{DC} = N_V/2$. (a) Experimental results obtained when $\alpha = 1$;
(b) experimental results obtained when $\beta = 1$; (c) experimental results obtained when $\gamma = 1$; (d) experimental
results obtained when $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$

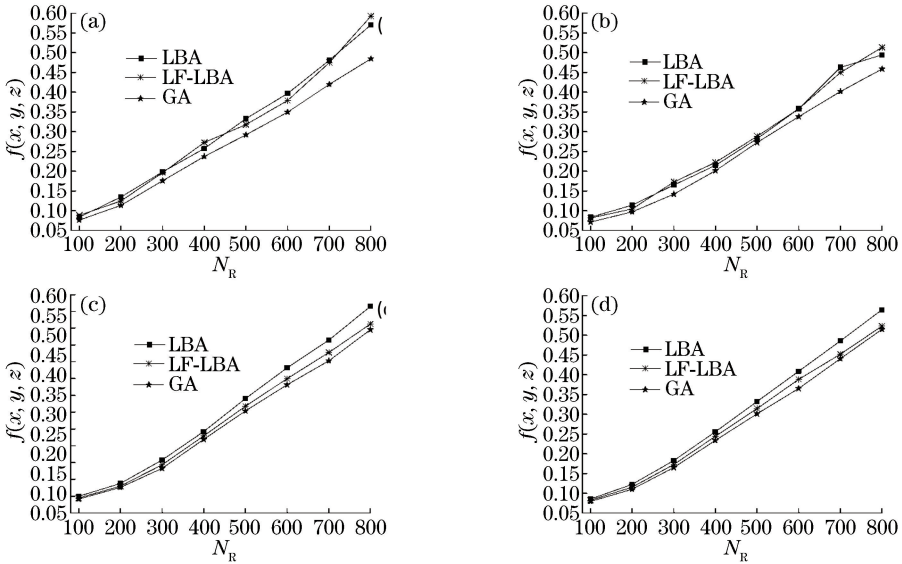


图 6 $N_{DC} = 3N_V/4$ 情况下 NSFNET 网络中的实验结果。(a) $\alpha=1$ 时的实验结果；(b) $\beta=1$ 时的实验结果；
(c) $\gamma=1$ 时的实验结果；(d) $\alpha=\beta=\gamma=1/3$ 时的实验结果

Fig. 6 Experimental results in NSFNET network when $N_{DC} = 3N_V/4$. (a) Experimental results obtained when $\alpha = 1$;
(b) experimental results obtained when $\beta = 1$; (c) experimental results obtained when $\gamma = 1$; (d) experimental
results obtained when $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$

用的最大频隙号也逐渐增加。由于 LBA 算法未考虑虚拟网络功能之间的依赖关系,仅采用某一固定的顺序进行虚拟网络功能的配置,不能很好地解决考虑虚拟网络服务功能之间具有依赖关系的虚拟网络功能的配置问题。同样,LF-LBA 算法也未考虑

虚拟网络功能之间的依赖关系,虽然已将占用较小频隙的虚拟网络功能进行了优先配置,但当考虑到虚拟网络功能之间的依赖关系时,仍然不能得到最优的方案。而本文提出的 GA 算法不仅考虑了不同虚拟网络功能之间的依赖关系,而且可以经过迭代

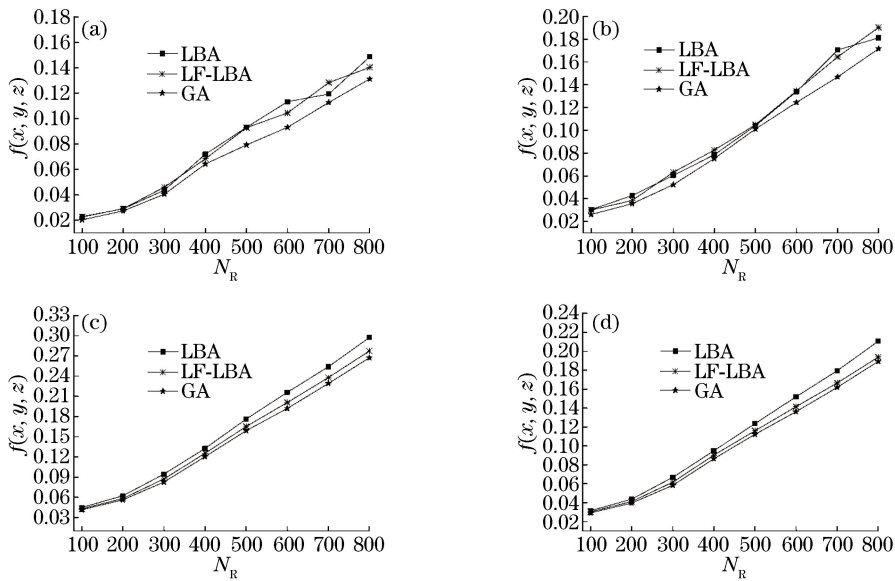


图7 $N_{DC}=3N_V/4$ 情况下 US Backbone 网络中的实验结果。(a) $\alpha=1$ 时的实验结果;(b) $\beta=1$ 时的实验结果;
(c) $\gamma=1$ 时的实验结果;(d) $\alpha=\beta=\gamma=1/3$ 时的实验结果

Fig. 7 Experimental results in US Backbone network when $N_{DC}=3N_V/4$. (a) Experimental results obtained when $\alpha=1$;
(b) experimental results obtained when $\beta=1$; (c) experimental results obtained when $\gamma=1$; (d) experimental
results obtained when $\alpha=\beta=\gamma=1/3$

多次搜索到最优的配置方案。因此,GA 算法能够得到比 LBA 算法和 LF-LBA 算法更优的结果。由实验结果也可以看出:GA 算法能够得到比其他两种对比算法更小的网络中占用的最大频隙号。当虚拟网络功能服务链的数目为 100 时,GA 算法能够得到的网络中占用的最大频隙号较之对比算法小 4.1%~5.2%。当虚拟网络功能服务链的数目为 800 时,GA 算法能够得到的网络中占用的最大频隙号较之对比算法小 10.5%~11.8%。由图 4(a)与图 6(a)以及图 5(a)与图 7(a)可以看出:对于同一个网络拓扑和相同的虚拟网络功能服务链数目,当网络中链接的数据中心数目增大时,网络中占用的最大频隙号减小。当数据中心数目较少时,网络中的这些结点会成为关键结点,会有较多的虚拟网络功能服务链经过该结点,同时也会导致较多的虚拟网络功能服务链经过与该结点相连的链路,造成网络中占用的最大频隙号较大。相反,当数据中心数目较多时,虚拟网络功能服务链会更均衡地占用不同的链路,使得网络中占用的最大频隙号减小。

当 $\beta=1$ 时,优化的目标即为最小化网络中占用频隙数目。由图 4~7 中的子图(b)可以看出:随着虚拟网络功能服务链数目的增加,网络中占用频隙数目也逐渐增加。由实验结果也可以看出:GA 算法能够得到比其他两种对比算法更小的网络中占用频隙数目。当虚拟网络功能服务链的数目为 100

时,GA 算法能够得到的网络中占用频隙数目较之对比算法小 3.5%~4.8%。当虚拟网络功能服务链的数目为 800 时,GA 算法能够得到的网络中占用频隙数目较之对比算法小 9.7%~11.2%。

当 $\gamma=1$ 时,优化的目标即为最小化网络中数据中心上配置的虚拟网络功能的数目。由图 4~7 中的子图(c)可以看出:随着虚拟网络功能服务链数目的增加,网络中数据中心上配置的虚拟网络功能的数目也逐渐增加。由实验结果也可以看出:GA 算法能够得到的比其他两种对比算法更小的网络中数据中心上配置的虚拟网络功能的数目。当虚拟网络功能服务链的数目为 100 时,GA 算法能够得到的网络中数据中心上配置的虚拟网络功能的数目较之对比算法小 2.9%~4.3%。当虚拟网络功能服务链的数目为 800 时,GA 算法能够得到的网络中数据中心上配置的虚拟网络功能的数目较之对比算法小 8.4%~10.6%。

当 $\alpha=\beta=\gamma=1/3$ 时,优化的目标即为最小化网络中占用频隙的最大频隙号、网络中占用频隙数目,以及网络中数据中心上配置的虚拟网络功能的数目,且三者具有相同的权重。由图 4~7 中的子图(d)可以看出:随着虚拟网络功能服务链数目的增加,加权求和后的 3 个目标值也逐渐增加。由实验结果也可以看出:GA 算法能够得到比其他两种对比算法更小的加权求和后的 3 个目标值。当虚拟网

络功能服务链的数目为 100 时,GA 算法能够得到的加权求和后的 3 个目标值较之对比算法小 4.8%~7.1%。当虚拟网络功能服务链的数目为 800 时,GA 算法能够得到的加权求和后的 3 个目标值较之对比算法小 10.1%~12.9%。

4.4 时间复杂度分析

算法为每个虚拟网络功能服务链计算了 N_Q 条备选路径,其计算复杂度为 $O(N_Q N_V^3)$,则为 N_R 个虚拟网络功能服务链计算 N_Q 条备选路径,其计算复杂度为 $O(N_R N_Q N_V^3)$ 。采用进化算法为每个虚拟网络功能服务链确定合适的路径,虚拟网络功能分配方案的计算复杂度为 $O(2G_m P_s N_V^3 N_F)$,则所提出的遗传算法的计算复杂度为 $O(N_R N_Q N_V^3 + 2G_m P_s N_V^3 N_F)$ 。

5 结 论

为解决弹性光网络中虚拟网络功能服务链的选路和虚拟网络功能配置问题,建立了一个以最小化网络中最大占用频隙号、网络中占用频隙数,以及配置的虚拟网络功能数目为目标的全局约束优化模型。将虚拟网络功能划分为具有依赖关系的虚拟网络功能和不相互依赖的虚拟网络功能两种类型。为高效地求解所建立的模型,采用加权求和法将三目标优化问题转化为了单目标约束优化问题,并设计了具有高效编码方法、交叉算子,以及变异算子的遗传算法。但提出的算法的时间复杂度较高,因此更适合于求解静态网络规划问题。后续的工作主要研究如何利用多目标优化方法对所建立的模型进行求解,为决策者提供更多的决策方案。

参 考 文 献

- [1] Chen Z, Feng G, Liu B, *et al.* Delay optimization oriented service function chain migration and re-deployment in operator network[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(9): 2229-2237.
陈卓, 冯钢, 刘蓓, 等. 运营商网络中面向时延优化的服务功能链迁移重配置策略[J]. *电子学报*, 2018, 46(9): 2229-2237.
- [2] Eramo V, Ammar M, Lavacca F G. Migration energy aware reconfigurations of virtual network function instances in NFV architectures [J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 4927-4938.
- [3] Xuan H J, Wang Y P, Xu Z Q, *et al.* Core selection algorithm for multi-core elastic optical networks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1206005.
宣贺君, 王宇平, 徐展琦, 等. 多纤芯弹性光网络中纤芯选择算法 [J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1206005.
- [4] Jiang X K, Zhao F, Fan Y Q, *et al.* Frequency assignment algorithm for elastic optical network with multi-cores considering crosstalk [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(6): 060601.
江祥奎, 赵峰, 范永青, 等. 考虑串扰的多纤芯弹性光网络中的频谱分配算法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(6): 060601.
- [5] Chen X L, Zhu Z Q, Guo J N, *et al.* Leveraging mixed-strategy gaming to realize incentive-driven VNF service chain provisioning in broker-based elastic optical inter-datacenter networks [J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 10(2): A232-A240.
- [6] Duan Q, Ansari N, Toy M. Software-defined network virtualization: an architectural framework for integrating SDN and NFV for service provisioning in future networks [J]. *IEEE Network*, 2016, 30(5): 10-16.
- [7] Mijumbi R, Serrat J, Gorricho J L, *et al.* Network function virtualization: state-of-the-art and research challenges [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(1): 236-262.
- [8] Soares J, Gonçalves C, Parreira B, *et al.* Toward a telco cloud environment for service functions [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(2): 98-106.
- [9] Mijumbi R, Serrat J, Gorricho J L, *et al.* Design and evaluation of algorithms for mapping and scheduling of virtual network functions [C] // 2015 1st IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft), April 13-17, 2015, London, UK. New York: IEEE, 2015: 15202730.
- [10] Zeng M L, Fang W J, Zhu Z Q. Orchestrating tree-type VNF forwarding graphs in inter-DC elastic optical networks [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(14): 3330-3341.
- [11] 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.
- [12] Wang L H, Lu Z M, Wen X M, *et al.* Joint optimization of service function chaining and resource allocation in network function virtualization [J]. *IEEE*

- Access, 2017, 4: 8084-8094.
- [13] Li X, Qian C. The virtual network function placement problem [C] // 2015 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), April 26-May 1, 2015, Hong Kong, China. New York: IEEE, 2015: 69-70.
- [14] Mechtri M, Ghribi C, Zeghlache D. A scalable algorithm for the placement of service function chains [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2016, 13(3): 533-546.
- [15] Fang W J, Zeng M L, Liu X H, *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.
- [16] Zhao J J, Guo H. A routing and spectrum assignment algorithm with low delay in optical interconnection of data center [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 080602.
赵继军, 郭宏. 数据中心光互联中低时延路由频谱分配算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 080602.
- [17] Ma W R, Medina C, Pan D. Traffic-aware placement of NFV middleboxes [C] // 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), December 6-10, 2015, San Diego, CA, USA. New York: IEEE, 2015: 15820470.
- [18] Li B J, Lu W, Liu S Q, *et al.* Deep-learning-assisted network orchestration for on-demand and cost-effective VNF service chaining in inter-DC elastic optical networks[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(10): D29-D41
- [19] Savory S J. Congestion aware routing in nonlinear elastic optical networks [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(10): 1057-1060.
- [20] Gong L, Zhou X, Liu X H, *et al.* Efficient resource allocation for all-optical multicasting over spectrum-sliced elastic optical networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(8): 836-847.