

## 基于联合备份的服务功能链可靠性保障的部署方法

汤红波 邱航\* 游伟 季新生

(国家数字交换系统工程技术研究中心 郑州 450002)

**摘要:** 在网络功能虚拟化(NFV)环境中, 针对服务功能链(SFC)部署时的可靠性问题, 该文提出对备份虚拟网络功能选择、备份实例放置和服务功能链部署的联合优化方法。首先, 定义一个单位开销可靠性提高值的虚拟网络功能衡量标准, 改进备份虚拟网络功能选择方法; 其次, 采用联合备份的方式调整相邻备份实例之间的放置策略, 以降低带宽资源开销; 最后, 将整个服务功能链可靠性保障的部署问题构建成整数线性规划模型, 并提出一种基于最短路径的启发式算法, 克服整数线性规划求解的复杂性。仿真结果表明, 该方法在优先满足网络服务可靠性需求的同时, 优化资源配置, 提高了请求接受率。

**关键词:** 网络功能虚拟化(NFV); 服务功能链(SFC); 可靠性; 单位开销可靠性提高值; 整数线性规划

中图分类号: TN393.03

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)12-3006-08

DOI: 10.11999/JEIT190013

## A Reliability-guarantee Method for Service Function Chain Deployment Based on Joint Backup

TANG Hongbo QIU Hang YOU Wei JI Xinsheng

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

**Abstract:** In the Network Function Virtualization (NFV) environment, for the reliability problem of Service Function Chain (SFC) deployment, a joint optimization method is proposed for backup Virtual Network Function (VNF) selection, backup instance placement and service function chain deployment. Firstly, the method defines a virtual network function measurement standard named the unit cost reliability improvement value to improve the backup virtual network function selection method. Secondly, the joint backup mode is used to adjust the placement strategy between adjacent backup instances to reduce bandwidth resources overhead. Finally, the reliability-guarantee problem of the whole service function chain deployment is modeled as integer linear programming, and a heuristic algorithm based on the shortest path is proposed to overcome the complexity of integer linear programming. The simulation results show that the method optimizes resource allocation while prioritizing the network service reliability requirements, and improves the request acceptance rate.

**Key words:** Network Function Virtualization (NFV); Service Function Chaining (SFC); Reliability; Unit cost improvement value; Integer linear programming

### 1 引言

第五代移动通信系统(5G)将会满足人们在各方

面的应用需求, 例如AR/VR、超高清视频、车联网、远程医疗和智能家居等<sup>[1]</sup>。为应对多样化应用带来差异化的性能需求挑战, 5G引入了网络功能虚拟化(Network Function Virtualization, NFV)和软件定义网络技术, 利用虚拟化和云基础设施的弹性有效提高网络的灵活性和可编程性, 且可根据需求编排定制化的虚拟网络。NFV实现了传统网络设备中软件与硬件的解耦, 软件将以虚拟网络功能(Virtual Network Function, VNF)的形式运行在通用服务器之上。基于NFV技术, 运营商和服务提供者能够根据不同的服务需求将VNF编排构成服务功能链(Service Function Chain, SFC), 并将其

收稿日期: 2019-01-07; 改回日期: 2019-04-22; 网络出版: 2019-05-24

\*通信作者: 邱航 hangsoon@foxmail.com

基金项目: 国家重点研发计划网络空间安全专项(2016YFB0801605), 国家自然科学基金创新群体项目(61521003), 国家自然科学基金(61801515)

Foundation Items: The National Key R & D Program Cyberspace Security Special (2016YFB0801605), The National Natural Science Foundation Innovative Groups Project of China (61521003), The National Natural Science Foundation of China (61801515)

部署在网络基础设施的合适位置，为用户提供高质量的服务<sup>[2]</sup>。

在NFV环境中，文献<sup>[3]</sup>将资源分配分为成链、映射和调度3个阶段。成链阶段研究SFC的解构和重组问题。SFC动态成链方案可实现用户的定制化服务，同时作为映射阶段的输入，可优化映射阶段的资源开销；映射是指为SFC分配底层物理资源，文献<sup>[4-6]</sup>通过指定目标函数的形式建立SFC映射模型，设计启发式算法求解空间维度上VNF和虚拟链路部署的最优位置；而调度问题研究如何分配不同VNF组件在资源切片上占用的时隙，即VNF的生命周期管理。文献<sup>[7]</sup>在优化虚拟机之间带宽分配的基础上，以最小化所有SFC完成时间为目标函数，采用双层编码遗传算法求解各个VNF的执行时隙。

上述研究工作均假设NFV基础设施是完全可靠的，然而，这是不现实的。事实上，文献<sup>[8]</sup>重点研究了NFV相关的可靠性问题，并指出VNF的故障可能来自硬件(VNF承载服务器的故障等)或软件(VNF自身或者执行虚拟机的错误配置等)，而任意VNF的故障将会影响整个SFC的工作，造成服务中断。假设管理和编排中心可以感知底层节点的可靠性，Sun等人<sup>[9]</sup>研究了已知底层网络下最大化SFC可靠性的部署问题，并设计了不同的目标函数以优化底层资源配置，其实是一种考虑节点可靠性属性的SFC部署优化策略，而并未解决基础设施故障时的服务中断问题。在网络发生随机故障的情况下，为保证提供服务的连续性，文献<sup>[10]</sup>提出一种故障VNF的恢复机制，是将故障VNF实例通过迁移或动态实例化的方式创建新的VNF实例代替工作，同时更新路由流表。然而，恢复机制将会不可避免地引入难以忽略的时延，而且VNF状态的备份也是极为复杂的。为降低恢复机制的时延，文献<sup>[11]</sup>提出一种在线备份选择机制，首先将SFC部署到底层网络，若部署方案结果不能满足服务的可靠性要求则在线备份VNF，当VNF发生故障时直接切换到备份VNF继续提供服务。备份机制解决了时延问题，但其将SFC的部署分割为两个独立的阶段。Qu等人<sup>[12]</sup>将满足可靠性需求的SFC的部署问题建模成整数线性规划，其采用专用备份的方式冗余部署VNF实例以达到可靠性指标，并完成了SFC及备份VNF的一阶段协同部署。但在资源有限的情况下，专用备份方式将会带来极高的节点计算和链路带宽资源开销，使请求接受率降低。

为满足网络服务的可靠性需求，本文提出一种基于联合备份的SFC可靠性保障的部署方法。该方

法设计了节点资源利用率更高的VNF备份选择策略，并采用联合备份的方式调整相邻VNF备份实例之间的放置关系，优化SFC与底层网络的映射关系。本文将可靠性SFC的部署问题构建成整数线性规划模型，并提出一种启发式算法解决大规模网络时的扩展性问题。结果显示，相较于传统的专用备份策略，本文提出的部署方法在保证网络服务可靠性需求的前提下能够明显降低资源开销，提高请求接受率。

## 2 问题描述和网络模型

不同的应用场景对网络服务的性能指标有不同的要求。针对可靠性问题，本节在网络模型的基础上提出一种备份VNF选择方案，并改进了备份VNF实例放置策略，最后举例说明了SFC的可靠性计算方法。

### 2.1 问题描述

SFC部署是指，以明确的目标函数为指导，为指定VNF集合在网络基础设施上寻找合适的映射位置，并设计可行的路由方案<sup>[13]</sup>，如图1所示。在5G超可靠低时延场景<sup>[1]</sup>中，如车联网、远程医疗等对服务提供方都有相应的可靠性要求，而网络基础设施存在随机失效等问题，对网络服务的持续有效提供带来了极大的挑战。因此，在SFC部署阶段，运营商或服务提供商需要制定有效的可靠性保障方案，以确保网络基础设施出现故障时不影响SFC的继续运行。在SFC部署阶段同时考虑可靠性的问题也称之为SFC可靠性保障的部署问题<sup>[11]</sup>。

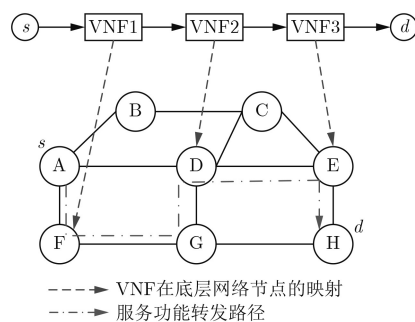


图1 服务功能链部署示例

### 2.2 网络模型

**底层网络：**底层网络可表示为物理节点和物理链路组成的无向赋权图  $G = (N, L)$ 。其中， $N$ 和 $L$ 分别表示物理节点集合和连接物理节点的物理链路集合，本文使用  $k (k \in [1, |N|]_{\mathbb{Z}})$  来表示物理节点对应的数字标识，每个物理节点拥有剩余可用计算资源表示为  $C_k$ ，且在满足资源约束的条件下可实例化多个VNF。 $m (m \in [1, |L|]_{\mathbb{Z}})$  表示集合 $L$ 中物理

链路的数字标识, 其剩余可用带宽资源为  $B_m > 0$ ,  $m.head$ 与 $m.tail$ 分别表示物理链路 $m$ 连接的头节点和尾节点。

**SFC请求:**  $S$ 表示网络服务集合,  $F$ 表示全部VNF类型集合。SFC  $s_i \in S$ 由一个VNF子集 $F_i$ 构成, 子集 $F_i$ 中的VNF用数值标识 $j (j \in [1, |F_i|])$ 表示, SFC  $s_i$ 的第 $j$ 个VNF可表示为 $f_{ij} (f_{ij} \in F_i)$ 。设每个SFC  $s_i$ 有相应的可靠性要求 $Q_i^{req} (0 < Q_i^{req} < 1)$ , SFC  $s_i$ 的源节点 $\sigma_i$ 和目的节点 $\delta_i$ 分别用数字标识0和 $|F_i| + 1$ 表示。每个VNF必须实例化在一个物理节点之上, 物理节点为其分配充足的计算资源。VNF的可靠性由其承载节点的可靠性决定, 当物理节点发生故障时, 其承载的VNF无法正常运行。SFC  $s_i$ 的VNF  $f_{ij}$ 的可靠性表示为:  $r_{ij} = MTBF_j \times (MTBF_j + MTTR_j)^{-1}$ , 其中,  $MTBF_j$ 和 $MTTR_j$ 分别表示VNF  $j$ 承载节点的平均故障间隔时间和平均故障修复时间, 且物理节点之间发生故障的概率是相互独立的。因此, 根据文献[14], SFC的可靠性计算可表示为

$$Q_i = Pr[\text{所有 VNF 的承载节点是可用的}] \\ = \prod_{j \in [1, |F_i|]} r_{ij}, \forall i \in [1, |S|] \quad (1)$$

### 2.3 备份VNF选择

在可靠性理论中[15], 潜在提高值表示系统可靠性的最大提升空间, 可以通过改变组件的可靠性来实现。在SFC中, 任一VNF可靠性的提高将会提高整条SFC的可靠性, SFC中VNF  $j$ 的潜在提高值定义为

$$I_j = h(p_j, p(t)) - h(p(t)) \quad (2)$$

其中,  $h(p_j, p(t))$ 和 $h(p(t))$ 分别表示VNF  $j$ 可靠性提高后和当前VNF  $j$ 时SFC的可靠性值。可靠性理论证明选择最大潜在提高值的VNF能够最大化SFC的可靠性提高。然而, 最大潜在提高值的VNF选择方式并未考虑备份带来的资源开销。设备份VNF  $j$ 对应的节点计算资源开销为 $c_{ij}$ , 本文定义单位开销可靠性提高值 $I_j^{mit}$ 来评估VNF  $j$ 冗余部署时单位开销带来的可靠性提高值, 如式(3)所示。 $I_j^{mit}$ 可准确表示备份VNF  $j$ 单位开销所获得的可靠性收益, 适用于以资源开销为优化目标的SFC部署。

$$I_j^{mit} = \frac{I_j}{c_{ij}} = \frac{h(p_i, p(t)) - h(p(t))}{c_{ij}} \quad (3)$$

### 2.4 可靠性计算

为满足高可靠性的网络服务需求, 一方面, 要选择可靠性较高的物理节点承载VNF。另一方

面, 如果SFC  $s_i$ 的可靠性 $Q_i$ 不能满足网络服务的可靠性要求 $Q_i^{req}$ , 则采用备份的方式来提高SFC  $s_i$ 的可靠性。为满足网络服务的可靠性要求, SFC必须包含充足数量的备份VNF实例, 同时保证充足的通信带宽资源。采用专用备份时, 各个VNF之间的可靠性计算是相互独立的。本文用 $F_j^t$ 表示SFC  $s_i$ 第 $j$ 个VNF的功能集合, SFC的可靠性计算可表示为

$$Q_i = Pr[\text{每个 VNF 至少一个实例是可用的}] \\ = \prod_{j=1}^{|F_i|} \left[ 1 - \prod_{x=1}^{|F_j^t|} (1 - r_{jx}) \right], \forall i \in [1, |S|] \quad (4)$$

备份VNF需要额外的计算和带宽资源, 而专用备份将会带来带宽资源开销的显著上升, 如图2所示。针对上述问题, 采用一种改进的联合备份方式。联合备份在SFC部署阶段主要包含两个方面的改进, 一是相邻VNF实例的放置策略, 由单独放置改进为满足资源约束条件下的合并放置, 合并放置可将单独放置节点间的通信转化为合并放置节点的内部通信, 以达到降低带宽资源开销的目的; 二是联合备份下节点间链路连接关系算法, 专用备份仅考虑节点单独放置的链路连接关系, 而联合备份需要考虑合并放置和独立放置两种情况下的链路连接关系, 具体分析见3.2节。然而, 联合备份打破了不同VNF之间可靠性独立的原则, SFC的可靠性计算需分成独立VNF和联合备份VNF两个部分。

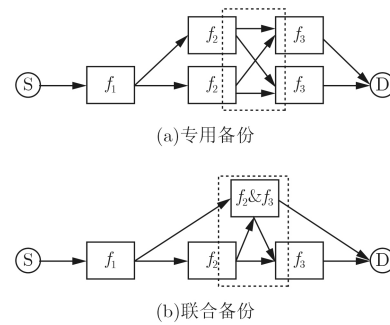


图2 专用备份与联合备份示例

设任意一条基础SFC  $s$ , 其包含3个VNF  $f_1, f_2$ 和 $f_3$ , 其对应的可靠性分别为 $r_1, r_2$ 和 $r_3$ , 则SFC  $s$ 的可靠性为 $Q_s = r_1 \cdot r_2 \cdot r_3$ 。设 $f_{2,3}^b$ 是VNF  $f_2$ 和 $f_3$ 的联合备份实例, 即 $f_{2,3}^b$ 拥有的VNF  $f_2$ 和 $f_3$ 需求的计算资源之和, 能够同时恢复 $f_2$ 和 $f_3$ 的故障,  $f_{2,3}^b$ 的可靠性为 $r_{2,3}$ 。设 $f_1^b$ 是VNF  $f_1$ 的备份实例, 可靠性为 $r_1^b$ 。当任意VNF  $f_1, f_2$ 和 $f_3$ 发生故障时, 服务都能通过备份 $f_1^b$ 或 $f_{2,3}^b$ 恢复。因此, SFC  $s$ 的备份链的可靠性等于 $f_1$ 或 $f_1^b$ 的可用性乘以 $(f_2, f_3)$ ,  $(f_2, f_{2,3}^b)$ ,

$(f_{2,3}^b, f_3)$  或  $(f_{2,3}^b)$  可用性, 设  $\bar{x} = 1 - x$ , 可靠性计算表达为

$$Q_s^p = \overline{r_1 \cdot r_1^b} \cdot [r_2 \cdot r_3 + \overline{r_2} \cdot r_{2,3}^b \cdot r_3 + r_2 \cdot r_{2,3}^b \cdot \overline{r_3} + \overline{r_2} \cdot \overline{r_3} \cdot r_{2,3}^b] \quad (5)$$

示例中, VNF $f_1$ 采用独立备份, VNF $f_2$ 和 $f_3$ 采用联合备份。由此可见, SFC中VNF的备份实例越多, 其可靠性越高, 但相应资源开销也越高, 而联合备份可以部分降低带宽资源开销。

### 3 系统模型

为了便于描述SFC的可靠性问题, 本文将SFC可靠性保障的部署问题形式化为整数线性规划模型。

#### 3.1 变量和目标函数

二值变量  $x_{ij}^k \in \{0, 1\}$  表示VNF $j$ 的放置策略,  $x_{ij}^k = 1$ 表示SFC $s_i$ 的VNF $j$ 放置在物理节点 $k$ 上, 否则  $x_{ij}^k = 0$ 。为表示流量在SFC中的路由策略, 二值变量  $y_{ij}^m = 1$ 表示SFC $s_i$ 的流量经物理链路 $m$ 流入VNF $j$ , 否则  $y_{ij}^m = 0$ 。SFC $s_i$ 的每个VNF $j$ 至少存在一个实例用于提供服务, 也可能包含备份实例用于预防故障, 定义变量NUM $_{ij}$ 表示SFC $s_i$ 中VNF $j$ 的实例数量。设二值变量  $p_{ij}^k = 1$ 表示SFC $s_i$ 中VNF $j$ 的基础实例放置在物理节点 $k$ 上, 否则  $p_{ij}^k = 0$ 。同样, 设  $q_{ij}^k = 1$ 表示SFC $s_i$ 中VNF $j$ 的备份实例放置在物理节点 $k$ 上。

为了描述相邻两个VNF之间备份资源的使用状态, 二值变量  $g_{ij} = 1, j \in [2, |F_i|]_z$ 表示SFC $s_i$ 中VNF $j$ 的备份实例和VNF $j-1$ 的备份实例放在同一个物理节点上, 否则,  $g_{ij} = 0$ 。保障SFC可靠性的部署方案的目标是在满足服务可靠性的前提下最小化网络资源开销, 目标函数可表达为

$$\min \left\{ \sum_{k=1}^{|N|} \sum_{i=1}^{|S|} \sum_{j=1}^{|F_i|} x_{ij}^k c_{ij} + \sum_{m=1}^{|L|} \sum_{i=1}^{|S|} \sum_{j=1}^{|F_i|} \cdot \{y_{ij}^m b_i - g_{ij} q_{ij}^{m, \text{tail}} b_i\} \right\} \quad (6)$$

在式(6)中,  $x_{ij}^k c_{ij}$ 的和表示全部SFC的VNF放置使用的节点计算资源开销,  $y_{ij}^m b_i$ 的和表示全部网络服务部署使用的带宽资源开销, 其包含了联合备份时的节点内部通信带宽, 所以需要减去联合备份VNF实例对应的带宽资源开销。

#### 3.2 SFC约束

首先要求每个承载SFC $s_i$ 中VNF $j$ 备份实例的节点必须能够承载这种类型的VNF, 则可表达为

$$q_{ij}^k \leq x_{ij}^k, (\forall k \in [1, |N|]_z, i \in [1, |S|]_z, j \in [1, |F_i|]_z) \quad (7)$$

$$\sum_{k \in [1, |N|]_z} p_{ij}^k = 1, \sum_{k \in [1, |N|]_z} q_{ij}^k = 1, \forall i \in [1, |S|]_z, j \in [0, |F_i| + 1]_z \quad (8)$$

约束式(8)表示SFC中VNF的每个实例只能放置在一个物理节点上。下面的约束式(9)确保, 如果SFC $s_i$ 中VNF $j$ 的一个实例放置在物理节点 $k$ 上, 则流量转发链路 $m$ 必须连接到节点 $k$ 上。

$$x_{ij}^k \leq \sum_{m, \text{tail}=k} y_{ij}^m, (\forall k \in [1, |N|]_z, i \in [1, |S|]_z, j \in [1, |F_i|]_z) \quad (9)$$

在SFC的部署过程中, 用户流量经过VNF的顺序是有严格规定的, 将SFC部署的流量路由分为两个子问题。首先, 第1个子问题主要解决SFC中相同VNF的多个实例的路由问题。根据流量守恒, 每个物理节点的流入流量之和应等于流出流量之和, 则存在以下VNF路由规划

$$\sum_{m, \text{head}=k} y_{ij}^m - \sum_{m', \text{tail}=k} y_{ij}^{m'} = x_{ij-1}^k \text{NUM}_{ij} (1 - g_{ij}) \quad (10)$$

$$\sum_{m, \text{tail}=k} y_{ij}^m \leq \text{NUM}_{ij-1} \quad (11)$$

$$\sum_{m, \text{head}=k} y_{ij}^m \leq \text{NUM}_{ij} \quad (12)$$

$$y_{ij}^m q_{ij}^{m, \text{tail}} = y_{ij-1}^m q_{ij-1}^{m, \text{tail}} \quad (13)$$

$$\sum_{j \in [1, |F_i|]_z} x_{ij}^k \leq 1 + \sum_{j \in [1, |F_i|]_z} g_{ij} x_{ij}^k \quad (14)$$

$$y_{ij}^m y_{ij}^{m'} = 0, (\forall m, m' \in [1, |L|]_z, m, \text{head} = m', \text{head}, m, \text{tail} = m', \text{head}) \quad (15)$$

$$\forall m \in [1, |L|]_z \forall k \in [1, |N|]_z, i \in [1, |S|]_z, j \in [1, |F_i|]_z \quad (16)$$

约束式(10)保证, 不承载联合备份VNF实例的节点必须满足流量守恒, 而且采用并联方式时, 网络需要提供充足的带宽资源满足不同实例之间的全连接。当节点承载联合备份实例时, VNF实例之间的通信在节点内部完成, 因此链路连接数量为0。约束式(11)和式(12)说明当VNF存在多个实例时流量在物理节点的多路复用和解多路复用。约束式(13)表示当VNF $j$ 和 $j-1$ 的备份实例共用一个物理节点时, 链路 $m$ 的尾是VNF $j$ 的备份实例的部署的节点, VNF $j$ 和 $j-1$ 的备份实例共用链路 $m$ 。约

束式(14)说明当采用联合备份时不同的VNF实例可放置在一个物理节点上。约束式(15)保证设计路由的无环,约束式(16)说明各个变量的取值范围。

SFC中不同VNF之间的路由约束作为第2个子问题。同时承载相邻VNF备份实例的物理节点资源等于两个VNF的计算资源之和,定义辅助常量 $cp_{ij}$ 为

$$cp_{ij} = c_{ij} + c_{ij-1} \quad (17)$$

相邻VNF之间的路由可以分为两种情况。一是相邻的VNF不共用一个物理节点。设链路 $m(y_{ij}^m)$ 用于连接上述两个实例,则相应的路由约束可表达为

$$q_{ij-1}^{m.head} q_{ij}^{m.tail} \leq y_{ij}^m \quad (18)$$

$$1 - q_{ij-1}^{m.head} q_{ij}^{m.tail} \geq g_{ij} \quad (19)$$

二是当前VNF和前一个VNF的备份实例共用一个物理节点。此时,两个VNF实例之间通过物理节点内部通信,不含有连接链路。相应的路由约束规划为

$$q_{ij-1}^k q_{ij}^k = g_{ij} \quad (20)$$

最后,SFC部署的资源约束为

$$\sum_{k \in [1, |M|]_z} x_{ij}^k \geq NUM_{ij} \quad (21)$$

$$\sum_{i \in [1, |S|]_z} \sum_{j \in [1, |F_i|]_z} \{x_{ij}^k (1 - g_{ij}) c_{ij} + g_{ij} cp_{ij}\} \leq C_k \quad (22)$$

$$\sum_{i \in [1, |S|]_z} \sum_{j \in [1, |F_i|]_z} \{y_{ij}^m b_i - p_{ij}^{m.tail} g_{ij} b_i\} \leq B_m \quad (23)$$

约束式(21)确保网络中有充足的VNF备份以完成可靠性需求。约束式(22)和式(23)分别执行节点计算资源和链路带宽资源限制。

约束条件式(13)–式(20)中存在非线性约束条件,为将SFC部署问题建模成整数线性规划,引入二值辅助变量 $yq_{ij}^m = y_{ij}^m q_{ij}^{m.tail} (\forall m \in [1, |L|]_z, i \in [1, |S|]_z, j \in [1, |F_i| + 1]_z)$ 将约束式(13)线性化。

$$yq_{ij}^m = y_{ij}^m q_{ij-1}^{m.tail} \quad (24)$$

其中,变量 $yq_{ij}^m$ 和 $y_{ij}^m, q_{ij}^{m.tail}$ 的关系能够表达为

$$y_{ij}^m \geq yq_{ij}^m, q_{ij}^{m.tail} \geq yq_{ij}^m, yq_{ij}^m \geq y_{ij}^m + q_{ij}^{m.tail} - 1 \quad (25)$$

同样可以将约束条件式(15),式(18),式(19)和式(20)进行线性化处理,由于篇幅限制,在此不再赘述。

## 4 算法描述

SFC的部署是一个NP-hard问题<sup>[16]</sup>,本文基于

以上建立的整数线性规划模型可实现可靠性保障的SFC最优化部署。而鉴于整数线性规划的计算复杂度较高,在大规模网络中扩展性较差,基于最短路径设计了一种低复杂度的启发式算法。

### 4.1 基于整数线性规划的部署算法

SFC部署时VNF备份实例个数未知,对此本文基于整数线性规划(Integer Linear Programming, ILP)设计了一种增值迭代的SFC可靠性保障的部署算法(Integer linear programming Reliability Guarantee- Service Function Chain, IRG-SFC)。首先,设初始阶段SFC只包含一个基础VNF实例(即 $NUM_{ij} = 1$ )。计算SFC可靠性(见2.4节),如果SFC的部署能满足网络服务的可靠性要求,则停止计算,此时SFC的部署方案消耗最少的带宽资源和计算资源。如果初始SFC不存在满足可靠性要求的部署方案,则需要在SFC中添加VNF备份实例,备份VNF的选择在2.3节已详细介绍(详见表1第10行)。参数 $NUM_{ij}$ 的数值在每次迭代过程中不断增加,同样,参数 $g_{ij}$ 在每次迭代过程中也进行相应调整,因为备份VNF实例数量的增加和底层资源状态变化将会影响相邻VNF备份实例的放置策略(详见表1第10~14行)。重复进行以上过程,直到SFC的部署方案的可靠性满足网络服务要求。

### 4.2 基于最短路径的启发式算法

针对ILP的计算复杂度问题,本节提出一种基于最短路径的SFC部署算法(Greedy Shortest Path- Service Function Chain, GSP-SFC)。首先

表1 基于ILP的保障SFC可靠性的部署方案

初始化输入
$NUM_{ij} = 1, (i \in [1,  S ]_z, j \in [1,  F_i ]_z);$
Finished_flag=1;
While true
求解最优化问题:目标函数式(6)
约束条件:式(7)–式(25)(线性化)
计算SFC的可靠性 $Q_i$
For $i = 1 :  S $
If $Q_i < Q_i^{req}$
选择单位开销可靠性提高值最大的VNF $j$ 进行备份;
$NUM_{ij} = NUM_{ij} + 1;$
If $g_{ij} = 0;$
If VNF $j - 1$ 的备份实例可联合备份;
$g_{ij} = 1$
End;
Finished_flag=0;
End

采用 $K$ 最短路由算法计算源节点与目的节点之间的最短路径集合, 根据带宽资源和节点计算资源约束筛选出初始路径集合(详见表2第5行), 将初始SFC部署在底层网络上(详见表2第6~12行), 计算SFC可靠性。如果SFC的可靠性满足服务要求, 则计算停止, 输出最优的部署方案; 如果可靠性不能满足服务要求, 则根据VNF备份选择方法选择VNF $j$ 进行备份, 将NUM $_{ij}$ 数值累加, 同时根据相邻VNF的备份情况进行 $g_{ij}$ 值的更新(详见表2第14~21行)。重新进行SFC部署, 其中备份实例以多路径的方式连接在基础VNF的两端, 计算SFC可靠性, 选择可靠性最大的部署方案。重复以上过程, 直到SFC的可靠性满足网络服务要求。

表2 基于最短路径的贪婪保障SFC可靠性的部署方案

```

初始化输入
NUM $_{ij} = 1, (i \in [1, |S|], j \in [1, |F_i|])$ ;
For  $i = 1 : |S|$ 
  网络状态信息更新
  生成初始路径集合 $P_i$ 
  For  $P_i$ 中选择初始路径 $ip$ 
    For  $j = 1 : |F_i|$ 
      沿着路径 $ip$ 依次部署VNF $j$ , 同时考虑备份实例NUM $_{ij}$ 和 $g_{ij}$ 的取值
    End;
    If  $F_i$ 中存在未部署的VNF实例
      Continue;
    End;
    计算SFC的可靠性 $\Theta_i$ 
    If  $Q_i < Q_i^{req}$ 
      选择单位开销可靠性提高值最大的VNF $j$ 进行备份;
      NUM $_{ij} = NUM_{ij} + 1$ ;
      If  $g_{ij} = 0$ 
        If VNF $j - 1$ 的备份资源可联合备份;
           $g_{ij} = 1$ ;
        End;
      End;
    End;
  End;
End

```

### 4.3 复杂度分析

对于每个网络服务, GSP-SFC主要计算过程包含: (1)生成初始路径; (2)路径扩展和VNF部署。(1)中主要基于 $k$ 最短路径算法, 复杂度为 $O(k|N|(|L| + |N|\lg|N|))$ <sup>[17]</sup>。(2)中路径扩展的复杂度为 $O(|N|(|ip| + |F_i|)) = O(|N|^2)$ , ( $|F_i| \leq |N|, |ip| \leq |N|$ )其中 $|ip|$ 路径 $ip$ 的长度,  $|F_i|$ 表示网络服务 $i$ 的VNF实例数量, VNF放置复杂度最大为 $O(|ip||F_i|) = O(|N|^2)$ 。

为满足服务的可靠性, 算法仅需要有限次迭代, 设为 $a(a < |N|)$ 。因此一个SFC的可靠性部署算法的复杂度为 $O(k|N|(|L| + |N|\lg|N|))$ , 是多项式时间复杂度。

## 5 仿真结果及分析

### 5.1 实验环境和参数设置

本实验在Intel Core i7-6500 3.60GHz CPU, 8GB内存, Windows系统PC机上进行, 使用MATLAB完成数值仿真。本文选择广泛使用的专用备份方案<sup>[12]</sup>(Dedicated Protection- Service Function Chain, DP-SFC)作为参考评估, 并参考其中设定的仿真参数。本文采用中型规模的网络, 其网络拓扑包含20个物理节点。为不失一般性, 网络服务需求VNF种类数量固定为3, 每个物理节点均能承载3种VNF, 且保证每个VNF至少运行在1个物理节点上。每个物理节点的可靠性在 $[0.90, 0.96]$ 随机生成。物理节点计算资源和链路带宽资源取值分别为40和20(unit), 链路时延统一为10 ms。

### 5.2 性能分析

为评估本文所提算法的有效性, 本文从网络服务的请求接受率和资源开销两个方面进行性能分析, 其中资源开销分别采用带宽资源使用率和计算资源使用率两个指标进行评估。带宽资源使用率和计算资源使用率分别是指是指网络中完成SFC部署实际占用带宽或计算资源之和与网络中总的带宽或计算资源的比值。

首先, 在可靠性要求相同的情况下, 比较不同的部署方法对请求接受率变化和资源开销的影响。为了保证比较的公平性, 全部网络服务的可靠性和带宽需求分别设为0.99和2(unit)。

为验证IRG-SFC与GSP-SFC的复杂度, 表3展示了8节点小型网络下两个算法的执行结果。两种算法都能完成网络服务的可靠性要求, 且总体带宽开销比较接近。通过两者的运行时间(463 s和0.49 s)可以看出GSP-SFC显示了更好的扩展性, 这是因为IRG-SFC在每次迭代过程中通过求解ILP模型计算节点放置和路由连接, 在路由连接计算过程中, SFC基于VNF数量进而分割成子网, 而每个子网路由是基于最短路径算法所得。

图3描述了不同网络服务数量下, 请求接受率的变化。可以看出, 随着网络服务数量的增加, 请求接受率逐渐降低, 但不同算法的下降速度明显不同。在相同的资源环境和服务请求数量下, 本文提出的IRG-SFC和GSP-SFC的下降速度相对DP-SFC稍慢。DP-SFC算法在备份阶段因为备份实例引入大量的计算资源和带宽资源的开销, 当网络服务数

表3 8节点网络3条SFC的部署结果

算法	SFC	部署结果	可靠性	带宽使用率(%)	运行时间(s)
IRG-SFC	$f_1 \rightarrow f_2 \rightarrow f_3$	$8 \rightarrow 4(f_1) \rightarrow 7(f_2) (3\{f_1, f_2\}) \rightarrow 2(f_3) \rightarrow 1(f_3) \rightarrow 5$	0.99		
	$f_1 \rightarrow f_3 \rightarrow f_2$	$1 \rightarrow 2(f_1) \rightarrow 6(f_1) \rightarrow 3(f_3) \rightarrow 8(f_2) (7\{f_2, f_3\}) \rightarrow 4$	0.99	17.18	463
	$f_2 \rightarrow f_1 \rightarrow f_3$	$3 \rightarrow 4(f_2) \rightarrow 7(f_2) \rightarrow 2(f_1) \rightarrow 5(f_3) (6\{f_1, f_3\}) \rightarrow 1$	0.99		
GSP-SFC	$f_1 \rightarrow f_2 \rightarrow f_3$	$8 \rightarrow 4(f_1) \rightarrow 6(f_2) (3 \rightarrow 2\{f_1, f_2\}) \rightarrow 1(f_3) \rightarrow 5(f_3) \rightarrow 5$	0.99		
	$f_1 \rightarrow f_3 \rightarrow f_2$	$1 \rightarrow 2(f_1) \rightarrow 6(f_1) \rightarrow 3(f_3) \rightarrow 8(f_2) (7\{f_2, f_3\}) \rightarrow 4$	0.99	19.09	0.49
	$f_2 \rightarrow f_1 \rightarrow f_3$	$3 \rightarrow 4(f_2) \rightarrow 7(f_2) \rightarrow 2(f_1) \rightarrow 5(f_3) (6\{f_1, f_3\}) \rightarrow 1$	0.99		

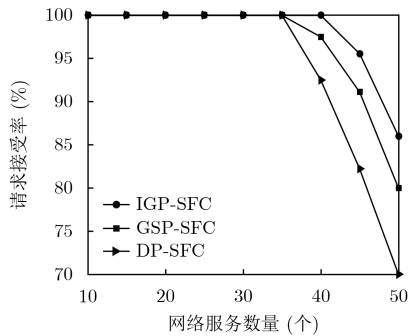


图3 请求接受率比较

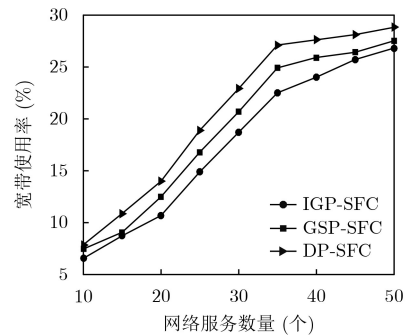


图4 带宽使用率比较

量的增加，有限的计算和带宽资源限制了SFC的部署，使请求接受率下降较快。而本文提出的算法可以有效节约备份时带来的带宽开销，且基于单位开销可靠性提高值最大的VNF备份选择策略也相对更高效地利用了计算资源。

图4评估了不同网络服务数量对带宽使用率的影响，随着网络服务数量的增加，带宽使用率逐渐上升。其中DP-SFC的带宽使用率上升速度较为明显，主要是因为专用备份的每个备份VNF实例需要与前后VNF的所有实例相连，且备份实例越多，带宽开销上升速度越快。本文采用的联合备份策略将相邻备份实例之间的链路连接转化为内部通信，有效地降低了备份实例的链路连接数量，因此带宽使用率相对降低。

图5给出了不同服务数量下本文提出的算法与DP-SFC节点计算资源使用率的比较。可以看出，3种算法的计算资源使用率上升速度均较快，而本文提出的算法在此方面存在少量优势。基于单位开销可靠性提高值最大的VNF备份选择策略，在资源有限情况下，每次选择计算资源使用效率最高的备份功能，但由于本文所提算法并未改变备份功能的数量，因此在计算资源利用率方面优势不够明显。当网络中服务请求数量较多时，3种方案的节点计算资源使用率均接近满载，出现网络拥塞。

然后在固定网络服务数量为40的情况下，图6比较了不同可靠性要求对请求接受率的影响。从图6中可以看出，请求接受率对服务可靠性需求变化很

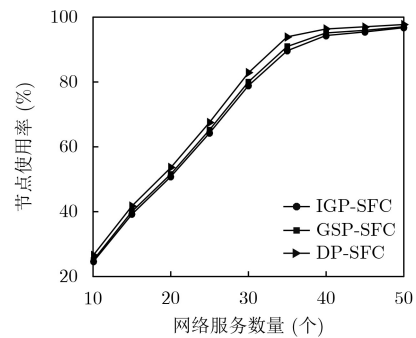


图5 节点计算资源使用率比较

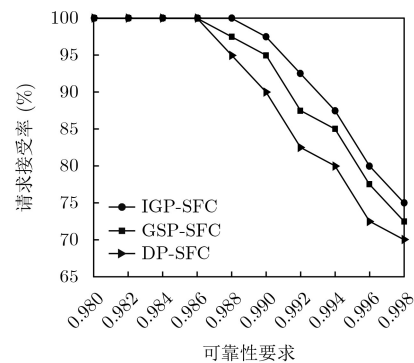


图6 不同可靠性下请求接受率比较

敏感，准确地说，少量的可靠性变化就会带来显著的请求接受率下降。可靠性需求的满足需要提供冗余VNF备份实例，其需要消耗额外的计算资源和带宽资源，而且，可靠性要求越高带来的额外资源开销越大，请求接受率越低。

## 6 结束语

本文主要研究了NFV环境下SFC部署时的可靠性问题, 如何在保障网络服务可靠性需求的同时最小化资源开销。针对恢复机制的实时性较差和专用备份的资源开销大问题, 本文设计了一种基于联合备份的SFC部署方法, 在优先满足可靠性需求条件下, 通过高效的备份VNF选择标准和改进的相邻备份实例放置策略降低部署资源开销, 并基于整数线性规划模型设计了一阶段SFC部署方案, 以及提出一种快速求解的启发式算法。仿真结果表明, 本文所提方法根据服务可靠性需求制定的SFC部署结果, 相对专用备份方式可有效节约资源开销, 提高请求接受率。

## 参考文献

- [1] NGMN A. 5G White Paper[OL]. <https://www.ngmn.org/5g-white-paper/5g-white-paper.html>, 2015.
  - [2] BO Han, VIJAY G, JI Lusheng, *et al.* Network function virtualization: Challenges and opportunities for innovations[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(2): 90–97. doi: [10.1109/MCOM.2015.7045396](https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7045396).
  - [3] GIL H J, and FELIPE B J. Resource allocation in NFV: A comprehensive survey[J]. *IEEE Transactions on Network & Service Management*, 2017, 13(3): 518–532. doi: [10.1109/TNSM.2016.2598420](https://doi.org/10.1109/TNSM.2016.2598420).
  - [4] ALLEG A, TOUFIK A, MOS M, *et al.* Delay-aware VNF placement and chaining based on a flexible resource allocation approach[C]. The 13th International Conference on Network and Service Management, Tokyo, Japan, 2017: 1–7.
  - [5] OUS S, MAR M, CHAIMA G, *et al.* Energy efficient algorithm for VNF placement and chaining[C]. The 17th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing, Madrid, Spain, 2017: 579–588.
  - [6] 刘彩霞, 卢干强, 汤红波, 等. 一种基于Viterbi算法的虚拟网络功能自适应部署方法[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(11): 2922–2930. doi: [10.11999/JEIT160045](https://doi.org/10.11999/JEIT160045).  
LIU Caixia, LU Ganqiang, TANG Hongbo, *et al.* Adaptive deployment method for virtualized network function based on viterbi algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(11): 2922–2930. doi: [10.11999/JEIT160045](https://doi.org/10.11999/JEIT160045).
  - [7] YUAN Quan, TANG Hongbo, YOU Wei, *et al.* Virtual network function scheduling via multilayer encoding genetic algorithm with distributed bandwidth allocation[J]. *Science China Information Sciences*, 2018, 61(9): 92–107. doi: [10.1007/s11432-017-9357-7](https://doi.org/10.1007/s11432-017-9357-7).
  - [8] COT D, DE SIMONE L, IAN A K, *et al.* Network function virtualization: challenges and directions for reliability assurance[C]. IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops. Naples, Italy, 2014: 37–42.
  - [9] SUN Jian, ZHU Guangyang, SUN Gang, *et al.* A reliability-aware approach for resource efficient virtual network function deployment[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 18238–18250. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2815614](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2815614).
  - [10] GEM A, VIS R, PAR C, *et al.* OpenNF: Enabling innovation in network function control[C]. ACM Conference on Sigcomm, Chicago, USA, 2014: 163–174.
  - [11] FAN Jingyuan, YE Zilong, GUAN Chaowen, *et al.* GREP: Guaranteeing reliability with enhanced protection in NFV[C]. ACM Sigcomm Workshop on Hot Topics in Middleboxes & Network Function Virtualization, London, United Kingdom, 2015: 13–18.
  - [12] QU Long, CHA A, KHA S, *et al.* A Reliability-aware network service chain provisioning with delay guarantees in NFV-enabled enterprise datacenter networks[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2017, 14(3): 554–568. doi: [10.1109/TNSM.2017.2723090](https://doi.org/10.1109/TNSM.2017.2723090).
  - [13] ZHU Zhikai, LU Hancheng, LI Jian, *et al.* Service function chain mapping with resource fragmentation avoidance[C]. 2017 IEEE Global Communications Conference, Singapore, 2017: 1–6.
  - [14] SARA A, ZHANG Yanhong, and CHADI A. RAS: Reliable auto-scaling of virtual machines in multi-tenant cloud networks[C]. IEEE International Conference on Cloud Networking, Niagara Falls, Canada, 2015: 1–6.
  - [15] HOY A, and RAUSAND M. System Reliability Theory: Models and Statistical Methods[M]. WILEY: Hoboken, USA, 2004: 97–106.
  - [16] KHEB S, HADJI M, and ZEG D. Scalable and cost-efficient algorithms for VNF chaining and placement problem[C]. Innovations in Clouds, Internet & Networks, Paris, France, 2017: 92–99.
  - [17] YEN J Y. Finding the K shortest loopless paths in a network[J]. *Management Science*, 1971, 17(11): 712–716. doi: [10.1287/mnsc.17.11.712](https://doi.org/10.1287/mnsc.17.11.712).
- 汤红波: 男, 1968年生, 教授、博士生导师, 主要研究方向为移动通信网络、新型网络体系结构。
- 邱航: 男, 1994年生, 硕士生, 研究方向为新一代移动通信技术、5G网络安全。
- 游伟: 男, 1984年生, 博士, 讲师, 研究方向为移动通信网络安全, 新一代移动通信网络技术。
- 季新生: 男, 1968年生, 教授、博士生导师, 主要研究方向为新一代移动通信技术、网络安全。