

面向可靠性的5G网络切片重构及映射算法

赵国繁* 唐伦 胡彦娟 赵培培 陈前斌

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

(重庆邮电大学移动通信技术重点实验室 重庆 400065)

摘要: 针对传统网络切片映射方法资源利用率低且可靠性差的问题, 该文提出了可靠性感知的网络切片(NS)重构及映射策略(RNSRE)。首先, 建立了面向可靠性和资源的网络切片可靠映射效用函数。其次, 综合考虑虚拟网络功能(VNF)的资源需求和位置约束, 提出了一种VNF可靠性需求的度量方法。在此基础上, 以最大化VNF可靠部署收益的同时最小化链路带宽资源开销为目标, 建立了切片可靠映射整数线性规划模型。最后, 针对不同的网络切片类型, 提出了基于邻域搜索的网络切片映射算法和关键VNF备份的网络切片重构映射算法。仿真结果表明, 所提算法在满足VNF可靠性需求的同时, 提高了资源利用率, 降低了映射的开销。

关键词: 5G网络切片; 可靠映射; 资源利用率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)06-1478-08

DOI: [10.11999/JEIT190500](https://doi.org/10.11999/JEIT190500)

A Reliability-aware 5G Network Slice Reconfiguration and Embedding Algorithm

ZHAO Guofan TANG Lun HU Yanjuan ZHAO Peipei CHEN Qianbin

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Post and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

(Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Post and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Considering the problems of low resource utilization and poor reliability of traditional network slice embedding, a Reliability-aware Network Slice (NS) Reconfiguration and Embedding (RNSRE) strategy is proposed. Firstly, a utility function of reliable embedding oriented reliability and available resources is established. Then, considering the resource requirements and the location constraints of Virtual Network Function (VNF), a method is proposed to quantify the reliability requirement of VNF. Based on the above works, the reliable network slice embedding problem is formulated as an integer linear programming which maximizes the profits of reliable VNF deployment while minimizing the consumption of link bandwidth resource. Finally, according to different types of network slices, a network slice reliable embedding algorithm based on neighborhood search and a network slice reconfiguration embedding algorithm based on key VNF backup are proposed. Simulation results show that the proposed algorithms improve the resources utilization and reduce the embedding cost while meeting the reliability of VNF.

Key words: 5G Network Slice (NS); Reliable embedding; Resource utilization

收稿日期: 2019-07-04; 改回日期: 2020-02-16; 网络出版: 2020-03-11

*通信作者: 赵国繁 1349366355@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61571073), 重庆市教委科学技术研究项目(KJZD-M201800601)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61571073), The Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJZD-M201800601)

1 引言

网络切片(Network Slice, NS)是5G理想的网路架构^[1],本质是共享底层基础设施但逻辑上完全隔离的专有网络,根据业务请求按需动态组合网络功能^[2]。网络切片映射(Network Slice Embedding, NSE)是网络切片生成的一个关键步骤^[3],其目的是在底层物理网络中找到满足映射约束的节点和路径,实现虚拟网络功能(Virtual Network Function, VNF)的部署和互通^[4]。业界普遍认可NSE是虚拟网络映射(Virtual Network Embedding, VNE)的扩展,为非确定性多项式困难(Non-deterministic Polynomial hard, NP-hard)问题,解决方案主要依赖于启发式算法。文献^[5]详述了现存NSE算法,主要针对理想网络状态下提高NSE成功率和优化链路资源利用率^[6,7]。

NS比单层网络更需要可靠映射策略来满足用户的可靠性需求。针对轻量级可靠映射,文献^[8]在无需备份资源的情况下最大化虚拟网络的可靠性。文献^[9,10]利用备份方式提高网络可靠性。文献^[11,12]提出了成本有效的可靠映射算法和虚拟网络“过可靠性”的概念。文献^[13]首次利用可靠性分配(Reliability Allocation, RA)的方法保证每个VNF的可靠性要求,但没有提出基于RA的NSE方案。综上所述,传统NSE在保证NS高可靠时忽略了资源利用率,导致较高的映射成本,同时没有考虑到VNF有不同可靠性需求的网络特性。

2 系统模型与问题描述

2.1 系统模型

5G网络切片集中映射架构如图1所示,端到端

NS将终端设备、接入网资源、核心网资源及管理系统等进行有机组合。虚拟网络运营商(Virtual Network Operation, VNO)依据获取的网络信息,利用映射算法实例化NS,建立逻辑独立、相互隔离的完整网络。

2.2 物理网络

底层物理网络为带权无向图 $G_s = (N_s, L_s)$,其中 $N_s = \{1, 2, \dots, n, \dots, M\}$ 为物理节点集。 C_n 和 R_n 表示物理节点 n 的计算资源和可靠性, C_n^r 表示节点 n 剩余的可用资源。 $L_s = \{l_{mn} | n, m \in N_s\}$ 表示物理链路集, l_{nm} 表示物理节点 n, m 之间的直接链路, b_{nm} 和 b_{nm}^r 分别表示通信链路 l_{nm} 分配的带宽资源和剩余可用带宽。

2.3 网络切片请求

NS请求(NS Request, NSR) g 由 $G_g^s = (V_g, E_g, R_{req}^g)$ 表示,其中 $V_g = \{v_1, v_2, \dots, v_{K_g}\}$ 为切片 g 所经过的VNF节点序列, K_g 为切片 g 中VNF节点数量。 $E_g = \{e_k | v_k, v_{k+1} \in V_g\}$ 为虚拟链路集, $e_k = (v_k, v_{k+1})$ 为切片 g 第 k 条虚拟链路, $b_{e_k}^g = b(v_k, v_{k+1})$ 切片 g 中VNF节点 v_k 与 v_{k+1} 间的带宽需求。 C_k^g 表示节点 $v_k \in N_v^g$ 的计算资源需求, R_{req}^g 表示NSR的整体可靠性需求, C_g 和 b_g 为NSR g 的计算和带宽资源消耗。

$P^g = [P(V_g), P(E_g)]$ 表示 G_g^s 映射方案。 $P(V_g) = \{P^g(v_k) | \forall v_k \in V_g\}$ 表示VNF功能节点的部署方案, $P(E_g) = \{P^g(e_k) | \forall e_k \in E_g\}$ 为切片 g 虚拟链路的映射方案。

2.4 可靠映射效用函数

本文利用有效度作为物理设备的可靠性度量指标^[14],由服务器平均修复时间(Mean Time To Repair, MTTR)和平均故障间隔时间(Mean Time Between Failures, MTBF)来衡量。

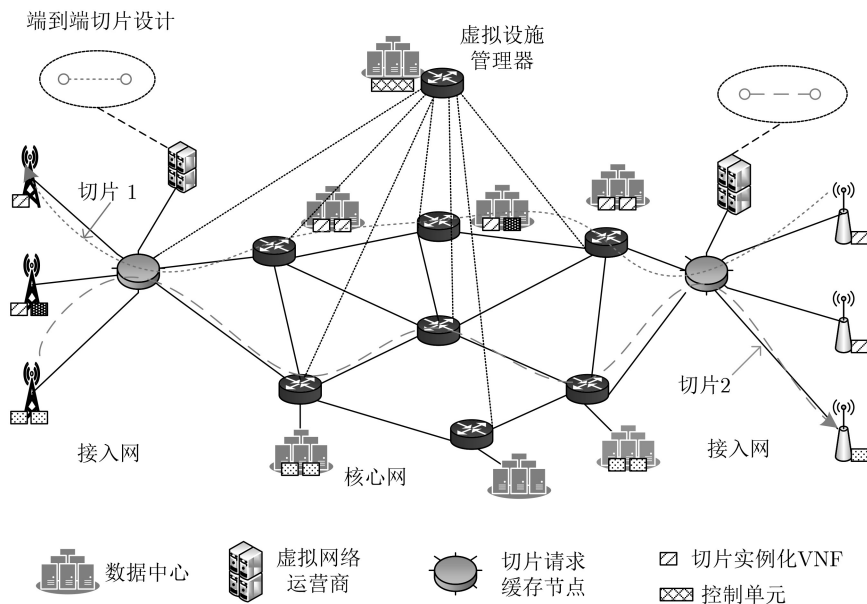


图1 5G网络切片场景

$$R_n = \text{MTBF}_n / (\text{MTBF}_n + \text{MTTR}_n) \quad (1)$$

NSR的不同VNF分别映射到不同的物理节点，VNF的可靠性由其所映射的物理服务器来保证。通过计算 P^g 中VNF部署涉及的每个物理节点可靠性的乘积来估计NS的总可靠性。

$$R(G_v^g) = \prod_{n \in P(V_g)} R_n \quad (2)$$

为了保证网络切片的可靠性，网络切片可靠映射必须满足

$$R_{\text{req}}^g \geq R(G_v^g) \quad (3)$$

VNO通过向基础设施提供商租赁资源创建NS为用户提供服务。VNO的收益 I_{VNO} 定义为提供服务获得的收入 H_g 与NSE成本 T_g 的差值。 T_g 和 H_g 由实例化该NS的资源量和提供资源的物理服务器可靠性共同决定，从VNO角度出发网络切片可靠映射效用函数可以定义为

$$I_{\text{VNO}} = H_g - T_g = k_1 R_{\text{req}}^g C_g - [k_2 R(G_v^g) C_g + k_3 b_g] \quad (4)$$

其中， k_1, k_2, k_3 为常数可调整。可靠映射模型可初步建立为式(5)，即在满足NS可靠性需求的前提下，最大化网络切片可靠映射效用函数

$$\begin{aligned} \max_{P^g} & k_1 R_{\text{req}}^g C_g - [k_2 R(G_v^g) C_g + k_3 b_g], \\ \text{s.t.} & R(G_v^g) \geq R_{\text{req}}^g \end{aligned} \quad (5)$$

3 网络切片可靠映射模型

NSR由一组VNF通过网络互连形成逻辑服务，本节根据VNF重要度指标，计算VNF可靠性需求，为其提供不同的可靠性保证。当NSR整体可靠性需求 R_{req}^g 给定时，获得VNF可靠性需求，可以采用RA的方法^[15]。定义VNF的3个重要度指标分别为：VNF v_i 计算资源需求 $S_i = C_i^g$ ；VNF带宽资源需求，定义为与VNF v_i 相连的所有邻接链路的带宽资源之和 $D_i = \sum_{e_i, e_{i+1} \in E_g} (b_{e_i}^g + b_{e_{i+1}}^g)$ ；VNF度中心性，从VNF位置的角度反映其重要性，定义为 $M_i = 1 / \sum_{v_j \in V_g} d_{ij}$ 。其中， d_{ij} 表示VNF v_i 与 v_j 之间的跳数距离。VNF中心度越大，表示VNF在网络切片中处于中间位置越重要。基于3个重要度指标， v_i 的归一化权重指标为

$$p_i^g = S_i + D_i + M_i / \sum_{i=1}^{K_g} S_i + D_i + M_i \quad (6)$$

根据RA的组件可靠性计算公式可得

$$R_i^g = (R_{\text{req}}^g)^{p_i^g} \quad (7)$$

其中， $R_i^g, i \in [1, 2, \dots, n]$ 为 v_i 的可靠性需求，且NS整体可靠性 R_{req}^g 与各个VNF的可靠性要求满足式(8)

$$\prod_{v_i \in V_g} R_i^g \geq R_{\text{req}}^g \quad (8)$$

为保证网络切片可靠性的前提下，最大化VNF部署收益同时最小化带宽资源开销，降低映射成本，基于式(5)网络切片可靠映射建模为式(9)整数规划问题。根据VNF可靠性权重指标，通过满足VNF的可靠性需求保证NS整体可靠性。其中，C1为二进制变量约束，当VNF节点 v_i 映射到物理节点 n 时 $x_{v_i, n}$ 为1，否则为0；如果NSR的虚拟链路 e_i 映射到物理链路 l_{nm} 则 $y_{e_i, l_{nm}}$ 为1，否则为0。C2表示属于同一NS的VNF节点不能映射到同一物理节点上。C3表示物理节点的可靠性 R_n 概率值不大于1。C4表示每个VNF都有不同的可靠性需求，在映射过程中要求单个VNF达到可靠性要求。C5在无备份保护物理网络中，NS实际实现的整体可靠性至少要满足NS整体可靠性要求。C6表示部署到同一物理节点各个NS中所有VNF节点所需求的计算资源总和小于等于该物理节点的计算资源容量。C7表示部署VNF节点的剩余计算资源必须大于节点所需的计算资源。C8表示部署到同一物理链路的各个NS所有链路所需求的带宽资源总和小于等于该物理链路的链路资源容量。C9表示映射的物理链路剩余带宽资源必须大于虚拟链路所需带宽资源。为解决上述问题，将NSR分为3类： $C_i^g > C_n, \forall n \in N_s, v_i^g \in V_g, C_n \geq C_i^g \ \& \ R_n \geq R_i^g, n \in N_s, v_i^g \in V_g$ 和 $C_n > C_i^g \ \& \ R_i^g > R_n, \forall n \in N_s, v_i^g \in V_g$ ，本文提出了面向可靠性的网络切片重构及映射策略(Reliability-aware Network Slice Reconfiguration and Embedding algorithm, RNSRE)。

$$\begin{aligned} \max_{x_{v_i, n}, y_{e_i, l_{nm}}} & w_r \sum_{n \in N_s} \sum_{v_i \in V_g} x_{v_i, n} C_i^g / (R_n - R_i^g) \\ & - \omega_c \left(\sum_{l_{nm} \in L_s} \sum_{e_i \in E_g} y_{e_i, l_{nm}} b_{e_i}^g \right) \\ \text{s.t.} & \text{C1: } x_{v_i, n} \in \{0, 1\}, y_{e_i, l_{nm}} \in \{0, 1\} \\ & \text{C2: } \sum_{n \in P(V_g)} x_{v_i, n} = 1, \forall v_i \in V_g \\ & \text{C3: } 0 < R_n < 1, \forall n \in N^S \\ & \text{C4: } R_n > R_i^g, \forall n \in P^g(v_i) \\ & \text{C5: } \prod_{n \in N_s} x_{v_i, n} R_n \geq R_{\text{req}}^g, \forall v_i \in V_g \\ & \text{C6: } \sum_{g \in \text{NS}} \sum_{v_i \in V_g} x_{v_i, n} C_i^g \leq C_n \\ & \text{C7: } C_n^r \geq C_i^g, n \in P^g(v_i), v_i \in V_g \\ & \text{C8: } \sum_{g \in \text{NS}} \sum_{e_i \in E_g} y_{e_i, l_{nm}} b_{e_i}^g \leq b_{nm} \\ & \text{C9: } b_{nm}^r \geq b(e_i), l_{nm} \in P^g(e_i), e_i \in E_g \end{aligned} \quad (9)$$

4 可靠性感知的网络切片重构及映射策略

4.1 基于邻域搜索的网络切片映射算法

针对第2类NSR，提出基于邻域搜索的网络切片映射算法。 P_{init}^g 利用贪婪准则搜索当前最可靠的节点和利用Dijkstra算法寻找最短路径获得。 P^g 的物理节点集从 P_i 节点集的邻域解中获得，邻域解为满足资源限制未被占用的可靠性次高节点集，根据部署阶段获得的节点集 $P^g(v_k), \forall v_k \in V_g$ 找出最短路径，最小化带宽资源消耗 b_g 。 P_i 为满足计算资源和可靠性约束的物理节点集，即VNF节点映射备选集，利用贪婪准则在备选集内选择可靠性与 R_i^g 最接近的节点 r_{min}

$$r_{\text{min}} = \arg \min \{ R_n - R_i^g \mid \varphi(n) = 0 \},$$

$$\forall n \in N_s \mid C_i^g > C_n \& R_i^g > R_n \quad (10)$$

通过不断搜索当前解 P_i 的邻域集，根据优化目标获得更优的可行解 P^g ，不断逼近目标解 P_{opt}^g 。其中，邻域搜索空间为 $S = \{n, n \in N_s \mid C_i^g > C_n \& R_i^g > R_n\}$ 。其次，为了提高资源利用率定义优化目标的更新函数如式(11)，其指明算法搜索的方向。当可行解变化时映射方案被改变，当前解的邻域集能够作为可行解的条件是其对应的更新函数 $\text{Obj}(P^g)$ 优于当前解获得的更新函数值，通过不断地搜索获得优化方案。

$$\text{Obj}'(P^g) = w_r \left(\prod_{n \in P(V_g)} R_n - R_{\text{req}}^g \right) + w_c b_g \quad (11)$$

考虑到可靠性差值与带宽之间的数量级，以及两目标的优先级，进一步完善优化目标如式(12)，其中 B_{total} 为当前网络的总带宽，其值远远大于当前NSE的带宽资源 b_g 。

$$\text{Obj}(P^g) = B_{\text{total}} \left(\prod_{n \in P(V_g)} R_n - R_{\text{req}}^g \right) + b_g$$

$$= B_{\text{total}} R_{\text{gap}} + b_g \quad (12)$$

最终，邻域搜索的终止条件为实际可靠性差值与带宽差值，避免大数效应，两者均归一化。

$$0 \leq R_{\text{gap}}/R_{\text{req}} + (b^g - b_{\text{req}}^g)/b_{\text{req}}^g \leq 0.5 \quad (13)$$

上述网络切片映射过程总结在表1算法中。

4.2 关键VNF备份的网络切片重构映射算法

对于第3类NSR，为提高映射成功率，设计了一种可靠性感知的网络切片重构映射算法。备份后VNF的可靠性发生变化，假设备份后VNF v_i^g 可靠性增量为 Δ_i 。由式(2)可知NS的可靠性为当前VNF可靠性的乘积，则备份模式下NS可靠性为

$$R(G_{\text{backup}}^g) = \prod_{v_i^g \in V_g, n \in P(V_g)} (R_i^n + \Delta_i) \quad (14)$$

在实际的网络场景中，由于存在多个VNF共享底层物理节点，每个VNF可靠性增量 Δ_i 很难得到。为计算NS的可靠性，针对不同的备份方式提出不同的估算模型，备份方式主要分为专有备份和共享备份。

专有备份，只要同种类型的VNF有一个可靠则NS整体可靠，估算模型为

$$R(G_{\text{backup}}^g) = \prod_{v_i^g \in V_g} \left[1 - \prod_{n \in S_i^g} (1 - R_n) \right] \quad (15)$$

其中， S_i^g 为NSRg的第 i 个VNF的备份物理节点集， $R(G_{\text{backup}}^g)$ 为备份后网络切片的可靠性。

共享备份，以所选的VNF为边界将NS划分为 K'_g 个串联的子拓扑结构 G_{sys}^g ，子拓扑的可靠性为 $R(G_{\text{sys}}^g)$ ，整个网络切片的可靠性为所有子拓扑可靠性的乘积

$$R(G_{\text{backup}}^g) = \prod_{i=1}^{K'_g} R(G_{\text{sys}}^g) \quad (16)$$

为计算 $R(G_{\text{sys}}^g)$ 根据所选择的两个VNF是否已经备份，参考文献[16]分为4种模型，(1)所选择的

表 1 基于邻域搜索的网络切片映射算法

输入：NSR $G_v^g = (V_g, E_g, R_{\text{req}}^g)$ ，物理网络 $G_s = (N_s, L_s)$ (5)

输出：NSE方案 $P^g = [P^g(v_k), P^g(e_k)]$ (6)

(1) 搜索空间 $S, P_{\text{opt}}^g = P_{\text{init}}^g; P_i = P_{\text{init}}^g$ (7)

(2) while($0.5 \leq R_{\text{gap}}/R_{\text{req}} + (b^g - b_{\text{req}}^g)/b_{\text{req}}^g \leq 1$), do (8)

(3) 在 P_i 的邻域解中搜索当前更优的个体 P_{next}^g (9)

(4) if $\prod_{n_i \in P_{\text{next}}^g} R_i \geq R_{\text{req}}^g$ then (10)

$P_i = P_{\text{next}}^g, R_{\text{gap}} = \prod_{n_i \in P_{\text{next}}^g} R_i - R_{\text{req}}^g$ (5)

计算当前的带宽消耗为 b_g (6)

end if (7)

if ($\text{Obj}(P_{\text{next}}^g) < \text{Obj}(P_{\text{opt}}^g)$) then (8)

$P_{\text{opt}}^g = P_{\text{next}}^g$ (9)

end if (10)

end while (11)

两个VNF v_i 与 v_j 均没有备份；(2)所选择的两个VNF中 v_j 具有备份节点 b' ；(3)所选 v_i 与 v_j 分别存在于两个子拓扑 G_W^g 和 G_N^g 中；(4)所选 v_i 与 v_j 在同一拓扑 G_N^g 中。

备份后NS可靠性的增量定义为

$$\Delta = R(G_{\text{backup}}^g) - R(G_v^g) \quad (17)$$

为了求解上述问题，本文引入概率重要度的概念^[17]，其可以有效地反映当前VNF可靠性变化对NS整体可靠性的影响。VNF v_i^g 的概率重要度定义为

$$P_i = \prod_{v_i^g \in V_g, n \in P(V_g)} (R_i^n + \Delta_i) - R(G_v^g) / \Delta_i = \Delta / \Delta_i \quad (18)$$

进一步可得VNF备份单位开销，即提高单位可靠性的资源消耗

$$\varphi_i = \left(\sum_{n \in N_s} x_{v_i, n} C_i^g \right) - C_i^g / \Delta_i \quad (19)$$

根据VNF概率重要度和备份单位开销定义VNF备份重要度指标，获得VNF备份顺序

$$\theta_i = P_i / \varphi_i = \Delta / \left(\sum_{n \in N_s} x_{v_i, n} C_i^g \right) - C_i^g \quad (20)$$

在共享备份中，每次选择两个VNF v_i 与 v_j 进行备份，此时VNF对的重要度可定义为

$$\theta_{ij} = \Delta / \left(\sum_{n \in N_s} x_{v_i, n} \cdot x_{v_j, n} \max(C_i^g, C_j^g) \right) - (C_i^g + C_j^g) \quad (21)$$

若每个VNF备份都计算 Δ ，计算繁琐。为简化计算，从NS整体角度出发，定义NS可靠性提高率为

$$u = \Delta / R(G_v^g) = R(G_{\text{backup}}^g) - R(G_v^g) / R(G_v^g) \quad (22)$$

基于文献^[16]的共享备份模式(2)可得

$$R(G_{\text{backup}}^g) = R_1 R_2 \dots R_k (R_N (1 - (1 - R_i)(1 - R_b)) + R_{N \setminus j} R_b R_i) R_p \dots R_q \quad (23)$$

其中， $R_1 R_2 \dots R_k$ 和 $R_p \dots R_q$ 是未被选中的子网可靠性，被选中的两个VNF v_i 与 v_j ，备份前的可靠性 R_i 和 R_j ，当为其提供备份节点 b 时，NS可靠性提高率为

$$u = \Delta / R(G_v^g) = -R_b + R_b / R_i \left(1 + R_i (1 - R_j) \cdot \prod_{k=1}^M (1 - R_{k_j}) / \tau - (1 - R_j) \prod_{k=1}^M (1 - R_{k_j}) \right) \quad (24)$$

为了获得可靠性增量 Δ 与所选择VNF的关系，分别求 u 关于 R_i 与 R_j 的偏导

$$\partial u / \partial R_i = -R_b / R_i^2 \quad (25)$$

定义 $A = (1 - R_j) \prod_{k=1}^M (1 - R_{k_j})$ ，可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial R_j} &= \frac{R_b R_i A' (\tau - A) - R_i (\tau - A)' A}{(\tau - A)^2} \\ &= R_b \frac{A' \tau - A \tau'}{(\tau - A)^2} = -R_b \frac{\prod_{k=1}^M (1 - R_{k_j}) (\tau + A)}{(\tau - A)^2} \end{aligned} \quad (26)$$

基于以上分析，为了获得映射方案 P_g^* ，提出了如表2所示的网络切片重构算法，将未满足可靠性需求NSR中的VNF分为两类：必须备份节点与可选备份节点。

5 性能仿真与结果分析

5.1 仿真场景设置

为了验证本文提出的RNSRE的有效性，利用MATLAB仿真实验平台模拟物理网络和NSR，参考文献^[7]具体仿真参数设置如表3所示。

同时为了更好地比较和评估RNSRE算法的性能，将其与其他3种基本的可靠映射策略做对比。

(1)改进文献^[7]中NSR节点排序算法为基于贪婪机制的网络切片可靠映射算法 (Reliable Network Slice Embedding algorithm based on Greedy, RNSEG)。(2)基于可靠性分配的两阶段网络切片

表2 关键VNF备份网络切片重构算法

输入: NSR $G_v^g = (V_g, E_g)$, 备份节点集 V_{reconf}

输出: $P^g = [P^g(v_k), P^g(e_k)]$

(1) for each $v_i^g \in V_{\text{reconf}}$

(2) 专有备份节点 $v_i^b, C_k^b = C_i^g$,

(3) 备份链路

(4) 基于式(23)得到 $R(G_{\text{backup}}^g)$

(5) end for

(6) while($R(G_{\text{backup}}^g) \leq R_{\text{req}}^g$), do

(7) for all $v_k^g \in V_g$, do

(8) 按照VNF可靠性递增，对节点进行排序

(9) 选择相邻VNF对提供共享备份节点 $v_i^b, C_k^b = \max\{C_i^g, C_j^g\}$

(10) 选择关键VNF对 $v_i^g, v_j^g = \arg \max\{\theta_{ij} | v_i^g, v_j^g \in V_g\}$

(11) 根据 $v_i^g, v_j^g \in V_g$ 的状态，选择共享备份可靠性估算模型得到

$R(G_{\text{backup}}^g)$

(12) end for

(13) 链路备份

(14) end while

(15) return

表 3 仿真参数设置表

仿真参数	参数设置	仿真参数	参数设置
物理节点的数目	$N=12, 25, 36$	物理节点CPU资源容量	$U[10, 20]$
物理节点可靠性分布	$U[0.95, 0.99]$	物理链路带宽资源容量	$U[20, 50]$
NSR的VNF个数	3	NSR生命周期	$[4, 12, 24]$
3种类型切片的可靠性需求	$U[0.90, 0.98]$	VNF节点CPU资源需求	$U[2, 6]$
VNF之间带宽资源需求	$U[8, 16]$		

映射算法 (two-stages Network Slice Embedding algorithm based on RA, NSERA); (3)基于禁忌搜索的网络切片可靠映射算法(reliable Network Slice Embedding algorithm based on Tabu Search, NSETS)。

5.2 仿真结果分析

图2显示了不同的NSR数目下，所提算法RNSRE与3种算法在映射成本方面的比较。由于RNSEG每次都选择当下最可靠的映射方式，所以映射成本最高。NSERA选择映射成本最低的节点映射，但是节点映射与链路映射分为两阶段，导致较高的带宽资源消耗。所提算法RNSRE与NSETS同时考虑节点映射成本与链路带宽资源，避免了以高昂的成本满足低可靠性需求，从而降低了映射成本。

图3(a)、图3(b)分别显示了所提算法与3种算法平均物理节点、链路资源利用率累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)。仿真

结果表明RNSRE最多可以利用80%节点资源，NSETS, NSERA和RNSEG分别最多可以利用70%, 55%和60%的节点资源。RNSRE算法一方面在映射过程中综合考虑可靠性与物理资源利用，从而增加节点资源利用率；另一方面，通过备份降低VNF对单个物理节点可靠性的需求，进而提高物理节点资源利用率。NSERA和RNSEG最多可利用50%的链路资源。NSETS在映射过程中综合考虑可靠性与链路资源利用率，最多可利用75%的链路资源。RNSRE提高了NSR映射成功率，所以具有更高的平均物理链路资源利用率。

NSR接受率，定义为成功映射的NSR数量占所到达的NSR总数目。如图4所示，本文所提算法RNSRE的平均接受率优于其他3种算法。NSERA在物理资源充足的条件下，单个物理节点的可靠性无法满足每个VNF的高可靠性要求，所以NSR平均接受率最低。RNSEG采用贪心策略选择最可靠节点保证NSR的可靠性，没有考虑当前映射方案对后续NSR的映射。NSETS在映射过程中联合优化节点和链路资源提高接受率。RNSRE同时考虑可靠性与链路带宽资源分配，避免出现瓶颈节点，通过VNF备份保证NSR的高可靠性需求，所以NSR接受率最高。

图5显示了不同映射算法下，NSR的可靠性。在NSE过程中，RNSEG算法以可靠性最大化为主要目标映射NSR，所以在整体可靠性性能方面产生优于NSETS和NSERA。但是，后面两种算法，综

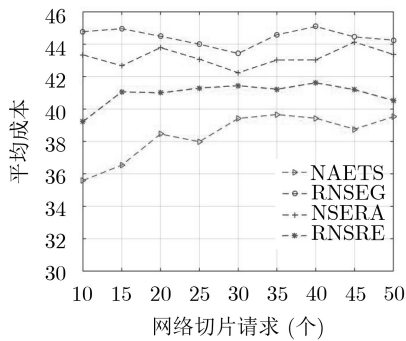
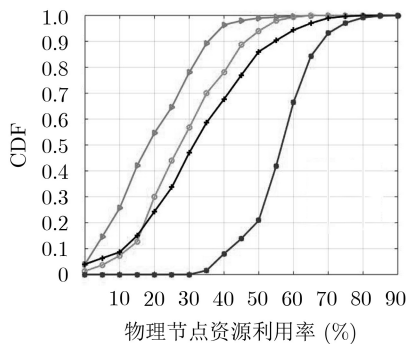
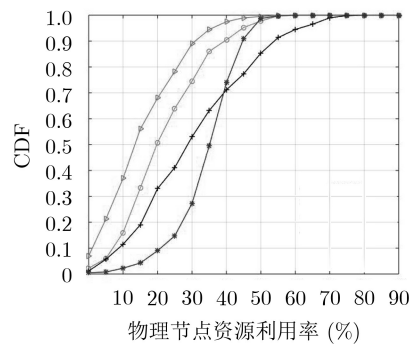


图 2 不同算法平均成本比较



(a) 物理节点资源利用率CDF



(b) 链路资源利用率CDF

图 3 所提算法与3种算法的平均物理节点、链路资源利用率累积分布函数

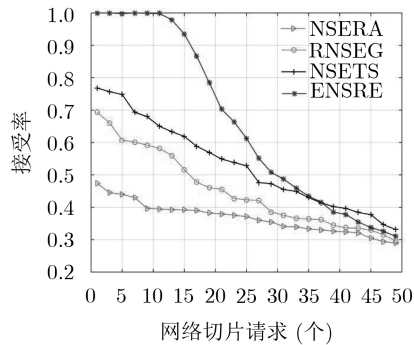


图4 不同算法NSR平均接受率比较

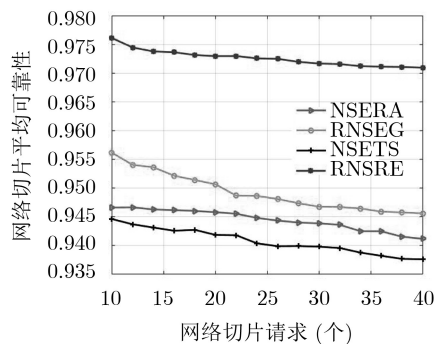


图5 不同算法到达的可靠性比较

合考虑了用户可靠性与切片映射成本，避免追求高可靠性导致的资源浪费。RNSRE算法在保证网络切片可靠性的同时降低映射成本，通过VNF备份满足网络切片的高可靠需求，所以，在4种算法中具有最好的可靠性能。

6 结束语

传统NSE在保证切片高可靠性需求时忽略了资源开销导致资源利用率低，同时忽略了VNF的不同可靠性需求导致切片可靠性差。为了在保证VNF可靠性需求的前提下，提高资源利用率，本文对网络切片可靠映射进行研究。首先，建立网络可靠映射效用函数，将VNF部署的收益与底层节点可靠性和自身可靠性需求相关联，其次，设定重要度评价指标获得VNF可靠性需求，以最大化VNF可靠部署收益的同时最小化链路开销为目标，建立网络切片可靠映射整数线性规划模型。最后设计了面向可靠性的网络切片重构及映射策略对其进行求解。

参考文献

- [1] ZHANG Haijun, LIU Na, CHU Xiaoli, *et al.* Network slicing based 5G and future mobile networks: Mobility, resource management, and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(8): 138–145. doi: [10.1109/MCOM.2017.1600940](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600940).
- [2] ORDONEZ-LUCENA J, AMEIGEIRAS P, LOPEZ D, *et al.* Network slicing for 5G with SDN/NFV: Concepts, architectures, and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(5): 80–87. doi: [10.1109/MCOM.2017.1600935](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600935).
- [3] FOUKAS X, PATOUNAS G, ELMOKASHFI A, *et al.* Network slicing in 5G: Survey and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(5): 94–100. doi: [10.1109/MCOM.2017.1600951](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600951).
- [4] LI Xi, CASELLAS R, LANDI G, *et al.* 5G-crosshaul network slicing: Enabling multi-tenancy in mobile transport networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(8): 128–137. doi: [10.1109/MCOM.2017.1600921](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600921).
- [5] VASSILARAS S, GKATZIKIS L, LIAKOPOULOS N, *et al.* The algorithmic aspects of network slicing[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(8): 112–119. doi: [10.1109/MCOM.2017.1600939](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600939).
- [6] ZHANG Nan, LIU Yafeng, FARMANBAR H, *et al.* Network slicing for service-oriented networks under resource constraints[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(11): 2512–2521. doi: [10.1109/JSAC.2017.2760147](https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2760147).
- [7] GUAN Wanqing, WEN Xiangming, WANG Luhan, *et al.* A service-oriented deployment policy of end-to-end network slicing based on complex network theory[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 19691–19701. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2822398](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2822398).
- [8] 刘光远, 苏森. 面向底层单节点失效的轻量级可靠虚拟网络映射算法[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(11): 2644–2649. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.00254](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.00254).
- LIU Guanyuan and SU Sen. Less stringent reliable virtual network mapping algorithm for substrate single node failure[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(11): 2644–2649. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.00254](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.00254).
- [9] LIU Jiajia, JIANG Zhongyuan, KATO N, *et al.* Reliability evaluation for NFV deployment of future mobile broadband networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(3): 90–96. doi: [10.1109/MWC.2016.749807](https://doi.org/10.1109/MWC.2016.749807).
- [10] KONG Jian, KIM I, WANG Xi, *et al.* Guaranteed-availability network function virtualization with network protection and VNF replication[C]. 2017 IEEE Global Communications Conference, Singapore, 2017: 1–6. doi: [10.1109/GLOCOM.2017.8254730](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2017.8254730).
- [11] CHEN Yiheng, AYOUBI S, and ASSI C. CORNER: CoSt-efficient and reliability-aware virtual Network redesign and embedding[C]. The 3rd IEEE International Conference on Cloud Networking, Luxembourg, 2014: 356–361. doi: [10.1109/CloudNet.2014.6969021](https://doi.org/10.1109/CloudNet.2014.6969021).
- [12] 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).

- [13] BIJWE S, MACHIDA F, ISHIDA S, *et al.* End-to-end reliability assurance of service chain embedding for network function virtualization[C]. 2017 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN), Berlin, Germany, 2017: 1–4. doi: [10.1109/NFV-SDN.2017.8169853](https://doi.org/10.1109/NFV-SDN.2017.8169853).
- [14] QU L, ASSI C, SHABAN K, *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).
- [15] CATELANI M, CIANI L, PATRIZI G, *et al.* Reliability allocation procedures in complex redundant systems[J]. *IEEE Systems Journal*, 2018, 12(2): 1182–1192. doi: [10.1109/JSYST.2017.2651161](https://doi.org/10.1109/JSYST.2017.2651161).
- [16] FAN Jingyuan, YE Zilong, GUAN Chaowen, *et al.* GREP: Guaranteeing reliability with enhanced protection in NFV[C]. 2015 ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Middleboxes and Network Function Virtualization, London, UK, 2015: 13–18.
- [17] MIZIULA P and NAVARRO J. Birnbaum importance measure for reliability systems with dependent components[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2019, 68(2): 439–450. doi: [10.1109/TR.2019.2895400](https://doi.org/10.1109/TR.2019.2895400).
- 赵国繁：女，1993年生，硕士，研究方向为5G网络切片中的资源分配，可靠性。
- 唐 伦：男，1973年生，教授，博士生导师，研究方向为新一代无线通信网络、异构蜂窝网络、软件定义无线网络等。
- 胡彦娟：女，1993年生，硕士生，研究方向为网络切片的映射与资源分配。
- 赵培培：女，1993年生，硕士生，研究方向为5G网络切片、网络虚拟化。
- 陈前斌：男，1967年生，教授，博士生导师，主要研究方向为个人通信、多媒体信息处理与传输、下一代移动通信网络、异构蜂窝网络等。