

基于可靠性的5G网络切片在线映射算法

唐伦* 赵国繁 杨恒 赵培培 陈前斌
(重庆邮电大学移动通信技术重点实验室 重庆 400065)

摘要: 为了满足业务多样性对5G网络切片带来差异化需求的同时保证切片的可靠性, 实现网络资源的优化配置。该文针对5G网络切片的动态映射、轻量级可靠映射问题, 提出对计算资源、链路资源和RRU频谱资源联合分配方案。首先, 该方案建立面向可靠性约束的多目标资源分配模型, 引入李雅普诺夫优化模型, 在保证队列稳定同时优化资源分配。其次, 提出了基于队列稳定性的虚拟节点映射算法和基于可靠性的虚拟链路映射算法。最后, 将时间离散为一系列连续的时间窗, 利用时间窗动态处理到达的网络切片请求, 实现在线的网络切片映射算法。仿真结果表明, 该算法提高了资源利用率, 并且保证网络可靠性。

关键词: 网络切片; 资源分配; 可靠性; 李雅普诺夫优化

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)08-1956-07

DOI: 10.11999/JEIT171119

Online Mapping Algorithm Based on Reliability for 5G Network Slicing

TANG Lun ZHAO Guofan YANG Heng ZHAO Peipei CHEN Qianbin

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

Abstract: To meet the diversified demand of 5G Network Slicing (NS), while ensuring the reliability of slice, to achieve the optimal allocation of network resources, considering the dynamic mapping and lightweight reliable mapping problem of network slicing, this paper proposes a joint allocation scheme of computing resources, link resources and the spectrum resources of Radio Remote Unit (RRU). Firstly, a multi-objective resource allocation model oriented to reliability constraints is established, and the Lyapunov optimization model is introduced to ensure the queue stability and optimize the resource allocation. Then, the virtual node mapping algorithm based on queue stability and virtual link mapping algorithm based on reliability are proposed. Finally, the time is discretized into a series of continuous time windows, and the online network slice mapping algorithm is implemented by using the time window dynamic processing of the incoming network slice request. Simulation results show that the proposed algorithm improves resource utilization and guarantees network reliability.

Key words: Network Slicing (NS); Resource allocation; Reliability; Lyapunov optimization

1 引言

网络切片(Network Slicing, NS)是逻辑上完全隔离的不同专有网络, 通过虚拟化技术可以实现不同网络切片之间资源的生命周期管理。在切片映射

过程中, 一方面底层的物理网络失效就会影响到共用基础设施的多个切片; 另一方面, 物理网络的失效率具有聚集性, 满足“二八定律”, 因此网络切片比单层网络更需要关注底层网络的可靠性。

文献[1~5]主要针对无故障核心网以提高虚拟网络请求的接受率与物理网络收益为目标进行了研究。文献[6]通过选择合适的冗余路径实现在可靠性限制下的高映射性能与低收敛时间之间的折中。文献[7]建立了可靠性感知和时延约束(RELIABILITY-Aware and Delay-constrained, READ)框架, 同时最大化服务可靠性与最小化相对应服务的端到端时延。文献[8]提出公平恢复模型和基于优先级的恢复

收稿日期: 2017-11-28; 改回日期: 2018-05-09; 网络出版: 2018-06-07

*通信作者: 唐伦 tangl@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61571073), 重庆市科委重点产业共性关键技术创新专项(cstc2015zdcy-ztzz40008)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61571073), The Chongqing Science and Technology Commission Key Industry Common Technology Innovation Special Project (cstc2015zdcy-ztzz40008)

模型解决底层物理网络中的故障。

综上所述，目前大多数文献研究无故障核心网映射，没有考虑接入网切片映射受到RRU (Radio Remote Unit)频谱利用率的影响；针对可靠映射主要采用冗余保护机制，该类方法虽简单有效，但需要额外的资源开销；网络切片虚拟化环境中，业务多样性对切片的可靠性提出了不同的要求，前期的研究未考虑到可靠性的不同要求。本文针对网络切片的动态映射、轻量级可靠映射问题，首先提出了对C-RAN (Cloud-Radio Access Network)中的计算资源和链路资源进行联合分配的方案，建立了面向可靠性约束的多目标资源分配模型，在不预留底层网络保护资源，寻找底层物理网络最可靠的通信路径，在保证网络切片可靠性的同时，最大化网络吞吐量。

其次将NS可靠度问题与李雅普诺夫优化模型结合起来，实现多目标优化，在保证网络稳定性下提高NS映射可靠度，最大化资源利用率，利用V参数的调节实现两者的折中。

最后，设计基于时间窗的网络切片在线映射算法(Network Slicing Embedding window-based Online, NSE-Online)，算法中网络切片请求的到达时间，持续时间以及资源需求都是随机的，根据网络切片的流量特征实时地为其分配底层物理资源，在时间维度上对底层资源进行调度，更加吻合实际网络的情况。

2 系统模型与问题描述

2.1 系统模型

文献[9]在C-RAN场景下研究了上行链路资源的动态分配，文献[10]将采用商业化模式将频谱资源作为收益载体，并对不同切片网络进行差异化定价。不同的是本文基于C-RAN网络场景主要针对不同服务特性创建的专有切片动态分配RAN的计算资源与链路资源。

如图1所示，不同线型的切片表示不同的业务类型， $\lambda_i, i = 1, 2$ 为链路的失效率，假设 $\lambda_1 > \lambda_2$ 的条件下，图中所示网络切片(实线箭头链接)均是在考虑到节点与链路资源限制下，选择最可靠的链路映射。但是节点2的负载过重，由于RRU频谱资源限制无法传输，网络切片时延增加，利用黄色虚线代表网络切片新的映射，提高频谱利用效率，网络切片可靠性也得到保证。

2.2 网络切片可靠性

采用目前大多数独立任务调度研究和文件所使用的系统模型[11]，假设通信链路的失效率满足泊松分布。文献[12,13]利用节点集评估网络的可靠

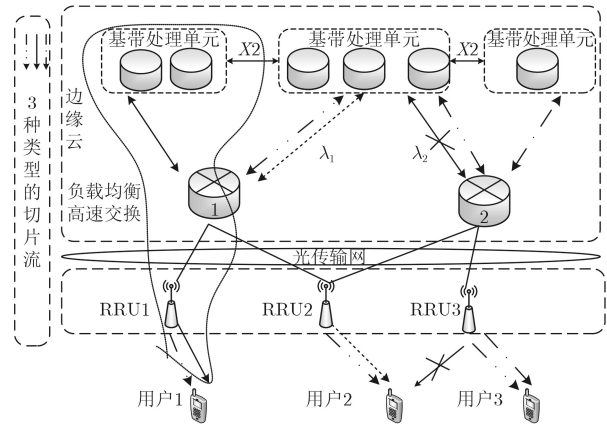


图1 C-RAN场景网络切片

性。为了准确评估网络切片的可靠性，本文利用随时间变化的函数(常数失效率)来表示系统可靠性，将可靠性与时延、失效率实现转换。随时间变化函数的定义如下：

定义 1 假设 $F(t)$ 表示随机变量 X 的概率分布函数， $f(t)$ 表示 X 的概率密度函数，系统可靠性为

$$R(t) = P(X > t) = 1 - F(t) \quad (1)$$

系统的失效率

$$\lambda(t) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x} \frac{F(t+x) - F(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2)$$

当系统无修复时间 X 满足指数分布 $EXP(\lambda)$ 时，有 $\lambda(t)$ 为常数，此时 $R(t) = e^{-\lambda t}$ 。在本文中， $R(t) = e^{-\lambda t}$ 中的 λ 表示通信链路的失效率， t 为传输时延。切片可靠性模型后面将详细描述。

3 网络模型

3.1 物理网络

底层物理网络由带权无向图 $G_s = (N_s, L_s)$ ，其中 $N_s = \{n_1, n_2, \dots, n_M\}$ 为物理节点集， C_i 表示物理节点 n_i 的计算能力， $L_s = \{l_{ij} | n_i, n_j \in N_s\}$ 表示物理链路集， l_{ij} 表示底层物理网络上具体的物理节点 n_i, n_j 的物理链路，其中通信链路 l_{ij} 的链路失效率表示为 λ_{ij} ，带宽为 B_{ij}^s 。

3.2 网络切片请求

网络切片请求 g 由 $G_v^g = (N_v^g, E_v^g)$ 表示，其中 $E_v^g = \{e_{kg} | v_m, v_n \in N_v^g\}$ 为虚拟链路集， e_{kg} 表示切片 g 第 k 条虚拟链路， $C_{s_{kg}}, C_{d_{kg}}$ 表示切片 g 的第 k 条链路的源节点和目的节点的计算资源需求， $N_v^g = \{v_1^g, v_2^g, \dots, v_N^g\}$ 为虚拟节点集， N 表示切片 g 虚拟节点数， $b_g = B(e_{kg}), \forall e_{kg}$ 切片 g 所需的带宽容量。

如图2所示，对每一个切片而言可以用 K_g 个两点有向子图表示建立数学模型， $v_{s_{kg}}, v_{d_{kg}}$ 分别为第 k 条虚拟链路 e_{kg} 的源节点、目的节点，当物理链路

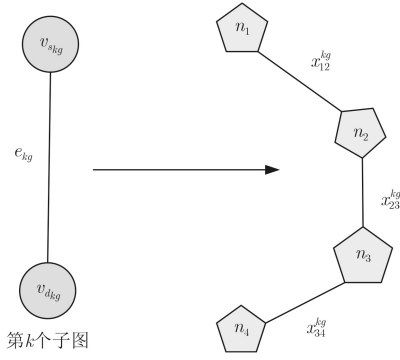


图2 虚拟链路两点子图映射

l_{ij} 被选中 $x_{ij}^{kg} = 1$, 否则 $x_{ij}^{kg} = 0$ 。

3.3 可靠切片网络映射模型

文献[14]研究了中大型网络中可靠性指标的精确评估, 提出了一旦已知源和目的节点, 可以只研究源到目标的通信节点的通信链路。于是, 可靠性定义如下: 若 e_{kg} 为表示切片 g 第 k 条虚拟链路, 虚拟节点 $v_{s_{kg}}, v_{d_{kg}}$ 被映射到物理节点 n_s, n_d 上执行, 两点间通信链路 l_k 的失效率与传输速率定义如式(3)和式(4)。

$$\lambda_{kg}(t) = \sum_{l_{ij} \in l_k} \lambda_{ij}(t) \quad (3)$$

$$b_g \leq \min_{l_{ij} \in l_k} B_{ij}^s \quad (4)$$

数据在源节点 n_s 与目的节点 n_d 间的传输时延 $L(e_{kg}, l_k)$, $v_{s_{kg}}$ 与 $v_{d_{kg}}$ 可靠通信的概率为

$$R(e_{kg}, l_k, t) = \exp[-\lambda_{kg}(t) \cdot L(e_{kg}, l_k)] \quad (5)$$

由式(5)得到可靠性与链路失效率、时延之间的转化。给定切片 g 的时延约束 T_g , 则最可靠通信路径方法可以归纳为如式(6)整数规划问题 $x_{ij}^{kg} \in \{0, 1\}$:

$$\text{Min} \sum_{l_{ij} \in P_{sd}^u} x_{ij}^{kg} \cdot \lambda_{ij} \cdot T_g \quad (6)$$

本文目标函数定义在保证可靠性的前提下最大化虚拟切片的数量。 T_g, P_g 为切片 g 的时延要求和计算资源需求。

二进制变量说明: $x_{ij}^{kg} \in \{0, 1\}$ 如果切片 g 的第 k 个子图映射到 l_{ij} 则为1, 否则为0; $y_{s_{kg}}^i, y_{d_{kg}}^i \in \{0, 1\}$ 节点 $v_{s_{kg}}$ 或者目的节点 $v_{d_{kg}}$ 映射到 n_i 则为1 否则为0; $y_g \in \{0, 1\}$ 如果切片 g 被成功映射则为1, 否则为0。

约束条件说明。 C_1 拓扑限制: 被映射的每一条物理链路 l_{ij} 其必须存在; C_2 多条虚拟链路映射到同一物理链路满足带宽限制; C_3, C_4 每个物理节点必须满足流守恒限制条件; C_5 物理节点计算

资源限制; C_6 在同一个子图中源节点与目的节点不可以映射到同一个点; C_7 如果切片 g 被映射则其子图内的每一个源节点与目的节点均被映射且只被映射一次。

$$\max R = \left\{ \sum_{g=1}^N \left[y_g P_g - \sum_{k=1}^{K_g} T_g \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M x_{ij}^{kg} \lambda_{ij} \right] \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{s.t. } & \forall i, j, n \in \{1, 2, \dots, M\}, \forall g \in \{1, 2, \dots, N\}, \\ & \forall k \in \{1, 2, \dots, K_g\} \\ C_1: & x_{ij}^{kg} \leq l_{ij} \\ C_2: & \sum_{g=1}^N \sum_{k=1}^{K_g} \left[b_g (x_{ij}^{kg} + x_{ji}^{kg}) \right] \leq B_{ij}^s \\ C_3: & \sum_{j=1}^M x_{nj}^{kg} \leq 1, \sum_{i=1}^M x_{in}^{kg} \leq 1 \\ C_4: & \sum_{j=1}^M x_{nj}^{kg} - \sum_{i=1}^M x_{in}^{kg} = y_{s_{kg}}^n - y_{d_{kg}}^n \\ C_5: & \sum_g \sum_{k=1}^{K_g} \left[C_{s_{kg}} y_{s_{kg}}^i + C_{d_{kg}} y_{d_{kg}}^i \right] \leq C_i \\ C_6: & y_{s_{kg}}^i + y_{d_{kg}}^i \leq 1 \\ C_7: & \sum_{i=1}^M y_{s_{kg}}^i = y_g, \sum_{i=1}^M y_{d_{kg}}^i = y_g \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

3.4 李雅普诺夫队列模型

不同于文献[15]研究备份可靠性与节点负担的折中, 本文通过选择最可靠的通信路径增加网络可靠性, 为消除资源热点问题, 将物理节点实时的队列状态与可靠性模型相结合, 根据参考文献[16]建立不同服务速率的多节点队列模型如图3所示。

网络切片队列模型描述如下: 切片 g 在时隙 t 的包到达过程定义为 $Z_g(t)$, ($g = 1, 2, \dots, N$); 时隙 t 物理节点 n_i 的服务速率为 $\mu_i(t)$, ($i = 1, 2, \dots, M$); 对于物理节点 n_i 数据的到达率为 $A_i(t) = \sum_{g=1}^N w_{g,i} Z_g(t)$, $w_{g,i}(t) \in [0, 1]$ 切片 g 映射到 n_i 的权重因子; 在时隙 t 的网络物理节点实际的队列向量为 $\mathbf{Q}(t) = (Q_1(t), Q_2(t), \dots, Q_M(t))$ 。

物理节点 n_i 的队列更新方程为

$$Q_i(t+1) = \max [Q_i(t) + A_i(t) - \mu_i(t), 0] \quad (9)$$

首先定义系统的李雅普诺夫函数为

$$L(t) = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^M (Q_i^2(t)) \right] \quad (10)$$

然后定义李雅普诺夫转移函数为

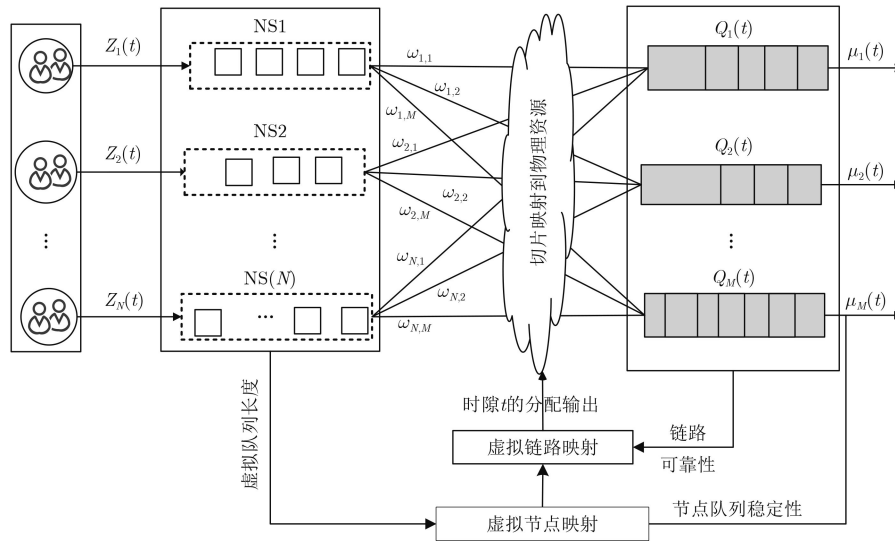


图3 基于网络切片的队列模型

$$\Delta(t) = E\{L(t+1) - L(t) | \mathbf{Q}(t)\} \quad (11)$$

将 $R(t)$ 作为惩罚项，控制任意时隙的资源分配，在保证队列稳定性的同时，要求式(7)中的效用函数最大，因此定义惩罚项为

$$R(t) = \sum_{g=1}^N \left[y_g(t) P_g - \sum_{k=1}^{K_g} T_g \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M x_{ij}^{kg}(t) \lambda_{ij} \right] \quad (12)$$

李雅普诺夫转移惩罚项为

$$\begin{aligned} \Delta(t) - VR(t) &= E[L(t+1) - L(t) | \mathbf{Q}(t)] - VE\{R(t)\} \\ &= E\left\{ \sum_{i=1}^M [Q_i(t)(A_i(t) - \mu_i(t)) | \mathbf{Q}(t) \right. \\ &\quad \left. + (A_i(t) - \mu_i(t))^2 \right\} - VE\{R(t)\} \\ &\leq B + E\left\{ \sum_{i=1}^M Q_i(t)(A_i(t) - \mu_i(t)) | \mathbf{Q}(t) \right\} \\ &\quad - VE\{R(t)\} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} B &= \frac{1}{2} E\left\{ \sum_{i=1}^M [(A_i(t))^2 + (\mu_i(t))^2] \right\} \\ &= \frac{1}{2} E\left\{ \sum_{i=1}^M \left[\sum_{g=1}^N (\omega_{g,i} x_g(t))^2 \right] + \mu_i^2(t) \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

最小化李雅普诺夫转移惩罚项的上界作为优化目标，李雅普诺夫优化模型可以简化为

$$\min_{y_g(t), x_{ij}^{kg}(t)} \sum_{i=1}^M Q_i(t)(A_i(t) - \mu_i(t)) - VR(t) \quad (15)$$

代入 $R(t)$ 之后：

$$\begin{aligned} \min_{y_g(t), x_{ij}^{kg}(t)} \sum_{i=1}^M Q_i(t) &\left[\sum_{g=1}^N w_{g,i}(t) Z_g(t) - \mu_i(t) \right] \\ &- V \left\{ \sum_{g=1}^N \left[y_g(t) P_g - \sum_{k=1}^{K_g} T_g \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M x_{ij}^{kg}(t) \lambda_{ij} \right] \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

$$A_i(t) = \sum_{g=1}^N w_{g,i} Z_g(t) \leq \mu_m^{\max}, \forall m \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (17)$$

$$Q_i(t+1) = \max [Q_i(t) + A_i(t) - \mu_i(t), 0] \quad (18)$$

$$w_{g,i}(t) = \sum_{k=1}^{K_g} [C_{s_{kg}} y_{s_{kg}}^i(t) + C_{d_{kg}} y_{d_{kg}}^i(t)] / P_g, \forall t \quad (19)$$

假设 $C_{s_{kg}} = C_{d_{kg}}$ ，得到

$$w_{g,i}(t) = C_{s_{kg}} / P_g, y_{s_{kg}}^i(t) \text{ 或 } y_{d_{kg}}^i(t) = 1 \quad (20)$$

基于上述条件，假设每个切片的所有子图 $K_g = 1$ ，最小化式(15)，相当于最大化其相反数，上述优化目标可以简化为

$$\begin{aligned} \max_{y_g(t), x_{ij}^{kg}(t)} \sum_{g=1}^N y_g(t) &\left\{ VP_g - \frac{Z_g(t)}{P_g} \sum_{i=1}^M Q_i(t) C_{*_{kg}} \right\} \\ &+ \sum_{i=1}^M Q_i(t) \mu_i(t) - V \sum_{g=1}^N T_g \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M x_{ij}^{kg}(t) \lambda_{ij} \end{aligned} \quad (21)$$

优化目标函数中节点映射与链路映射之间没有重叠，因此将原问题分解为节点映射与链路映射两个子问题(SP)求解。

$$\text{SP1} \quad \max \sum_{g=1}^N y_g(t) \left\{ VP_g - \frac{Z_g(t)}{P_g} \sum_{i=1}^M Q_i(t) C_{*kg} \right\} + \sum_{i=1}^M Q_i(t) \mu_i(t) \quad (22)$$

由于切片之间相互隔离, 将每一个切片看作是相互独立, 对于节点*i*需要求解的子问题为

$$i_{\max} = \arg \max_{i \in N_s} \{ VP_g - Z_g(t) w_{g,i} Q_i(t) \} + Q_i(t) \mu_i(t) \quad (23)$$

$$\text{SP2} \quad \min V \sum_{g=1}^N T_g \sum_{i,j=1}^M x_{ij}^{kg}(t) \lambda_{ij} \quad (24)$$

式(24)为带权值的最短径问题, 权值矩阵元素为链路失效率 λ_{ij} 。

4 算法分析与描述

4.1 算法描述

基于队列稳定性的可靠网络切片映射问题, 本质上是一种资源的优化组合问题, 难以在多项式时间内找到最优解, 因此提出新的启发式算法1和算法2。分别示于表1和表2。

表1 基于队列稳定性的虚拟节点映射

算法1 基于队列稳定性的虚拟节点映射

- (1) 虚拟切片 $C_v^g = (N_v^g, E_v^g)$
- (2) 生成物理网络 $G_s = (N_s, E_s)$
- (3) **for all** $n \in N_v^g$, **do**
- (4) **if** $C_n > C_i, \forall i \in N_s$ **then**
- (5) 拒绝 $G_v^g, y_g = 0$
- (6) **return**
- (7) **end if**
- (8) **for all** $i \in N_s | C_n \geq C_i$ **do**
- (9) $Y_i \leftarrow \{ VP_g - Z_g(t) w_{g,i} Q_i(t) \} + Q_i(t) \mu_i(t)$
- (10) $\varphi(i) \leftarrow 0, y_g \leftarrow 1$
- (11) $w_{g,i} = C_n y_n^i / P_g = C_{s_{kg}} y_{s_{kg}}^i / P_g = C_{d_{kg}} y_{d_{kg}}^i / P_g (i \neq j)$
- (12) **end for**
- (13) Let $i_{\max} = \arg \max_{i \in N_s} \{ Y_i | \varphi(i) = 0 \}$
- (14) set $y_g^{i_{\max}} \leftarrow 1, \varphi(i_{\max}) \leftarrow 1, Y_g \leftarrow i_{\max}$
- (15) **end for**
- (16) 基于 Y_g 利用 VLM-R (基于可靠性的链路映射算法) 映射虚拟链路
- (17) VLM-R 成功映射 **then**
- (18) 更新物理网络剩余的资源容量
- (19) **else**
- (20) 拒绝 $G_v^g, y_g = 0$
- (21) **end if**

表2 基于切片可靠性的虚拟链路映射

算法2 基于切片可靠性的虚拟链路映射

Input: Request $G_v^g = (N_v^g, E_v^g, T_g, b_g), G_s = (N_s, E_s, \lambda_s), Y_g, e_{kg} = (\text{src_id}, \text{dst_id})$

For $e_{kg} \in E_v^g$

Begin:

- (1) 将每个切片中的虚拟链路按照 k 递增的顺序排列
- (2) **for each** $e_{kg} \in E_v^g$ **do**
- (3) 由算法1得到的 Y_g 为 e_{kg} 匹配相对应的物理节点 n_s 与 n_t
- (4) set $\text{src_id} \leftarrow n_s, \text{dst_id} \leftarrow n_t$
- (5) 计算所有从 src_id 到 dst_id 的子路径 $P_m \in \Omega(e_{kg})$
- (6) **end for**
- (7) **for each** 子路径 $P_m \in \Omega(e_{kg})$ **do**
- (8) **if** $\{b_{ij} < b_k | l_{ij} \in P_m\}$ **then**
- (9) refuse e_{kg}
- (10) **else** $x_{ij}^{kg} = 1, \forall l_{ij} \in P_m$
- (11) 计算此路径 P_m 的失效率 $\sum_{i,j} x_{ij}^{kg} \lambda_{ij} T_g$ 作为它的权值
- (12) **end if**
- (13) **for all** p_k **do**
- (14) $\lambda_k \leftarrow \sum_{i,j} x_{ij}^{kg} \lambda_{ij} T_g$
- (15) **end for**
- (16) let $p_{\min} = \arg \min_{p_m \in \Omega(e_{kg})} \{\lambda_k\}$
- (17) set $X_{ij}^{kg} \leftarrow x_{ij}^{kg}$
- (18) **end for**

4.2 在线网络切片映射

在实际的网络虚拟化场景中, 切片网络请求不可能总是在固定的时间间隔内一个接一个依次到达。本文提出的在线映射, 根据网络切片的流量特征动态为其分配底层物理资源, 在时间维度上对底层资源进行调度。参考文献[5]利用时间窗动态处理到达的网络切片请求, 如图4将时间离散为一系列连续的时间窗。表3的算法3在一个特定的时间窗存储即将到达的网络切片请求, 基于生命周期的优先级进行处理, 周期越短的优先处理, 由可靠性的相关定义可知, 生命周期越短在映射过程中失效率越低, 进而提高全网的可靠性。

5 仿真结果与分析

仿真中物理网络随机生成10个物理节点, 计算资源、链路资源为[50, 80]随机分布。3种切片生命周期分别为60, 80, 100时间单元, 切片请求泊松分布随机到达, 在一个时间窗(50时间单元)到达率变化平均为1.4, 每个网络切片中业务的时间间隔服从参数15时间单位的泊松分布。NS的虚拟节点计算资源和链路带宽(30~50)随机分布, RRU的服务

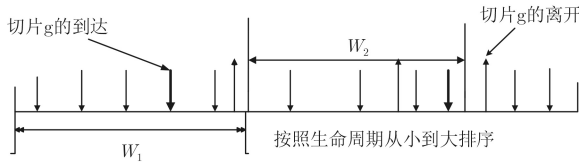


图 4 时间窗在线网络切片映射机制

表 3 基于时间窗的在线网络切片映射

算法3 基于时间窗的在线网络切片映射

- (1) 初始化时间窗为空集 $W_1 \leftarrow \{\}$
- (2) **loop**
- (3) $W_2 \leftarrow W_1$
- (4) $W_1 \leftarrow \{\}$
- (5) **repeat**
- (6) 添加新的虚拟切片请求 $G_v^g = (N_v^g, E_v^g, T_v^g)$ 到 W_2
- (7) **until** 当前窗口 W_2 过期
- (8) 根据切片生命周期对 W_2 内的切片进行排序，时间周期越短越优先处理
- (9) 将当前的时间 $T_2 \leftarrow$ Current time
- (10) **for all** $G_v^g \in W_2$ **do**
- (11) **if** $t_w(G_v^g)$ 在 T_2 之前已经过期 **then**
- (12) Reject G_v^g
- (13) **else**
- (14) 映射 G_v^g 用算法1
- (15) **if** 算法1映射 G_v^g 失败 **then**
- (16) 将 G_v^g 添加到 W_1
- (17) **end if**
- (18) **end if**
- (19) **end for**
- (20) **end loop**

速率 μ 为 (1.1~1.4)，控制参数 V 设置范围为 (0.2~0.6)。将仿真周期设置为400时间单元。

图5描述了RRU不同服务速率下，网络平均队长(400 ms)的变化。可以看出，随着RRU服务速率 μ 的增加，网络节点的平均队长稳定值越来越低。当服务速率为1.1时，随着时间的推移队列积压越来越多，网络无法保持稳定，证明了在资源映射过程中没有考虑到服务速率会造成网络拥塞。

图6评估了参数 V 对网络平均队长的影响，随着 V 增大，成本函数越接近最优值，但是网络平均队长越大， V 实现两者之间的折中。在服务速率受限时， V 对队列的影响比较明显，随着服务速率的增加，控制参数的变化对队列稳定的影响因子逐渐变低，甚至3个参数 V 之间的队列基本一致，因为服务速率的不断增大，队列几乎没有积压，此时效用函数的提高与队列稳定性之间基本可同时满足。

图7给出了不同服务速率下NSE-Online与文献

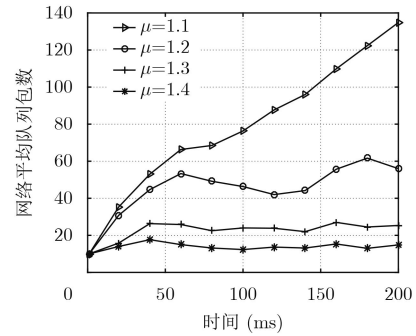


图 5 不同服务速率下对网络平均队长的影响比较

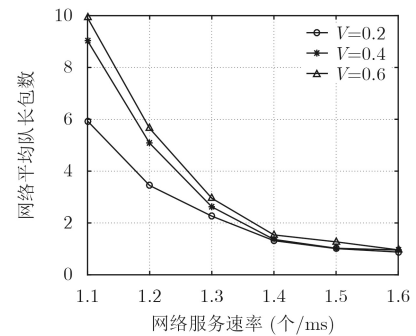


图 6 不同控制参数 V 下服务速率对网络队长的影响

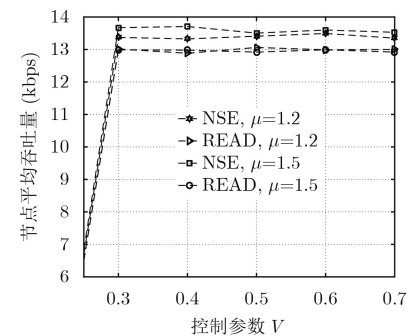


图 7 两种算法节点平均吞吐量对比

[7]中READ全网吞吐量性能比较，吞吐量为网络在400个时间单元内的时间平均值。从图中看出，NSE-Online性能优于READ，并且随着服务速率的增加而提高，因为READ并没有考虑服务速率所以其吞吐量基本不受服务速率的影响。

图8在不同控制参数下，比较了两种算法的可靠性，可靠性为网络在400时间单位内的平均值。NSE-Online算法初始时随着 V 的增加，可靠性能增加，在 $V=0.4\sim 0.5$ 时，可靠性最优，但是随着 V 的不断增大，忽略了队列的稳定性，增加了时延，可靠性能下降，但是总体平均值在0.98以上。READ没有考虑队列稳定性，性能次于NSE-Online。

6 结束语

本文基于5GCRAN场景，针对网络切片的动态映射、轻量级可靠映射问题，提出基于时间窗的

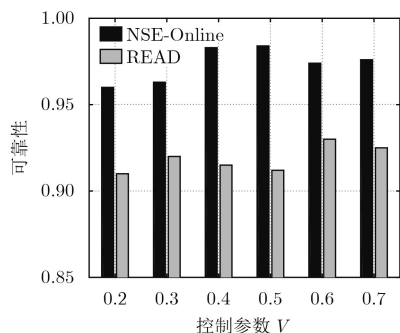


图8 两种算法不同控制参数V下可靠性对比

在线网络切片映射算法NSE-Online, 建立了面向可靠性约束的多目标资源分配模型, 在考虑到RRU服务速率的同时给出计算资源和链路资源联合分配方案。最后, 将切片的接受率与网络失效率差值作为目标函数进行建模, 并且引入李雅普诺夫优化模型, 在保证队列稳定同时优化资源分配。

参考文献

- [1] CAO Hantong, ZHU Yongxu, ZHENG Gan, *et al.* A novel optimal mapping algorithm with less computational complexity for virtual network embedding[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2018, 15(1): 356–371. doi: [10.1109/TNSM.2017.2778106](https://doi.org/10.1109/TNSM.2017.2778106).
 - [2] ZHOU Zibo, CHANG Xiaolin, YANG Yang, *et al.* Resource-aware virtual network parallel embedding based on genetic algorithm[C]. 2016 17th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies, Guangzhou, 2016: 81–86. doi: [10.1109/PDCAT.2016.031](https://doi.org/10.1109/PDCAT.2016.031).
 - [3] ZHENG Hongkun, LI Jingjing, GONG Yuejiao, *et al.* Link mapping-oriented ant colony system for virtual network embedding[C]. 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation, San Sebastian, 2017: 1223–1230. doi: [10.1109/CEC.2017.7969445](https://doi.org/10.1109/CEC.2017.7969445).
 - [4] TRIVISCONNO R, VAISHNAVI I, and GUERZONI R. Virtual links mapping in future SDN-enabled networks[C]. IEEE SDN for Future Networks and Services, Trento, 2013: 1–5. doi: [10.1109/SDN4FNS.2013.6702562](https://doi.org/10.1109/SDN4FNS.2013.6702562).
 - [5] CHOWDHURY M, RAHMAN M R, and BOUTABA R. ViNEYard: Virtual network embedding algorithms with coordinated node and link mapping[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2012, 20(1): 206–219.
 - [6] GUERZONI R, DESPOTOVIC Z, and TRIVISONNO R. Modeling reliability requirements in coordinated node and link mapping[C]. IEEE 33rd International Symposium on Reliable Distributed Systems, Nara, 2014: 321–330. doi: [10.1109/SRDS.2014.17](https://doi.org/10.1109/SRDS.2014.17).
 - [7] LONG Q, 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 & Service Management*, 2017, 14(3): 554–568. doi: [10.1109/TNSM.2017.2723090](https://doi.org/10.1109/TNSM.2017.2723090).
 - [8] SHAHRIAR N, AHMED R, CHOWDHURY S, *et al.* Generalized recovery from node failure in virtual network embedding[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2017, 14(2): 261–274. doi: [10.1109/TNSM.2017.2693404](https://doi.org/10.1109/TNSM.2017.2693404).
 - [9] HA V N and LONG B L. End-to-end network slicing in virtualized OFDMA-based cloud radio access networks[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 18675–18691. doi: [10.1109/ACCESS.2017.2754461](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2754461).
 - [10] 唐伦, 张亚, 梁荣, 等. 基于网络切片的网络效用最大化虚拟资源分配算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(8): 1812–1818. doi: [10.11999/JEIT161322](https://doi.org/10.11999/JEIT161322).
TANG Lun, ZHANG Ya, LIANG Rong, *et al.* Virtual resource allocation algorithm for network utility maximization based on network slicing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(8): 1812–1818. doi: [10.11999/JEIT161322](https://doi.org/10.11999/JEIT161322).
 - [11] LI Kenli, TANG Xiaoyong, VEERAVALLI B, *et al.* Scheduling precedence constrained stochastic tasks on heterogeneous cluster systems[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2014, 64(1): 191–204. doi: [10.1109/TC.2013.205](https://doi.org/10.1109/TC.2013.205).
 - [12] CHEN Yu and ZHANG Hongwei. Optimal request clustering for link reliability guarantee in wireless networked control[C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, San Francisco, 2017: 1–6. doi: [10.1109/WCNC.2017.7925790](https://doi.org/10.1109/WCNC.2017.7925790).
 - [13] 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.2016.7498079](https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7498079).
 - [14] CASCAVAL P and FLORIA S A. SDP algorithm for network reliability evaluation[C]. IEEE International Conference on Innovations in Intelligent Systems and Applications, Gdynia, 2017: 119–125. doi: [10.1109/INISTA.2017.8001143](https://doi.org/10.1109/INISTA.2017.8001143).
 - [15] KANG Jinkyu, SIMEONE O, and KANG J. On the trade-off between computational load and reliability for network function virtualization[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(8): 1767–1770. doi: [10.1109/LCOMM.2017.2698040](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2698040).
 - [16] SHUMINOSKI T and JANEVSKI T. Lyapunov optimization framework for 5g mobile nodes with multi-homing[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(5): 1026–1029. doi: [10.1109/LCOMM.2016.2540622](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2540622).
- 唐伦: 男, 1973年生, 教授, 博士, 研究方向为新一代无线网络、异构蜂窝网络、软件定义无线网络等。
赵国繁: 女, 1993年生, 硕士生, 研究方向为5G网络切片中的资源分配、可靠性。
杨恒: 男, 1993年生, 硕士生, 研究方向5G网络切片、虚拟资源分配。
赵培培: 女, 1993年生, 硕士生, 研究方向为5G网络切片映射算法。
陈前斌: 男, 1967年生, 教授, 博士生导师, 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。