

文章编号:1007-5321(2018)06-0071-07

DOI:10.13190/j.jbupt.2018-018

# 基于时延感知的 5G 网络切片节点和链路映射算法

唐 伦, 杨 恒, 赵国繁, 王耀玮, 陈前斌

(1. 重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 重庆邮电大学 移动通信技术重点实验室, 重庆 400065)

**摘要:** 针对第 5 代移动通信系统(5G)网络切片映射过程中,在满足系统时延要求的情况下,使资源调度最优化的问题,提出了一种基于时延感知的 5G 网络切片节点和链路映射成本最小化算法. 该算法在网络功能虚拟化管理和编排器及各网络功能服务器处建立两级队列动态调度模型,感知系统中当前队列积压状态并进行动态调度,使系统队列积压始终维持在稳定的较小值,采用 Lyapunov 随机优化方法,实现对映射成本与系统时延的平衡控制. 仿真结果表明,所提算法可在满足系统时延要求的同时,最优化资源调度,进而使得 5G 网络切片映射成本最小.

**关键词:** 网络切片; 映射算法; 时延; Lyapunov

**中图分类号:** TN929.53

**文献标志码:** A

## Delay-Aware 5G Network Slicing Node and Link Embedding Algorithm

TANG Lun, YANG Heng, ZHAO Guo-fan, WANG Yao-wei, CHEN Qian-bin

(1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** To optimize the resource scheduling while meeting the system delay requirement, the article proposes a delay-aware the fifth generation of mobile communications system (5G) network slicing node and link embedding algorithm in the process of 5G network slice embedding. The algorithm establishes a two-level queue dynamic scheduling model at the network functions virtualization management and orchestration and network functions virtualization servers. It realizes a current queue backlog in the system and carries on the dynamic scheduling, so that the system queue backlog is always maintained at the stable smaller value. The algorithm achieves the balance control between the embedding cost and the system delay by Lyapunov stochastic optimization method. The simulation results show that the algorithm can optimize the resource scheduling while satisfying the system delay requirement, and minimize 5G network slice embedding cost as well.

**Key words:** network slice; embedding algorithm; delay; Lyapunov

移动通信技术自 20 世纪 80 年代起发展十分迅速. 为了第 5 代移动通信(5G, the fifth generation of mobile communications system)系统的部署,必然需要全新的相关技术实现无线网络资源的统一调度及管理<sup>[1]</sup>,网络切片技术的提出可以有效地满足 5G

系统的需求,是实现 5G 网络的关键技术之一<sup>[2]</sup>. 虚拟网络映射(VNE, virtual network embedding)问题是 5G 网络切片中的关键问题. VNE 问题是指在不改变底层物理网络的前提下,如何从物理资源中选择满足虚拟网络请求(VNR, virtual network request)

收稿日期: 2018-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(6157073); 重庆市教委科学技术研究项目(KJZD-M201800601)

作者简介: 唐 伦(1973—),男,教授,博士生导师; 杨 恒(1993—),男,硕士生, E-mail: 378171465@qq.com.

的物理节点和链路,以使整个系统的映射成本最低,从而最大化网络运营商的收益<sup>[3]</sup>.目前,已有不少学者针对 VNE 算法进行了研究<sup>[4-7]</sup>,Wen 等<sup>[7]</sup>基于长期演进(LTE,long term evolution)网络针对无线接入网中的层二提出了软件定义协议栈的概念,将层二中协议栈的每一个协议层进行模块化,并且认为每一个协议层模块可以单独作为一个虚拟化网络功能模块组件(VNFC,virtualized network function component)进行映射,同时将 VNE 问题转化为软件定义协议栈请求映射(SDPM,software defined protocol request mapping)问题,并提出了一种 SDPM 算法.

现有映射算法均没有考虑不同 VNR 在短时间内大量达到时,如何满足系统时延要求.因此,为了满足系统时延要求,保证系统性能,提出了基于时延感知的 5G 网络切片节点和链路映射(DANSNLE,delay-aware 5G network slicing node and link embedding)算法.

## 1 系统模型与问题描述

### 1.1 网络切片系统架构

根据文献[7-8]提出了一种适合 5G 网络切片接入侧的系统架构,如图 1 所示.

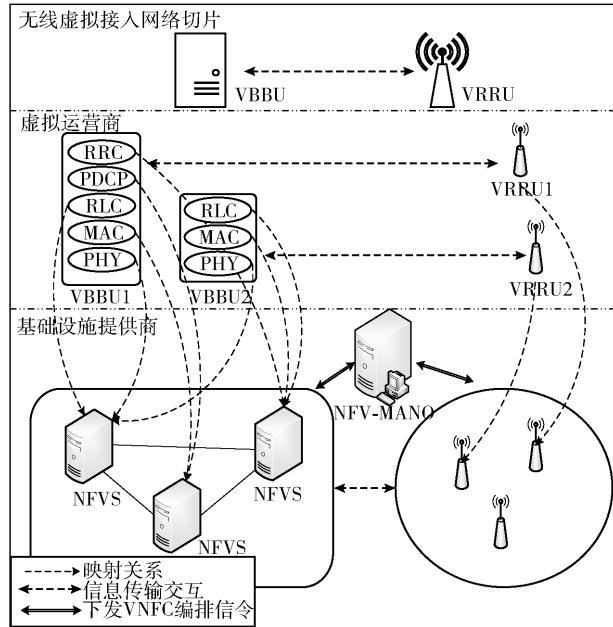


图1 5G网络切片接入侧系统架构

整个架构分成3层,即无线虚拟接入网络切片层、虚拟运营商层和基础设施提供商层.其中,虚拟运营商提出 VNR,且下发至网络功能虚拟化管理和编排器(NFV-MANO,network functions virtualization

management and orchestration),基础设施提供商则通过 NFV-MANO 的控制根据不同的 VNR 实现不同 VNFC 的编排部署,进而形成不同的虚拟化室内基带处理单元(VBBU,virtual building baseband unit),并接入合适的虚拟化远端射频单元(VRRU,virtual remote radio unit),从而根据虚拟运营商的 VNR 构建完成不同需求的无线虚拟接入网络切片.

网络中网络功能虚拟化服务器(NFVS,network functions virtualization server)的集合为  $N = \{1, 2, \dots, f, \dots, j, \dots, n\}$ ,不同 VNFC 种类的集合为  $M = \{1, 2, \dots, d, \dots, g, \dots, m\}$ ,不同 VNR 类型的集合为  $I = \{1, 2, \dots, i\}$ ,每台 NFVS 仅可支持运行有限的同一种 VNFC,即

$$\sum_{i \in I} \beta_{idf}(t) \leq Z, \forall d \in M, f \in N \quad (1)$$

其中: $\beta_{idf}(t) \in \{0, 1\}$ ,当且仅当 VNR $i$  中需要 VNFC $d$ ,且该 VNFC $d$  映射至 NFVS $f$  时  $\beta_{idf}(t) = 1$ ;  $Z$  为每台 NFVS 可支持运行同一种 VNFC 的最大数量.当 VNFC $d$  映射至 NFVS $f$  且 VNFC $g$  映射至 NFVS $j$  时,即实现虚拟链路到物理链路的映射,此时  $\beta_{idf}(t)\beta_{igj}(t) = 1$ ,同时针对任意一种 VNR,其所需要的物理链路带宽不能超过任意两台 NFVS 间所提供的最大可用带宽上限,即

$$\sum_{1 \leq d < g \leq |M|} \beta_{idf}(t)\beta_{igj}(t)b_{dg}(t) \leq K, \forall i \in I, f, j \in N \quad (2)$$

其中: $b_{dg}(t)$  为 2 个 VNFC 之间虚拟链路所需要的带宽资源, $K$  为任意两台 NFVS 间所提供的最大可用带宽上限.另外对于每一种 VNR,应保证其所需要的 VNFC 均能够映射到 NFVS 上,即

$$\sum_{f \in N} \beta_{idf}(t) = \varepsilon_d^i(t), \forall i \in I, d \in M \quad (3)$$

其中: $\varepsilon_d^i(t)$  为第  $i$  种 VNR 是否需要第  $d$  种 VNFC,若需要则  $\varepsilon_d^i(t) = 1$ ;否则  $\varepsilon_d^i(t) = 0$ .

### 1.2 两级队列调度模型

结合排队论,在网络切片系统中 NFV-MANO 处及各 NFVS 处建立两级队列动态调度模型,使得 NFV-MANO 处及各 NFVS 处的 VNR 积压始终稳定在一个稳定范围内,保证用户的体验.

第 1 级队列动态调度发生在 NFV-MANO 处,该处队列状态转移方程为

$$Q_{im}^M(t+1) = \max [Q_{im}^M(t) + \phi_i(t)\varepsilon_m^i(t) - \gamma_{im}(t), 0], \quad \forall i \in I, m \in M \quad (4)$$

其中: $Q_{im}^M(t)$  为某一时隙内,NFV-MANO 队列中来自

虚拟运营商不同的 VNR*i* 中需要 VNFC*m* 的个数; $\phi_i(t)$  为某一时隙内到达 NFV-MANO 中类型为 *i* 的 VNR 个数,服从泊松分布,均值为  $\lambda_i$ ,并假设存在达到峰值  $\hat{\phi}$ ,使得  $0 \leq \phi_i(t) \leq \hat{\phi}, \forall i \in I, \forall t \in T$  成立; $\gamma_{im}(t) = \sum_{n \in N} \gamma_{imn}(t)$  为第 *i* 种 VNR 中所需要的第 *m* 种 VNFC 映射请求路由的总个数, $\gamma_{imn}(t)$  为系统中 NFV-MANO 处第 *i* 种 VNR 中所需要的第 *m* 种 VNFC 的映射请求路由至 NFVSn,为了防止路由过程中的突发性,笔者认为  $\sum_{n \in N} \gamma_{imn}(t) < \hat{N}$ .

第2级队列动态调度发生在每一台 NFVS 处,该处队列状态转移方程为

$$Q_{imn}^P(t+1) = \max [Q_{imn}^P(t) + \gamma_{imn}(t) - \beta_{imn}(t)S_{imn}(t), 0], \quad \forall i \in I, m \in M, n \in N \quad (5)$$

其中: $Q_{imn}^P(t)$  为某一时隙内 NFVSn 的队列中待映射的来自虚拟运营商的不同 VNR*i* 中的 VNFC*m* 个数; $S_{imn}(t)$  为系统中 VNFC*m* 在 NFVSn 中的服务速率,服从泊松分布,均值为  $\kappa_s$ .

根据式(4)、式(5)可得时隙 *t* 起始时刻队列为

$$Q(t) = \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} \left[ Q_{im}^M(t) + \sum_{n \in N} Q_{imn}^P(t) \right] \quad (6)$$

对式(6)两端取期望可得时间平均队列积压为

$$\bar{Q} = \lim_{T \rightarrow \infty} \sup \frac{1}{T} \sum_{t \in T} E[Q(t)] \quad (7)$$

其中 *T* 为系统网络运行时间. 时间平均队列积压是与系统时延相关的时间平均性能指标,因此,为了满足系统时延要求,保证系统稳定性,需满足

$$\bar{Q} < \infty \quad (8)$$

### 1.3 映射成本模型

结合上述分析与讨论,可以进一步得到5G网络切片架构中的映射成本模型,表示为

$$c(t) = \sum_{i \in I} \left( \sum_{f, j \in N} \frac{1}{N(M-1)} \sum_{1 \leq d < g \leq M} (\beta_{idf}(t)c_f^d(t) + \beta_{igj}(t)c_j^g(t)) + \sum_{1 \leq d < g \leq M} \beta_{idf}(t)\beta_{igj}(t)c_{fg}^d(t)b_{dg}(t) \right) \quad (9)$$

其中: $c_f^d(t)$  为某一时隙内 VNFC*d* 映射到 NFVS*f* 上时, NFVS*f* 的租用价格, $c_{fg}(t)$  为某一时隙内物理链路单位带宽的租用价格; $r_c(t)$  为 NFVS 的剩余计算资源,为反映网络负载情况,定义  $c_f^d(t)$  与 NFVS 中的剩余计算资源成反比,记  $c_f^d(t) = \sigma/r_c(t)$ ,  $\sigma$  为非零常数, $r_b(t)$  为物理链路中的剩余带宽资源,同样

定义  $c_{fg}(t)$  与物理链路中剩余的带宽资源成反比,记  $c_{fg}(t) = \zeta/r_b(t)$ ,  $\zeta$  为非零常数;每完成一次 VNR 的映射,均需要更新  $c_f^d(t)$  与  $c_{fg}(t)$ ;  $1/N(M-1)$  仅为了消除物理节点重复计算.

进一步,对式(9)两端取期望,可得时间平均映射成本  $\bar{c}$  为

$$\bar{c} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t \in T} E[c(t)] \quad (10)$$

### 1.4 问题描述

控制目标为最小化时间平均映射成本,因此将节点和链路映射与系统时延问题描述为一个时延约束下的映射成本最小化问题:

$$\begin{aligned} & \min_{\gamma_{imn}, \beta_{imn}} \bar{c} \\ & \text{s.t. C1: } \bar{Q} < \infty \\ & \text{C2: } \sum_{i \in I} \beta_{idf}(t) \leq Z, \forall d \in M, f \in N \\ & \text{C3: } \sum_{i \in I} \beta_{igj}(t) \leq Z, \forall g \in M, j \in N \\ & \text{C4: } \sum_{1 \leq d < g \leq M} \beta_{idf}(t)\beta_{igj}(t)b_{dg}(t) \leq K, \forall i \in I, f, j \in N \\ & \text{C5: } \sum_{f \in N} \beta_{idf}(t) = \varepsilon_d^i(t), \forall i \in I, d \in M \\ & \text{C6: } \sum_{j \in N} \beta_{igj}(t) = \varepsilon_g^i(t), \forall i \in I, g \in M \\ & \text{C7: } \beta_{igj}(t), \beta_{idf}(t) \in \{0, 1\}, \forall i \in I, g, d \in M, j, f \in N \end{aligned} \quad (11)$$

该问题的目标是在满足系统队列稳定的前提下最小化映射成本,属于离散时间的随机动态规划问题. 式(11)中约束条件分别根据式(1)~(3)、式(8)得出,其中限制条件 C7 保证了决策变量的二元性.

## 2 Lyapunov 优化与 DANSNLE 算法流程

### 2.1 Lyapunov 优化模型转化

定义  $Q^M(t) = Q_{im}^M(t)$ 、 $Q^P(t) = Q_{imn}^P(t)$  分别表示时隙 *t* 的起始时刻, NFV-MANO 以及 NFVS 中的 VNR 队列长度;定义  $Q(t) \triangleq [Q^M(t); Q^P(t)]$ , 且定义 Lyapunov 函数以衡量系统在时隙 *t* 起始时刻的积压状况为

$$L(Q(t)) = \frac{1}{2} \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} \left[ (Q_{im}^M(t))^2 + \sum_{n \in N} (Q_{imn}^P(t))^2 \right] \quad (12)$$

可以发现,当  $L(Q(t))$  取值越小,则系统中队列积压越少.不失一般性,这里假设  $L(Q(0)) = 0$ .

定义 Lyapunov 漂移为相邻 2 个时隙 Lyapunov 函数之差的条件期望:

$$\Delta(Q(t)) = E\{L(Q(t+1)) - L(Q(t)) | Q(t)\} \quad (13)$$

根据 Lyapunov 随机优化理论的算法设计原则, NFV-MANO 需要在每个时隙  $t$  的起始时刻决定 VNR 的路由行为  $\gamma_{imn}(t)$  和 VNR 的映射行为  $\beta_{imn}(t)$ . 优化如下 Lyapunov 漂移与加权代价函数之和 (DPP, drift-plus-penalty) 的上界

$$\Delta(Q(t)) = VE\{c(t) | Q(t)\} \quad (14)$$

其中:  $V > 0$  称为 Lyapunov 控制参数,用于控制 Lyapunov 漂移与即时代价函数之间的平衡关系.

**定理 1** (漂移与加权代价函数之和的定界) 在任意算法控制下,  $\forall Q(t), \forall t \in T$ , DPP 具有如下上界:

$$\begin{aligned} \Delta(Q(t)) + VE\{c(t) | Q(t)\} \leq & B + VE\{c(t) | Q(t)\} + \\ & \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} E\{Q_{im}^M(t) [\phi_i(t) \varepsilon_m^i(t) - \gamma_{im}(t)] | Q(t)\} + \\ & \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} E\{Q_{imn}^P(t) [\gamma_{imn}(t) - \\ & (\beta_{imn}(t) S_{imn}(t))] | Q(t)\} \end{aligned} \quad (15)$$

具体证明过程参见文献[9],其中

$$\begin{aligned} B = & \frac{1}{2} \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} E\{[(\phi_i(t) \varepsilon_m^i(t))^2 + \\ & \gamma_{im}(t)^2 - 2\phi_i(t) \varepsilon_m^i(t) \gamma_{im}(t)] | Q(t)\} + \\ & \frac{1}{2} \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} E\{[\gamma_{imn}(t)^2 + (\beta_{imn}(t) S_{imn}(t))^2 - \\ & 2\gamma_{imn}(t) (\beta_{imn}(t) S_{imn}(t))] | Q(t)\} \end{aligned}$$

## 2.2 DANSNLE 算法流程

由于  $c(t)$  包含链路映射花费,且两节点确定一条链路,所以需成对考虑节点,将式(15)重新写为如下形式

$$\begin{aligned} \text{sum}(t) = & V \left( \sum_{i \in I} \left( \sum_{f, j \in N} \frac{1}{N(M-1)} \sum_{1 \leq d < g \leq |M|} (\beta_{idf}(t) c_f^d(t) + \right. \right. \\ & \left. \left. \beta_{igj}(t) c_j^g(t)) + \right. \right. \\ & \left. \sum_{1 \leq d < g \leq |M|} \beta_{idf}(t) \beta_{igj}(t) c_{fj}(t) b_{dg}(t) \right) + \\ & \sum_{i \in I} \frac{1}{M-1} \sum_{1 \leq d < g \leq |M|} \{Q_{id}^M(t) [\phi_i(t) \varepsilon_d^i(t) - \gamma_{id}(t)] + \\ & Q_{ig}^M(t) [\phi_i(t) \varepsilon_g^i(t) - \gamma_{ig}(t)]\} + \\ & \sum_{i \in I} \frac{1}{N(M-1)} \sum_{f, j \in N} \sum_{1 \leq d < g \leq |M|} \{Q_{idf}^P(t) [\gamma_{idf}(t) - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (\beta_{idf}(t) S_{idf}(t))] + Q_{igj}^P(t) [\gamma_{igj}(t) - \\ & (\beta_{igj}(t) S_{igj}(t))] \} \end{aligned} \quad (16)$$

其中:  $1/M-1$  与  $1/N(M-1)$  为消除重复计算.

经过转化后的最小化映射成本模型为

$$\begin{aligned} \min_{\gamma_{imn}, \beta_{imn}} \quad & \text{sum}(t) \\ \text{s. t.} \quad & \text{C1: } 0 \leq \sum_{f \in N} \gamma_{idf}(t) < \hat{N}, \forall i \in I, d \in M \\ & \text{C2: } 0 \leq \sum_{g \in N} \gamma_{igj}(t) < \hat{N}, \forall i \in I, j \in M \\ & \text{C3: } \sum_{i \in I} \beta_{idf}(t) \leq Z, \forall d \in M, f \in N \\ & \text{C4: } \sum_{i \in I} \beta_{igj}(t) \leq Z, \forall g \in M, j \in N \\ & \text{C5: } \sum_{1 \leq d < g \leq |M|} \beta_{idf}(t) \beta_{igj}(t) b_{dg}(t) \leq K, \\ & \quad \forall i \in I, f, j \in N \\ & \text{C6: } \sum_{f \in N} \beta_{idf}(t) = \varepsilon_d^i(t), \forall i \in I, d \in M \\ & \text{C7: } \sum_{j \in N} \beta_{igj}(t) = \varepsilon_g^i(t), \forall i \in I, g \in M \\ & \text{C8: } \gamma_{idf}(t), \gamma_{igj}(t), \beta_{idf}(t), \beta_{igj}(t) \in \{0, 1\}, \\ & \quad \forall i \in I, g, d \in M, j, f \in N \end{aligned} \quad (17)$$

其中:限制条件 C1 与 C2 是为了限制 VNR 转移至 NFVS 的突发性, C8 为了保证决策变量的二元性,其他限制条件与式(11)中限制条件物理意义相同.

忽略无关常量,对目标函数进行整理可得

$$\begin{aligned} \text{sum}(t) = & \sum_{i \in I} \sum_{1 \leq d \leq g \leq |M|} \sum_{f, j \in N} \left( \frac{1}{N(M-1)} (V \beta_{idf}(t) c_f^d(t) + \right. \\ & \left. V \beta_{igj}(t) c_j^g(t) - Q_{idf}^P(t) (\beta_{idf}(t) S_{idf}(t)) - \right. \\ & \left. Q_{igj}^P(t) (\beta_{igj}(t) S_{igj}(t))) + V \beta_{idf}(t) \beta_{igj}(t) c_{fj}(t) b_{dj}(t) \right) - \\ & \sum_{i \in I} \sum_{1 \leq d \leq g \leq |M|} \left( \frac{1}{(M-1)} (Q_{id}^M(t) \gamma_{id}(t) + Q_{ig}^M(t) \gamma_{ig}(t)) + \right. \\ & \left. \sum_{f, j \in N} \frac{1}{N(M-1)} (Q_{idf}^P(t) \gamma_{idf}(t) + Q_{igj}^P(t) \gamma_{igj}(t)) \right) \end{aligned} \quad (18)$$

不难看出,上述问题属于三维 0-1 二次规划问题,无法直接进行求解,因此根据决策变量  $\gamma_{imn}(t)$  及  $\beta_{imn}(t)$  对最小化问题进行分解,将式(18)转化为如下两类  $|I|$  个二维 0-1 二次规划子问题.

1) NFV-MANO 处 VNR 路由问题

$$\min_{\gamma_{imn}} \sum_{1 \leq d \leq g \leq |M|} \left( \sum_{f, j \in N} \frac{1}{N(M-1)} (Q_{idf}^P(t) \gamma_{idf}(t) + \right.$$



$$Q_{igj}^P(t)\gamma_{igj}(t) - \frac{1}{(M-1)}(Q_{id}^M(t)\gamma_{id}(t) + Q_{ig}^M(t)\gamma_{ig}(t)) \quad (19)$$

## 2) NFVS 处 VNR 映射问题

$$\max_{\beta_{imn}} \sum_{1 \leq d \leq g \leq Mf, j \in N} \left( \frac{1}{N} \frac{1}{(M-1)} (Q_{idf}^P(t)(\beta_{idf}(t)S_{idf}(t)) + Q_{igj}^P(t)(\beta_{igj}(t)S_{igj}(t)) - V\beta_{idf}(t)c_f^d(t) - V\beta_{igj}(t)c_j^g(t)) - V\beta_{idf}(t)\beta_{igj}(t)c_{fj}(t)b_{df}(t) \right) \quad (20)$$

基于上述分析,提出了满足系统时延要求的 DANSNLE 算法,具体算法流程如算法 1 所示。

**算法 1** 基于时延感知的 5G 网络切片节点和链路映射算法

输入:  $M, N, I, T, V$ .

输出:  $\gamma_{imn}(t), \beta_{imn}(t), c(t)$

```

1  初始化:  $t \leftarrow 0, Q_{im}^M(t) \leftarrow 0, Q_{imn}^P(t) \leftarrow 0, r_c(t), r_b(t), \sigma, \zeta$ .
2  while  $t \leq T$  do
3    for  $i \in I$  do
4       $c_f^d(t) = \sigma^* ./ r_c(t)$ .
5       $c_{fj}(t) = \zeta^* ./ r_b(t)$ .
6      根据式(19)采用分支定界法得到  $\gamma_{imn}(t)$ .
7      根据式(20)采用分支定界法得到  $\beta_{imn}(t)$ .
8      根据  $\beta_{imn}(t)$  更新  $r_c(t)$  及  $r_b(t)$ .
9      for  $m \in M$  do
10         根据式(4)更新  $Q_{im}^M(t)$ .
11         for  $n \in N$  do
12            根据式(5)更新  $Q_{imn}^P(t)$ .
13         end for
14       end for
15     end for
16     根据式(9)计算得到  $c(t)$ .
17      $t++$ .
18  end while

```

**定理 2** (基于时延感知的 5G 网络切片节点和链路映射算法的理论性能) 所提算法控制下的时间平均队列满足

$$\bar{Q} \leq \frac{B + V\hat{c}}{e} \quad (21)$$

其中  $e$  为非零常数。与此同时,最优映射成本  $\bar{c}^*$  与所提算法控制下的成本  $\bar{c}$  满足

$$\bar{c}^{\text{our}} \triangleq \limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t \in T} E[c(t)] \leq \bar{c}^* + \frac{B}{V} \quad (22)$$

**证明** 运用文献[9]中的随机优化理论的标准结果得证。

## 3 仿真与分析

利用 matlab 仿真工具对本文所提算法进行仿真验证。假设基础设施提供商拥有 5 台 NFVS, 每台 NFVS 均可运行 4 种不同类型的 VNFC, 且运行每种 VNFC 的最大数量服从均匀分布  $U(5, 10)$ , 每台 NFVS 通过物理链路两两互联, 每条物理链路的最大容量服从均匀分布  $U(3, 8)$ , 设置  $\sigma = 30$ ,  $\zeta = 20$ ,  $\hat{N} = \hat{\phi} = 6$ ; 假设虚拟运营商持续下发 3 种不同类型的 VNR。每种类型 VNR 单位时隙内的到达率均服从参数为  $\lambda_i = 2$  的泊松分布, 而系统中不同 NFVS 针对每种 VNFC 的服务率则服从  $\kappa_s = 4$  的泊松分布。为了验证本文算法的有效性和优越性, 与文献[7]中的 SDPM 算法进行了比较分析; 仿真持续 200 个时隙, 每时隙长度为 5 min。

### 1) 有效性评估

如图 2 所示, 随着仿真时隙的增加, 时间平均队列积压起初迅速增加, 随后趋于稳定, 这也说明笔者所提的 DANSNLE 算法可以有效保证系统队列稳定性, 满足系统时延要求, 这一趋于稳定的趋势也与定理 2 中的式(21)的表述一致。如图 3 所示, 随着仿真时隙的增加, 时间平均映射成本起初也会迅速增加, 但最终仍会趋于一个稳定值, 与定理 2 中的式(22)表述一致。

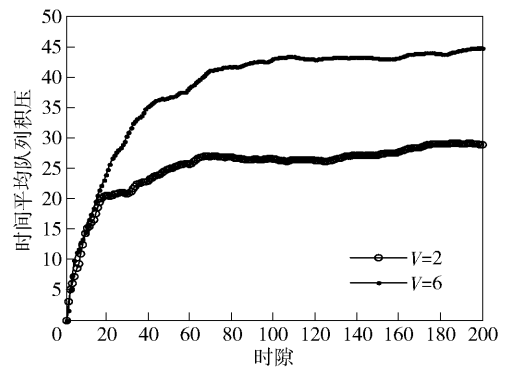


图 2 时间平均队列积压与时隙的关系

如图 4 所示, 当控制参数  $V$  的取值从 0 增大到 10 时, 系统的平均队列积压  $\bar{Q}$  由 23.58 增大到 60.18, 增幅达 155.22%; 同时, 系统的平均映射成本  $\bar{c}$  由 124.23 降低到 86.81, 降幅达 30.12%, 与定理 2 的表述相吻合, 进而验证了  $\bar{c}$  和  $\bar{Q}$  之间存在  $[B(1/V), B(V)]$  平衡关系。

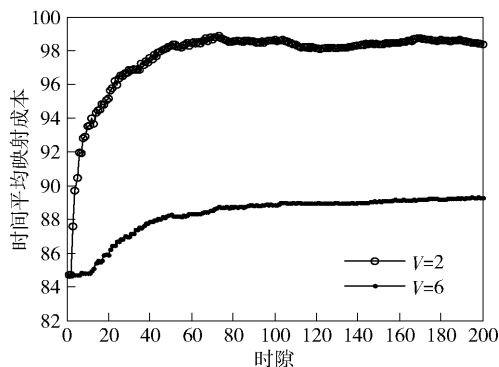
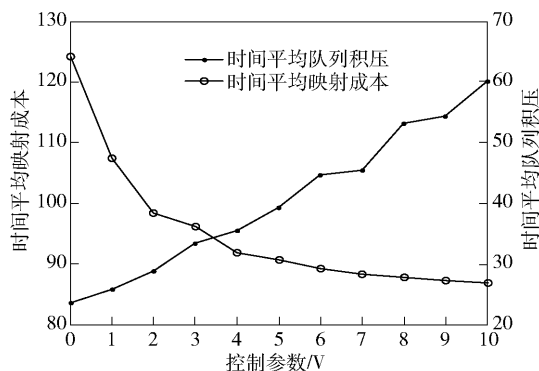


图3 时间平均映射成本与时隙的关系

图4 时间平均队列积压及时间平均映射成本与控制参数  $V$  的关系

## 2) 性能对比分析

所提 DANSNLE 算法与 SDPM 算法主要从时间平均队列积压与时间平均映射成本两方面进行性能对比分析。

如图5所示,当 VNR 的到达率  $\lambda_i$  大于部分 NFVS 的服务速率  $S_{inn}(t)$  时,DANSNLE 算法相比于 SDPM 算法可以明显控制时间平均队列积压。这是因为 DANSNLE 算法在进行映射时,综合考虑了系统的队列状态以及 NFVS 服务速率的差异性,尽可能地将 VNR 转移至队列状态较短的队列,或将 VNFC 优先映射至服务速率较大的 NFVS,并在综合考虑以上因素的前提下,选择使得映射花费最小的 NFVS 完成最终映射;而 SDPM 算法忽略了队列状态与 NFVS 服务速率的差异性,仅考虑如何使得映射花费最小,因此当选择服务速率较小的 NFVS 进行映射时,其服务能力显然无法满足短时间内 VNR 的大量达到,且系统无法动态地调整映射结果,因此必然会使队列积压严重,从而增大系统时延,影响用户体验。

如图6所示,DANSNLE 算法因为综合考虑了队

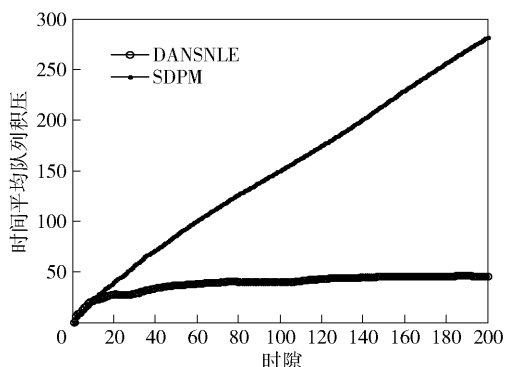


图5 不同映射算法的时间平均队列积压比较

列状态与 NFVS 服务速率的差异性,所以在进行映射时,较 SDPM 算法相比,在映射成本最小化方面并不一定是最优结果,正与定理2的式(22)表述形式相吻合。通过图5与图6的对比分析,当系统队列趋于稳定时,SDPM 算法下系统的时间平均映射成本为 84.70, DANSNLE 算法下系统的时间平均映射成本为 88.25, DANSNLE 算法较 SDPM 算法仅需增大 4.19% 的映射成本便可显著减少系统队列积压,进而满足系统时延要求。

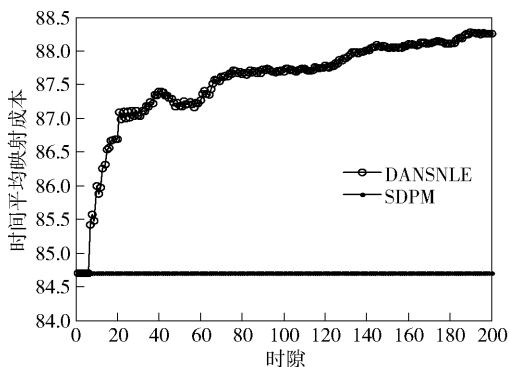


图6 不同映射算法的时间平均映射成本比较

## 4 结束语

结合 5G 网络的最新需求,从资源调度最优化,进而最小化映射成本的角度,对 5G 网络切片中 VNFC 到 NFVS 的映射问题进行了研究,提出了基于时延感知的 5G 网络切片节点和链路映射算法;同时从理论上证明了该算法可以在时间平均映射成本以及时间平均队列积压之间实现可控平衡。仿真结果证明,本文算法可以显著减少系统队列积压,满足系统时延要求,进而虚拟运营商通过本文算法实现映射成本以及系统时延之间的灵活控制。

## 参考文献:

- [1] Benchaabene Y, Boujnah N, Zarai F. 5G Cellular: survey on some challenging techniques [C] // International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCAT). New York: IEEE Press, 2017: 348-353.
  - [2] Foukas X, Patounas G, Elmokashfil A, et al. Network slicing in 5G: survey and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(5): 94-100.
  - [3] Cai Zhiping, Liu Fang, Xiao Nong, et al. Virtual network embedding for evolving networks[C] // 2010 IEEE Global Telecommunications Conference. New York: IEEE Press, 2010: 1-5.
  - [4] Gong Xiaoxue, Guo Lei, Shen Gangxiang, et al. Virtual network embedding for collaborative edge computing in optical-wireless networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(18): 3980-3990.
  - [5] Riggio R, Bradai A, Harutyunyan D, et al. Scheduling wireless virtual networks functions[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2016, 13(2): 240-252.
  - [6] Zhu Lei, Zhang Zhi Zhong, Feng Lin Lin. Wireless virtual network embedding algorithm through topology awareness [C] // 16<sup>th</sup> International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). New York: IEEE Press, 2017: 7-10.
  - [7] Wen Ruihan, Feng Gang, Tan Wei, et al. Protocol function block mapping of software defined protocol for 5G mobile networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, 17(97): 1651-1665.
  - [8] Herrera J G, Botero J F. Resource allocation in NFV: a comprehensive survey[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2016, 13(3): 518-532.
  - [9] NEELY M J. Stochastic network optimization with application to communication and queueing systems[M]. Wiliston: Morgan and Claypool, 2010.
- 
- (上接第70页)
- [2] Sun Y, Liao Z J, Ye Z H, et al. Determining the maximum power transfer points for MC-WPT systems with arbitrary number of coils[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9734-9743.
  - [3] 董颖, 崔梦瑶, 吴昊, 等. 一种基于能量预测的分簇WRSNs 充电调度研究[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(4): 1265-1273.  
Dong Ying, Cui Mengyao, Wu hao, et al. A research of clustering WRSNs charging schedule based on energy prediction[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(4): 1265-1273.
  - [4] Joseph V, Sharma V, Mukherji U. Joint power control, scheduling and routing for multihop energy harvesting sensor networks[C] // Proceedings of the 4<sup>th</sup> ACM Workshop on Performance Monitoring and Measurement of Heterogeneous Wireless and Wired Networks. ACM, 2009: 128-136.
  - [5] Han G J, Yang X, Liu L, et al. A joint energy replenishment and data collection algorithm in wireless rechargeable sensor networks [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(4), 2596-2604.
  - [6] Dai H P, Wu X B, Xu L J, et al. Using minimum mobile chargers to keep large-scale wireless rechargeable sensor networks running forever[C] // Computer Communications and Networks (ICCCN), 2013 22<sup>nd</sup> International Conference on. [S.l.]: IEEE, 2013: 1-7.
  - [7] Madhja A, Nikolettseas S, Raptis T P. Distributed wireless power transfer in sensor networks with multiple mobile chargers [J]. Computer Networks, 2015 (80): 89-108.