

基于5G接入网络的多优先级虚拟网络功能迁移开销与网络能耗联合优化算法

唐伦 杨恒* 马润琳 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5G接入网络中虚拟网络功能(VNF)部署完成后,其资源需求发生动态变化,导致网络中物理机(PM)资源利用率过高或过低这一问题,该文首先将网络中PM的资源使用情况划分5个不同分区,提出一种多优先级VNF迁移请求队列调度模型。其次基于该模型,对VNF迁移开销的最小化及网络能耗的最小化建立联合优化模型。最后提出一种基于5G接入网络的多优先级VNF迁移开销与网络能耗联合优化算法对其进行求解。仿真结果表明,该算法在有效实现VNF迁移开销与网络能耗折中的同时,提高了PM资源利用率,保证了PM性能并均衡各PM负载。

关键词: 5G接入网络;虚拟网络功能;迁移开销;网络能耗

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)09-2079-08

DOI: 10.11999/JEIT180906

Multi-priority Based Joint Optimization Algorithm of Virtual Network Function Migration Cost and Network Energy Consumption

TANG Lun YANG Heng MA Runlin CHEN Qianbin

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

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

Abstract: After the Virtual Network Function (VNF) in the 5G access network is deployed, the resource requirements are dynamically changed, resulting in the problem that the Physical Machine (PM) resource utilization in the network is too high or too low. To solve the above problem, the resource usage of PM in the network is divided into five different partitions, and a multi-priority VNF migration request queue scheduling model is proposed. Secondly, based on the model, a joint optimization model is established to minimize the VNF migration cost and minimize the network energy consumption. Finally, a multi-priority VNF migration cost and network energy joint optimization algorithm based on 5G access network is presented to solve the above model. The simulation results show that the algorithm can effectively improve the PM resources utilization, ensure the PM performance and balance the PM load while effectively realizing a compromise between VNF migration cost and network energy consumption.

Key words: 5G access network; Virtual Network Function (VNF); Migration cost; Network energy consumption

收稿日期: 2018-09-20; 改回日期: 2019-03-06; 网络出版: 2019-04-01

*通信作者: 杨恒 378171465@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-M 201800601)

1 引言

在5G接入网络中,网络功能虚拟化(Network Function Virtualization, NFV)技术将不同类型的虚拟网络功能(Virtual Network Function, VNF)按照特定的规则编排,构成与用户业务相对应的服务功能链(Service Function Chain, SFC),并将SFC中的VNF部署至不同的物理机(Physical Machine, PM)进而为用户提供服务^[1]。当SFC中

VNF部署完成后, 由于用户业务需求的动态变化, 因此VNF对PM资源的需求也随之改变, 极易导致网络中PM资源利用率处于非正常态。当PM资源利用率过高时, 由于PM长时间处于高负载状态, 会导致PM性能下降^[2], 因此需将VNF迁移至其它PM从而保证该PM性能, 提高网络稳定性, 而当PM资源利用率较低时, 可将该PM中运行的VNF迁移至其它PM, 并关闭该PM, 从而减小整个网络的能耗。

目前已有文献^[3-7]等对VNF迁移问题进行了研究。然而现有VNF迁移算法均没有对VNF迁移开销的最小化及网络能耗的最小化进行联合考虑, 即当仅最小化VNF迁移开销时, 极有可能产生较大网络能耗, 而仅最小化网络能耗时, 则有可能产生较大VNF迁移开销, 因此本文针对5G接入网络, 提出一种基于5G接入网络的多优先级虚拟网络功能迁移开销与网络能耗联合优化(Multi-priority based Joint Optimization of Virtual network function Migration cost and network Energy consumption, MJOVME)算法。

2 问题描述与系统模型

2.1 5G接入网络系统架构

本文采用文献^[8]提出的基于NFV技术的5G接入网络的系统架构, 整个架构分为3层, 即用户层、虚拟运营商层和基础设施提供商层。其中用户提出业务请求; 虚拟运营商以部署与用户业务相对应的SFC的形式, 为用户提供服务; 而基础设施提供商则通过网络功能虚拟化管理和编排器的控制根据SFC部署请求实现不同VNF的编排及部署从而构成不同的虚拟化室内基带处理单元, 并接入合适的虚拟化远端射频单元以满足不同的用户业务请求。SFC中的VNF需占用PM中的CPU资源及内存资源。

2.2 VNF迁移模型

将底层基础设施网络表示为一个全连接无向图, 记 $G = (N, E)$, 其中 $N = N_{sl} \cup N_{run}$ 表示PM集合且PM集合由睡眠状态PM集合 N_{sl} 与运行状态PM集合 N_{run} 构成, E 表示PM节点间的链路集; 不同VNF种类的集合为 $M = \{k_m | m = 1, 2, \dots, |M|\}$, 而由不同种类VNF组成的不同SFC集合为 F , 则任意一种SFC $f \in F$ 的VNF构成可表示为 $\{k_m^{f,l} | l = 1, 2, \dots, L\}$, 其中 L 表示该SFC的长度; β_{fmn} 为布尔变量, 当SFC f 需要VNF k_m , 且其部署在PM n 时, PM n 处于运行状态, 此时 $\beta_{fmn} = 1$, 否则PM n 处于休眠状态, 此时 $\beta_{fmn} = 0$; 同时定义 $P^b = (\beta(b)_{fmn})$ 为 $|F|$ 个 $|M| \times |N|$ 矩阵, 表示迁移发生之前VNF的部署情况, 定义 $P^a = (\beta(a)_{fmn})$ 为

$|F|$ 个 $|M| \times |N|$ 矩阵, 表示迁移发生之后VNF的部署情况。

另外分别定义 $s(b)_n$ 与 $s(a)_n$ 表示VNF迁移前后的PM n 的工作状态, 具体表示为

$$s(b)_n = \begin{cases} 1, & \text{物理机 } n \text{ 处于运行状态} \\ 0, & \text{物理机 } n \text{ 处于休眠状态} \end{cases} \quad (1)$$

$$s(a)_n = \begin{cases} 1, & \text{物理机 } n \text{ 处于运行状态} \\ 0, & \text{物理机 } n \text{ 处于休眠状态} \end{cases} \quad (2)$$

针对任意一种SFC, 应保证其所需的VNF均能够部署到唯一PM上, 即

$$\sum_{n \in N} \beta_{fmn} = \varepsilon_m^f, \forall f \in F, m \in M \quad (3)$$

其中, ε_m^f 表示SFC f 是否需要VNF k_m , 若需要则 $\varepsilon_m^f = 1$ 且此时 k_m 可表示为 $k_m^{f,l}$, 否则 $\varepsilon_m^f = 0$ 。

当VNF部署在PM上时, 需要占用PM的CPU资源及内存资源, 且不能超过PM所能提供的物理资源上限, 即

$$\sum_{f \in F} \sum_{m \in M} \beta_{fmn} \cdot v_m^f \cdot r_{cpu} \leq L_{cpu}, \forall n \in N \quad (4)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{m \in M} \beta_{fmn} \cdot v_m^f \cdot r_{mem} \leq L_{mem}, \forall n \in N \quad (5)$$

其中, v_m^f 表示VNF $k_m^{f,l}$ 中业务流的处理速率, 为VNF每秒处理的兆比特数(Million bit per second, Mbps), r_{cpu} 表示PM中每单位业务流处理速率所占用的CPU资源, r_{mem} 表示PM中每单位业务流处理速率所占用的内存资源, L_{cpu} 及 L_{mem} 分别表示PM的CPU资源上限和内存资源上限。由于底层基础设施网络为全连接无向图, 因此当VNF $k_m^{f,l}$ 部署至PM n 且VNF $k_{m+1}^{f,l}$ 部署至PM l 时, 即实现虚拟链路到物理链路的映射, 此时 $\beta_{fmn} \cdot \beta_{f(m+1)l} = 1$, 同时, 不同VNF $k_m^{f,l}$ 与VNF $k_{m+1}^{f,l}$ 需要通过彼此之间的虚拟链路进行业务流的交互, 且不能超过PM间所能提供带宽资源的上限 B_{nl} , 即

$$\begin{aligned} \sum_{f \in F} \sum_{m \in M} \beta_{fmn} \cdot \beta_{f(m+1)l} \cdot b_{m(m+1)}^f \\ = B_{nl}^v \leq B_{nl}, \quad \forall n, l \in N, n \neq l \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $b_{m(m+1)}^f$ 表示SFC f 中, VNF $k_m^{f,l}$ 与VNF $k_{m+1}^{f,l}$ 之间虚拟链路所需的带宽资源。另外针对每条SFC f , 其端到端时延可计算为

$$\begin{aligned} D_f = \sum_{m \in M} \sum_{n, l \in N, n \neq l} \beta_{fmn} \cdot \beta_{f(m+1)l} \cdot d_{nl} \\ + \sum_{m \in M} \varepsilon_m^f(t) \cdot d_m^f \end{aligned} \quad (7)$$

其中, d_{nl} 表示PM n 与PM l 间链路时延, $d_m^f = D/v_m^f$ 表示当VNF $k_m^{f,l}$ 部署在PM上时业务流的处理时延, D 为非零常数。同时, SFC f 的端到端时延不能超过其约束上限, 即

$$D_f < D_f^{\text{up}}, \forall f \in F \quad (8)$$

2.3 迁移开销模型

基于文献[9]的分析, 在VNF迁移过程中, 需要网络功能虚拟化管理和编排器将VNF所服务的业务流重新定向到迁移完成后的PM上, 因而在VNF迁移过程中, 相较于需要将VNF所服务的业务流进行重新定向所产生的迁移开销相比, 因迁移VNF中业务流的内部状态信息等原因所产生的迁移开销相对较小, 且由于VNF迁移过程时间相对较短, 因此本文定义VNF迁移的总开销为所有所需迁移VNF所服务的聚合业务流大小, 即聚合业务流的处理速率之和。本文认为同一VNF服务同一种业务流, 因此SFC f 中VNF $k_m^{f,l}$ 的迁移开销 c_m^f 可定义为

$$c_m^f = A \cdot v_m^f \quad (9)$$

其中, A 为该VNF中所服务业务流的数量。由此可得网络中VNF迁移的总开销为

$$C^{\text{mig}} = \sum_{f \in F} \sum_{m \in M} c_m^f \cdot \sum_{n \in N} h_m^f \quad (10)$$

其中, $h_m^f = \sum_{n \in N} \beta(b)_{fmn} \oplus \beta(a)_{fmn} / 2$, 表示SFC f 中的VNF $k_m^{f,l}$ 是否发生迁移, 当VNF $k_m^{f,l}$ 发生迁移时 $h_m^f = 1$, 否则 $h_m^f = 0$ 。

2.4 网络能耗模型

本文认为网络能耗由基础设施中PM能耗构成, 而PM能耗则分为PM运行状态时能耗与PM休眠状态时能耗[10]。当VNF部署在PM n 时, PM处于运行状态, 需要消耗CPU与内存资源, 本文定义PM n 的内存资源利用率 u_n^{mem} 与CPU资源利用率 u_n^{cpu} 分别为

$$u_n^{\text{mem}} = \sum_{f \in F} \sum_{m \in M} \beta_{fmn} \cdot v_m^f \cdot r_{\text{mem}} / M_n \quad (11)$$

$$u_n^{\text{cpu}} = \sum_{f \in F} \sum_{m \in M} \beta_{fmn} \cdot v_m^f \cdot r_{\text{cpu}} / C_n \quad (12)$$

其中, C_n 为PM n 中的CPU资源总量, M_n 为PM n 中的内存资源总量;

定义PM n 运行能耗为

$$E_n^{\text{run}} = P_n^{\text{run}} \cdot T \quad (13)$$

其中, T 指网络运行时间, P_n^{run} 为PM n 运行功耗,

主要由PM运行时基础功耗及CPU功耗构成[11], 表示为

$$P_n^{\text{run}} = P_n^{\text{ba}} + u_n^{\text{cpu}} \cdot P_n^{\text{mc}} \quad (14)$$

其中, P_n^{ba} 为PM n 运行时基础功耗, P_n^{mc} 为PM n 中CPU资源全部占用时所产生的功耗。

当没有VNF部署在PM n 上时, PM处于休眠状态, 但仍然会存在少量能耗 $E_n^{\text{sl}} = P_n^{\text{sl}} \cdot T$, 其中 P_n^{sl} 为PM n 的休眠时功耗。因此网络能耗可表示为

$$E^{\text{sum}} = \sum_{n \in N} s_n \cdot E_n^{\text{run}} + \sum_{n \in N} (1 - s_n) \cdot E_n^{\text{sl}} \quad (15)$$

2.5 多优先级VNF迁移请求队列调度模型

当来自高负载PM和低负载PM上的VNF同时需进行迁移时, 本文提出多优先级VNF迁移请求队列调度模型, 同时将PM的资源使用情况根据图1中指标划分为5类分区。

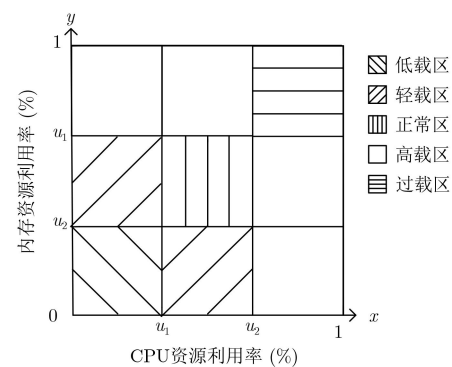


图1 PM资源使用情况分区指标

本文所提待迁移队列模型中的VNF迁移请求均来自上述除正常区之外的低载区、轻载区、高载区及过载区。为保证VNF迁移的有序性, 防止网络崩溃情况的发生, 本文针对来自上述4类分区的VNF迁移请求, 在网络功能虚拟化管理和编排器中设置4种队列分别为 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 , 并设定它们的优先级关系为: $Q_4 > Q_3 > Q_1 > Q_2$, 即优先迁移高负载PM中的VNF, 保证PM的处理性能, 进而提高网络稳定性, 其次, 对低负载PM中的VNF进行迁移, 并使该PM处于休眠状态, 从而降低整个网络能耗。

2.6 问题描述

本文所提联合优化问题属于多目标优化问题, 具体表示为

$$\text{Min}_{\beta(a)_{imn}} C^{\text{mig}} \quad (16)$$

$$\text{Min}_{\beta(a)_{imn}} E^{\text{sum}} \quad (17)$$

$$\text{s.t. C1: } \sum_{n \in N} \beta(a)_{fmn} = \varepsilon_m^f, \forall f \in \mathbf{I}, m \in \mathbf{M};$$

$$\text{C2: } \sum_{f \in \mathbf{F}} \sum_{m \in \mathbf{M}} \beta(a)_{fmn} \cdot v_m^f \cdot r_{\text{cpu}} \leq L_{\text{cpu}}, \forall n \in \mathbf{N};$$

$$\text{C3: } \sum_{f \in \mathbf{F}} \sum_{m \in \mathbf{M}} \beta(a)_{fmn} \cdot v_m^f \cdot r_{\text{mem}} \leq L_{\text{mem}}, \forall n \in \mathbf{N};$$

$$\text{C4: } \sum_{f \in \mathbf{F}} \sum_{m \in \mathbf{M}} \beta(a)_{fmn} \cdot \beta(a)_{f(m+1)l} \cdot b_{m(m+1)}^f \leq B_n, \forall n, l \in \mathbf{N}, n \neq l;$$

$$\text{C5: } D_f < D_f^{\text{up}}, \forall f \in \mathbf{F};$$

$$\text{C6: } \sum_{f \in \mathbf{F}} \sum_{m \in \mathbf{M}} \beta(a)_{fmn} \geq 1, \text{ 则 } s_n = 1; \text{ 否则, } s_n = 0, \forall n \in \mathbf{N};$$

$$\text{C7: } u_n^{\text{cpu}} < u_2, \forall n \in \mathbf{N};$$

$$\text{C8: } u_n^{\text{mem}} < u_2, \forall n \in \mathbf{N};$$

$$\text{C9: } \beta(a)_{fmn} \in \{0, 1\}, \forall f \in \mathbf{F}, m \in \mathbf{M}, n \in \mathbf{N}.$$

式(16)的优化目标为最小化VNF迁移开销, 式(17)的优化目标为最小化网络能耗, C1到C5分别根据式(3)、式(4)、式(5)、式(6)、式(8)得出; C6表示若在某一个PM上部署了VNF, 则该PM即处于运行状态; C7和C8保证PM不能处在高负载状态; C9则保证了决策变量的二元性。

3 问题转化与算法描述

由于VNF迁移开销与网络能耗无法进行单位与量级上的统一, 本文首先对迁移开销与网络能耗进行归一化处理, 同时为了实现两者的折中及联合优化, 将式(16)及式(17)重写为

$$\text{Min}_{\beta(a)_{imn}} \text{Sum} = \alpha \cdot E^{\text{sum}} / E^{\text{max}} + (1 - \alpha) \cdot C^{\text{mig}} / C^{\text{max}} \quad (18)$$

其中, E^{max} 为网络最大能耗, 即网络中所有PM均处于运行状态且资源全占用时的能耗, C^{max} 为VNF最大迁移开销, 即当网络中部署的所有VNF均发生迁移时产生的迁移开销; α ($0 \leq \alpha \leq 1$)为加权因子, 可以调整实际VNF迁移开销与实际网络能耗的权重, 约束条件与式(16)及式(17)相同。

不难看出, 求解上述问题仍然十分困难, 因此需要将上述问题进行进一步简化为如下3类子问题:

(1)归一化的VNF迁移开销与网络能耗下降量加权和最小化子问题

$$\text{Min}_{\beta(a)_{imn}} \alpha \cdot \Delta E_n^{\text{sum}} / \Delta E_n^{\text{max}} + (1 - \alpha) \cdot C_n^{\text{mig}} / C_n^{\text{max}} \quad (19)$$

其中, ΔE_n^{max} 表示对低负载PM n 进行整合后的网络能耗最大下降量, ΔE_n^{sum} 表示对低负载PM n 进行整合后的实际网络能耗下降量, 表示为

$$\Delta E_n^{\text{sum}} = E_n^{\text{run}} - E_n^{\text{sl}} \quad (20)$$

C_n^{max} 为整合低负载PM n 时, 需迁移的VNF的最大迁移总开销, C_n^{mig} 为整合低负载PM n 时, 需迁移的VNF的实际迁移总开销。

(2)归一化的VNF迁移开销最小化子问题

$$\text{Min}_{\beta(a)_{imn}} (1 - \alpha) \cdot c_m^f / C_m^f \quad (21)$$

其中, C_m^f 为待迁移VNF发生迁移的最大迁移开销, c_m^f 为迁移该VNF $k_m^{f,l}$ 产生的迁移开销。

(3)归一化的VNF迁移开销与网络能耗增长量加权和最小化子问题

$$\text{Min}_{\beta(a)_{imn}} \alpha \cdot \Delta e_{mn}^f / \Delta E_{mn}^f + (1 - \alpha) \cdot c_m^f / C_m^f \quad (22)$$

其中, ΔE_{mn}^f 表示当VNF $k_m^{f,l}$ 迁移完成后目的PM n 的能耗最大增长量, Δe_{mn}^f 表示当VNF $k_m^{f,l}$ 迁移完成后目的PM n 的能耗增长量, 表示为

$$\Delta e_{mn}^f = P_n^{\text{ba}} \cdot T + \sum_{f \in \mathbf{F}} \beta_{fmn} \cdot v_m^f \cdot r_{\text{cpu}} / C_n \cdot P_n^{\text{mc}} \cdot T - P_n^{\text{sl}} \cdot T \quad (23)$$

上述3类子问题约束条件均与式(18)相同, 针对上述3类子问题, 本文提出MJOVME算法进行求解, 详见表1。

其中子算法2及子算法3均基于贪婪机制, 具体表述为表2及表3。

子算法4采用最佳适应下降方法, 具体表述为表4。

本文算法时间复杂度主要由表4中步骤(1)决定, 步骤(1)采用快速排序方法, 因此该时间平均复杂度为 $O(|\mathbf{N}_{\text{run}}| \cdot \lg |\mathbf{N}_{\text{run}}|)$, 最恶劣情况下为 $O(|\mathbf{N}_{\text{run}}|^2)$, 且其复杂度低于解决NP困难问题的一般方法。

4 性能仿真与分析

本文仿真平台基于CPU型号为Intel Core i7-

表1 MJOVME算法

输入: $N, M, F, P^b, u_1, u_2, A, v_m^f$

输出: P^a

(1) 初始化: $P^a = P^b$;

(2) 确定过载区PM, 设置优先级为 Q_4 , 表示为

$$N_4 = \{n_1^{Q_4}, n_2^{Q_4}, \dots, n_k^{Q_4}\}, \text{ 执行子算法2;}$$

(3) 确定高载区PM, 设置优先级为 Q_3 , 表示为

$$N_3 = \{n_{k+1}^{Q_3}, n_{k+2}^{Q_3}, \dots, n_l^{Q_3}\}, \text{ 执行子算法2;}$$

(4) 确定低载区PM, 设置优先级为 Q_1 , 表示为

$$N_1 = \{n_{l+1}^{Q_1}, n_{l+2}^{Q_1}, \dots, n_m^{Q_1}\}, \text{ 执行子算法3;}$$

(5) 确定轻载区PM, 设置优先级为 Q_2 , 表示为

$$N_2 = \{n_{m+1}^{Q_2}, n_{m+2}^{Q_2}, \dots, n_n^{Q_2}\}, \text{ 执行子算法3.}$$

表 2 子算法2高负载PM消除算法

输入： 高负载PM $n_j^{Q_i}$, N , M , F , P^a , $u_{n_j^{Q_i}}^{\text{cpu}}$, $u_{n_j^{Q_i}}^{\text{mem}}$, u_1 , u_2
输出： P^a

- (1) 创建该PM待迁移的VNF集合 $\text{VNFSET}(n_j^{Q_i}) = \text{NULL}$;
- (2) 据式(20)按值从小到大, 对该PM上VNF进行排序, 表示为:

$$M_z = \{k_{m,1}^{f,l}, k_{m,i}^{f,l}, \dots, k_{m,z}^{f,l}\};$$
- (3) **while** $u_{n_j^{Q_i}}^{\text{cpu}} > u_2$ 或 $u_{n_j^{Q_i}}^{\text{mem}} > u_2$ **do**
- (4) **for** $k_{m,i}^{f,l}$ ($1 \leq i \leq z$) **do**
- (5) **if** 迁移VNF $k_{m,i}^{f,l}$ 能够使得PM的 $u_{n_j^{Q_i}}^{\text{cpu}}$ 与 $u_{n_j^{Q_i}}^{\text{mem}}$ 均小于 u_2 **do**
- (6) 将VNF $k_{m,i}^{f,l}$ 添加到集合 $\text{VNFSET}(n_j^{Q_i})$ 中;
- (7) **break**;
- (8) **end if**
- (9) **end for**
- (10) **if** $i > z$ **then**
- (11) 将 $k_{m,1}^{f,l}$ 添加到集合 $\text{VNFSET}(n_j^{Q_i})$ 中, 同时更新集合

$$M_z = M_z - k_{m,1}^{f,l};$$
- (12) $z = z - 1$;
- (13) **end if**
- (14) 据式(11)、式(12)更新计算PM $n_j^{Q_i}$ 的 $u_{n_j^{Q_i}}^{\text{cpu}}$ 与 $u_{n_j^{Q_i}}^{\text{mem}}$;
- (15) **end while**
- (16) **for** $k_m^{f,l} \in \text{VNFSET}(n_j^{Q_i})$ **do**
- (17) 执行子算法4, 得到迁移目标PM n ;
- (18) **if** 子算法4返回NULL **then**
- (19) 据式(21)按值从小到大, 对休眠状态的PM进行排序表示为: $N_z = \{n_1, n_i, \dots, n_z\}$;
- (20) **for** $n_i \in N_z$ **do**
- (21) 据式(7)计算将VNF $k_m^{f,l}$ 迁移至PM n_i 上时, VNF $k_m^{f,l}$ 所属SFC f 的时延 D_f ;
- (22) **if** $D_f < D_f^{\text{up}}$ **then**
- (23) 据式(6)计算得到 $B_{(n-1)n_i}^v$ 与 $B_{(n-1)n_i}^v$;
- (24) **if** $B_{(n-1)n_i}^v < B_{(n-1)n_i}$ 且 $B_{(n-1)n_i}^v < B_{(n-1)n_i}$ **then**
- (25) 将VNF $k_m^{f,l}$ 迁移至PM n_i , 同时更新 $P^a = P^a$;
- (26) **break**;
- (27) **else** 将 $k_m^{f,l}$ 迁移至目的PM n , 更新 $P^a = P^a$;
- (28) **end if**
- (29) **end for**
- (30) **return** P^a .

4790, 内存为8 GB, CPU频率为3.60 GHz的个人电脑进行搭建, 在本文的仿真实验中, 参考文献[12]对基础设施中PM节点的参数进行设置, 同时参考文献[10, 13]对VNF相关参数及SFC相关参数进行设置, 见表5、表6、表7。

表 3 子算法3低负载PM整合算法

输入： 低负载PM $n_j^{Q_i}$, N , M , F , P^a , $u_{n_j^{Q_i}}^{\text{cpu}}$, $u_{n_j^{Q_i}}^{\text{mem}}$, u_1 , u_2
输出： P^a

- (1) 据式(19)分别计算 $(1 - \alpha) \cdot C_n^{\text{mig}} / C_n^{\text{max}}$ 的值与 $\alpha \cdot \Delta E_n^{\text{sum}} / \Delta E_n^{\text{max}}$ 的值;
- (2) **if** $(1 - \alpha) \cdot C_n^{\text{mig}} / C_n^{\text{max}} \geq \alpha \cdot \Delta E_n^{\text{sum}} / \Delta E_n^{\text{max}}$ **then**
- (3) **return** P^a , 算法结束; //迁移开销大于等于网络能耗减小量, 整合无意义
- (4) **end if**
- (5) $P^t = P^a$
- (6) **for** 每一个运行在PM $n_j^{Q_i}$ 上的 $k_m^{f,l}$ **do**
- (7) 执行子算法4, 得到迁移目标PM n , 此时计划将VNF $k_m^{f,l}$ 迁移至PM n ;
- (8) **if** 子算法4返回NULL **then**
- (9) **return** $P^a = P^t$, 算法结束; //VNF $k_m^{f,l}$ 无法找到目的PM, 放弃整合
- (10) **end if**
- (11) **end for**
- (12) 将步骤(7)中计划迁移的VNF迁移至其目的PM, 更新 P^a ;
- (13) **return** P^a .

表 4 子算法4目的PM选择算法

输入： 待迁移 $k_m^{f,l}$, N_{run} , u_1 , u_2
输出： 目的PM n

- (1) 据式(11)、式(12)计算 N_{run} 中各PM的CPU利用率 u_n^{cpu} 和内存利用率 u_n^{mem} , 并根据 sum_n^u 值依次从大到小重新排列 N_{run} 中PM的顺序; // $\text{sum}_n^u = u_n^{\text{cpu}} + u_n^{\text{mem}}$
- (2) **for** $n \in N_{\text{run}}$ **do**
- (3) 据式(11)、式(12)计算将VNF $k_m^{f,l}$ 迁移至PM n 上时, PM n 的 u_n^{cpu} 与 u_n^{mem} ;
- (4) **if** $u_1 < u_n^{\text{cpu}} < u_2$ 且 $u_1 < u_n^{\text{mem}} < u_2$ **then**
- (5) 据式(7)计算将VNF $k_m^{f,l}$ 迁移至PM n 上时, VNF $k_m^{f,l}$ 所属SFC f 的时延 D_f ;
- (6) **if** $D_f < D_f^{\text{up}}$ **then**
- (7) 据式(6)计算得到 $B_{(n-1)n}^v$ 与 $B_{n(n+1)}^v$;
- (8) **if** $B_{(n-1)n}^v < B_{(n-1)n}$ 且 $B_{n(n+1)}^v < B_{n(n+1)}$ **then**
- (9) **return** 目的PM n ;
- (10) **break**;
- (11) **end if**
- (12) **end if**
- (13) **end for**
- (14) **end for**
- (15) **if** 步骤(9)未执行 **then**
- (16) **return** NULL.
- (17) **end if**

表5 基础设施中PM节点的参数设置

参数	数值
PM个数	200, 230, 260
M_n (GB)	{4, 8, 12, 16}
P_n^{ba} (W)	Uniform[90, 120]
d_{nl} (ms)	Uniform[1, 2]
P_n^{mc} (W)	Uniform[170, 230]
B_{nl} (Mbps)	Uniform[80, 100]
P_n^{sl} (W)	Uniform[25, 35]
u_1	0.9
C_n (MIPS)	Uniform[200, 300]
u_2	0.3

表6 VNF相关参数设置

参数	数值
VNF种类	8
r_{mem} (GB/Mbps)	4
v_m^f (Mbps)	Uniform[0.1, 1.0]
D (Mb)	0.0005
r_{cpu} (MIPS/ Mbps)	110
A	100

表7 SFC相关参数设置

参数	数值
SFC请求数量	60, 70, 80
D_f^{up} (ms)	[8, 10, 12]
VNF集合长度	Uniform[3, 5](种类随机)
链路所需带宽资源 (Mbps)	Uniform[5, 10]

4.1 算法的有效性评估

为了评估所提MJOVME算法有效性，本文分别从网络能耗与VNF迁移开销两方面对有效性进行验证。

由图2、图3可以看出，不同网络参数下，当 $0.12 \leq \alpha \leq 0.22$ 时，网络能耗均随 α 增大而减小，迁移开销则均随 α 增大而增大，说明本文所提算法

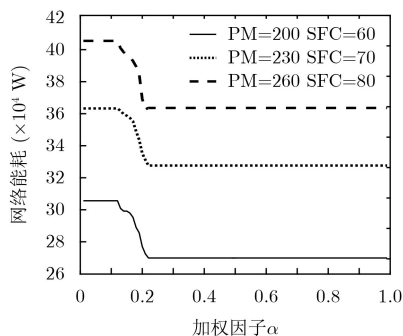


图2 网络能耗与加权因子 α 的关系

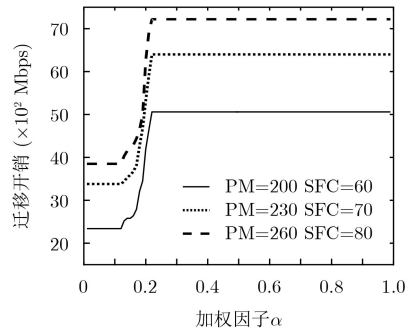


图3 迁移开销与加权因子 α 的关系

可以通过调整 α 的值，实现网络能耗与迁移开销的折中。

4.2 算法性能对比分析

本文首先从MJOVME算法可实现网络能耗与迁移开销联合优化的角度，与仅实现迁移开销最小化的最优化VNF迁移开销(Optimized Virtual Network Functions Migration Cost, OVNFMC)算法^[9]及仅实现网络能耗最小化的基于贪婪机制的负载均衡(Greedy-based Load Balance, GBLB)算法^[13]进行对比，此时 $\alpha = 0.19$ 。

由图4、图5可以看出，由于OVNFMC仅考虑当VNF资源需求发生变化时，如何对VNF进行迁移使得迁移开销最小，忽略了对低负载PM的整合，因此OVNFMC算法下的网络能耗必然大于MJOVME算法下的网络能耗；同时，由于在GBLB算法中，只要PM资源利用率小于其设定阈值，即对该PM进行整合，迁移VNF，然而极有可能存在VNF迁移开销大于网络能耗减小量的情况，因此GBLB算法下，极有可能产生较大迁移开销，综上所述，MJOVME算法能够有效实现VNF迁移开销与网络能耗的联合优化。

进一步，本文从MJOVME算法在VNF迁移过

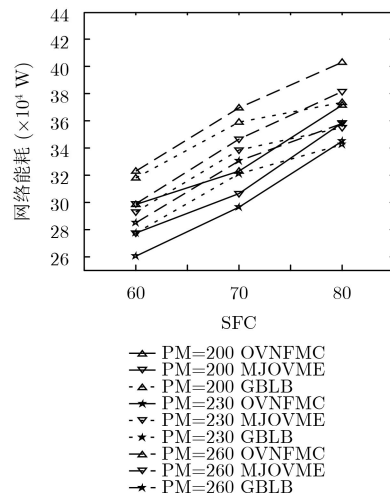


图4 网络能耗与SFC请求数量的关系

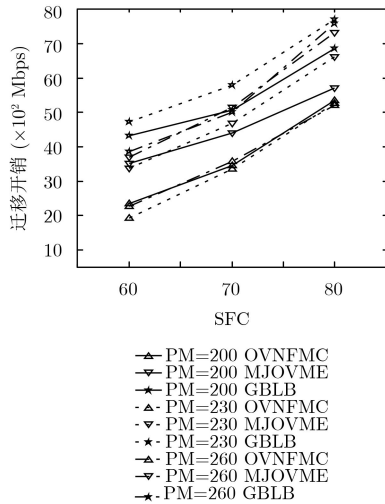


图 5 迁移开销与SFC请求数量的关系

程中能够有效提高PM资源利用率并均衡PM负载的角度与同样可实现网络能耗与迁移开销联合优化的随机(RANDOM based joint optimization of virtual network function migration cost and network energy consumption, RANDOM)算法进行对比分析, 该RANDOM算法在进行目的PM选择时, 为随机选择网络中符合迁移条件的PM进行VNF的迁移操作, 此时 $\alpha = 0.19$ 。

图6、图7、图8、图9综合对比分析, 说明MJOVME算法下PM的负载分布更均衡, 这是因为本文所提MJOVME算法中的子算法4的步骤(1)采用了最佳适应下降方法, 因此, VNF迁移完成后, 目的PM的计算资源及内存资源利用率更接近于上限阈值 u_1 , 从而可提高两种资源利用率, 均衡各PM负载。

5 结束语

本文针对5G接入网中VNF对资源需求的动态变化, 提出一种基于5G接入网络的多优先级

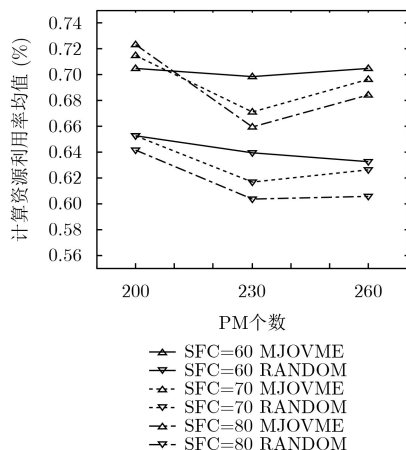


图 6 计算资源利用率均值与PM个数的关系

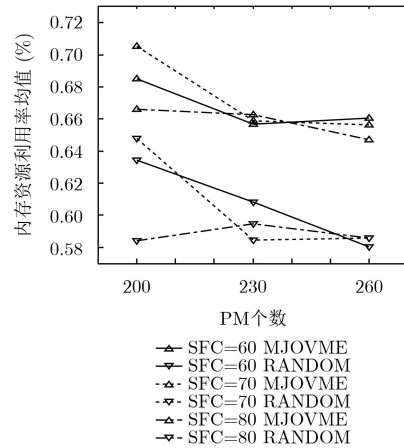


图 7 内存资源利用率均值与PM个数的关系

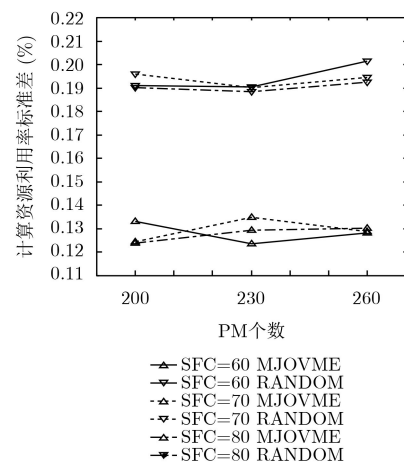


图 8 计算资源利用率标准差与PM个数的关系

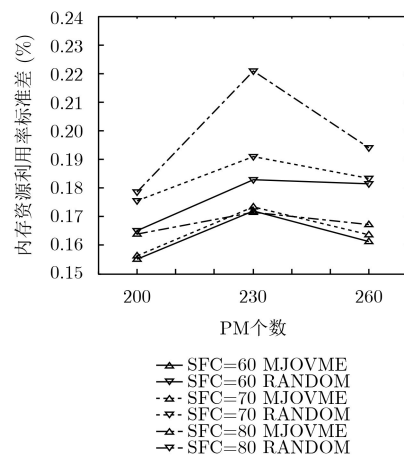


图 9 内存资源利用率标准差与PM个数的关系

VNF迁移开销与网络能耗联合优化算法对该模型进行求解。仿真结果表明, 本文所提算法在有效实现VNF迁移开销与网络能耗折中的同时, 提高了PM资源利用率, 保证了PM性能并均衡各PM负载。

参考文献

[1] BOURAS C, KOLLIA A, and PAPAIOIS A. SDN & NFV

- in 5G: Advancements and challenges[C]. 2017 20th Conference on Innovations in Clouds, Internet and Networks (ICIN), Paris, France, 2017: 107–111. doi: [10.1109/ICIN.2017.7899398](https://doi.org/10.1109/ICIN.2017.7899398).
- [2] LI Defang, HONG Peilin, XUE Kaiping, *et al.* Virtual network function placement considering resource optimization and SFC requests in cloud datacenter[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2018, 29(7): 1664–1677. doi: [10.1109/TPDS.2018.2802518](https://doi.org/10.1109/TPDS.2018.2802518).
- [3] ZHANG Jie, ZENG Deze, GU Lin, *et al.* Joint optimization of virtual function migration and rule update in software defined NFV networks[C]. GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference, Singapore, 2018: 1–5. doi: [10.1109/GLOCOM.2017.8254083](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2017.8254083).
- [4] CHO D, TAHERI J, ZOMAYA A Y, *et al.* Real-time virtual network function (VNF) migration toward low network latency in cloud environments[C]. 2017 10th International Conference on Cloud Computing (CLOUD), Honolulu, USA, 2017: 798–801. doi: [10.1109/CLOUD.2017.118](https://doi.org/10.1109/CLOUD.2017.118).
- [5] ERAMO V, AMMAR M, and LAVACCA F G. Migration energy aware reconfigurations of virtual network function instances in NFV architectures[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 4927–4938. doi: [10.1109/ACCESS.2017.2685437](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2685437).
- [6] 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. doi: [10.1109/TNET.2017.2668470](https://doi.org/10.1109/TNET.2017.2668470).
- [7] ZHANG Jinshi, LI Liang, and WANG Dong. Optimizing VNF live migration via para-virtualization driver and QuickAssist technology[C]. 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), Paris, France, 2017: 1–6. doi: [10.1109/ICC.2017.7997166](https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7997166).
- [8] TANG Lun, YANG Heng, MA Runlin, *et al.* Queue-aware dynamic placement of virtual network functions in 5G access network[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 44291–44305. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2862632](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2862632).
- [9] XIA Jing, CAI Zhiping, and XU Ming. Optimized virtual network functions migration for NFV[C]. 2016 IEEE 22nd International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS), Wuhan, China, 2016: 340–346. doi: [10.1109/ICPADS.2016.0053](https://doi.org/10.1109/ICPADS.2016.0053).
- [10] LIN Tachun, ZHOU Zhili, TORNATORE M, *et al.* Demand-aware network function placement[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(11): 2590–2600. doi: [10.1109/JLT.2016.2535401](https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2535401).
- [11] FAN Qiang, ANSARI N, and SUN Xiang. Energy driven avatar migration in green cloudlet networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(7): 1601–1604. doi: [10.1109/LCOMM.2017.2684812](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2684812).
- [12] XU Heyang and YANG Bo. Energy-aware resource management in cloud computing considering load balance[J]. *Journal of Information Science and Engineering*, 2017, 33(1): 1–16. doi: [10.6688/JISE.2017.33.1.1](https://doi.org/10.6688/JISE.2017.33.1.1).
- [13] MIJUMBI R, SERRAT J, GORRICO J L, *et al.* Design and evaluation of algorithms for mapping and scheduling of virtual network functions[C]. The 1st IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft), London, UK, 2015: 1–9. doi: [10.1109/NETSOFT.2015.7116120](https://doi.org/10.1109/NETSOFT.2015.7116120).
- 唐 伦: 男, 1973年生, 教授, 博士, 主要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。
- 杨 恒: 男, 1993年生, 硕士生, 主要研究方向为网络切片及虚拟网络资源分配。
- 马润琳: 女, 1993年生, 硕士生, 主要研究方向为5G网络切片、网络功能虚拟化、无线资源分配等。
- 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。