基于在线拍卖的网络切片资源分配算法

梁 靓*①② 武彦飞② 冯 钢①

①(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 611731)

②(重庆大学微电子与通信工程学院 重庆 400044)

摘 要：为满足未来移动通信网络中多样化的业务需求，为用户提供定制化服务的同时提升网络经济效益，该文提出一种基于在线拍卖的网络切片资源分配算法。根据业务类型将用户的服务请求转化为相应投标信息，以最大化拍卖参与者的社会福利为目标，将切片资源分配问题建模为基于多业务的在线赢家确定问题。结合资源分配与价格更新策略，实现基于在线拍卖的资源优化配置。仿真结果表明，该算法能够在满足用户业务需求的同时，提升网络经济效益。

关键词：网络切片；资源分配；多业务；在线拍卖

中图分类号：TN929.5 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-5896(2019)05-1187-07

DOI: 10.11999/JEIT180636

Resource Allocation Algorithm of Network Slicing Based on Online Auction

LIANG Liang①② WU Yanfei② FENG Gang①

①(*National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu* 611731, *China*)

②(*School of Microelectronics and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing* 400044, *China*)

Abstract: In order to meet the diversified service requirements in future mobile communication networks and provide users with customized services while improving network economic efficiency, a resource allocation algorithm of network slicing based on online auction is proposed. The algorithm transforms the service requests of users into the corresponding bidding information according to the service types. For maximizing the social welfare of the auction participants, the slicing resource allocation problem is modeled as a multi-service based online winner determination problem. Combined with the resource allocation and price updating strategy, the optimal resources allocation based on online auction is achieved. The simulation results show that the proposed algorithm can improve the network economic efficiency and satisfy the service requirements of users.

Key words: Network slicing; Resource allocation; Multi-service; Online auction

1 引言

未来移动通信系统将逐步演化为异构互联的融合网络，用户的业务需求也呈现出多样性和随机性[1]。不同的应用场景在网络功能、系统性能等方面表现出差异化的需求，这使得无线网络的接入资源调度和管理面临极大挑战[2]。在此背景下，网络切片作为在一个物理网络上灵活承载多场景逻辑网络的关键技术，受到业界越来越密切的关注[3]。

网络切片技术的发展为5G(5th-Generation)时代带来了全新的运营模式转变，网络虚拟化将基础设施与其提供的服务解耦，使得传统的网络服务提供商(Internet Service Provider, ISP)分为两部分：基础设施提供商(Infrastructure Provider, InP)和服务提供商(Service Provider, SP)。其中，InP负责部署和管理底层物理网络，并向SP出售物理网络资源；SP在InP上部署和管理虚拟网络，即网络切片，为终端用户提供高性能的服务[4–6]。切片资源的高效、均衡分配包括底层物理资源的分配和上

收稿日期：2018-06-29；改回日期：2018-12-21；网络出版：2019-01-02

*通信作者： 梁靓 liangliang@cqu.edu.cn

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金(61601067)，中国博士后科学基金(2016M602671)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61601067), The Postdoctoral Science Foundation of China (2016M602671)

层网络切片虚拟资源的分配。考虑到拍卖机制可被有效地引入到这两层模型中以获得更好的性能和经济效益[7]，本文主要研究和设计上层网络切片虚拟资源的在线拍卖机制。

现有的网络切片虚拟资源分配算法主要侧重于频谱资源共享的研究，较少考虑不同业务类型的差异化需求。文献[8]提出一种资源共享比例受限的分配机制，该机制能够提升网络切片的资源共享能力，但没有研究定制化资源分配问题。文献[9]提出一种基于破产博弈的资源分配算法，实现对云接入网络切片的频谱资源分配。该算法能够有效提升频谱资源利用率，但没有考虑不同业务的差异化需求。文献[10]提出一种基于比例公平算法的半静态网络切片资源分配方案，该方法虽然考虑了不同类型的网络切片，但同种类型切片的业务需求是固定的，不能满足用户的差异化需求。文献[11]将网络切片的资源分配问题建模为双凸优化问题，实现网络负载均衡的同时最小化链路成本。不同业务类型对网络速率、时延、可靠性等的需求不同，如何根据异构化的业务需求只为用户分配其所需的虚拟网络资源，是网络切片资源分配算法研究中需解决的关键问题。

此外，现有网络切片虚拟资源分配算法的研究大部分是离线的。文献[12,13]分别提出一种网络切片资源分配方法，实现网络资源利用率和经济效益的联合优化。但优化方法是离线的，并且没有考虑不同业务类型的差异化需求。文献[14]提出一种基于在线双向拍卖的虚拟网络切片资源调度机制，该机制综合考虑了业务需求和业务收益，但在算法的即时性和复杂度方面优势不明显。实际应用中，用户是依次在线到达的。因此，需要一种在线的切片资源分配方法，能够及时、高效地在用户提交业务请求后为其分配所需资源，提供定制化的切片服务。

为解决上述问题，本文综合考虑用户业务需求与网络经济效益，提出一种基于在线拍卖的网络切片资源分配算法。本算法面向多种业务类型，通过构建基于在线拍卖的系统模型，将网络切片资源分配转化为一个最大化拍卖参与者社会福利的在线赢家确定问题，并结合资源分配与价格更新策略，实现基于多业务的切片资源最优分配。

2 系统模型

系统模型如图1所示。用户作为竞标者请求一个网络切片，服务提供商作为网络切片的设计和提供者担任卖方和拍卖师，接受用户的投标，确定获胜用户并为获胜者实例化网络切片。本文根据市场需求将用户投标分为3种业务类型：增强移动宽带(enhance Mobile BroadBand, eMBB)，超高可靠超低时延通信(ultra-Reliable Low Latency Communications, uRLLC)和海量机器类通信(massive Machine-Type Communications, mMTC)。每个网络切片由一系列虚拟网络功能(Virtual Network Function, VNF)、运行这些网络功能的资源以及连接这些功能的定向链路组成。部署于不同区域的同种VNF在时延、速率上表现出不同的性能，因此，为了满足用户差异化需求，本文考虑VNF的分区部署，将服务提供商的资源根据地理位置进行区域划分。

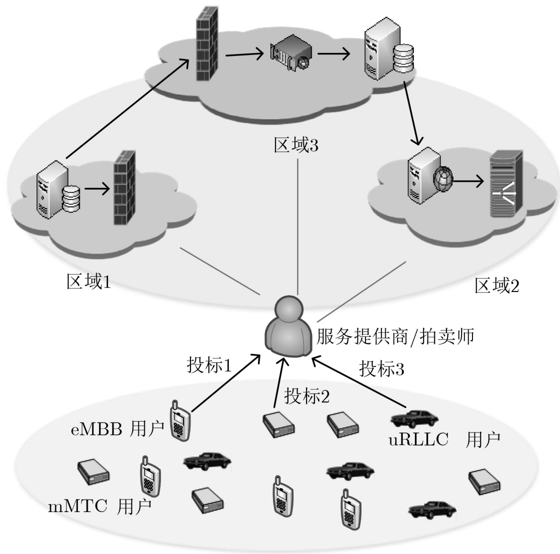

图 1 系统模型

设服务提供商共有Z个区域，每个区域能提供的VNF有V种。系统具有K种虚拟资源(虚拟频谱资源、虚拟计算资源、虚拟存储资源等)，实例化一种类型的VNF消耗本地资源为p_v^k，区域资源总量记为$C^{k,z}\,(v \in [V], k \in [K], z \in [Z])$。服务提供商拥有从区域$z$到区域$z'$的链路带宽容量$L_{z,z'}$，从区域$z$到其他区域的上传带宽容量$Q_z^{\rm up}$以及从其他区域到区域$z$的下载带宽容量$Q_z^{\rm dw}$。

用户i所需网络切片的VNF有多种区域部署策略。用Π_i表征用户i区域部署策略的集合，对于策略$\zeta \in \Pi_i$，用$d_{i\zeta}^{vz}(d_{i\zeta}^{vz} \in \{0,1\})$表征该策略中$v$类VNF是否部署于区域$z$中。每个网络切片中，同一区域同种类型的VNF最多拥有1个，但可拥有多个部署于不同区域的同一类型VNF实例，这种简化符合大多数实际应用场景。另外，为提高资源利用率，部分类型的VNF实例可在切片间共享，用$[V_a]$/$[V_b]$表示可共享/不可共享VNF类型的集合。为保证切片性能，共享是本地的且共享程度受处理能力

$D_{v,z}$的限制，即部署于某个区域的VNF只能在该区域内共享。用$y_{v,z}\in\{0,1\}$表征部署于区域z的v类VNF是否被激活。

3　问题定义

3.1 投标信息转换

用户投标服从泊松分布依次到达，将其业务需求以及竞标价提交给服务提供商请求网络切片服务。不同类型的业务对时延、吞吐量等需求的偏好不同，本文分别为3种业务类型的投标设计相应的价格函数，确定符合特定业务类型需求偏好的投标价格。因此，可将业务类型为ty_i的用户i的投标信息转化为

$$B_i^{\mathrm{ty}_i}=\Big(t_{ai},t_{bi},\left\{h_{i\zeta}^{vz}\right\}_{v\in[V],z\in[Z],\zeta\in\varPi_i},\left\{d_{i\zeta}^{vz}\right\}_{v\in[V_a],z\in[Z],\zeta\in\varPi_i{}'}\\ \left\{l_{i\zeta}^{zz'}\right\}_{z\neq z'\in[Z],\zeta\in\varPi_i{}'}\left\{b_{i\zeta}^{\mathrm{ty}_i}\right\}_{\zeta\in\varPi_i}\Big)\tag{1}$$

其中，t_{ai}/t_{bi}表示用户请求网络切片开始运行/释放时间，用$t_i\in[1,T]$表示投标到达时间，切片实际开始运行/释放时间表示为t_i^-/t_i^+, τ_i表示切片实际运行时间，则有：$t_i\le t_i^-<t_i^+,\tau_i=t_i^+-t_i^-$。$h_{i\zeta}^{vz}$表示部署于区域$z$的类型为$v$的VNF是否在竞标网络切片的部署策略$\zeta$中。$d_{i\zeta}^{vz}$表示流入区域$z$中$v$类可共享VNF的数据速率，其总量不能超过处理能力$M_{v,z}$。$l_{i\zeta}^{zz'}$表示区域$z$与$z'$之间的链路聚合带宽，可根据VNF实例间流量需求和功能部署策略计算。$b_{i\zeta}^{\mathrm{ty}_i}$表示业务类型为$\mathrm{ty}_i$用户的投标价格，3种业务类型的价格函数设计如下：

(1) $\mathrm{ty}_i=1$ eMBB类型：以人为中心的业务类型，包括语音通话、多媒体等业务。这类业务希望在特定时间段内获得足够的网络资源。因此，将其价格函数表示为随用户分配资源总量而增加的凹函数$b(\cdot)$，如式2所示

$$b_{i\zeta}^{\mathrm{ty}_i}=\sum_{k\in[K]}b\left(Q_{i\zeta}^k\right)+\sum_{z\in[Z],z'\in[Z]/\{z\}}b\left(l_{i\zeta}^{zz'}\right)\tag{2}$$

(2) $\mathrm{ty}_i=2$ uRLLC类型：包括智能电网、交通等业务。这类业务对时延要求更高，如果在$[t_{ai},t_{di}]$时间段内完成业务内容，用户投标价为$b_{\mathrm{to}_{i\zeta}}$，如果超过截止时间$t_{di}(t_i^+>t_{di})$，则延迟时间$\mathrm{de}_i=\max\left(t_i^+-t_{di},0\right)$越长，用户体验越差，相应的投标价格越少。用$\mathrm{pr}_i$表示延迟惩罚因子，其价格函数为

$$b_{i\zeta}^{\mathrm{ty}_i}=b_{\mathrm{to}_{i\zeta}}-\mathrm{de}_i\cdot\mathrm{pr}_i\tag{3}$$

(3) $\mathrm{ty}_i=3$ mMTC类型：这类业务请求来源于网络内连接大量机器类设备，这些设备通常具有通信请求不频繁、传输数据包小等特点。考虑多数机器类设备的位置是固定的，除时延影响外，VNF的放置区域也是一个重要的影响因素。引入VNF区域权重因子we_{vz}，将其价格函数表示为

$$b_{i\zeta}^{\mathrm{ty}_i}=b_{\mathrm{to}_{i\zeta}}-\mathrm{de}_i\cdot\mathrm{pr}_i-\sum_{z\in[Z]}\sum_{v\in[V]}h_{i\zeta}^{vz}\cdot\mathrm{we}_{vz}\tag{4}$$

用户需要赢得所有竞标商品才能获得网络切片满足自身需求，故该拍卖为多单位组合拍卖模型。

3.2 在线赢家确定问题定义

在拍卖模型中，用户的目的在于满足自身业务需求的同时以最低的成本接入网络，服务提供商则希望为用户提供定制切片服务的同时提升网络经济效益。用$v_{i\zeta}$表示用户i请求网络切片的真实估价，用户效用定义为其真实估价与支付价格之差，竞标失败的用户效用恒为0。服务提供商的效用为其总收入与资源运营成本之差。用$c_{z,k}$代表区域z中k类资源的单位运营成本，$c_{z,z'}$代表区域z与z'间的单位链路运营成本，则用户i请求的网络切片在生命周期内产生的运营成本表示为

$$\mathrm{c}_{i,\zeta}=\sum_{z\in[Z]}\sum_{v\in[V]}\sum_{k\in[K]}h_{i\zeta}^{vz}p_v^k c_{z,k}\tau_i\\ -\sum_{z\in[Z]}\sum_{z'\in[Z]/\{z\}}l_{i\zeta}^{zz'}c_{z,z'}\tau_i\tag{5}$$

对于用户i，不论其他用户如何出价，将真实估价作为其竞标价才能最大化自身效用，此时有$b_{i\zeta}=v_{i\zeta}$。用逻辑变量$x_{i\zeta}$表示用户i是否竞标成功，$p_i(\zeta,t_i)$表示VNF部署策略为ζ的用户i的支付价格，用户与服务提供商的总效用分别表示为

$$u_{\mathrm{us}}=\sum_{i\in[I]}\sum_{\zeta\in\varPi_i}(b_{i\zeta}^{\mathrm{ty}_i}-p_i(\zeta,t_i))x_{i\zeta}\tag{6}$$

$$u_{\mathrm{sp}}=\sum_{i\in[I]}\sum_{\zeta\in\varPi_i}\left(p_i(\zeta,t_i)-\mathrm{c}_{i,\zeta}\right)x_{i\zeta}\tag{7}$$

将用户投标分为J种业务类型，用ρ_j表示投标属于业务类型j的概率。假设用户在时间跨度T内随机到达，到达过程服从参数为λ的泊松分布，则到达的总投标数I为接近泊松分布期望值λT的一个随机数，则在时间跨度T内到达的投标数中属于业务类型j的数量为$\rho_j\lambda T$。拍卖机制的社会福利定义为用户与服务提供商总效用之和，权衡用户和SP双方的利益，将拍卖机制的在线赢家确定问题建模为如下最大化社会福利问题

$$\max\sum_{j\in[J]}\lambda T\rho_j\sum_{\zeta\in\varPi_j}(b_{j\zeta}^{\mathrm{ty}_j}-\mathrm{c}_{j,\zeta})x_{j\zeta}\tag{8}$$

$$\text{s.t.}\sum_{\zeta\in\varPi_j}x_{j\zeta}\le1\,,\quad\forall j\in[J]\tag{8a}$$

$$\sum_{v\in[V_a]} y_{vz}\cdot p_v^k+\sum_{j\in[J]}\sum_{v\in[V_s]}\sum_{\zeta\in\Pi_j}\lambda T\rho_j\frac{\tau_j}{T}p_v^k\cdot h_{j\zeta}^{vz}\cdot x_{j\zeta}\le C^{k,z},\ \forall k\in[K],z\in[Z] \tag{8b}$$

$$\sum_{j\in[J]}\sum_{\zeta\in\Pi_j}\lambda T\rho_j\frac{\tau_j}{T}d_{j\zeta}^{vz}\cdot x_{j\zeta}\le D_{v,z},\ \forall v\in[V],z\in[Z] \tag{8c}$$

$$\sum_{j\in[J]}\sum_{\zeta\in\Pi_j}\lambda T\rho_j\frac{\tau_j}{T}h_{j\zeta}^{vz}\cdot x_{j\zeta}\le Jy_{v,z},\ \forall v\in[V_a],z\in[Z] \tag{8d}$$

$$\sum_{j\in[J]}\sum_{\zeta\in\Pi_j}\lambda T\rho_j\frac{\tau_j}{T}l_{j\zeta}^{zz'}\cdot x_{j\zeta}\le L_{zz'},\ \forall z\in[Z],z'\in[Z]\setminus\{z\} \tag{8e}$$

$$\sum_{j\in[J]}\sum_{\zeta\in\Pi_j}\sum_{z'\in[Z]\setminus\{z\}}\lambda T\rho_j\frac{\tau_j}{T}l_{j\zeta}^{zz'}\cdot x_{j\zeta}\le Q_z^{\mathrm{up}},\ \forall z\in[Z] \tag{8f}$$

$$\sum_{j\in[J]}\sum_{\zeta\in\Pi_j}\sum_{z'\in[Z]\setminus\{z\}}\lambda T\rho_j\frac{\tau_j}{T}l_{j\zeta}^{zz'}\cdot x_{j\zeta}\le Q_z^{\mathrm{dw}},\ \forall z\in[Z] \tag{8g}$$

$$0\le x_{j\zeta}\le 1,y_{v,z}\ge 0,\forall j\in[J],\forall v\in[V_a],\forall z\in[Z] \tag{8h}$$

其中，式(8a)表示至多有一种VNF部署策略可以赢得投标，式(8b)为对各区域资源容量的限制。对于业务类型为j的投标所请求的网络切片，VNF部署策略为ζ时$t\in\left[t_j^-,t_j^+\right]$时刻消耗的$k$资源为$p_v^k\cdot h_{j\zeta}^{vz}$，则所有业务类型为$j$的投标的$k$资源单位时间平均消耗量为$\lambda T\rho_j\tau_j/Tp_v^k\cdot h_{j\zeta}^{vz}$。式(8c)表示各区域可共享VNF共享程度限制，即总数据速率不能超过其处理能力。式(8d)是对可共享VNF是否激活的判断，由式(9)变换而来

$$y_{v,z}=\begin{cases}1, & \sum\limits_{j\in[J]}\sum\limits_{\zeta\in\Pi_j}\lambda T\rho_j\dfrac{\tau_j}{T}x_{j\zeta}h_{j\zeta}^{vz}>0\\ 0, & \sum\limits_{j\in[J]}\sum\limits_{\zeta\in\Pi_j}\lambda T\rho_j\dfrac{\tau_j}{T}x_{j\zeta}h_{j\zeta}^{vz}=0\end{cases},\ \forall v\in[V_a],\forall z\in[Z] \tag{9}$$

式(8e)为区域间链路带宽容量的限制，式(8f)与式(8g)分别为各区域上传与下载带宽容量的限制。

4 面向多业务的在线拍卖机制设计

在线拍卖过程中，用户投标以泊松分布依次到达，服务提供商需要在接收用户请求后即时做出以下决策：(1)是否接受该投标，如果接受，选择哪种VNF区域部署策略；(2)确定用户支付价格。

4.1 资源分配策略

本文采用优化所有投标的方法，选择使投标i效用最大的VNF部署策略$\zeta_i\in\Pi_i$为接受该投标时的备选策略，表示为

$$\zeta_i=\arg\max_{\zeta\in\Pi_i}\left\{b_{i\zeta}^{\mathrm{ty}_i}-p_i(\zeta,t_i)\right\} \tag{10}$$

将投标效用u_i定义为部署策略为ζ_i时的效用与0之间的较大值，表示为

$$u_i=\max\left\{0,\max_{\zeta\in\Pi_i}\left\{b_{i\zeta}^{\mathrm{ty}_i}-p_i(\zeta,t_i)\right\}\right\} \tag{11}$$

当$u_i>0$时，表示用户可以从中得到收益，即接受该投标会增加拍卖机制的社会福利，使$x_{i\zeta_i}=1$，接受投标i的ζ_i部署策略；反之，当$u_i\le 0$时，拒绝投标i。这种资源分配方式可以最大化整个拍卖机制的社会福利，同时确保拍卖的真实性。

4.2 支付价格确定

用户i的支付价格p_i与两个因素有关：(1)备选VNF部署策略ζ_i；(2)投标到达时间t_i。只需求得网络切片各运行时刻的单位资源支付价格，便可得到总支付价格$p_i(\zeta_i,t_i)$。

服务提供商为用户提供的网络切片中包含两类资源：区域内的虚拟资源($k\in[K]$)和区域间的链路带宽资源($l_{z,z'}\ z\in[Z],z'\in[Z]\setminus\{z\}$)，用$p_{k,z}(t_i)$和$p_{l_{z,z'}}(t_i)$分别表示其单位资源支付价格。拍卖机制中允许为投标预留资源，即如果在t_i时刻接受了投标i，便会在$\left[t_i^-,t_i^+\right]$时间段为其预留运行网络切片所需的资源。用变量$f_{k,z}(t,t_i)$和$f_{l_{z,z'}}(t,t_i)$表示投标i到达时，之前到达的投标在时刻$t\in[T]$的资源使用量，$(f_{k,z}^+(t,t_i)/f_{l_{z,z'}}^+(t,t_i)$表示投标$i$到达后$t$时刻的资源使用量)。用户的支付价格与投标$i$到达时所需网络切片生命周期中各时刻的资源使用量有关，其单位资源价格函数表示为所有运行时刻的单位资源价格之和

$$p_{k,z}(t_i)=\sum_{t=t_i^-}^{t_i^+}w_{k,z}f_{k,z}^+(t,t_i)^{1+\beta},\ \forall\zeta\in\Pi_i,k\in[K],z\in[Z] \tag{12}$$

$$p_{l_{z,z'}}(t_i)=\sum_{t=t_i^-}^{t_i^+}w_{l_{z,z'}}f_{l_{z,z'}}^+(t,t_i)^{1+\beta},\ \forall\zeta\in\Pi_i,z\ne z'\in[Z] \tag{13}$$

以式(12)为例，参数$w_{k,z}$表示资源$k\in[K]$在拍卖机制中的相对权值，$\beta\ge 0$决定了单位资源价格函数的形式。VNF部署策略$\zeta\in\Pi_i$消耗区域z中k类

资源总量 $S^{kz}_{i\zeta}=\sum_{v\in[V_a]}(1-y_{vz})\,h^{vz}_{i\zeta}p^k_v+\sum_{v\in[V_b]}h^{vz}_{i\zeta}p^k_v$，支付价格表示为

$$p_i(\zeta,t_i)=\sum_{z\in[Z]}\sum_{k\in[K]}p_{k,z}(t_i)\,S^{kz}_{i\zeta}+\sum_{z\in[Z]}\sum_{z'\in[Z]/\{z\}}l_{z,z'}p_{l_{z,z'}}(t_i)+c_{i,\zeta} \tag{14}$$

根据资源分配策略，选择使投标小的最大的VNF部署策略作为备选策略，所以投标i的支付价格表示为

$$p_i=\begin{cases}p_i(\zeta_i,t_i), & \text{接受投标}i\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{15}$$

资源使用量发生改变时，服务提供商会同时更新$f_{k,z}(t,t_i)$的值，单位资源支付价格也随之更新

$$f_{k,z}(t,t_{\rm cu})=f_{k,z}(t,t_{\rm cu})+S^{kz}_{i\zeta}\ \forall t\in\left[t^-_i,t^+_i\right],\ k\in[K],z\in[Z] \tag{16}$$

$$f_{l_{z,z'}}(t,t_{\rm cu})=f_{l_{z,z'}}(t,t_{\rm cu})+l_{z,z'}\ \ \forall t\in\left[t^-_i,t^+_i\right],\ z\neq z'\in[Z] \tag{17}$$

4.3 在线拍卖算法

结合资源分配和价格支付策略，设计基于多业务的网络切片在线拍卖算法，算法流程如图2所示。本算法将各区域资源总量作为输入，输出为到达投标的赢家确定决策与支付价格。随着投标依次到达，根据其业务类型获得对应的投标信息，将用户效用$u_i>0$的投标作为获胜投标，并选择使用户效用最大的部署策略ζ_i作为获胜投标的部署策略。然后根据投标i请求的可共享VNF激活相应区域的VNF。区域资源使用量改变时(接受新投标时)更新单位资源支付价格。

以$\mathrm{ty}_i=1$的投标类型为例分析在线拍卖算法的复杂度。在时间跨度T内到达的总投标数为λT，所以判断用户是否到达的循环最多执行λT次。确定备选VNF部署策略的循环执行$Z^2(K+Z-1)^2$次，激活可共享VNF循环执行V_aZ次，更新资源使用量的循环执行$Z(K+Z-1)$次。因此在线拍卖算法的计算复杂度为$O\left(\lambda T\left(Z^2(K+Z-1)^2+V_aZ\right)\right)$，可实现在多项式时间内求解。与求解原始问题式(8)的最优解相比，缩短了计算时间，有利于投入实际使用。

5　仿真结果与分析

本文在MATLAB平台上对设计的在线拍卖算法进行验证分析，用户投标业务类型包括eMBB, uRLLC和mMTC 3种，投标价格由其投标类型对应的价格函数生成，其余仿真参数如表1所示。

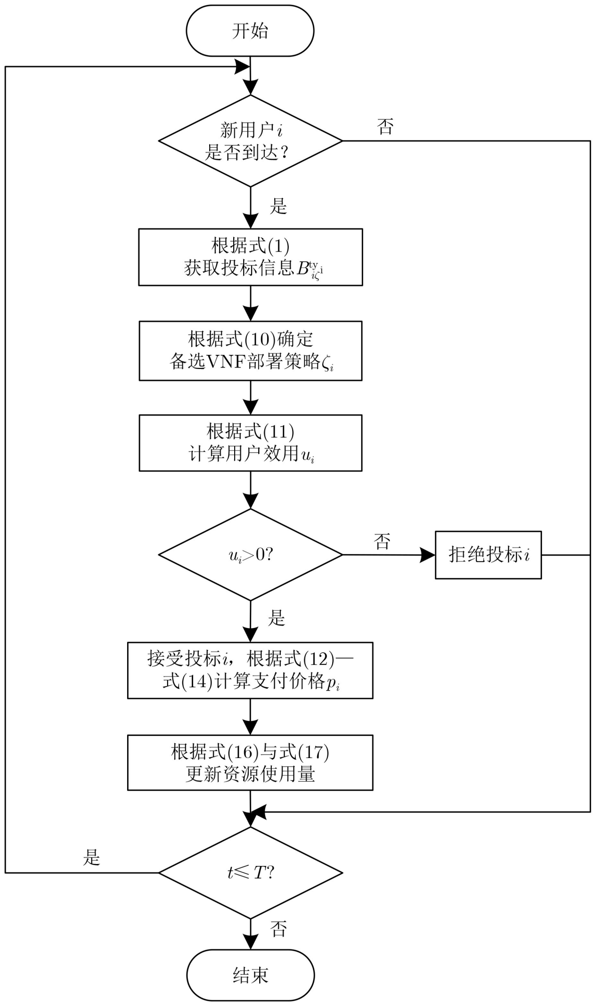

图 2 在线拍卖算法流程图

表 1　仿真参数表

仿真参数	仿真值
切片所属业务类型出现概率	eMBB: 0.6, uRLLC: 0.2, mMTC: 0.2
切片生命周期τ_i	$[t_i, T]$
VNF种类	10
可共享VNF种类	5
区域个数	5
资源种类	3
区域资源总量$C^{k,z}$	[300, 1200]
可共享VNF处理能力$D_{v,z}$	[6, 20]
区域间链路带宽$L_{z,z'}$	[6, 20]
上传/下载带宽容量$Q^{\rm up}_z/Q^{\rm dw}_z$	[40, 80]

5.1 算法性能分析

图3为执行在线拍卖算法得到的竞争率随投标人数和时间跨度T的变化图。拍卖机制的竞争率定义为最优社会福利(离线赢家确定问题的最优解)与执行在线拍卖算法得到的在线拍卖社会福利之比。由仿真结果可得，随着投标人数和时间跨度T的增

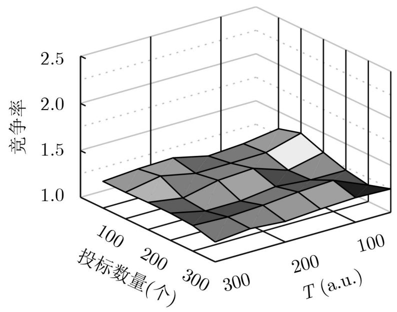

图 3 竞争率

加，在线拍卖机制的竞争率在1.5左右浮动，总体趋于稳定，这表明本文所提算法在竞争率方面具有稳定性。

图4为在线拍卖算法的用户社会福利与支付价格随时间跨度T的变化图。随着竞标人数的增加，社会福利呈上升趋势，这是因为在线拍卖中，T的增加意味着竞标人数的增加，有更多的时间段供用户所需网络切片选择，获胜用户增加，使社会福利增加。另外，支付价格始终低于竞标价格，满足个人理性。

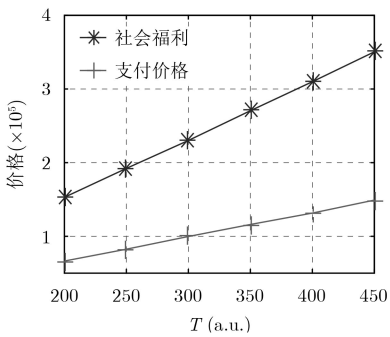

图 4 社会福利与支付价格

5.2 算法性能对比

文献[15]针对NFV市场的VNF资源分配问题提出一种原始-对偶近似算法，将该算法运用在本文的拍卖模型中，用相同的参数进行仿真，对两种算法的竞争率、社会福利与用户满意度等性能进行对比。

图5为本文所提算法与文献[15]中原始-对偶近似算法的竞争率随时间跨度T的变化图。由图5可得，随着时间跨度T的增加，在线拍卖算法的竞争率稳定在1.6左右，近似算法的竞争率逐渐上升，且一直高于在线拍卖的竞争率值。这一结果说明在线拍卖算法的社会福利更接近于最优值。

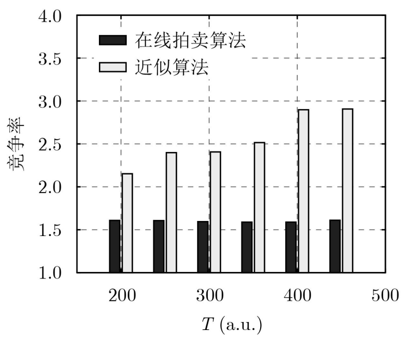

图 5 在线拍卖与近似算法的竞争率

图6与图7表示固定$T=200$时，在线拍卖与近似算法的社会福利与用户满意度随投标人数的变化图。从图6可见，当T不变时，随着投标人数的增长，在线拍卖与近似算法的社会福利均先上升后趋于稳定，原因在于竞标人数较少时，资源量充足，更多的竞标用户意味着获胜用户数随之增加，社会福利增多，此后随着用户数急剧增加，资源总量的限制导致获胜用户数趋于稳定，所得社会福利随之稳定。另一方面，在相同数量的用户参与竞标时，在线拍卖算法的社会福利始终优于近似算法。

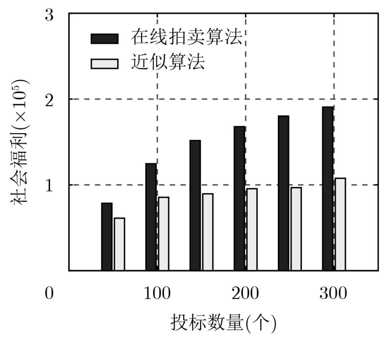

图 6 在线拍卖与近似算法在不同投标人数时的社会福利

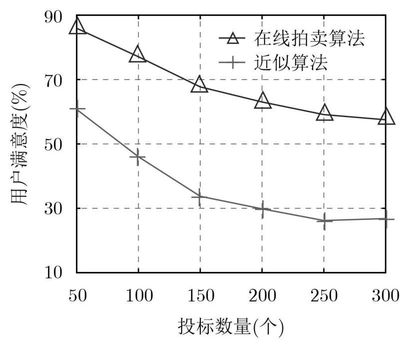

图 7 在线拍卖与近似算法在不同投标人数时的用户满意度

用户满意度定义为接受投标个数与投标到达总个数之比。由图7可知，用户数较少时大部分用户能赢得投标，用户满意度较高。随着用户的增加，用户满意度呈下降趋势，这是由于资源量的限制导致获胜用户数趋于稳定，而总投标人数不断增加。另一方面，相等投标人数的情况下，在线拍卖算法的用户满意度始终高于近似算法的用户满意度。

图8为时间跨度T固定时，在线拍卖与近似算法为所有投标完成资源分配的运行时间随投标总人数的变化图。由图可知，相对于近似算法，在线拍卖算法的运行时间更短，复杂度更低。

综上所述，本文所提算法在竞争率、社会福

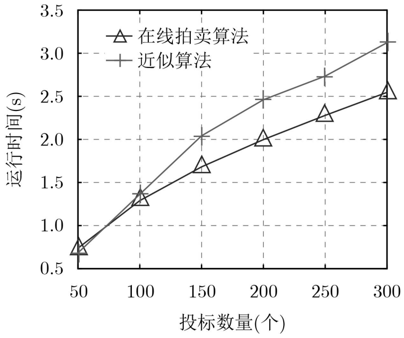

图 8 在线拍卖与近似算法在不同投标人数时的运行时间

利、用户满意度以及运行时间等方面均优于原始对偶近似算法，结果表明在线拍卖算法在网络切片的资源分配问题上有较好的有效性和稳定性。

6　结论

随着物联网、自动化等垂直行业的快速发展，未来移动通信网络呈现出应用场景多样化、多种无线接入技术融合共存的趋势。为根据用户需求提供定制化的服务，本文基于在线拍卖机制，提出一种面向多业务的网络切片资源分配算法。本算法能够在用户提交服务请求后，根据其业务需求进行定制化的投标信息转换，以最大化拍卖参与者的社会福利为目标进行切片资源分配，同时设计相应的价格更新算法保障拍卖机制达到均衡。仿真结果表明，相对于离线拍卖机制，本算法能得到较好的竞争率，能在保证用户满意度的同时，提升整个拍卖机制的经济效益。与原始-对偶近似拍卖算法相比，本算法在竞争率、用户满意度和拍卖机制的经济效益方面，都表现出相对较好的性能优势。

参 考 文 献

[1] IMT-2020(5G)推进组. 5G愿景与需求白皮[OL]. http://www.imt-2020.org.cn/zh/documents/listByQuery, 2015.

[2] 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.

[3] ROST P, MANNWEILER C, MICHALOPOULOS D S, *et al.* Network slicing to enable scalability and flexibility in 5G mobile networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(5): 72–79. doi: 10.1109/MCOM.2017.1600920.

[4] RICHART M, BALIOSIAN J, SERRAT J, *et al.* Resource slicing in virtual wireless networks: A survey[J]. *IEEE Transactions on Network & Service Management*, 2016, 13(3): 462–476. doi: 10.1109/TNSM.2016.2597295.

[5] AFOLABI I, TALEB T, SAMDANIS K, *et al.* Network slicing & softwarization: A survey on principles, enabling technologies & solutions[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(3): 2429–2453. doi: 10.1109/COMST.2018.2815638.

[6] LI Xin, SAMAKA M, CHAN H A, *et al.* Network slicing for 5g: Challenges and opportunities[J]. *IEEE Internet Computing*, 2017, 21(5): 20–27. doi: 10.1109/MIC.2017.3481355.

[7] 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.

[8] CABALLERO P, BANCHS A, VECIANA G, *et al.* Network slicing games: enabling customization in multi-tenant networks[C]. IEEE INFOCOM - IEEE Conference on Computer Communications, Atlanta, USA, 2017: 1–9.

[9] NARMANLIOGLU O, ZEYDAN E, and ARSLAN S S. Service-aware multi-resource allocation in software-defined next generation cellular networks[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 20348–20363. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2818751.

[10] 粟欣, 龚金金, 曾捷. 面向5G网络切片无线资源分配[J]. 电子产品世界, 2017, 24(4): 30–32.
SU Xin, GONG Jinjin, and ZENG Jie. Wireless resource allocation for 5G network slicing[J]. *Electronic Computer Design World*, 2017, 24(4): 30–32.

[11] VO P L, NGUYEN M N H, LE T A, *et al.* Slicing the edge: resource allocation for RAN network slicing[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2018, 99: 1–4. doi: 10.1109/LWC.2018.2842189.

[12] JIANG Menglan, CONDOLUCI M, and MAHMOODI T. Network slicing in 5G: An auction-based model[C]. IEEE International Conference on Communications, Chengdu, China, 2017: 1–6.

[13] WANG Gang, FENG Gang, TAN Wei, *et al.* Resource allocation for network slices in 5G with network resource pricing[C]. IEEE Globlecom, Singapore, 2017: 1–6.

[14] 陈前斌, 施颖洁, 杨希希, 等. 基于在线双向拍卖的虚拟网络切片资源调度机制[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(7): 1738–1744. doi: 10.11999/JEIT170902.
CHEN Qianbin, SHI Yingjie, YANG Xixi, *et al.* Resource scheduling mechanism for virtual network slice based on online double auction[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(7): 1738–1744. doi: 10.11999/JEIT170902.

[15] GU Sijia, LI Zongpeng, WU Chuan, *et al.* An efficient auction mechanism for service chains in the NFV market[C]. The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications, San Francisco, USA, 2016: 1–9.

梁　靓：女，1981年生，副教授，研究方向为移动通信网络、物联网.
武彦飞：女，1993年生，硕士生，研究方向为无线网络资源管理.
冯　钢：男，1964年生，教授，研究方向为无线通信网络.