

基于细粒度切片的 6G 网络弹性切换算法研究

朱晓荣, 陈康

(南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003)

摘要: 面向未来全息通信、增强扩展现实等业务的涌现, 需要将大带宽业务按照用户速率需求划分为更细粒度的业务切片实现多样化的业务。针对大带宽业务细粒度切片的网络切换问题, 提出了基于二分图匹配的 6G 网络弹性切换算法, 通过完成“用户-切片-基站”的最优关联, 最大化用户和速率, 并将接入问题建模为层次化二分图稳定匹配问题, 通过“切片-基站”一体化和“先切片再基站”两阶段的 2 种匹配思想, 使用 Gale-Shapley 匹配算法, 实现网络的自适应切换。仿真结果表明, 所提的一体化和两阶段匹配算法的接入成功率与传统方法相比分别提升 15% 和 10%, 用户和速率也有明显提升。

关键词: 网络切换; 细粒度切片; 弹性匹配; 资源分配

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022177

Research on elastic handover algorithm of 6G network based on fine-grained slicing

ZHU Xiaorong, CHEN Kang

Jiangsu Key Laboratory of Wireless Communications, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

Abstract: With the emergence of high-bandwidth services such as holographic communication and augmented reality in the future, high-bandwidth services will be divided into finer-grained service slices according to the rates to meet diverse requirements of users. For the problem of how to complete network switching in a fine-grained slicing of large bandwidth services, an elastic handover algorithm of 6G network based on bipartite graph stable matching was proposed. By optimizing “user-network slice-base station” association, the total rate of users was maximized, and the access problem was modeled as a hierarchical bipartite graph stable matching problem. Then by using the two matching ideas of “slice base station” integration and “slice first and then base station”, the adaptive handoff of the network was realized by using Gale-Shapley algorithm. Simulation results show that the access success rates of the proposed integrated and two-stage matching algorithms are 15% and 10% higher respectively than that of the traditional method, and the total rate of users is also significantly improved.

Keywords: network handover, fine-grained slicing, elastic matching, resource allocation

0 引言

随着科学技术的不断发展, 人们对移动通信服务的需求也在不断变化。在 6G 时代, 除了通过空

天地海一体化服务架构实现全球无缝覆盖的目标外, 更重要的是对虚拟世界进行探索, 这对网络通信服务产生了更多更严格的要求。5G 网络中的三大典型应用场景增强型移动宽带 (eMBB, enhanced

收稿日期: 2022-07-08; 修回日期: 2022-08-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61871237, No.92067101); 江苏省高校“青蓝工程”基金资助项目; 江苏省重点研发计划基金资助项目 (No.BE2021013-3); 江苏省研究生科研与实践创新计划基金资助项目 (No.KYCX21_0733)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61871237, No.92067101), Program to Cultivate Middle-aged and Young Science Leaders of Universities of Jiangsu Province, The Key Research and Development Program of Jiangsu Province (No.BE2021013-3), Jiangsu Province Postgraduate Research and Practice Innovation Program (No.KYCX21_0733)

mobile broadband)、低可靠低时延通信 (URLLC, ultra-reliable and low-latency communication)、大连接物联网 (mMTC, massive machine-type communication) 虽然对业务的速率、时延、服务数设定了不同的指标, 但仍然无法满足 6G 网络的需求。未来的 6G 网络将支持面向计算的通信、上下文敏捷的 eMBB 通信和事件定义的 URLLC 增强型业务, 对比 5G 网络, 服务将会根据业务进行更细粒度的划分, 形成沉浸式云扩展现实、全息通信、感官互联、智慧交互、通信感知、普惠智能、数字孪生、全域覆盖等八大业务应用^[1], 这些业务需要网络提供定制化、场景化的服务, 对于业务指标则需要更精细化的划分, 而现有的 5G 网络切片 (NS, network slicing) 方案不能满足精细化的业务需求。

因此, 网络切片技术仍然是未来 6G 网络的关键技术之一。网络切片以按需组网的方式, 在统一的基础设备集上, 部署多个端到端网络。切片之间是逻辑隔离的, 选取不同的基础设备来满足不同的业务需求。目前, 已有一些文献对网络切片进行了深入研究^[2-5]。文献[2]针对 5G 网络中网络切片技术的概念和关键点做了详细的阐述, 并介绍了 3GPP 标准化以及切片在 5G 网络中的部署进展。文献[3-5]针对网络切片结构和框架提出了软件定义网络、复杂网络等新的方案, 可以实现切片的自适应控制等。由于 6G 网络要建立空天地海一体化体系, 将导致其网络环境更为复杂, 业务种类更加繁多, 大量的细粒度的网络切片分布在整个网络, 用户的服务体验将更依赖于网络切片, 因此, 用户设备 (UE, user equipment) 在 6G 网络中的切换方式将会成为巨大的挑战。对于接入网领域来说, 在当前切片、基站 (BS, base station) 无法满足用户需求时, 用户终端如何在复杂环境下快速地重新接入合适的切片以及基站成为亟须研究的方向。

传统的切换只考虑了用户和基站 2 个层面, 而面对新的网络架构, 用户获得的服务质量 (QoS, quality of service) 不仅与基站相关, 还与切片相关。传统的切换算法无法适应新的网络架构, 为了保障业务连续性, 需要研究新的算法来实现切片层次的无缝连接, 将网络切换由传统的用户和基站 2 个层面转化为用户、切片以及基站 3 个层面。目前, 国内外研究者对网络切片切换也进行了深入研究^[6-16]。首先, 对于切片切换问题的建模, 现有研究有多种方案^[6-8]。文献[6]将端到端切片的切换问题建模为马

尔可夫决策过程, 设计了一种基于双深度 Q 网络的切片切换算法, 可以最大化与用户的服务利润、切换成本和中断惩罚相关的效用。文献[7]则将切换问题表述为一个多代理强化学习问题, 并利用图注意力网络来加强代理之间的合作。考虑多用户间的相互影响, 文献[8]将移动通信网络中多用户的接入切换问题建模为一个多人随机博弈模型, 采用多智能体强化学习的方法对该问题进行求解, 并设计了一种基于分布式多智能体强化学习算法的多用户接入切片动态切换机制。另外, 文献[9-12]提出了保障用户 QoS 的切片算法。文献[9]研究了虚拟化无线接入网中具有混合通信量的动态网络切片策略, 考虑到 QoS 对传输时延和传输速率的要求, 提出了粗资源配置方案和基于深度强化学习的自主切片细化算法。文献[10]提出在未来移动网络系统中, 应解决用户-切片-基站三层关联关系, 并提出用户访问控制和移动用户切换策略来保障用户的 QoS 需求。文献[11]提出了一种基于最大吞吐量的切片访问机制, 研究了 5G 网络切片体系结构中由用户移动性引起的切片再访问和切片资源调度问题。文献[12]提出了动态访问控制和切片分配算法, 通过用户当前的需求、优先级和网络条件, 找到接入网络和网络切片最有效的组合, 以最大限度地提高 QoS。

但是, 上述文献都没有考虑切换成本带来的影响。文献[13]提出了一种基于切换效率的异构网络选择与带宽分配算法, 以用户 QoS 需求及系统带宽为约束, 以最大化切换效率为目标, 解决网络选择与带宽资源分配的联合优化问题。文献[14]提出了一种基于多智能体强化学习的智能切换策略, 可以降低切换成本, 同时保持无线接入网络切片中的用户 QoS 要求。文献[15]提出了一种新的切片选择机制, 允许用户根据服务类型连接到多个切片, 这种多连接方式为切换的重接入过程提供了新的思路。文献[16]则提出更加灵活的切片部署方式, 同时通过使用增强的多连接协议来确保用户移动时的业务连续性, 减少了由于目标小区缺少切片支持而导致的切换和用户关联失败。

此外, 文献[17-21]从新的角度研究了与网络切片切换相关的无线与计算资源管理等算法。文献[17]提出一个移动终端充当由不同切片服务的另一个终端的设备到设备间的中继, 并提出两层激励制度来激发合作, 切片和用户的吞吐量都有所提升。文献[18]提出使用 5G 网络中切片的移动边缘计算, 将通信

和计算资源的要求耦合在一起，并利用串联队列来表示和分析切片的通信资源和计算资源之间的耦合关系，实现切片间资源的高效共享。文献[19-20]考虑了切片间的资源隔离，在无线资源复用和隔离之间进行权衡，在无线资源隔离要求的约束下最大化无线资源复用增益。文献[21]提出了一个基于SM2国密算法的5G mMTC网络切片二次认证与安全隔离模型，通过引入批量认证和预认证机制，满足了5G机器类用户大规模认证的高效性；通过对不同通信数据分级加密，实现了5G mMTC网络切片间的安全隔离。

从以上文献可以看出，当前研究主要针对对大类业务的粗粒度网络切片，如时延、接入数和速率等。而未来6G业务会存在更细粒度的网络切片划分需求，即同一类业务下对参数指标进一步划分的网络切片，如5G中eMBB业务的通用数据速率大约为10 Gbit/s，在这类同样关注速率的业务下，未来6G业务的速率需求可能会有20 Gbit/s、30 Gbit/s、50 Gbit/s等。在这种细粒度切片的网络场景下，由于用户移动或者网络环境波动，当前的切片无法满足用户需求，用户终端需要进行网络切换以提升用户体验和资源利用率，即重新接入合适的切片和基站，因此细粒度的切片切换值得关注。本文提出基于细粒度切片的6G网络弹性切换算法，在多层异构网络场景下，将大带宽业务进行更细粒度的切片划分。利用弹性接入的思想，在满足基站以及切片资源约束的前提下，将网络切换表示为重新寻找用户、切片以及基站间的最优匹配关系，通过“切片-基站”一体化和“先切片再基站”的2种匹配方式，并利用Gale-Shapley算法，找到用户和速率最大的匹配结果，完成网络切换的决策，实现网络的自适

应匹配。最后，对本文提出的细粒度切片弹性切换算法进行仿真验证，接入成功率及用户和速率都有所提升。

1 系统模型

本文考虑如图1所示的多层异构无线网络场景。网络场景中主要包含宏基站和微基站，宏基站覆盖范围大，主要负责控制信令的传输；微基站覆盖范围小，主要提供定制化的数据服务。基站和用户都服从参数为 λ 的泊松分布。宏基站与微基站间使用异频通信，即使用频段相互正交。网络在初始阶段已经将细粒度切片部署完毕，切片类型为大带宽业务，切片的细粒度体现在切片的保障速率不同，网络中部署了 K 个基站、 M 个切片和 I 个用户，每个用户只有一个终端。不同切片得到的物理资源不同，所以各切片分得的带宽和最大接纳用户数各不相同，并且不同切片提供不同的保障速率，由小到大排序为 $R_{\min} = \{R_1, R_2, \dots, R_M\}$ 。只有当保障速率大于用户业务需求时，用户得到的服务才为可靠服务。切片可以部署在多个基站上，基站上也可以部署多个切片，但用户同一时刻只能接入一个基站上的一个切片。

网络包含总带宽资源 B 和总功率 P ，根据网络流量的时空分布，将资源分配给网络中的微基站，带宽分配情况表示为 $b = \{b^1, b^2, \dots, b^K\}$ ，功率分配情况表示为 $p = \{p^1, p^2, \dots, p^K\}$ ，其中， b^k 表示第 k 个基站获得的带宽资源， p^k 表示第 k 个基站获得的功率资源，需满足约束条件 $\sum_{k=1}^K b^k \leq B$ ， $\sum_{k=1}^K p^k \leq P$ 。

根据网络对用户日常业务的统计进行基站级资源分布调整，将基站资源按需分配给部署的切片。假

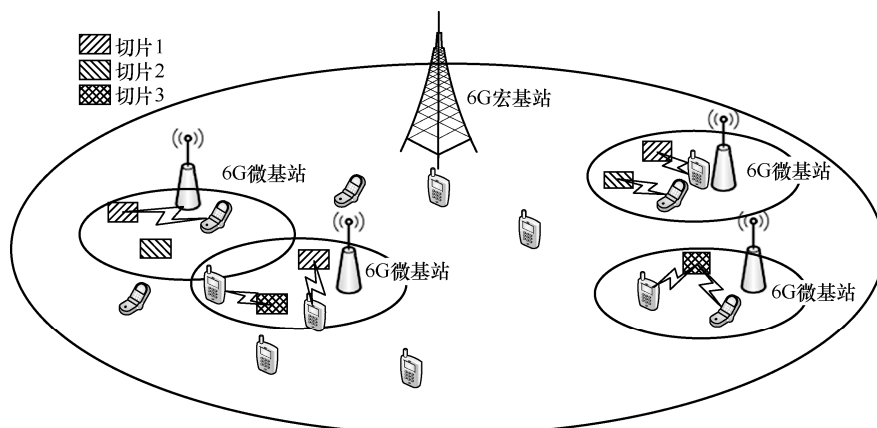


图1 多层异构无线网络场景

设基站 k 中切片 m 得到的带宽为 b_m^k ，功率为 p_m^k ，基站部署的切片资源和不能超过当前基站的资源，即

$$\sum_{m=1}^M b_m^k \leq b^k \quad (1)$$

$$\sum_{m=1}^M p_m^k \leq p^k \quad (2)$$

当用户处于某个微基站的范围内，且该基站上部署的网络切片能满足用户的业务需求时，这个基站就可以为该用户提供服务。

2 弹性接入的切换机制

由于网络中的用户可以移动，用户感知的网络环境也会变化，当切片无法满足用户需求时，用户将发送切换请求进行网络搜索，重新选择合适的切片与基站接入。弹性的切片选择机制是指用户可以选择任何能够满足业务需求的切片接入，并且对提供用户速率越高的切片，偏好程度越高。切换条件不再由信号强度决定，针对不同业务切换条件可以不同。为保证业务连续性，采用预切换思想，在切换条件上增加一个余量作为阈值，来触发切换决策，当达到切换条件时，便可根据决策结果重新接入。本文考虑的是大带宽业务，主要指标是用户速率，所以切换决策条件可表示为

$$R_{i,m}^k(t) \leq R(t)_{\text{req}} + \tau_0, t \in [0, T] \quad (3)$$

其中， τ_0 表示余量。当用户速率 $R_{i,m}^k$ 在时间 T 内小于阈值时，用户进行扫描，确定可使用的切片，并向接入和移动管理功能单元发送切换请求。当用户速率降低到用户需求速率 R_{req} 时，执行切换，用户重接入决策选择的基站和切片。

考虑切片和基站的资源情况，得到关于切片的约束条件

$$\sum_{i=1}^I \alpha_{i,m}^k b_{i,m}^k \leq b_m^k \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I \alpha_{i,m}^k p_{i,m}^k \leq p_m^k \quad (5)$$

其中， $\alpha_{i,m}^k$ 表示用户 i 是否接入基站 k 上的切片 m ，为 1 时表示接入，为 0 时表示没有接入； $b_{i,m}^k$ 表示用户 i 接入基站 k 的切片 m 时得到的带宽资源，约束式(4)表示接入基站 k 上切片 m 的用户分配的总带宽资源不能超过基站 k 为切片 m 分配的带宽； $p_{i,m}^k$ 表示用户 i 接入基站 k 的切片 m 时基站的发送功率，约束式(5)表示接入基站 k 上切片 m 的用户分配的功

率和不能超过基站 k 上切片 m 分配的功率。

由于带宽资源有限，假设切片将带宽平均分配给接入用户，带宽约束体现在切片承载用户数存在极限值。切片 m 满足保障速率需要提供的频带资源作为 $b_{m,\min}^k$ ，即有

$$R_m \leq b_{m,\min}^k \text{lb}(1 + \text{SINR}_{i,m}^k) \quad (6)$$

此时，基站 k 的切片 m 的最大承载用户数为

$$N_m^k = \left\lfloor \frac{b_m^k}{b_{m,\min}^k} \right\rfloor \quad (7)$$

所以带宽约束可以表示为切片服务用户数不超过其最大承载用户数

$$\sum_{i=1}^I \alpha_{i,m}^k \leq N_m^k \quad (8)$$

用户可获得的速率为

$$R_{i,m}^k = b_{i,m}^k \text{lb}(1 + \text{SINR}_{i,m}^k) \quad (9)$$

$\text{SINR}_{i,m}^k =$

$$\frac{p_{i,m}^k |h_i^k(t)|^2}{n_0 b_{i,m}^k + \sum_{k' \neq k} \sum_{i' \neq i} \sum_{m \in M} p_{i',m}^{k'} |h_{i'}^{k'}(t)|^2} \text{loss}(d_{i,k}) \quad (10)$$

其中， $h_i^k(t)$ 表示用户 i 接入基站 k 的信道增益； n_0 表示高斯白噪声密度，仅考虑除当前基站外的微基站发送信号带来的干扰； $d_{i,k}$ 表示用户 i 和基站 k 间的距离； $\text{loss}(d_{i,k})$ 表示此距离下的路径损耗，

$\text{loss}(d_{i,k}) \propto \frac{1}{d_{i,k}^2}$ 。优化目标是最大用户和速率，形

成如下的优化问题

$$\begin{aligned} & \max \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \alpha_{i,m}^k R_{i,m}^k \\ & \text{C1: } \sum_{i=1}^I \alpha_{i,m}^k \leq N_m^k \\ & \text{C2: } \sum_{i=1}^I \alpha_{i,m}^k p_{i,m}^k \leq p_m^k \\ & \text{C3: } \sum_{m=1}^M b_m^k \leq b^k \\ & \text{C4: } \sum_{m=1}^M p_m^k \leq p^k \\ & \text{C5: } R_{i,m}^k > R_{\text{req}}, \forall \alpha_{i,m}^k = 1 \\ & \text{C6: } \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \alpha_{i,m}^k \leq 1, \alpha_{i,m}^k \in \{0, 1\} \end{aligned} \quad (11)$$

其中, C1 表示基站 k 上切片 m 接入的用户数小于其最大承载用户数; C2 表示基站 k 上切片 m 接入的用户功率和必须小于其分配的功率; C3 表示基站 k 上所有切片分配的带宽资源和必须小于基站 k 的总带宽; C4 表示基站 k 上所有切片分配的功率和必须小于基站 k 的总功率; C5 表示对于用户业务速率要求 R_{req} , 当用户发生切换时, 目标切片应保证提供的保障速率大于用户需求, 即用户只会向保障速率超过用户速率需求的切片发送请求, 从而保障业务的连续性; C6 表示一个用户只能接入一个基站的一个切片。

3 弹性网络切换匹配算法研究

用户接入问题可以看作一个层次化二分图稳定匹配问题。切换决策的目的就是得到实现用户和速率最大的用户-切片-基站间的匹配关系。单用户只能接单切片, 单切片可以接收多用户。切片和基站的关系在部署时就已经确定, 单切片可部署在多个基站, 单基站也可部署多个切片。为了得到合适的匹配关系, 使用先切片再基站两阶段和切片基站一体化 2 种方案进行匹配, 并通过 Gale-Shapley 匹配算法得到匹配结果。

3.1 先切片再基站两阶段匹配

先切片再基站两阶段匹配示意如图 2 所示。第一阶段完成用户-切片层的匹配, 第二阶段将第一阶段得到的切片用户集与基站层匹配, 得到用户-切片-基站的匹配结果。

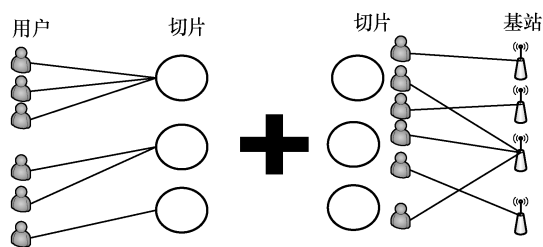


图 2 先切片再基站两阶段匹配示意

第一阶段是用户和切片的匹配, 由于资源受限, 每个切片都有一个最大承载用户数。对于用户侧, 每个用户都希望得到最好的服务体验, 所以在满足业务需求的前提下, 用户会选择保障速率指标最大的切片接入, 即用户侧的偏好列表顺序就是切片保障速率 R_m 顺序。对于切片侧, 切片会根据用户的速率需求 R_{req} , 选择用户速率需求高的用户接入, 故切片侧的偏好列表顺序为用户业务需求的

R_{req} 顺序。第二阶段的匹配受第一阶段的匹配的影响, 由于基站及切片的部署已经初始化, 切片的基站候选列表已经确定, 只有部署该切片的基站可以被选择。假设部署有第 m 个切片的基站集合为 k_m , 其中 $m \in \{1, 2, \dots, M\}$, $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 。对于用户 i , 在第一阶段匹配中选择的切片 m 后, 可选择的基站只能限制在 k_m 。对于不同基站部署的相同切片, 切片提供的保障速率相同, 但由于用户和基站间的距离不同, 用户接入相同切片得到的速率是不一样的, 用户侧可以根据不同基站提供的速率与所有基站中可获得的最大速率的比值进行速率归一化, 并将结果作为偏好指标。考虑负载均衡, 使用基站当前切片接入用户数 $N_{m,used}^k$ 和最大承载用户数 N_m^k 的比值来表示当前基站的饱和度, N 越大, 负载压力越大, 选择接入的概率越小。

$$N = \frac{N_{m,used}^k}{N_m^k} \quad (12)$$

综上, 可以得到匹配度的计算式为

$$\rho_{i,m}^k = \alpha(1 - N) + \beta \frac{R_{i,m}^k}{\max R_{i,m}^k}, k \in k_m, \alpha + \beta = 1 \quad (13)$$

其中, α, β 为常数, 分别表示负载均衡和用户速率所占的权重; $\rho_{i,m}^k$ 表示选择切片 m 的用户 i 对基站 k 的匹配度, 匹配度越高, 基站的优先级越高, 被选择的概率越大。基站侧的偏好列表顺序仍为用户业务需求 R_{req} 。

3.2 切片基站一体化匹配

当用户选择切片后, 继续进行基站层的选择, 若没有合适的基站接入, 则当前切片不可用, 用户继续选择其他切片。切片基站一体化匹配示意如图 3 所示。

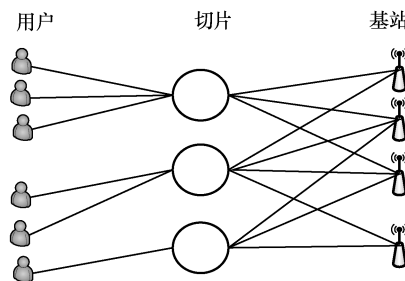


图 3 切片基站一体化匹配示意

与 3.1 节的两阶段匹配不同, 一体化匹配的思想是将基站和切片一起选择, 用户在根据偏好列表选择切片后, 会继续寻找合适的基站接入; 当用户选择的切片没有合适的基站接入时, 则表示当前选

择的切片不可用，继续进行下一切片的选择，其中切片和基站的选择标准与3.1节相同。一体化匹配是将基站和切片看作一个整体，用户的偏好列表由切片和基站联合提供的用户速率 $R_{i,m}^k$ 决定， $R_{i,m}^k$ 越高，切片基站被选择的机会越高；切片基站部分的偏好列表为用户需求速率 R_{req} ， R_{req} 越高，用户越容易被接收。

传统的基站选择没有引入切片的层面，无法满足新的网络架构。与两阶段匹配不同，切片基站一体化匹配综合考虑了切片基站的关联关系，消除了部分用户出现的有合适的切片但无合适的基站选择情况，更能提高用户的接入成功率和资源利用率，但在环境更为复杂的场景，当基站和切片数目都较多时，这种一体化匹配考虑的组合情况会较多，决策时长会增加，因此不适用于时延敏感度较高的业务。

3.3 Gale-Shapley 算法

完成匹配的具体算法是 Gale-Shapley 算法，该算法包括3个阶段：第一阶段为匹配请求者和匹配接收者感知彼此的信息，如用户可以得到切片的保障速率和基站的位置及负载情况，切片和基站可以得到用户的需求速率；第二阶段为初始化阶段，其中所有匹配请求者和匹配接收者需要初始化其偏好列表，然后所有未匹配的匹配请求者放入集合 UNMATCH 中；第三阶段为核心匹配阶段，主要分为两步，第一步，集合 UNMATCH 中的所有匹配请求者向匹配接收者发送匹配请求，第二步，匹配接收者根据优胜劣汰的原则来确定匹配对象，当匹配请求者没有可选择的匹配接收者时，从集合 UNMATCH 中移除该匹配请求者。重复执行第三阶段的2个步骤，直到集合 UNMATCH 为空。

Gale-Shapley 算法流程如算法1所示。

算法1 Gale-Shapley 算法

初始化

- 1) 每个匹配请求者和匹配接收者分别得到自己的偏好列表
- 2) 将所有未匹配的匹配请求者都放入 UNMATCH 集合中
- 3) while UNMATCH $\neq\emptyset$
- 4) for $i\in\text{UNMATCH}$
- 5) 匹配请求者向列表中未发送过请求的偏好度最高的匹配接收者发出匹配请求
- 6) for $j\in\text{匹配接收者}$

- 7) if 可提供匹配请求者速率 $<$ 匹配请求者需求速率
- 8) 将该匹配请求者从偏好列表中移除
- 9) end if
- 10) end for
- 11) for $j\in\text{匹配接收者}$
- 12) if 匹配接收者还未达到最大承载数，则匹配接收者按照自己的偏好序列与匹配请求者临时配对，并将请求者从 UNMATCH 集合中移除
- 13) else if 匹配接收者已达到最大承载数，则匹配接收者按照自己的偏好序列比较当前临时配对对象和当前请求者，选择速率更高的请求者组成临时配对，没有配对者进入 UNMATCH 集合，将成功配对者从 UNMATCH 集合中移除
- 14) else 匹配接收者未收到匹配请求，则进入下一轮
- 15) end if
- 16) end for
- 17) end for
- 18) end while

与传统单向匹配的匈牙利算法不同，Gale-Shapley 算法联合考虑了匹配双方的偏好序列，得到的匹配结果是符合双方期望的最优值。本文为了得到最高的用户和速率，需要提高网络资源利用率，所以得到的是用户和网络双方匹配的最优结果，Gale-Shapley 算法符合求解目标。

在3.1节的两阶段匹配中，用了两次 Gale-Shapley 算法得到匹配结果，第一次的双方是用户和切片，完成用户-切片的匹配，第二次的双方是切片和基站，完成切片-基站的匹配。在3.2节的一体化匹配中，将切片和基站看作一个整体进行匹配选择，只用了一次 Gale-Shapley 算法得到匹配结果。

3.4 复杂度分析

3.1节的两阶段匹配中，第一阶段是切片层的选择匹配，得到的结果是用户和切片的匹配关系，其时间复杂度为 $O(IM)$ ，其中， I 表示用户数目， M 表示切片数目。第二阶段是基站层的选择匹配，得到的是用户和基站的匹配关系，其时间复杂度为 $O(IK)$ ，其中， K 表示基站数目，总体时间复杂度

为 $O(I(M + K))$ 。3.2 节的一体化匹配将切片和基站看成一个对象，数目为 MK ，整体时间复杂度为 $O(IMK)$ 。

可以看出，两阶段匹配的时间复杂度更低，当 M 、 K 越大时，两阶段匹配在时间方面的优势越大，在时间敏感性业务的应用前景更广阔。

4 仿真结果与分析

为了体现弹性接入切片机制的作用，设置了传统接入方式与本文 2 种匹配方式作为对照，传统接入方式下，用户只能选择对应需求速率的切片接入，即使能提供更高速率的切片空闲，也不会选择该切片。

仿真考虑有 4 个微基站分布在 $600\text{ m} \times 600\text{ m}$ 的区域内，基站带宽为 20 MHz，发射功率为 30 dBm，噪声功率为 -174 dBm/Hz ，仿真参数如表 1 所示。为模拟复杂的接入环境，用户大多分布在多基站重叠覆盖范围内，如图 4 所示。网络中部署了 6 个切片，切片与基站的覆盖关系如表 2 所示。

表 1 仿真参数

网络参数	参数值
仿真区域	$600\text{ m} \times 600\text{ m}$
基站数目	4
切片数目	6
用户需求等级	$U[1,6]$
基站无线信道带宽/MHz	20
基站发射功率/dBm	30
噪声功率/(dBm·Hz ⁻¹)	-174
基站总干扰	1

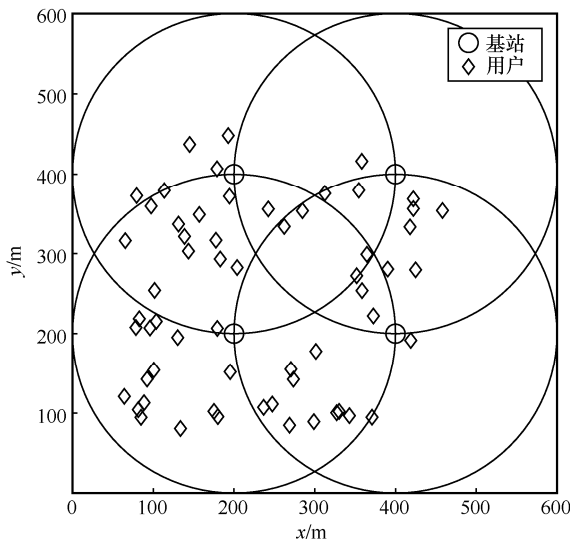


图 4 基站用户分布

表 2 切片与基站的覆盖关系

切片类型	部署基站
切片 1	基站 2、基站 4
切片 2	基站 1
切片 3	基站 3、基站 4
切片 4	基站 1、基站 2、基站 3
切片 5	基站 1、基站 3
切片 6	基站 2、基站 3

不同匹配方案用户-切片和用户-基站接入成功率分别如图 5 和图 6 所示。弹性接入机制下，用户可以使用比自己需求更高的切片来获得服务，所以用户接入成功率更高。从图 6 中可以看出，无论是两阶段还是一体化匹配，弹性模式的接入成功率都比传统模式更好，两阶段的接入成功率达到 75% 以上，一体化接入成功率达到 85% 以上。图 5 中的两阶段匹配的切片接入成功率更高，是因为两阶段匹配在切片层选择时未考虑基站的位置、最大承载用户数的情况，但会出现用户选择的切片无合适的基站接入的情况，导致图 6 中的两阶段的基站接入成功率会低于一体化的基站接入成功率。

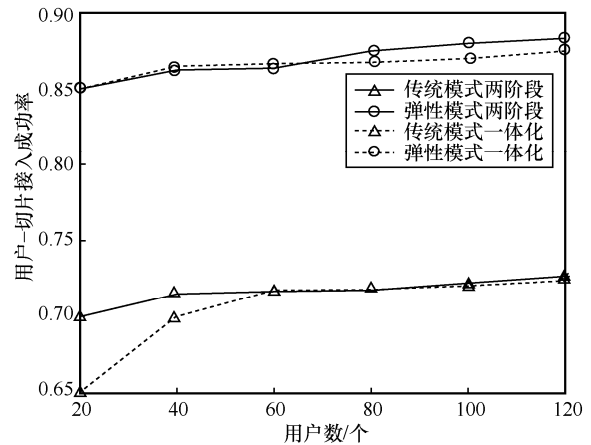


图 5 不同匹配方案用户-切片接入成功率

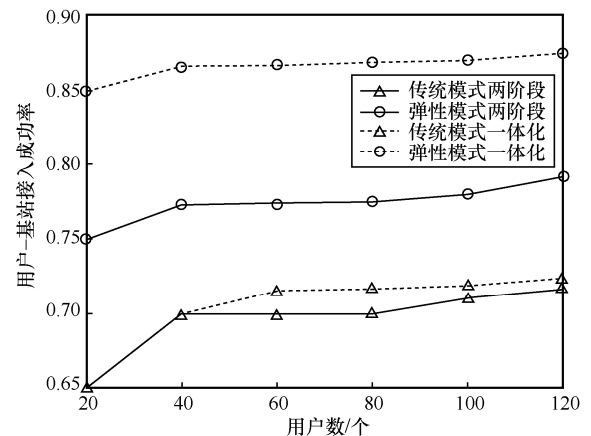


图 6 不同匹配方案用户-基站接入成功率

用户和速率随用户数的变化曲线如图 7 所示。用户和速率随用户数先增加后趋于稳定，当用户数为 70 个时，用户和速率达到平稳。弹性模式一体化匹配时，由于用户接入成功率最高，资源利用率最大，因此用户和速率最大；其次是弹性模式两阶段匹配，其资源利用率比传统模式高，所以用户和速率次之；传统模式接入时，由于资源利用率较低，有合适切片但无合适基站的情况较少，因此两阶段匹配和一体化匹配的情况近似相同。从图 7 可以看出，弹性模式接入比传统模式接入在用户和速率上有明显提高。

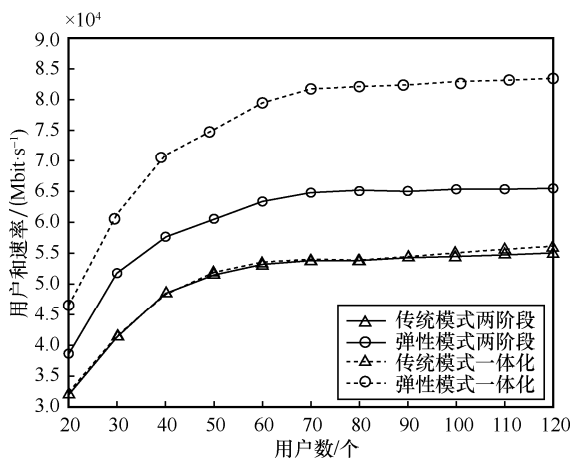


图 7 用户和速率随用户数的变化曲线

用户平均速率随用户数的变化曲线如图 8 所示。在满足用户业务需求的情况下，用户平均速率随用户数的增加而降低，且下降幅度先剧烈后平缓。弹性模式一体化匹配的用户平均速率最高，传统模式接入的用户平均速率最低。从图 8 可以看出，弹性模式接入比传统模式接入在用户平均速率上也有明显提高。

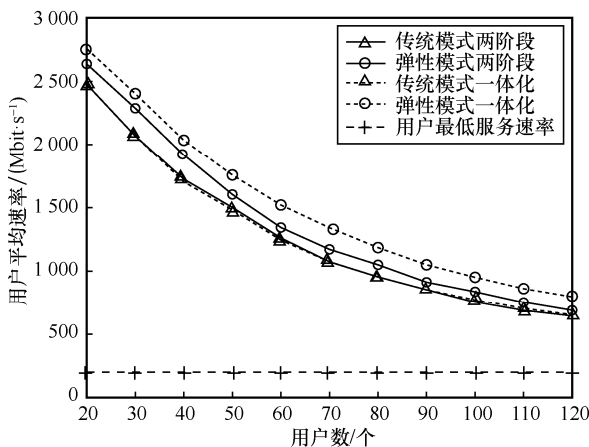


图 8 用户平均速率随用户数的变化曲线

在用户数固定的网络环境下，切片数越多，资源划分的粒度更细，资源利用率更高，用户可选择的粒度更细，用户速率提升，用户和速率也越高。从图 9 可以看出，4 种情况的用户和速率都随着切片数的增加而增加，但弹性模式下，资源利用率更高，用户和速率增加幅度也更大。

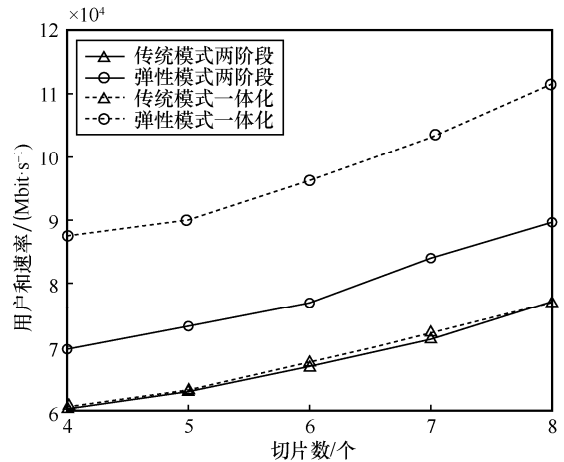


图 9 用户和速率随切片数的变化曲线

在大带宽业务下，业务最重要的指标为用户得到的服务速率。一体化匹配方式会增大切片和基站层面的耦合程度，避免出现部分用户有合适的切片但无合适的基站选择的情况，用户接入成功率和资源利用率比两阶段匹配方式都有明显提高，但每一个用户选择切片时都会进行基站的选择判断，造成时延，对于时延敏感型业务则不适用。两阶段匹配则相反，其会减轻切片和基站的耦合程度，虽然用户接入成功率和资源利用率会有所下降，但由于分阶段进行，用户只会向选择切片对应的基站请求接入，可以减少切换决策的时延。

5 结束语

对于 6G 系统下的多层异构网络环境，本文在保障用户业务连续性的前提下，针对用户移动或者网络环境发生变化时快速完成细粒度网络切换问题，提出了基于细粒度切片的 6G 网络弹性切换算法。首先提出了弹性接入思想，为保障用户业务连续性，只有保障速率大于用户需求的切片才能被选择。然后考虑了网络的负载均衡，对用户侧、切片侧以及基站侧进行了联合优化，目的是获得最大用户和速率，并使用 Gale-Shapley 算法，通过“切片-基站”一体化和“先切片再基站”两阶段的匹配方式完成匹配选择。仿真结果表明，弹性模式接入在

接入成功率、用户和速率以及用户平均速率方面都优于传统模式接入,两阶段匹配算法在切片选择时略优于一体化匹配,但总体接入成功率、用户和速率方面一体化匹配更高。本文考虑的业务为大带宽业务,时延敏感性较低,在未来的工作中,将会进一步考虑时延敏感型业务的快速网络切换。

参考文献:

- [1] SERGIOU C, LESTAS M, ANTONIOU P, et al. Complex systems: a communication networks perspective towards 6G[J]. IEEE Access, 2020, 8: 89007-89030.
- [2] ZHANG S L. An overview of network slicing for 5G[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(3): 111-117.
- [3] CHEN J J, TSAI M H, ZHAO L Q, et al. Realizing dynamic network slice resource management based on SDN networks[C]//Proceedings of 2019 International Conference on Intelligent Computing and its Emerging Applications (ICEA). Piscataway: IEEE Press, 2019: 120-125.
- [4] WEI H, ZHANG Z F, FAN B. Network slice access selection scheme in 5G[C]//Proceedings of 2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference. Piscataway: IEEE Press, 2017: 352-356.
- [5] MEI J, WANG X B, ZHENG K. An intelligent self-sustained RAN slicing framework for diverse service provisioning in 5G-beyond and 6G networks[J]. Intelligent and Converged Networks, 2020, 1(3): 281-294.
- [6] YANG F, WU W J, WANG X X, et al. Deep reinforcement learning based handoff algorithm in end-to-end network slicing enabling HetNets[C]//Proceedings of 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-7.
- [7] SHAO Y, LI R P, ZHAO Z F, et al. Graph attention network-based DRL for network slicing management in dense cellular networks[C]//Proceedings of 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [8] 秦爽, 赵冠群, 冯钢. 基于多智能体强化学习的接入网络切片动态切换[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(2): 162-168.
QIN S, ZHAO G Q, FENG G. Dynamical accessing handoff by using multi-agent reinforcement learning in slice based mobile networks[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2020, 49(2): 162-168.
- [9] SUN G L, XIONG K, BOATENG G O, et al. Autonomous resource provisioning and resource customization for mixed traffics in virtualized radio access network[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(3): 2454-2465.
- [10] SUN Y, ZHANG L, FENG G, et al. Radio access network slicing and virtualization for 5G vertical industries[M]. New York: John Wiley & Sons, 2021.
- [11] LU Y G, CHEN X, XI R R, et al. Research on user access selection mechanism based on maximum throughput for 5G network slicing[C]//Proceedings of 2021 International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-8.
- [12] GONZÁLEZ C C, PUPO E F, ATZORI L, et al. Dynamic access control and slice allocation algorithm for diverse traffic demand over 5G heterogeneous networks[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [13] 赵慧. 5G 无线接入网络的异构切换技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
ZHAO H. Handoff in heterogeneous radio access networks of 5G[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [14] SUN Y, FENG G, ZHANG L, et al. Distributed learning based handoff mechanism for radio access network slicing with data sharing[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [15] SAMA M R, BEKER S, KIESS W, et al. Service-based slice selection function for 5G[C]//Proceedings of 2016 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [16] MANJESHWAR A N, JHA P, KARANDIKAR A, et al. Enhanced UE slice mobility for 5G multi-RAT networks[C]//Proceedings of 2019 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [17] SUN Q, TIAN L, ZHOU Y Q, et al. A two-layered incentive scheme for cooperation in sliced 5G D2D networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(11): 13289-13304.
- [18] SUN Q, TIAN L, SHI J L, et al. Joint management of communicating and computing resources in sliced 5G networks[C]//Proceedings of 2020 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [19] TIAN L, DAI L L, SUN Q, et al. Wireless resource management in sliced networks based on isolation indexes[C]//Proceedings of 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [20] HUI N, SUN Q, WANG Y Y, et al. Wireless resource allocation based on multiplexing and isolation in sliced 5G networks[C]//Proceedings of 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1629-1634.
- [21] 徐子钧, 刘建伟, 李耕. 面向 5G mMTC 的网络切片安全研究[J]. 网络与信息安全学报, 2022, 8(1): 95-105.
XU Z J, LIU J W, LI G. Research on network slicing security for 5G mMTC[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2022, 8(1): 95-105.

[作者简介]



朱晓荣 (1977-), 女, 山东临沂人, 南京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为 5G/6G 通信系统、物联网、区块链等关键技术及系统研发。



陈康 (1998-), 男, 山东枣庄人, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线通信、接入网切片技术等。