

# 任务驱动的立体无线 Mesh 网络多维资源智能协同算法研究

顾浩, 李侍阳, 朱晓荣

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 为应对未来应急通信场景下无线 Mesh 网络中资源受限、网络拓扑和用户需求动态变化带来的多维资源分配问题, 提出了一种面向 6G 网络的动态 Mesh 网络切片端到端服务稳定匹配算法。首先, 根据不同业务的差异化服务需求, 基于 Gale-Shapley 匹配思想, 将多业务端到端服务问题表述为层次化二分图稳定匹配问题; 然后, 建立服务请求方和提供方的偏好列表, 在接入侧和回程侧分别进行终端-切片-基站和业务流-服务路径的稳定匹配, 完成区分任务类型的端到端服务。仿真结果表明, 所提稳定匹配算法在降低网络成本、提高业务服务成功率以及满足高可靠、低时延、大带宽等差异化业务需求方面, 都表现出良好的性能。

**关键词:** 立体无线 Mesh 网络; 任务驱动; 端到端切片; 稳定匹配算法

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2026.00408

## Research on multi-dimensional resource intelligent collaborative algorithm for task-driven stereoscopic wireless Mesh networks

Gu Hao, Li Shiyang, Zhu Xiaorong

School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

**Abstract:** In order to deal with the problem of multi-dimensional resource allocation in future wireless Mesh networks with limited resources and dynamic changes in network topology and user demands in emergency communication scenarios, a dynamic Mesh network slicing end-to-end service stable matching algorithm for 6G networks was proposed. Firstly, according to the differentiated service requirements of different services and based on Gale-Shapley matching idea, the multi-service end-to-end service problem was expressed as hierarchical bipartite stable matching process. Then, preference lists of requesters and service providers were established, and stable matching of user-slice-base station and service flow-service path were carried out on the access side and the return side respectively. Complete an end-to-end service that differentiates task types. The simulation results showed that the proposed stable matching algorithm had good performance in reducing network cost, improving the success rate of service and distinguishing the differentiated needs of high reliability, low latency and large bandwidth services of service types.

**Key words:** stereoscopic wireless Mesh network, task-driven, end-to-end slicing, stable matching algorithm

## 0 引言

混合式无线 Mesh 网络是一种分布式网络结构, 主要由搭载 Mesh 路由器 (MR, Mesh routers) 的各

类骨干节点和需要服务的用户节点共同组成, 具有易部署、灵活性高、抗毁性强等优势, 已被广泛应用于现代战场、应急救援等领域<sup>[1-2]</sup>, 并被视为未来 6G 网络的重要组网形式之一。然而, Mesh 组网具

收稿日期: 2024-05-07; 修回日期: 2025-08-27

通信作者: 朱晓荣, xrzhu@njupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 92367102); 江苏省重点研发计划项目 (No. BE2021013-3)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No. 92367102), The Jiangsu Province Key Research and Development Program (No. BE2021013-3)

有较高的动态特性。其动态性不仅体现在网络拓扑的动态性，如节点移动导致节点间距离改变、无线信道条件随环境变化，还体现在用户业务需求在不同时段也会发生显著变化。传统的资源分配算法在这种情况下容易导致网络拥塞、吞吐量下降、传输可靠性降低、端到端时延过大等诸多问题<sup>[1]</sup>。近年来，应急救援等场景中的业务需求越来越多样化，例如传递指令需要具有较高可靠性及较低时延；传输视频流文件需要较高传输速率，而对时延要求较低；实时地图信息共享上报等业务则需要保障低时延。传统无线 Mesh 网络难以同时满足这些差异化的业务需求。此外，在资源受限的条件下，针对不同业务设计专网会使网络资源利用率降低，可扩展性和鲁棒性也较差。

为应对传统无线 Mesh 网络架构及其资源配置管理方案无法满足新兴多样化业务场景需求问题，迫切需要引入新的网络架构和资源协同方案，使无线 Mesh 网络实现快速自组网，并根据不同业务需求自适应分配资源。网络切片（NS, network slice）由一组定制化的虚拟网络功能（VNF, virtual network function）组成，以按需组网的方式，在底层物理设备上构建多个端到端虚拟网络，并通过虚拟化网络各类资源以支持细粒度的资源分配及回收，从而应对服务质量（QoS, quality of service）需求动态变化的多样化任务。因此，构建切片化无线 Mesh 网络<sup>[4-6]</sup>，将提供更细致的定制化、场景化网络服务。

近年来，关于无线接入网（RAN, radio access network）切片化的研究已较为丰富。文献[7]在 5G RAN 中设计了片内和片间资源调度机制，其中，片间带宽资源分配通过多智能体深度强化学习异步优势演员-评论家（A3C, asynchronous advantage actor-critic）算法实现，而片内物理资源块（PRB, physical resource block）的分配则在小时时间尺度上采用比例公平（PF, proportional fair）调度算法完成。在核心网侧，文献[8]针对服务链路和虚拟节点映射问题，综合考虑 5G 的增强移动宽带（eMBB, enhanced mobile broadband）、超高可靠低时延通信（uRLLC, ultra-reliable and low-latency communications）、海量机器类通信（mMTC, massive machine-type communications）三大应用场景的不同业务需求，将底层物理节点按照功能类型分为 3 个虚拟子

网的节点集合，并根据不同类型的服务功能链（SFC, service function chaining）分别建模，构建混合整数线性规划模型，提出基于拉格朗日对偶分解的算法，将网络切片联合优化问题分解为节点和链路的子问题进行映射方案求解。仿真表明，该算法在资源利用率、接受率和平均执行时间等方面具有较好性能。不过，上述研究均未考虑片间 VNF 能否共享的问题。为此，文献[9]研究了基于切片的业务功能链嵌入问题，综合考虑业务流的差异化需求、片内和片间 VNF 共享、优先级感知准入控制等挑战，以最大化流量接受率和最小化网络资源成本为目标，提出两种启发式算法，并验证了其有效性。考虑到 RAN 域的资源分配往往会影响核心网切片性能，很多研究进一步从端到端角度展开探讨。文献[10]引入基于强化学习方法的双深度 Q 网络和指针网络实现 SFC 映射，共同优化 eMBB 用户业务满意度，实现端到端接入用户数最大化。文献[11]提出了一种面向异构网络的端到端网络切片放置方案，根据用户数量及其 QoS 需求优化各种网络功能的切片及其实例数量，联合优化终端关联、无线带宽分配、VNF 部署及计算资源分配，以最小化所有用户的端到端任务完成时间。文献[12]提出了一种网络切片随机接入方案，通过将物理随机接入资源动态划分为多个虚拟资源，在满足 mMTC 业务要求的同时减少接入冲突。然而，文献[10-12]都仅针对单一业务类型进行优化。文献[13]进一步考虑不同切片类型的资源需求差异，提出一种面向多业务场景的端到端网络切片安全部署算法，在满足安全部署的同时降低部署成本，获得了较好的部署安全收益。

随着 5G 时代的到来，空天地一体化网络将充分利用轨道卫星、无人机、高空平台等空中资源，构建多层次、多连接、多接入的新型融合架构。无人机被广泛认为是未来空天地一体化网络中的重要组成，文献[14]针对切片化的无人机辅助 6G 地面网络，研究了端到端分片业务的资源编排和分配问题，提出了一种启发式的 ReOrcAll-UAVs-6G 算法。仿真结果表明，该算法在服务接受率和资源利用率上均具有一定优势。

在本文考虑的空天一体化 Mesh 网络应急通信场景中，系统包含了无人机、地面基站以及各类终端等多种异构节点，这些节点的计算、通信、存储

能力等存在较大差别。同时，由于节点普遍具有一定的移动性，网络拓扑结构不断变化，因此资源分配策略需要以较低成本和较高可拓展性实现动态调整。此外，节点间可能存在多条潜在传输路径，如何有效分配和管理这些路径上的资源，以实现负载均衡和网络资源的高效利用，是当前亟待解决的问题。进一步地，立体无线 Mesh 网络中的频谱、计算资源、能量等资源是动态变化且有限的，资源分配必须考虑其稀缺性和公平性。考虑到网络中的节点分布密集，同频干扰也需纳入优化范畴，以提升网络吞吐量。最后，从服务保障的角度出发，针对不同类型的用户业务，还需要确保在多跳网络环境下满足时延、传输可靠性等性能指标的要求。

为使切片化 Mesh 网络具备实际可行性，需要首先根据用户任务需求选取合适的网络切片和基站接入，再根据接入后业务流服务需求和网络可用资源变化自适应调度多维资源，以保障业务流传输。未来 6G 网络中存在多种新兴业务，其服务水平协议 (SLA, service level agreement) 要求各不相同。

为此，本文选取带宽、时延、可靠性三类基本指标需求来定义业务类型并构建相应切片，具体包括：面向大带宽业务的切片、面向低时延业务的切片、面向高可靠业务的切片。在综合考虑通信、计算等多维资源分配的基础上，本文提出了一种基于 Gale-Shapley 思想的两阶段稳定匹配算法，在接入侧实现终端-切片-基站的最优匹配，在回程侧为用户接入后的各类业务流实现业务流-服务路径的最优匹配，从而实现区分业务类型的端到端资源分配和业务服务流程保障。

### 1 系统模型

本文考虑如图 1 所示空地立体无线 Mesh 网络应急通信场景。物理网络层主要包含各类实体节点，如移动终端节点、无人机空中节点、传感器节点和地面车载综合节点等，这些节点拓扑在一定范围内动态变化。终端节点和各类传感器节点生成任务并向网络请求服务，而空中无人机节点、地面车载综合节点等为用户业务流提供数据转发和计算服

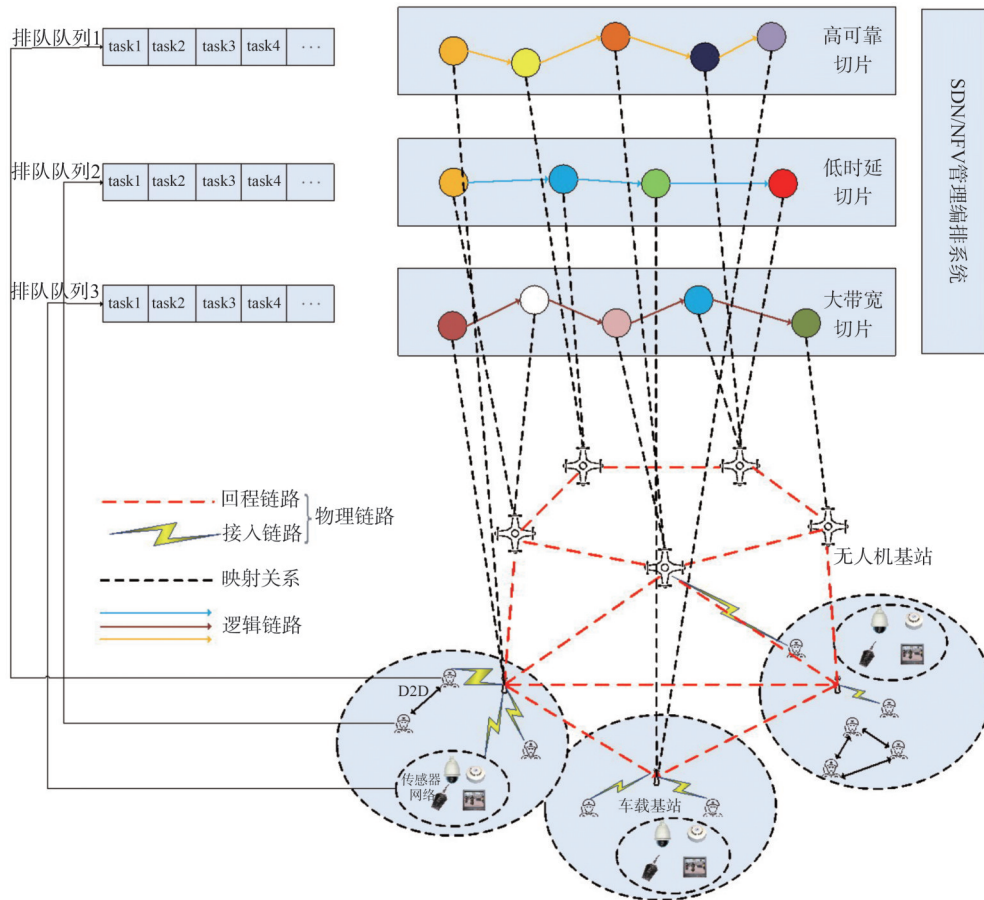


图 1 空地立体无线 Mesh 网络应急通信场景

务。各类节点分别具有通信、计算、存储等一种或多种资源。虚拟网络层包括三大类网络切片，每个切片中存在多条业务流等待被服务。不同切片间业务流服务需求差异较大，而同一切片内的业务流则在流量规模上有所不同。下面分别对物理网络和虚拟网络进行模型描述。

底层物理网络表示为  $G = (N, L)$ 。其中， $N$ 、 $L$  分别表示物理网络中的节点集合和链路集合。 $N$  由基站集合  $N_n$  和用户节点集合  $N_u$  组成，即  $N = N_n \cup N_u$ 。基站总数为  $n$ ，用户节点总数为  $n_u$ 。基站包括组成骨干 Mesh 网络的无人机空中节点和地面车载综合节点，不仅能转发流量，还能承载切片中的某些 VNF。网络使用 5G 支持的多个频段， $L$  由基站间链路集  $L_n$  和用户接入链路集  $L_u$  组成，即  $L = L_n \cup L_u$ 。链路  $l$  总数为  $n_l$ ，每条链路剩余带宽表示为  $B_l$ 。

虚拟网络表示为  $V = (M, S, F)$ ，其中  $M$  表示网络切片集， $S$  表示切片中的 SFC 集合， $F$  表示场景中存在的 VNF 集合。 $M = M_{BB} \cup M_{HR} \cup M_{LD}$ ，其中， $M_{BB}$  表示大带宽切片集， $M_{HR}$  表示高可靠切片集， $M_{LD}$  表示低时延切片集。一个网络切片就是满足一类业务需求的虚拟网络，切片内 VNF 按序连接成的虚拟链路构成了服务用户业务流的一条功能链。令  $f_g$  表示某种 VNF 类型，则场景中存在的 VNF 集合表示为  $F = \{f_g | g = 1, 2, \dots, G\}$ 。 $f_g$  所需的各类资源量  $R_{f_g}$  与服务业务流所需的传输速率成线性关系。定义  $s_m$  为切片  $m \in M$  中的 SFC，则有  $S = \{s_m | m \in M\}$ ，各切片内可以有多个 SFC 来服务用户业务流，相同切片内 SFC 具有相同的结构。 $Q_s = \{f_1^s, f_2^s, \dots, f_D^s | f_d^s \in F\}$  是  $s$  使用的 VNF 集合，包含一系列预定义顺序的 VNF。为了将  $s$  中使用的 VNF 有序序列下标与 VNF 集合中的类型对应，引入参数  $q_{d,g}^s \in \{0, 1\}$ ，若  $q_{d,g}^s = 1$ ，表示  $s$  中用到的 VNF  $f_d^s$  类型为  $f_g$ ，对应资源需求为  $\sum_{g \in G} q_{d,g}^s R_{f_g}$ 。在虚拟网络中，将系统各类资源统一虚拟化以支持灵活的调度分配。将系统可用频段的总无线资源虚拟化为总带宽资源  $R^B$ ，接入和回程网络使用异频通信，低频段用于分配用户接入，高频段用于基站间回程组网。系统总可用计算资源虚拟化并表示为  $R^C$ 。

将虚拟化的各类资源分配给网络中的基站，带宽分配情况可表示为  $b = \{R_1^B, R_2^B, \dots, R_n^B\}$ ，其中  $R_n^B$

表示基站  $n$  获得的带宽资源，需要满足  $\sum_{n=1}^N R_n^B \leq R^B$ 。基站  $n$  中切片  $m$  得到的带宽为  $R_{n,m}^B$ ，基站部署的切片获取的带宽资源之和不能超过节点具有的带宽资源量，即  $\sum_{m \in M} R_{n,m}^B \leq R_n^B$ 。类似的，将总计算资源  $R^C$  分配给基站，计算资源分配情况为  $c = \{R_1^C, R_2^C, \dots, R_n^C\}$ ，其中  $R_n^C$  表示基站  $n$  获得的计算资源，需要满足  $\sum_{n=1}^N R_n^C \leq R^C$ 。基站  $n$  中切片  $m$  得到的计算资源为  $R_{n,m}^C$ ，基站部署的切片获取的计算资源之和不能超过节点具有的计算资源量，即  $\sum_{m \in M} R_{n,m}^C \leq R_n^C$ 。切片和基站的部署关系初始时已经确定，同一切片可以部署在多个基站上，一个基站上也可以部署多个切片。

本文考虑具有差异化服务指标需求的各类业务端到端服务，将用户任务对速率、时延、可靠性的需求分为  $\{1, 2, \dots, N\}$  的若干等级，较高的需求等级主导用户业务类型。

首先考虑用户接入问题，用户在某时刻只能接入一个基站上的一个切片，而是否接入某切片由用户业务类型决定。定义关联因子  $\psi_n^{u,m}$ ，用于表示用户  $u$  是否接入基站  $n$  中的切片  $m$ ， $\psi_n^{u,m}=1$  表示接入，否则表示没有接入； $R_{n,m,u}^B$  表示用户  $u$  接入基站  $n$  中的切片  $m$  获得的带宽。

假设切片  $m$  为该切片内接入用户提供的基准带宽为  $b_n^{m, \text{mean}}$ ，则基站  $n$  上的切片  $m$  能提供的基准带宽资源数为：

$$\phi_n^m = \frac{R_{n,m}^B}{b_n^{m, \text{mean}}} \quad (1)$$

接入节点  $n$  上切片  $m$  的用户  $u$  所占用的基准带宽资源数量为：

$$\phi_n^{u,m} = \frac{R_{n,m,u}^B}{b_n^{m, \text{mean}}} \quad (2)$$

需要满足接入节点  $n$  上切片  $m$  的用户所占用的带宽资源块总和不超过其能提供的基准带宽资源数，即

$$\sum_{u=1}^{U_n} \psi_n^{u,m} \phi_n^{u,m} \leq \phi_n^m \quad (3)$$

由于基站与切片的部署关系已在初始化阶段确定，各类切片部署的基站列表也随之固定，只有部署了该类切片的基站才能被用户选择接入。设部署切片  $m$  的基站集合为  $N_s^m$ 。考虑到用户和基站的移动性，对于用户  $u$ ，设当前能够覆盖  $u$  的基站集

合为  $N_s^u$ 。用户根据自身业务类型选择需要接入的切片  $m$  后，其可接入的基站集合应为  $N_s^u \cap N_s^m$ 。对于部署在不同基站的同一类切片，其能提供的基准接入带宽资源虽然相同，但由于用户和基站间的距离和信道条件存在差异，用户实际接入不同基站的切片所获得的数据流传输速率是不一样的。为此，用户可以根据可选基站所能提供的速率与其中最大速率的比值，进行速率归一化处理。同时，考虑到负载均衡，定义基站  $n$  的切片  $m$  中已经占用的基准带宽资源块数量  $\phi_n^{m, \text{used}}$  和总基准带宽资源块数  $\phi_n^m$  的比值为当前基站的负载度，记作  $\kappa_n^m$ 。 $\kappa_n^m$  越大表示当前基站  $n$  的切片  $m$  的负载压力越大。

$$\kappa_n^m = \frac{\phi_n^{m, \text{used}}}{\phi_n^m} \quad (4)$$

综上，定义用户  $u$  选取接入基站  $n$  上部署的切片  $m$  的偏好指标  $\rho_n^{u,m}$  为：

$$\rho_n^{u,m} = x(1 - \kappa_n^m) + y \frac{r_n^{u,m}}{\max(r_n^{u,m})}, x + y = 1 \quad (5)$$

$\rho_n^{u,m}$  越大，表示用户  $u$  对接入基站  $n$  上切片  $m$  的偏好程度越高。

其中， $r_n^{u,m}$  表示用户  $u$  接入基站  $n$  上切片  $m$  可获得的传输速率，其数学表达式如下：

$$r_n^{u,m} = R_{n,m,u}^B \log_2(1 + \zeta_n^{u,m}) \quad (6)$$

$$\zeta_n^{u,m} = \frac{p_n^{u,m} |h_n^u(t)|^2 \cdot \iota(d_{u,n})}{\sum_{\forall n' \neq n} \sum_{\forall m \in M} \sum_{\forall u' \neq u} p_{n'}^{u',m} |h_{n'}^{u'}(t)|^2 \iota(d_{u',n}) + \sigma^2} \quad (7)$$

其中， $p_n^{u,m}$  表示用户  $u$  到基站  $n$  上切片  $m$  的发射功率； $h_n^u(t)$  表示当前时刻用户  $u$  到基站  $n$  的信道增益，包括路径损耗、多径衰落、阴影衰落和天线增益等； $\sigma^2$  表示信道上的高斯白噪声； $\iota(d_{u,n})$  表示距离  $d_{u,n}$  下的路径损耗， $\iota(d_{u,n}) \propto \frac{1}{d_{u,n}^2}$ 。

除了传输速率外，可靠性也是衡量网络服务质量的重要指标，本文主要考虑信号衰减、无线电干扰和背景噪声等因素影响的链路传输可靠性。当节点  $i$  和  $j$  之间的  $\zeta_{ij}$  大于阈值  $\zeta_{th}$  时，无线链路  $l_{ij}$  能够可靠地传输数据。定义二进制变量  $\zeta_{ij}$  为：

$$\zeta_{ij} = \begin{cases} 1, \zeta_{ij} \geq \zeta_{th} \\ 0, \zeta_{ij} < \zeta_{th} \end{cases} \quad (8)$$

定义  $A = [a_{ij}]_{N \times N}$  为网络邻接矩阵，其中  $a_{ij}$  可表示为：

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, \zeta_{ij} = 1 \\ 0, i = j \\ \infty, \zeta_{ij} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

定义  $\varpi = [Re_{ij}]_{N \times N}$  为网络可靠性权值矩阵，其中  $Re_{ij}$  可表示为：

$$Re_{ij} = \begin{cases} P(\zeta_{ij} \geq \zeta_{th}), a_{ij} = 1 \\ 1, i = j \\ 0, a_{ij} = \infty \end{cases} \quad (10)$$

用户接入的数据包传输视为 M/M/1 排队模型，数据包的平均长度为  $\mu$  位，数据包到达率为  $\lambda$ 。

对于  $m = M_{BB}$  中的用户  $u$ ，需要满足  $r_{th}^{u,m} \geq r_{th}^m$ ， $r_{th}^m$  指切片  $m$  中用户业务传输速率需求。

对于  $m = M_{LD}$  中的用户  $u$ ，接入节点  $n$  的切片  $m$  后的平均传输时延可以表示为：

$$\tau_u^{\text{access}} = \frac{\mu}{r_n^{u,m} - \mu\lambda} \quad (11)$$

对于  $m = M_{HR}$  中的用户  $u$ ，接入链路传输可靠性表示为  $Re_{u,n}$ 。

当前接入基站  $n$  上切片  $m$  的用户的总传输速率为：

$$r_n^m = \sum_{u \in N_n} \psi_n^{u,m} r_n^{u,m} \quad (12)$$

用户选择合适的基站及切片接入网络后，网络中各基站处已经汇聚了多条业务数据流，它们是多种切片业务的混合流，混合流中目的节点不同的流可视为独立的流。定义网络中当前所有待处理的业务流集合为  $O = \{o_m^i | m \in M, i = 1, 2, \dots, n\}$ 。业务流  $o_m^i$  可以记为  $(str_{o_m^i}, des_{o_m^i}, r_{o_m^i})$ ，其中  $str_{o_m^i}$  表示  $o_m^i$  的起点， $des_{o_m^i}$  表示  $o_m^i$  的目的节点， $r_{o_m^i}$  是  $o_m^i$  的传输速率需求， $o_m^i$  的初始传输速率就是接入速率  $r_{str_{o_m^i}}$ 。需要为这些属于某类切片的业务数据流选择合适服务路径，并部署相应 SFC 进行流量处理，从而完成端到端的用户业务服务。 $o_m^i$  的某条端到端路径  $p_{o_m^i}$  的传输可靠性为：

$$\varpi_{p_{o_m^i}} = \prod_{i=1}^{n-1} \varpi_{l_i} \quad (13)$$

其中， $\varpi_{l_i}$  表示路径  $p_{o_m^i}$  中第  $l_i$  段链路的可靠性。

接下来，需要将每个切片中的 SFC 映射到底层物理网络，以处理业务流量，具体包括 SFC 的节点映射和链路映射。其中，节点映射需要为 VNF 找到满足其资源需求的物理节点，链路映射需要为逻

辑链路找到满足其带宽需求的物理路径。需要注意的是，切片在基站上的部署关系已经确定，因此各切片中的 SFC 只能映射到部署了该类切片的基站上。

定义决策变量  $\gamma_{d,n}^s \in \{0, 1\}$ ，若  $\gamma_{d,n}^s = 1$ ，表示  $s$  的  $f_d^s$  放置在物理节点  $n$  处。令  $\zeta_{f_d^s, f_{d+1}^s}^{n_i, n_j} \in \{0, 1\}$ ， $\zeta_{f_d^s, f_{d+1}^s}^{n_i, n_j} = 1$  表示  $r$  中的  $f_d^s$  和  $f_{d+1}^s$  间的虚拟链路映射到节点  $n_i$  和  $n_j$  间的物理链路  $l_{n_i, n_j}$  上。值得说明的是， $\zeta_{f_d^s, f_{d+1}^s}^{n_i, n_j} = 1$  还表示  $r$  的两个相邻虚拟功能  $f_d^s$ 、 $f_{d+1}^s$  分别由物理节点  $n_i$  和  $n_j$  承担。令  $|\cdot|$  表示某条候选链路的跳数，则  $|l_{n_i, n_j}|$  表示服务功能链  $s$  的逻辑链路  $(f_d^s, f_{d+1}^s)$  映射到物理域节点  $n_i$  和  $n_j$  之间的链路  $l_{n_i, n_j}$  的跳数。定义  $\varphi_s \in \{0, 1\}$  表示功能链  $s$  是否被底层网络接受，若  $\varphi_s = 1$  表示  $s$  可以被底层网络接受。

## 2 优化问题形成

为实现任务驱动的无线 Mesh 网切片资源分配管理，需要将联合用户接入和回程网络的各业务切片映射到底层网络。具体而言，需要解决的优化问题为：在具有动态拓扑和动态业务需求的切片化 Mesh 网络场景中，在满足各类约束条件的前提下，根据传输需求为用户选择合适的切片和基站进行接入，进而在网络中构建多条用户业务流。针对不同切片用户的差异化业务需求，需为业务流选择合适的服务路径，并在路径上部署 SFC 进行流量处理。该机制旨在保障各类业务切片 QoS 需求的前提下，

尽可能降低网络成本。用户接入及业务流选路示意图如图 2 所示。

假设每条业务流消耗的计算资源与其传输数据速率成正比。如果业务流量需要经虚拟功能  $f_g$  做流量处理，则用  $\text{cost}(f_g)$  表示单位业务流量流经  $f_g$  所消耗的计算资源。类似地，设单位数据速率下的业务流消耗的带宽资源为  $w$ ，则当前流经节点  $n$  的所有业务流所需的计算资源为：

$$R_n^{\text{cot}}(t) = \sum_{o \in \mathbf{O}} \sum_{f_j^s \in s, s \in \mathbf{S}} \gamma_{d,n}^s r_{o_m}^{\text{cot}} \text{cost}(f_d^s) \quad (14)$$

当前流经物理链路  $l_{n_i, n_j}$  的所有流消耗的总带宽资源为：

$$R_{n_i, n_j}^b(t) = \sum_{o \in \mathbf{O}} \sum_{f_j^s \in s, s \in \mathbf{S}} \zeta_{f_d^s, f_{d+1}^s}^{n_i, n_j} r_{o_m}^b \cdot w \quad (15)$$

服务切片用户业务流消耗的资源等于网络中各切片内所有业务流消耗的资源总和。设计算资源和带宽资源的价格函数分别是  $\theta_{\text{cot}}(\cdot)$  和  $\theta_b(\cdot)$ ，则实际花费成本可表示为：

$$C_{\text{res}}(t) = \theta_{\text{cot}}\left(\sum_{n \in N_s} R_n^{\text{cot}}(t)\right) + \theta_b\left(\sum_{l \in L} R_{n_i, n_j}^b(t)\right) \quad (16)$$

考虑业务流服务失败而没有占用网络资源的情况，虽然表面降低了网络成本，但是用户请求没有得到满足。因此，加入惩罚项  $C_{\text{penalty}}(t)$ 。  $C_{\text{penalty}}(t)$  表示即使服务失败，底层网络仍需要承担的服务成本，其数学表达式如下：

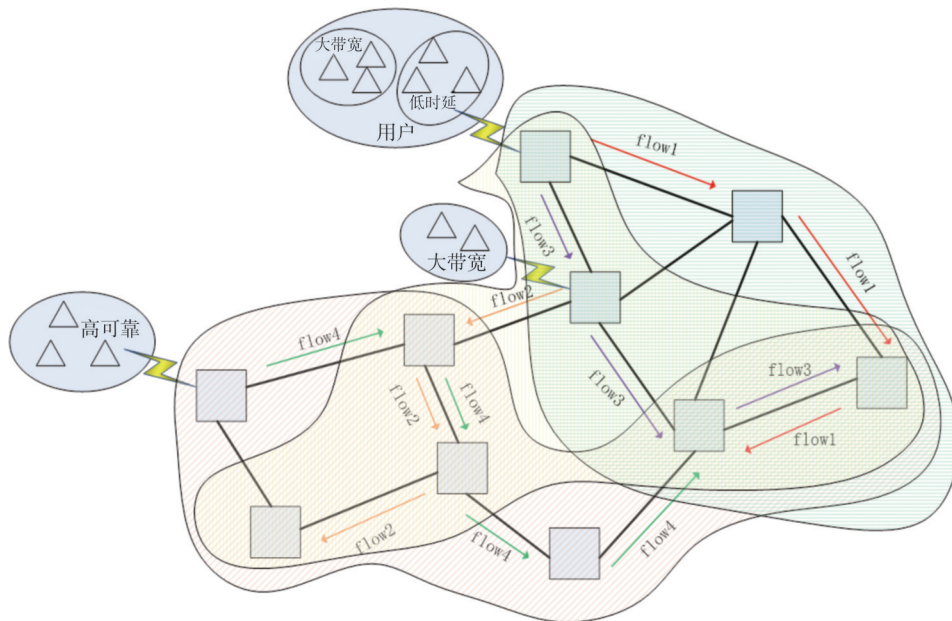


图2 用户接入及业务流选路示意图

$$C_{\text{penalty}}(t) = \theta_{\text{cot}} \left( \sum_{n \in \text{path}_t} R_n^{\text{cot}}(t) \right) + \theta_b \left( \sum_{l \in P_t} R_{n_i, n_j}^b(t) \right) \quad (17)$$

其中,  $P_j$  表示该业务流从源节点到目的节点之间的最长可行路径。

综上, 总网络成本可以表示为:

$$C(t) = C_{\text{res}}(t) + C_{\text{penalty}}(t) \quad (18)$$

接下来, 提出面向多类型用户业务的 Mesh 网络动态资源分配问题的优化目标, 即在满足各类用户业务需求及其相关约束条件的前提下, 尽可能降低网络成本。该目标可表示为:

$$\rho: \min_{\psi_n^{u,m}, \gamma_{d,n}^s, \zeta_{f_d^s, f_{d+1}^s}} C(t) \quad (19)$$

针对这一优化问题, 需要满足的约束条件如下:

$$\sum_{n=1}^{n_s} \psi_n^{u,m} \leq 1, \forall n \in N_s, m \in M, u \in N_u \quad (20)$$

$$\sum_{u=1}^{n_u} \psi_n^{u,m} \phi_n^{u,m} \leq \phi_n^m \quad (21)$$

$$\sum_{m \in M} b_n^m \leq b_n \quad (22)$$

$$\sum_{n \in N_s} \gamma_{d,n}^s \leq 1, \forall f_d^s \in Q_s, s \in S \quad (23)$$

$$\sum_{s \in S} \gamma_{d,n}^s \sum_{f_g^s \in F, f_d^s \in Q_s} q_{d,g}^s R_{f_g}^C \leq R_n^C, \forall n \in N_s \quad (24)$$

$$R_{n_i, n_j}^b(t) \leq B_{l_{n_i, n_j}}, \forall n \in N_s, l_{n_i, n_j} \in L \quad (25)$$

$$r_n^{u,m} \geq r_{\text{th}}^m, m = M_{\text{BB}} \quad (26)$$

$$\tau_u \leq \tau_u^{\text{th}}, \forall u \in U_m, m = M_{\text{LD}}$$

$$\tau_u = \tau_u^{\text{access}} + \sum_{d=n_{\text{st}}^s}^{n_{\text{des}}^s-1} \zeta_{f_d^s, f_{d+1}^s}^{n_i, n_j} (d_{n_i, n_j}^{\text{tran}} + d_{n_i}^{\text{cot}} + d_{n_j}^{\text{cot}}) \quad (27)$$

$$\omega_{p_{\sigma_m}} \geq \omega_{p_{\sigma_m}^{\text{th}}}, m = M_{\text{HR}} \quad (28)$$

$$\sum_{n_1=1}^{n_s} \zeta_{f_{d_1}^s, f_{d_1+1}^s}^{n_i, n_j} - \sum_{n_2=1}^{n_s} \zeta_{f_{d_2}^s, f_{d_2+1}^s}^{n_i, n_j} = \begin{cases} 1, \gamma_{d,n}^s = 1 \\ 0, \text{其他} \\ -1, \gamma_{d+1,n}^s = 1 \end{cases} \quad (29)$$

$$\psi_n^{u,m} \in \{0, 1\}, \gamma_{d,n}^s \in \{0, 1\}, \zeta_{f_d^s, f_{d+1}^s}^{n_i, n_j} \in \{0, 1\} \quad (30)$$

其中, 约束式 (20) 表示用户在任意时刻只能接入某一个基站上的一个切片; 约束式 (21) 表示接入节点  $n$  上切片  $m$  的用户所占用的基准带宽资源总数不超过该切片能提供的基准带宽资源数; 约束式 (22) 表示基站  $n$  上所部署切片的带宽资源之和不能超过该节点的总带宽资源量; 约束式 (23) 表示对于 SFC 中的任一 VNF, 网络最多为其选择一个

物理节点承载; 约束式 (24) 表示映射到任意节点  $n$  上的 VNF 所需的计算资源总和不超过该节点能够提供的总计算资源; 约束式 (25) 表示流经物理链路  $l_{n_i, n_j}$  的所有流消耗的总带宽资源  $B_{l_{n_i, n_j}}$  不能超过链路剩余带宽; 约束式 (26) 表示大带宽业务端到端传输速率必须大于切片需求速率阈值; 约束式 (27) 表示时延约束型切片中业务端到端服务时延要小于其最大容忍时延, 其中  $\tau_u^{\text{access}}$  表示用户接入侧的传输时延,  $d_{n_i, n_j}^{\text{tran}}$  表示节点  $n_i$  和节点  $n_j$  之间的传输时延,  $d_{n_i}^{\text{cot}}$  表示节点  $n_i$  的处理时延,  $\tau_u^{\text{th}}$  表示用户业务流的最大容忍时延; 约束式 (28) 表示高可靠切片中用户端到端传输数据可靠性要大于设定阈值  $\omega_{p_{\sigma_m}^{\text{th}}}$ ; 约束式 (29) 表示对所有 SFC 映射完成后的物理网络, 流量传输需满足链路连通性约束, 即除路径端点, 中间节点流入链路数量与流出数量相等; 约束式 (30) 表示用户接入决策变量、VNF 映射变量、虚拟链路映射变量的选择约束。

上述问题已经被证明是 NP 难的组合优化问题, 在接入侧和回程侧均涉及需要优化的变量, 且用户选择切片及接入基站后, 还需要为其业务流选择合适的服务路径并进行 SFC 部署, 前后两部分需要联合求解。观察发现, 整个端到端业务服务流程可以视作用户节点和网络服务的多层跨域匹配过程。具体来说, 在接入侧形成终端-切片-基站间的匹配关系, 在回程侧形成业务流与服务路径的匹配关系。

Gale-Shapley 算法是一种广泛使用的稳定匹配算法, 最早用于解决社会经济学领域中的配对问题。其核心思想为: 首先, 参与匹配的两组个体分别按照自身偏好规则对另一组个体进行排序; 接着, 请求方选择偏好列表中最优先且尚未拒绝自己的个体; 然后, 被选择一方根据自己的偏好列表决定是否接受; 重复上述流程, 直到没有一方愿意改变当前匹配, 得到的就是一个最优稳定匹配。在本文所研究的端到端多层跨域匹配问题中, 可以将网络节点及其之间的链路抽象为特殊节点, 用户和网络双方分别根据自身需求、通信距离、服务能力等因素构建偏好条件。基于 Gale-Shapley 思想达成的稳定匹配能够兼顾本文场景下的用户体验和网络服务效率。下面首先将优化问题转换为匹配过程表述, 然后基于 Gale-Shapley 思想设计端到端稳定匹配算法进行问题求解。

### 3 Mesh网络切片端到端服务稳定匹配算法

第一阶段，基于用户侧对带宽需求与切片、基站侧的资源能力和偏好，实现用户-切片-基站的双向稳定匹配。终端-切片-基站匹配示意图如图3所示。第二阶段，根据接入后产生的业务流服务需求、流量速率以及服务路径的偏好和服务能力，完成业务流-服务路径的双向稳定匹配。业务流-服务路径匹配示意图如图4所示。

#### 3.1 终端-切片-基站匹配

在本场景中，用户不固定选择某类切片，而是根据业务所要求的最高服务等级需求确定业务类型，进而选取合适的切片。切片侧则依据其对应业

务类型的服务需求等级构建偏好列表，在资源足够时，切片按照偏好列表顺序与用户达成临时匹配；否则，切片会比较当前请求者与已经匹配的用户服务需求等级，优先选取服务需求等级最高的用户接入，并为该用户分配其带宽需求等级所对应的带宽资源。用户选定切片后，继续进行基站的选择。根据上文式(5)，用户 $u$ 选取接入基站 $n$ 及其部署切片 $m$ 的偏好指标 $\rho_n^{u,m}$ 表示选择切片 $m$ 上用户 $u$ 对基站 $n$ 的匹配度，匹配度越高，基站的优先级越高，被选择的概率也越大。基站侧则根据用户带宽服务需求等级构建偏好列表，即基站会优先保障传输速率需求大的用户接入，因为在接入侧，各类业务需求都可以归结于传输速率指标。

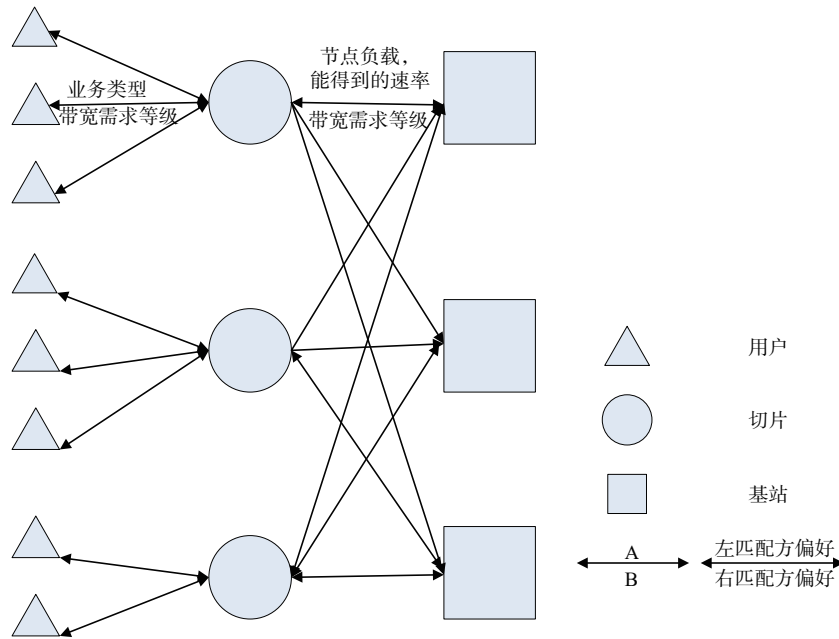


图3 终端-切片-基站匹配示意图

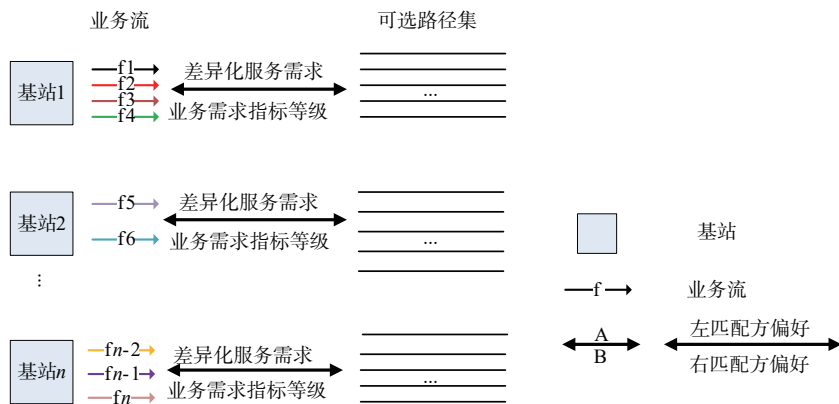


图4 业务流-服务路径匹配示意图

### 3.2 业务流-服务路径匹配

在接入阶段匹配完成后, 需要为业务流选择合适的物理路径以部署 VNF 服务。这些物理路径上的资源应能满足服务这些业务流的 SFC 所需的资源。

对于当前网络业务流集合中的某条流  $o_m^i$ , 其起点和目的节点都是确定的。确定起点和终点的业务流在网络中可选的路由路径数不会太大, 即路径搜索时间是可接受的<sup>[15]</sup>。因此, 本文采用 K-最短路径算法确定各业务流的可选路径集合。

不同切片的业务流具有差异化的服务需求, 即业务流对服务路径的偏好不同。对于  $M_{BB}$  切片中的业务流, 业务类型由带宽需求主导, 偏好路径是剩余带宽较大和节点剩余资源较大的路径; 对于  $M_{LD}$  切片中的业务流, 业务类型由时延需求主导, 时延由节点处理时延和路径传输时延组成, 节点处理时延与节点计算资源量大小有关, 传输时延与路径跳数有关, 偏好路径是节点资源量较大且跳数较小的路径; 对于  $M_{HR}$  切片中的业务流, 业务类型由可靠性需求主导, 需要评估其可选路径中每条路径的网络状况, 选取路径的传输可靠性、负载均衡度是重要的衡量指标, 偏好路径就是指标降序。在形成偏好路径列表后, 需要判断偏好路径上节点可用计算资源及各链路剩余带宽资源是否满足该业务流对应 SFC 的需求资源量。若不满足, 选择偏好列表中的下一条路径继续判断, 若均不满足, 则判定该业务流服务失败。路径侧的偏好顺序基于用户业务流的需求等级确定。首先按照业务在带宽、时延和可靠性三个指标中的最高需求等级进行排序, 若最高需求等级相同, 则依次比较次高需求, 直到完成排序。这样既保障了各类业务按照服务需求由高到低得到满足, 也体现了对各类业务流服务的公平性。

### 3.3 基于 Gale-Shapley 的匹配算法

完成上述两层匹配的具体算法基于 Gale-Shapley 思想, 主要包括以下 3 个步骤。

**步骤 1** 信息感知阶段。匹配请求者和匹配接收者感知彼此信息, 具体而言, 在终端-切片-基站匹配的过程中, 用户可以获取基站当前的位置、切片部署和负载情况; 基站和切片也能获取用户位置和用户业务需求。在业务流-服务路径匹配过程中, 业务流可以通过 K-最短路径搜索算法得到网络中从源节点到目的节点的可选路径集; 服务路径也能

获取业务流所属切片类型及其对各项指标的服务等级需求。

**步骤 2** 偏好列表初始化阶段。所有匹配请求者和匹配接收者需要根据获取的信息构建各自的偏好列表, 初始化完成后, 将所有未匹配的匹配请求者加入集合 UNMATCH。用户-切片-基站匹配以及业务流-服务路径匹配偏好建立在第 3.1 小节和第 3.2 小节中已经详细介绍。

**步骤 3** 核心匹配阶段。该阶段主要包括以下两步: 第一步, 在集合 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原则确定匹配对象。当匹配请求者没有可选择的匹配接收者时, 该匹配请求者从集合 UNMATCH 中移除。

重复执行步骤 2 和步骤 3, 直到集合 UNMATCH 为空。两阶段匹配算法分别如算法 1 和算法 2 所示。

**算法 1** 基于 Gale-Shapley 的用户-切片-基站匹配算法

#### 初始化

1. 每个用户、切片和基站根据第 3.1 小节规则生成各自偏好列表

2. 将所有未匹配的用户都加入集合 UNMATCH

**while** UNMATCH  $\neq \Phi$

**for** 每个用户  $u \in \text{UNMATCH}$

用户向其偏好列表中尚未拒绝过自己的, 且部署了对应切片的最高偏好基站发出匹配请求

**for** 每个收到请求的基站  $n \in$  部署切片的基站

**if** 基站  $n$  可提供最大速率  $<$  用户需求速率

将该用户从偏好列表中移除

**for**  $n \in$  部署切片的基站

**if**  $n$  对应切片的带宽资源还未分配完

基站按照偏好顺序与用户建立临时匹配, 并将用户从集合 UNMATCH 移除

**else if** 该基站对应切片带宽资源均已分配

按照偏好顺序比较已临时匹配用户和当前请求用户, 选择速率需求更大的用户组成临时配对, 没有匹配成功者返回集合 UNMATCH, 成功配对者从集合 UNMATCH 移除

**else** 基站未收到匹配请求

进入下一轮

算法结束

**算法 2** 基于 Gale-Shapley 的业务流-服务路径匹配算法

**初始化**

1. 每条业务流和对应服务路径集根据第 3.2 小节规则生成各自偏好列表

2. 将所有未匹配的业务流加入集合 UNMATCH

**while** UNMATCH $\neq\Phi$

**for** 业务流  $i \in \text{UNMATCH}$

业务流向其偏好列表中尚未拒绝过自己的最高偏好服务路径发送匹配请求

**for** 服务路径  $j \in \text{服务路径集}$

**if**  $j$  可提供业务流处理资源 < 业务流需求资源

将该业务流从偏好列表中移除

**for**  $j \in \text{服务路径集}$

**if** 服务路径资源量还未达到承载阈值

服务路径按照偏好顺序与业务流建立临时配对，并将业务流从集合 UNMATCH 中移除

**else if** 服务路径资源受限或局部拥塞

比较已临时匹配的业务流和当前请求流的服务需求等级，按照第 3.2 小节方法选择主导需求等级更高的业务流达成新的匹配。配对失败者返回集合 UNMATCH，成功配对者从集合 UNMATCH 中移除。

**else** 服务路径未收到匹配请求

进入下一轮

算法结束

### 3.4 算法复杂度分析

在终端-切片-基站匹配过程中，用户根据当前业务类型选择接入切片，切片则根据用户需求等级生成偏好列表，终端和切片之间的匹配是一个时间复杂度不超过  $O(|M| \cdot n_u)$  的过程，其中  $n_u$  是用户数， $|M|$  是切片种类。用户完成与切片的匹配后，依据对基站偏好指标的高低，在未达成匹配前依次向基站发出匹配请求，基站数量是  $n$ ；基站比较请求者，选择偏好程度最高的用户达成匹配。由于每个用户最多向所有基站发出请求，该过程的时间复杂度最高为  $O(n_u \cdot n)$ 。因此，终端-切片-基站的联合匹配过程的时间复杂度近似为  $O(n_u \cdot |M| \cdot n)$ 。

在业务流-服务路径匹配过程中，匹配一方为尚未匹配到路径且还没被所有可选路径拒绝的用户

业务流，考虑用户可能接入失败，业务流数量为一个小于等于  $n_u$  的常数。每条业务流需要从偏好列表中依次尝试匹配路径，最坏的情况下需要遍历其整个可选路径集，设路径集中路径个数为  $K$ 。采用 K-最短路径算法寻找可行路径的最大时间复杂度为  $O(K \cdot ((n_u + n) \cdot E + (n_u + n) \cdot \log(n_u + n)))$ ，其中  $E$  表示网络拓扑中边的数量。收到匹配请求的路径将选择偏好程度最高的业务流建立临时匹配，其他业务流重新回到匹配队列。重复此过程，每条业务流最多向可选路径集中的每条路径都发出请求，因此该匹配过程的时间复杂度近似为  $O(n_u \cdot K \cdot ((n_u + n) \cdot E + (n_u + n) \cdot \log(n_u + n)))$ 。

综上，两个匹配过程先后执行，整体时间复杂度为两者之和： $O(n_u \cdot |M| \cdot n) + O(n_u \cdot K \cdot ((n_u + n) \cdot E + (n_u + n) \cdot \log(n_u + n)))$ 。

在本文场景下，用户数  $n_u$  远大于其他参量，简化来看，匹配过程的时间复杂度主要取决于  $O(n_u \cdot n_u \cdot E)$ ，而  $E$  仅为具有流量处理能力节点之间的边数，其值不会随用户数增长而显著增加，因此最终时间复杂度不会超过  $O(n_u \cdot n_u)$ 。本文所提算法能在可预计时间内收敛，对用户规模变化具有较好的适应性。

## 4 仿真分析

本仿真实验在一台配置为 AMD Ryzen7-5800H 处理器（3.20 GHz CPU）、16GB 运行内存的 Windows 11 系统 PC 机上进行，采用 Matlab2020 软件编程。仿真参数设置见表 1。

为对比本文提出的空地一体动态 Mesh 网络切片端到端服务稳定匹配算法的性能，设计了一种端到端单向匹配的算法，并选取面向入口点的切片放置算法<sup>[16]</sup>（EPH）和 TailoredSlice-6G 算法<sup>[17]</sup>进行对比实验。在端到端单向匹配算法中，终端向切片和基站发出服务请求，业务流向服务路径发出服务请求。所有服务或资源提供方按照先来先服务的原则处理请求。EPH 算法的目标是在无线接入网域中，根据可用带宽、节点出度，为用户找到一个最佳接入点。接着，算法计算当前所选节点到所有其他节点的跳数、出口总带宽及可用虚拟资源，并对上述指标进行归一化加权。最后，采用变体 Dijkstra 算法确定最佳下一跳，直到完成端到端服务或服务失败。TailoredSlice-6G 算法则在接收到切片请求时，首先识

表 1 仿真参数设置

网络参数	参数值
仿真区域/m <sup>2</sup>	1 000×1 000
地面基站/个	8
地面基站覆盖半径/m	200
无人机基站/个	12
无人机基站覆盖半径/m	400
用户数/个	[200,600]
基站总接入信道带宽/MHz	20
可分配单用户信道带宽/MHz	{0.18,0.36,0.54,0.72,0.9,1.08}
基站回程侧信道带宽/MHz	20
用户发射功率/dBm	20
无人机基站发射功率/dBm	30
地面基站发射功率/dBm	40
噪声功率谱密度/(dBm·Hz <sup>-1</sup> )	-174
各切片资源初始分配比例 (大带宽:低时延:高可靠)	0.4:0.3:0.3
用户对速率、时延、传输可靠性需求等级	[1,6]
网络中 VNF 数目/个	8
地面基站部署各切片计算能力/(cycles·s <sup>-1</sup> )	(300,20)
无人机基站部署各切片计算能力/ (cycles·s <sup>-1</sup> )	(240,20)
各 VNF 服务单位流量消耗计算能力/ (cycles·s <sup>-1</sup> )	[0.1,0.2]
各 VNF 处理流量时延/ms	(1.5,0.3)
链路传输时延/ms	(4,1)
大带宽业务端到端速率需求阈值/(Mbit·s <sup>-1</sup> )	40
低时延业务端到端时延需求阈值/ms	30
高可靠业务端到端传输 SINR 阈值/dB	4
各业务流 K-最短路径搜索路径数目/条	5

别切片类型（如资源需求型、时延敏感型、密集连接型等）。然后，针对不同类型切片设计差异化的节点能力评估指标，并采用贪心策略将切片中的 VNF 优先部署在评分最高的节点。随后，按 VNF 的服务顺序，基于最短路径优先算法生成服务路径。动态场景中某时刻基站和用户位置示意图如图 5 所示。

随用户数的变化，用户接入和速率的变化如图 6 所示。在本实验中，大带宽、低时延、高可靠 3 类用户业务比例设置为{0.4,0.3,0.3}。从图 6 可以看出，随着用户数量增加，用户接入和速率也增加，增长速度表现为先快后趋于平稳。端到端稳定匹配算法实现了最高的用户接入和速率。这是因为该算法能够达成用户-切片-基站间的稳定匹配：用户根据其带宽服务等级向切片请求相应的带宽资源；接入切片后，进一步根据能得到的速率和基站

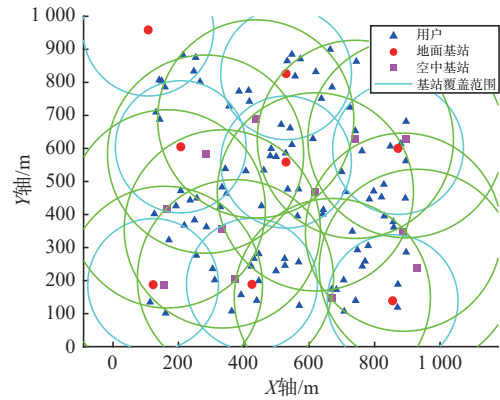


图 5 动态场景中某时刻基站和用户位置示意图

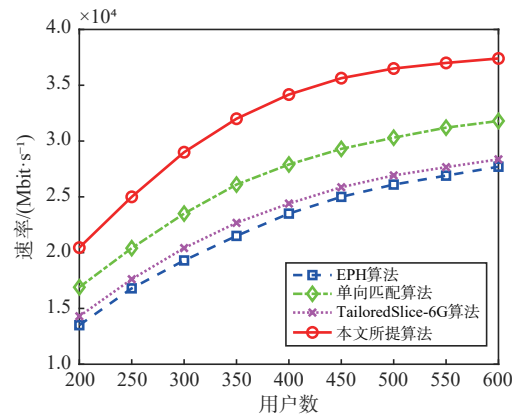


图 6 用户接入和速率的变化

负载均衡程度，选取部署该类切片的基站；同时，切片和基站也会优先保障带宽需求等级较高的用户接入。相比之下，单向匹配算法中的切片和基站只能按照请求到来顺序确定接入用户，无法主动选择能获得更高速率的用户。EPH 算法和 TailoredSlice-6G 算法在用户接入侧均没有充分考虑距离和信道条件等因素，因此获得的用户和速率较为接近且相对较低。

服务资源消耗量与业务流速率相关，而成功服务所消耗的计算资源差别不大，因此本文的优化重点在于减少服务失败的惩罚成本及转发带宽成本。随着用户数的变化，服务单位流量的归一化计算成本和带宽成本分别如图 7、图 8 所示。

从图中可以看出，本文所提算法和 EPH 算法的服务单位流量的平均成本和带宽成本增长较为平缓，而单向匹配算法和 TailoredSlice-6G 算法在用户数增长到约 500 后，服务单位流量成本明显增加。EPH 算法在选择下一跳 VNF 嵌入节点时，依据可用资源进行决策，服务失败率较低，惩罚成本较少，平均计算资源消耗较小。然而，其逐跳选路机

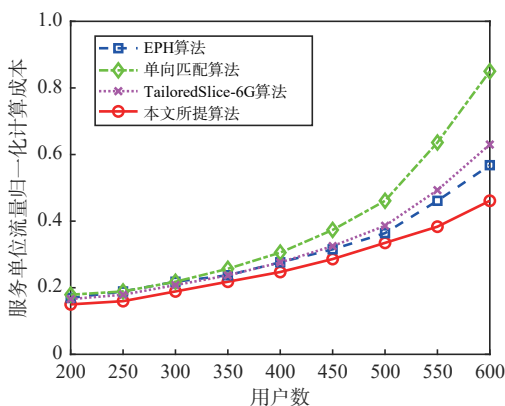


图7 服务单位流量的归一化计算成本

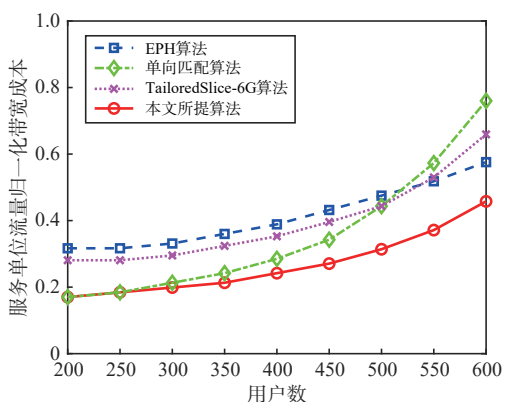


图8 服务单位流量的归一化带宽成本

制在转发过程中引入了额外的带宽消耗；端到端稳定匹配算法按照业务需求等级提供服务，高需求业务已经优先匹配，不会造成较大的惩罚成本；单向匹配算法按照先来先服务原则，部分后来业务流无法获得足够资源或不满足业务 QoS 约束而服务失败，造成较高的惩罚成本，使得服务单位流量消耗的带宽和计算资源量也快速增加。TailoredSlice-6G 算法采用“先放置后路由”的设计思路，对服务侧路由缺乏有效的动态调控策略，导致部分后来的高带宽需求业务出现拥塞，进而产生较大的惩罚成本。

随用户数的变化，业务端到端平均速率的变化如图9所示。从图9中可以观察到，随着用户数增加，用户业务能获得的端到端平均速率呈下降趋势。本文所提的稳定匹配算法在用户向切片请求带宽资源后，同时考虑了基站的位置和负载情况，且切片、基站和路径侧也都按照用户需求等级进行服务确认，因此得到的平均速率最高。EPH 算法和 TailoredSlice-6G 算法没有考虑节点间距离的影响，即使用户获得所需带宽，其速率提升也较为有限。单向匹配算法中的基站和路径侧按照“先来先服务”

的顺序直接提供服务，导致部分需求高但到达较晚的业务没有得到所需资源或不满足 QoS 需求而失败。

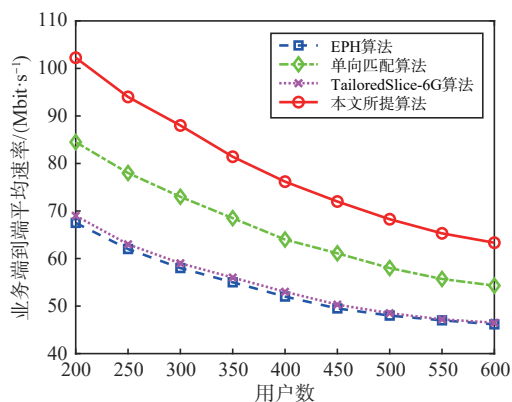


图9 业务端到端平均速率的变化

在低时延用户与其他业务用户比例为 0.7 : 0.3 时，随着用户数增加，业务端到端时延的变化如图10所示。端到端稳定匹配算法得到的平均时延最小且增长较平缓；单向匹配算法的业务平均时延则不断增加；EPH 算法和 TailoredSlice-6G 算法的业务平均时延较大，但增长速度相对较慢。这是因为稳定匹配算法业务流“竞争”路径失败后，会将其重新加入匹配队列以继续匹配其他路径，从而避免了因贪婪占用较短路径而引发的网络拥塞，有效降低了时延。单向匹配算法贪婪占用路径，导致部分节点链路拥塞，后续流可用路径跳数增加。EPH 算法通过逐跳寻找最优下一跳的方式虽然在一定程度上提高了传输成功率，但由于搜索方向不一定准确，因此牺牲了时延性能。TailoredSlice-6G 算法由于 VNF 之间存在执行顺序的依赖关系，两个相邻 VNF 可能部署在多跳之外的节点，进而增加了时延。

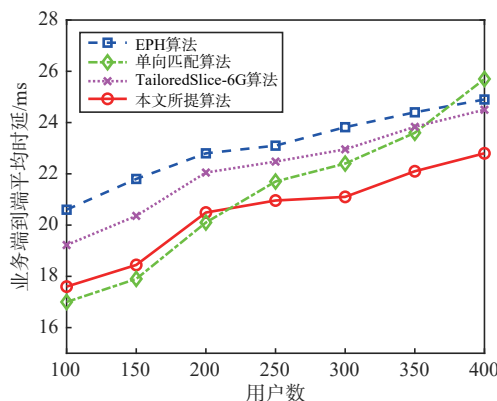


图10 业务端到端平均时延的变化

随网络中用户数的增加，用户业务流端到端传输可靠性变化如图 11 所示。从图 11 可以看出，随着用户数增多，传输信道干扰加剧，端到端数据包传输可靠性降低。稳定匹配算法维护的双向匹配机制在用户数较多时相比单向匹配算法表现出明显的传输优势。EPH 算法的平均跳数较高，一定程度上降低了传输可靠性，但每跳寻址也降低了网络拥塞，整体性能仍相对较优。TailoredSlice-6G 算法在链路分配中采用最短路径寻址，可能导致部分节点成为拥塞“枢纽”，从而降低了系统的可靠性。

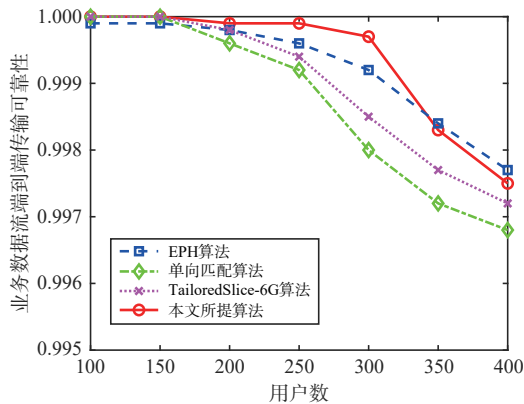


图 11 业务流端到端传输可靠性变化

设置大带宽、低时延、高可靠 3 类用户业务比例为 {0.4,0.3,0.3} 时，随着用户数变化，各类业务端到端服务成功率的变化如图 12 所示。图 12 显示，随着用户数增加，端到端服务成功率总体呈下降趋势。本文所提的端到端稳定匹配算法平均服务成功率最高，EPH 算法和 TailoredSlice-6G 算法次之，单向匹配算法最低。这是因为稳定匹配算法在保障高优先级用户需求的同时，会让匹配不成功的业务进入下一轮次继续匹配，因而最大程度降低了服务失败率。EPH 算法通过逐跳寻找最优下一跳机制，较

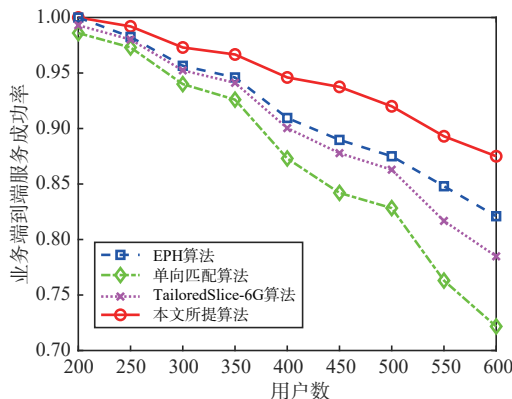


图 12 业务端到端服务成功率变化

好地保障了服务所需资源，从而提升了服务成功率，但在时延需求型业务上可能无法满足 QoS 阈值需求。TailoredSlice-6G 算法和单向匹配算法在业务流量较大时可能引发网络拥塞，且缺少服务侧的动态调控策略，因此服务成功率相对较低。

## 5 结束语

为应对 6G 网络中动态、资源受限的应急通信场景下面向端到端用户任务的多维资源协同问题，本文选取带宽、时延、可靠性这 3 个核心用户需求指标，用以表征差异化的用户业务类型及服务需求。在对网络场景进行建模的基础上，提出以满足各类业务服务需求并降低网络成本为目标的优化问题，将问题表述为请求方和接收方的偏好匹配关系，进一步提出基于 Gale-shapley 思想的端到端稳定匹配算法，完成终端-切片-基站、业务流-服务路径的双向匹配关联。仿真结果表明，本文所提端到端稳定匹配算法在提高用户接入和速率，降低因服务失败增加的网络成本以及区分业务类型的指标性能提升上均有良好表现。然而，当前研究对切片划分粒度仍较为粗略，作为下一步工作，将考虑对各类切片进行细粒度划分，并引入基于 AI 的智能化解方案。

## 参考文献:

- [1] Bano M, Qayyum A, Bin Rais R N, et al. Soft-mesh: a robust routing architecture for hybrid SDN and wireless Mesh networks[J]. IEEE Access, 2021, 9: 87715-87730.
- [2] Jiang X F, Zhang H, Barsallo Yi E A, et al. Hybrid low-power wide-area Mesh network for IoT applications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(2): 901-915.
- [3] Nurlan Z, Zhukabayeva T, Othman M, et al. Wireless sensor network as a Mesh: vision and challenges[J]. IEEE Access, 2022, 10: 46-67.
- [4] Seng A, Trick U, Lehmann A, et al. Network slice placement in wireless Mesh networks[C]//Proceedings of the 2024 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2024: 0120-0125.
- [5] Rodrigues T K, Kato N. Network slicing with centralized and distributed reinforcement learning for combined satellite/ground networks in a 6G environment[J]. IEEE Wireless Communications, 2022, 29(1): 104-110.
- [6] Wang J D, Li Y H, Liu J J, et al. Intelligent network slicing for B5G and 6G: resource allocation, service provisioning, and security[J]. IEEE Wireless Communications, 2024, 31(3): 271-277.
- [7] Yan D D, Ng B K, Ke W, et al. Multi-agent deep reinforcement learning joint beamforming for slicing resource allocation[J].

- IEEE Wireless Communications Letters, 2024, 13(5): 1220-1224.
- [8] 朱晓荣, 高健. 基于SDN和NFV融合的网络切片资源分配优化算法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2021, 41(3): 30-38.  
Zhu X R, Gao J. Optimization algorithm for network slice resource allocation based on SDN and NFV[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science), 2021, 41(3): 30-38.
- [9] Li H, Kong Z X, Chen Y W, et al. Slice-based service function chain embedding for end-to-end network slice deployment[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2023, 20(3): 3652-3672.
- [10] Bai H N, Zhang Y, Zhang Z Y, et al. Latency equalization policy of end-to-end network slicing based on reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2023, 20(1): 88-103.
- [11] Liu W Q, Hossain M A, Ansari N, et al. Reinforcement learning-based network slicing scheme for optimized UE-QoS in future networks[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2024, 21(3): 3454-3464.
- [12] Orim P, Mwangama J. Random access sliced 5G-advanced network for machine type communication[C]//Proceedings of the 2024 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC). Piscataway: IEEE Press, 2024: 490-495.
- [13] 赵季红, 冯晴, 王智, 等. 面向多业务场景的端到端网络切片安全部署算法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(4): 1421-1428.  
Zhao J H, Feng Q, Wang Z, et al. End to end network slicing security deployment algorithm for multi service scenarios[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(4): 1421-1428.
- [14] Cao H T, Kumar N, Yang L X, et al. Resource orchestration and allocation of E2E slices in softwarized UAVs-assisted 6G terrestrial networks[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2024, 21(1): 1032-1047.
- [15] Foukas X, Patounas G, Elmokashfi A, et al. Network slicing in 5G: survey and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(5): 94-100.
- [16] Cherifi M R, Dieye M, Elbiaze H, et al. Profit-driven slicing in dynamic multi-domain networks[C]//Proceedings of the GLOBECOM 2023-2023 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2023: 4760-4766.
- [17] Cao H T, Du J B, Zhao H T, et al. Toward tailored resource allocation of slices in 6G networks with softwarization and virtualization[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(9): 6623-6637.

## [作者简介]



顾浩(2000-), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为端到端网络切片、无线Mesh网络资源分配算法。



李侍阳(2002-), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院在读, 主要研究方向为无线Mesh网络。



朱晓荣(1977-), 女, 博士, 南京邮电大学通信与信息工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为5G/6G网络、智能物联网、网络大数据、区块链、群体智能。