

基于信道定价的无线虚拟网络资源分配策略：匹配/Stackelberg分层博弈

曾菊玲^{*①} 张春雷^① 蒋砾思^② 夏凌^①

^①(三峡大学 宜昌 443002)

^②(University of California, Irvine, CA, USA)

摘要：针对分层匹配博弈不能跟踪信道变化以及循环迭代收敛慢等问题，该文提出一种基于信道定价的无线虚拟网络资源分配策略：匹配/Stackelberg分层博弈。分别以基于流带宽的用户满意度、系统带宽及切片功率作为报酬函数建立3级联合优化模型，并采用匹配/Stackelberg分层博弈求解。在博弈下层，定义移动虚拟网络操作者(MVNOs) m_n 一切片 n 对 m_n 及其与用户(UEs)的1对1匹配博弈以代替UEs与MVNOs的多对1匹配，对 m_n 定义基于信道平均信息的切片功率价格，加速上、下一致收敛并使UEs适应信道选择最优 m_n ，证明均衡点存在并给出了低复杂度的分布式拒绝-接收算法；在博弈上层，基于UEs与 m_n 已匹配关系，形成基础资源提供者(InPs)与 m_n 的Stackelberg博弈，给出了基于局部信道信息的功率定价和分配策略，使系统效用及频谱效率基于信道最优。最后定义了双层循环稳定条件及过程。仿真表明，该策略在信道跟踪、频谱效率、效用方面均优于随机定价的匹配/Stackelberg分层博弈以及传统分层匹配博弈。

关键词：无线虚拟网络；分层博弈；匹配博弈；Stackelberg博弈；信道定价

中图分类号：TN929.5

文献标识码：A

文章编号：1009-5896(2021)01-0108-08

DOI: [10.11999/JEIT191032](https://doi.org/10.11999/JEIT191032)

Channel's Price-based Resource Allocation for Wireless Virtual Network: A Hierarchical Matching/Stackelberg Game Approach

ZENG Juling^① ZHANG Chunlei^① JIANG Lisi^② XIA Ling^①

^①(China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

^②(University of California, Irvine, CA, USA)

Abstract: For the low iteration convergence rate and the disability to track the change of channels in hierarchical matching game, a new resource allocation strategy for wireless virtual networks, i.e., the channel's price-based hierarchical matching/Stackelberg game is proposed in this paper. A three-level joint optimization model is established on each layer reward function based on stream's bandwidth-based user's satisfaction, the system's bandwidth and the slice's power. The hierarchical matching/Stackelberg game is adopted to solve the optimizing problem. In the lower layer of the hierarchical game, the m_n is defined to present Mobile Virtual Network Operator(MVNO) m -InP n and one-to-one matching game between it and UEs is constructed to displace the many-to-one matching game between UEs and MVNOs, where a price based on the global information of channels is given to speed up the identical convergence between the upper and the lower layer and make UEs select the optimal m_n adapting the channel. After proving the existing of equilibrium, the rejecting-receiving algorithm for one-to-one matching game is proposed. In the upper layer of the hierarchical game, a Stackelberg game between the InPs and many m_n is formed based on the connection between those users and m_n , and an optimized power pricing and allocation strategy based on local information of channel are given, which makes the optimal system utility and resource utilization based on channels. Finally, the process for the two-tier cycling is given and the stability of the hierarchical game is characterized. Simulation results show that the channel's price-based hierarchical matching/Stackelberg game strategy outperforms

收稿日期：2019-12-24；改回日期：2020-06-29；网络出版：2020-07-17

*通信作者：曾菊玲 julingzeng23@163.com

基金项目：湖北省软科学计划研究专项(2018ADC038)

Foundation Item: The soft science program research project of Hubei province (2018ADC038)

the random pricing hierarchical matching/Stackelberg game and the conventional hierarchical matching game in the aspect of tracking channel's changing and spectrum efficiency and system's utility.

Key words: Wireless virtual network; Hierarchical game; Matching game; Stackelberg game; Channel pricing

1 引言

无线网络虚拟化是5G的主要组网模式^[1,2]。合适的网络架构和有效的资源分配策略是虚拟化的关键技术。文献^[3-5]提出了资源提供者(Infrastructure Providers, InPs)直接向UEs(Users)提供资源的2级架构模型,由于未将移动虚拟网络操作者(Mobile Virtual Network Operators, MVNOs)包含在内,InPs直接面向所有UEs,计算复杂度高,且无法实现虚拟资源管理。文献^[2,6]提出了3级架构模型,中间层MVNOs向UEs提供服务,InPs与UEs解耦并被MVNOs共享,计算复杂度、资源利用及管理、系统效用及用户体验得到改善,被广泛采用。基于3层架构的多种分层联合优化资源分配模型被提了出来且常用分层博弈求解,文献^[7]给出了一种通过机会频谱共享实现虚拟化的机制,但非完全隔离降低了在虚拟网络中的可实用性,文献^[8,9]分别给出了基于合同理论及破产博弈的虚拟资源分配策略,分别采用MVNOs与UEs或MVNOs与InPs 2级架构以及仅MVNOs效用最优难以保证整个网络性能,文献^[10,11]提出了3级架构下2层联合的分层拍卖机制,保证了整体效用最大和资源分配次优,但不能保证个体效用最大,特别地,对于无线虚拟网络,作为卖方的MVNO需要全部信道信息进行中心决策,信道反馈开销大,系统复杂,计算量大。文献^[12]采用MVNOs与InPs以及UEs与MVNOs联合分层匹配博弈机制,保证了各层及个体效用最优,去中心化的实现方法也使系统相对简单,但还存在以下不足:(1)上、下两层博弈不相关联的效用函数及随机价格导致一致收敛困难、层间循环迭代次数多、计算复杂度大;(2)信道状态信息仅出现在InPs、未出现在MVNOs与UEs的效用函数中,导致整个博弈无法跟踪信道变化;(3)分层匹配博弈仅实现了MVNOs控制下UEs与切片匹配,并未对功率、带宽进行优化分配,不能实现基于信道特征的最大效用及较高资源利用率。因此,建立基于信道特征的优化模型和具有耦合关联的分层博弈以及切片选择与资源分配同时实现的新博弈结构,寻找跟踪信道、收敛快的自适应策略是目前具有挑战性的工作。

在分层博弈的下层,基于匹配实现UEs对切片

的选择,在上层,基于UEs与切片匹配关系,采用Stackelberg博弈实现基于信道特征的资源分配,将使效用及资源利用率优化,策略更加完善^[13]。

对于优化模型,在用户级以基于流带宽的用户满意度定价效用函数,既符合未来5G通信中以用户为中心、以流媒体为主要承载模式的趋势^[14,15],也与分别以带宽和功率为效用函数的MVNOs及InPs建立关联,加速循环迭代一致收敛,提高跟踪信道能力。在MVNOs,根据其在上下层博弈中的完全信息状态和非完全信息状态,分别基于局部信道信息和平均信道信息对购买功率非对称定价,不仅使系统简单易行,而且进一步提高了跟踪信道能力,特别是服从统计分布的局部信道信息在迭代中较快收敛于平均信息,进一步加速循环迭代收敛。

本文提出一种基于信道定价的无线虚拟网络资源分配策略:匹配/Stackelberg分层博弈。分别以基于流带宽的用户满意度、系统带宽及切片功率作为报酬函数建立3级联合优化模型,并采用匹配/Stackelberg分层博弈求解。在博弈下层,定义MVNO m ——InP n 对 m_n 及其与UEs的1对1匹配博弈以代替UEs与MVNOs的多对1匹配,对 m_n 定义基于信道平均信息的切片功率价格,加速上、下一致收敛并使UEs根据信道特征选择最优 m_n ,证明均衡点存在并给出低复杂度的分布式拒绝-接收算法;在博弈的上层,基于UEs与 m_n 已匹配关系,形成InPs与 m_n 的Stackelberg博弈,给出基于信道局部信息的优化功率定价和分配策略,使系统效用及资源利用率基于信道特征最优。最后给出双层循环过程图及稳定条件并仿真验证。

2 系统模型

如图1是3级架构的无线虚拟网络。考虑一个由 N_B 个基站(BSs)组成的下行网络,最高层是InPs,不失一般性,假定1个InP包含1个基站,基站的每个信道抽象成1个切片,1个InP包含 N_S 个切片,每切片带宽相同,功率可调,假定每切片只能以不同价格同时服务1个MVNO。中间层是MVNOs,根据网络状况和资源价格等因素动态向InPs购买无线资源,每MVNO可以不同价格购买多个切片,以不同的价格向UEs提供服务,第 m 个MVNO($m \in M$)向1组UEs K_m 提供服务, $K = \cup_{m \in M} K_m$ 为UEs总数, $|K|$ 表示集合 K 的基数。最底层是UEs,

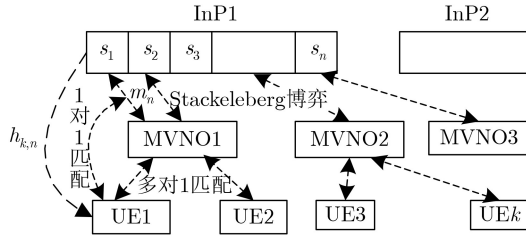


图1 无线虚拟网络3级架构及分层博弈示意图

以业务流模式向MVNOs提出带宽请求，每UEs可向多个MVNOs提出服务申请。系统工作流程为：UEs向MVNOs提出带宽申请，再由MVNOs向InPs申请切片。

系统需要优化。当切片带宽相同时，UEs与切片间需要根据信道质量最优匹配，才能使资源效率最高。另一方面，根据效用，UEs存在大带宽带来的良好用户体验与购买带宽付出更大代价之间的矛盾，MVNOs存在向UEs提供更多带宽获得更大收益与付出更大代价向InPs购买带宽的矛盾，总功率受限时，InPs存在切片提高功率获得更大报酬与付出更大代价的矛盾。因此，UEs, MVNOs, InPs之间需要优化选择及合理定价，才能使效用和资源利用率最大，需要建立一个基于信道的3阶段联合优化模型。

3 问题形成

3.1 用户层优化目标

在虚拟无线网络中，流是业务的主要模式，基于流带宽的用户满意度作为用户层质量度量，通常可分为语音流、视频流、数据流，由于本文仅针对2层业务，所以选择数据流。满意度函数

$$U_{\text{data}}(B) = \left(1 - e^{-\frac{s_1 B}{B_{\text{max}}}}\right) \quad (1)$$

其中 B 为达到最大效用的带宽， s_1 为正常数。

令第 m 个MVNO租用第 n 个切片向UE k 提供的带宽为 $B_{k,m}^n$ ，则UE k 从租用MVNO m 获得的收益为

$$\beta_{k,m}^n = U_{\text{data}}(B_{k,m}^n) \quad (2)$$

不失一般性，令

$$B_{k,m}^n = R_{k,n}^m / L \quad (3)$$

其中 $R_{k,n}^m$ 是被MVNO m 租用的切片 n 提供给UE k 的速率，由式(6)给出， L 为每帧比特率。

对任意UE $k \in K$ 有优化目标为

$$\max_{x_{k,m} \in \{0,1\}} \sum_{m \in M} x_{k,m} (\beta_{k,m} d_k - \lambda_{k,m} B_{k,m}^n d_k) \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \sum_{m \in M} x_{k,m} = 1 \quad (5)$$

$x_{k,m} = 1$ 表示UE k 选择MVNO m 服务，否则， $x_{k,m} = 0$ ； d_k 是UE k 对切片的需求数； $\lambda_{k,m}$ 为MVNO m 向UE k 提供带宽的价格；式(4)表示用户层优化目标效用最大，效用由用户满意度减去购买带宽付出的代价构成，式(5)中的约束表示每个UE只能由一个MVNO服务。

3.2 InPs的优化目标

不失一般性，假定1个InP包含1个基站，基站的每1个信道抽象成1个切片，1个InP包含 N_s 个切片，每个切片具有相同带宽 W ，假设InP之间的干扰被吸收到背景噪声 σ^2 。 $p_{m,n}$ 为被MVNO m 租用的切片 n 即 m_n 的功率， P 为InPs的最大功率。MVNO m 购买InP的切片 n 向UE k 提供业务。数据速率为

$$R_{k,n}^m = w \lg(1 + \gamma_{k,n}^m) \quad (6)$$

$$\gamma_{k,n}^m = \frac{p_{m,n} h_{k,n}}{\sigma^2} \quad (7)$$

其中， $h_{k,n}$, σ^2 分别为 m_n 到UE k 的信道增益和噪声功率谱密度。

假定UE k , MVNO m 、切片 n 已通过匹配形成稳定关联关系，当切片带宽一定时，增大功率可以提高速率，但InP总功率受限，各切片需要竞争功率，故InP需要根据MVNOs购买切片的不同价格分配功率，使InP效用达到最优。假定 $\mu_{m,n}$ 为MVNO m 购买切片 n 的价格，则一个InP的优化目标为

$$\max_{y_{m,n} \in \{0,1\}} \sum_{n=1}^{N_s} y_{m,n} \mu_{m,n} P_{m,n}, \quad \forall m \in M \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \sum_{m \in M} \sum_{n \in N_s} y_{m,n} \leq N_s \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K_m} \sum_{n \in N_s} y_{m,n} B_{k,n}^m \geq d_m, \quad \forall m \quad (10)$$

$$\sum_n P_{m,n} < P, \quad \forall m \in M \quad (11)$$

$y_{m,n} = 1$ 表示InP同意MVNO m 购买切片 n ； d_m 表示MVNO m 接纳的UE需求总数，其中 $d_m = \sum_{k \in K_m} d_k$ 。式(8)表明InP分配功率获得的收益最大，式(9)表明1个InP接纳的所有MVNO m 申请切片总数受限，式(10)表明MVNO m 申请的切片数量大于用户需求带宽，以保证服务。式(11)表示总功率受限。

3.3 MVNOs的优化目标

MVNO m 购买切片 n 向UE k 提供带宽的报酬函数

$$\beta_{m,k}^n = B_{k,m}^n \quad (12)$$

MVNO m 为切片 n 向 InPs 购买功率的价格为 $\mu_{m,n}$ ，购买的功率为 $p_{m,n}$ ，则代价函数为

$$\sum_n \mu_{m,n} P_{m,n} \quad (13)$$

MVNO m 从 InPs 为切片购买功率，向 UEs 提供带宽，效用函数等于报酬函数与代价函数之差，假定 $\lambda_{m,k}$ 为 MVNO m 向 UE k 提供一个切片的价格，此时，MVNO m 的收益函数可表示为

$$U_{MVNO}(m) = \sum_n \lambda_{m,k} B_{k,m}^n - \sum_n \mu_{m,n} P_{m,n} \quad (14)$$

因此，MVNO m 的优化目标为

$$U_{MVNO} = \max_{x_{k,m}, y_{m,n} \in [0,1]} \sum_k \left(\sum_n x_{k,m} \lambda_{m,k} B_{k,m}^n d_k - \sum_n y_{m,n} \mu_{m,n} p_{m,n} \right) \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \sum_m x_{k,m} \leq 1 \quad (16)$$

$$\sum_k x_{k,m} l_{k,n} \leq \sum_n y_{m,n}, \quad \forall k \quad (17)$$

$x_{k,m} = 1$ 表示 UE k 被 MVNO m 接受； $y_{m,n} = 1$ 表示 MVNO m 拟购买 InP 的切片 n ， $\mu_{m,n}$ 为购买功率 $p_{m,n}$ 的价格； $l_{k,n}$ 表示在 MVNO 中计算的实现 d_k 所需的切片数， $\lambda_{m,k}$ 为 MVNO m 向用户售出带宽时的价格，式(16) 保证 UE k 最多由 1 个 MVNO 提供服务，式(17) 保证 UEs 从切片获得的资源小于 MVNO m 所购切片容量。

上述式(4)、式(8)、式(15) 分别以用户满意度、系统带宽收入、切片功率收入作为报酬函数，再通过式(3)、式(6)、式(7)，三者融合在信道质量上，使上、下两层都基于信道质量博弈，相比文献[12]，信道信息仅出现在下层而上层完全基于随机价格博弈，更容易加速循环迭代收敛，提高跟踪信道能力。

4 问题求解

上述3个优化目标式(4)、式(8)、式(15) 需要联合优化才能达到系统最优，但涉及到相互关联的3个层次，需要循环迭代，且是一个混合整数非线性规划问题，具有 NP-hard 复杂度，要获得中心化解决方案，需要较大的计算量和复杂的控制过程。因此，本文引入匹配/Stackelberg 分层博弈进行分解，得到一个分布式次优方案。考虑到 MVNOs 向用户提供带宽与向 InPs 购买物理资源两个方向具有一定独立性，以 MVNOs 为中心，将原问题分解为分

层博弈，如图1所示，下层是 UEs 与 MVNOs 的匹配博弈，上层是 MVNOs 与 InPs 的 Stackelberg 博弈。

为避免上、下层无耦合以及 UEs 与 MVNOs 之间多对多博弈不能形成 UEs 与切片精确匹配，在博弈下层，将 MVNOs 与切片组合成单元对 m_n ，将 UEs 与 MVNO 之间的多对1匹配博弈转化为 UEs 与 m_n 的集合 M_n 的1对1匹配博弈，对 m_n 在上、下层购买功率分别基于平均信道信息和局部信道信息非对称定价，加速收敛一致、降低层间迭代次数，形成 UEs 与 m_n 的精确匹配。在上层，以 Stackelberg 博弈建模 InP 基于已匹配关系向 m_n 出售功率、 m_n 向 InP 购买功率过程，形成基于信道特征的功率定价和策略。

5 UE 与 m_n 间的匹配博弈

5.1 匹配博弈及其稳定性

定义1 严格的、完备的、具有传递性的偏好：假定 $p(k)$ 是用户 k 的偏好函数，如果 $p(k) = m_{n_1}, m_{n_2}, \Phi, m_{n_3}$ 则用户 k 选择网络时，首先选择 m_{n_1} ，其次 m_{n_2} ，不选 m_{n_3} ，则 $p(k)$ 是严格的、完备的、具有传递性的偏好。

定义2 偏好：用 \succ 表示严格偏好关系，对某用户 k ，选择网络 m_{n_1} 优于选择网络 m_{n_2} ，记作 $m_{n_1} \succ_k m_{n_2}$ 。类似地，对于某网络， m_n 选择用户 k_1 优于选择用户 k_2 ，即 $k_1 \succ_{m_n} k_2$ 。

定义3 匹配：假定用户集合 K, m_n 集合 M_n ，匹配 μ 是从集合 $K \cup M_n$ 到集合 $K \cup M_n$ 的所有子集构成集合的一个映射，对所有 $k \in K$ 和 $m_n \in M_n$ ，使：(1) $|\mu(k)| \leq 1$ ， $\mu(k) \in M_n$ 且 $|\mu(m_n)| \leq 1$ ， $\mu(m_n) \in K$ ；(2) $\mu(m_n) = k \Leftrightarrow \mu(k) = m_n$ 。

定义4 最优匹配：假定 UE k 与 m_n 匹配，匹配效用 $\pi(k, m_n)$ ，则最优匹配为： $\max_{k, m_n} \pi(k, m_n)$ 。

推论 已有文献证明，具有严格偏好的1对多或1对1匹配博弈一定存在稳定匹配，可采用拒绝—接收算法求解。

5.2 UEs 与的 m_n 匹配博弈

5.2.1 UEs 与 MVNOs 之间多对1的匹配博弈

如图1所示，UEs 向 MVNOs 租用带宽，形成多对1的匹配博弈，但不能形成 UEs 与切片的精确匹配，且 MVNOs 向 UEs 提供的带宽由 MVNOs 向 InPs 购买的切片到 UEs 的信道特性决定，将 MVNOs 与切片关联起来作为整体参与匹配博弈更有实际意义。

5.2.2 UE k 与 m_n 之间1对1的匹配博弈

形成了 MVNO m —切片 n 对 m_n 后，UEs 集合 K 与 m_n 的集合 M_n 形成如图1所示的1对1匹配博弈。

假定每切片只能被1个MVNO购买, 每MVNO则可以购买多个InPs的多个切片, 但每切片只能被1个MVNO购买, 不失一般性, 假定任意MVNO可以购买任意切片, 构成 m_n , 如图1所示, 3个MVNO, 2个InP, 每个InP包含8个切片, 则可构成48个 m_n , 假定初始状态各切片功率相等。

对于UE, 其偏好函数为

$$p_k = \beta_{k,m} d_k - \lambda_{k,m} B_{k,m}^n d_k \quad (18)$$

不失一般性, 令 $\lambda_{m,k}$ 均匀分布的随机数。假定 $d_k = 1$ (若 $d_k > 1$, 则可看成多个独立的用户需求)。

对于 m_n , 令其偏好函数为

$$p_{m_n} = \lambda_{m,k} B_{k,m}^n d_k - \mu_{m,n} P_{m,n} \quad (19)$$

$$\mu_{m,n} = \sqrt{\frac{\lambda_{m,k} h_{k,n}^m}{\sigma^2}} \frac{N_s \sigma \sqrt{\lambda} \sqrt{\frac{1}{h}}}{P + N_s \sigma^2 \frac{1}{h}} \quad (20)$$

$$P_{m,n} = \frac{P}{N_s} \quad (21)$$

其中, σ^2 , P , N_s 分别表示噪声功率、一个InP的总功率、1个InP包含的切片总数, $\sqrt{\lambda}$, $\frac{1}{h}$, $\sqrt{\frac{1}{h}}$ 分别表示在全网范围内MVNO向UEs提供带宽的价格、以及信道增益的平均。

式(20)中 m_n 购买功率的价格由后文6.2节推导, 仅与信道平均信息及匹配对本身价格信息相关, 定义为基于平均信道信息的功率价格。匹配博弈未完成之前, MVNOs处于不知道信道信息的非完全信息状态, 而价格 $\lambda_{m,k}$ 和信道 $h_{k,n}^m$ 是匹配对自身信息, $\sqrt{\lambda}$, $\frac{1}{h}$, $\sqrt{\frac{1}{h}}$ 可由简单信道反馈得到, 是可行的, 该价格使系统简单易行, 且具有加速迭代收敛、提高信道跟踪能力、保持切片隔离性及优选 m_n 等优点。

5.2.3 1对1匹配博弈求解——拒绝-接收算法

稳定性证明: 考查式(18)、式(19), 匹配双方的偏好 p_k , p_{m_n} 都是匹配的单值函数, 具有严格的可传递性, 因此, 1对1的用户 k 与 m_n 匹配具有稳定的最优解。可用拒绝—接收算法求解。

拒绝—接收算法

第1步: 每UE k 向可接受的最偏好的 m_n 递交租用申请; 每一个 m_n 在收到的所有申请中选择最偏好的UE k , 拒绝掉所有其它的申请。假定每个 m_n 只能选择一个UE k 。

第 K 步: 每一个还未匹配的用户向还未拒绝过它的、最偏好的 m_n 递交租用申请; 每一个 m_n 在收到的所有申请中留下最偏好的申请, 拒绝掉所有其

它的申请。如果 m_n 原来已有选择某UE k , 但新的申请者带来的匹配效用更大, 则选择后来者。

当没有拒绝发生时, 算法结束。

6 InP与MVNO之间Stackelberg 博弈及基于信道定价的功率策略

6.1 Stackelberg 博弈及基于局部信道定价的功率策略

如图1所示, UE与 m_n 在等功率条件下建立稳定匹配后, 假定每切片带宽一定且相同, MVNOs向InPs购买功率再向UEs提供带宽, 1个InP可以接收多个MVNO, 由于InP功率受限, 其接纳的多个MVNOs分享功率, 购买过程建模为InP为主导者, m_n 为跟随者的主从博弈, 由于InP彼此独立, 因此只需考虑任一InP与其容纳的 m_n 构成的博弈。不失一般性, 考虑 m_n 向1个包含 N_s 个切片的InP购买功率, $\mu_{m,n}$ 为 m_n 购买功率的价格, 则1个InP出售功率的收益函数为

$$U_{\text{InP}} = \sum_{n=1}^{N_s} \mu_{m,n} P_{m,n} \quad (22)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{n=1}^{N_s} P_{m,n} < P \quad (23)$$

对于MVNOs: MVNO m 购买功率获得的收益为

$$U_{\text{MVNO}} = \sum_n \lambda_{m,k} B_{k,m}^n - \sum_n \mu_{m,n} P_{m,n} \quad (24)$$

式(24)对于其中的某 m_n , 令

$$U_{\text{MVNO},m_n}(P_{m,n}, P_{m,-n}) = \lambda_{m,k} B_{k,m}^n - \mu_{m,n} P_{m,n} \quad (25)$$

Stackelberg博弈在MVNOs 端形成非合作博弈, 均衡点可以通过个体最优求得, 定义纳什均衡点

$$\begin{aligned} U_{\text{InP}}(\mu^* \cdot P^*) &\geq U_{\text{InP}}(\mu \cdot P^*), \\ U_{\text{MVNO},m_n}(\mu_{m,n}^* \cdot P_{m,n}^*, P_{m,-n}^*) &\geq U_{\text{MVNO},m_n}(\mu_{m,n}^* \cdot P_{m,n}^*, P_{m,-n}^*) \end{aligned} \quad (26)$$

式(25)是关于 $P_{m,n}$ 的严格凹函数, 由KKT条件得

$$P_{m,n}^* = \left(\frac{\lambda_{m,k}}{\mu_{m,n}^*} - \frac{\sigma^2}{h_{k,n}} \right)^+ \quad (27)$$

将式(27)代入式(22)式(23)经过变换可求

$$\mu_{m,n}^* = \sqrt{\frac{\lambda_{m,k} h_{k,n}^m}{\sigma^2}} \frac{\sum_{n=1}^{N_s} \sqrt{\frac{\lambda_{m,k} \sigma^2}{h_{k,n}^m}}}{P + \sum_{n=1}^{N_s} \frac{\sigma^2}{h_{k,n}^m}} \quad (28)$$

其中, $\lambda_{m,k}$ 是 m_n 向UE k 提供带宽的价格, $h_{k,n}$ 是在下层博弈中已匹配由MVNO m 控制的UE k 到切片 n 的信道。

(1) 基于局部信道信息的功率定价: 观察式(28), m_n 购买功率的价格仅由匹配UEs购买带宽的价格 $\lambda_{m,k}$ 及与关联切片的信道 $h_{k,n}^m$, σ^2 决定, 知道用户价格和用户信道的完全信息状态的MVNOs完全可行。对于InP, 式(28)只需InP本身所含切片的信道信息, 而InP在下行信道是控制中心, 信道信息完全已知, 因此, 基于式(28)定价的Stackelberg博弈是可行的。由于此时信道信息只属于某个InP, 将式(28)定义为基于局部信道信息的功率定价, 该定价只需局部信道信息, 反馈开销小, 系统实现简单。

(2) 基于局部信道信息的功率分配: 观察式(27), m_n 的功率计算只需局部信息, 当带宽价格和功率价格及信道一定时, 不论功率价格 $\mu_{m,n}$ 是否最优, 功率都是最优, 但此时只能保证 m_n 效用最优, 不能保证InP效用最优; 同时, 当带宽价格和信道一定时, 功率价格需大于一定值, 才能保证功率为正。

(3) 3种分层博弈策略: 再次观察式(28), 虽然最优价格形式上只由带宽价格、功率价格、信道及总功率决定, 与是否采用式(27)的最优功率无关, 可以独立计算, 但式(28)是在式(27)基础上得出, 只有同时采用式(27)的最优功率和式(28)的最优价格, 系统效用才能最优。若采用最优功率而不采用最优价格, 系统效用会降低。为说明匹配/Stackelberg博弈中功率价格及分配策略, 定义如下3种策略:

(a) 基于信道定价的分层匹配/Stackelberg博弈: 下层为UEs与 m_n 的匹配博弈, 且 m_n 采用式(20)为切片功率价格, 上层为 m_n 与InPs的Stackelberg博弈且采用式(27)、式(28)作为功率策略及定价。

(b) 随机定价的分层匹配/Stackelberg博弈: 与(a)具有相同博弈结构, m_n 仅采用式(27)功率策略, 上下层不采用式(20)、式(28)功率定价, 而采用随机价格。

(c) 传统分层匹配博弈: 文献[12]中分层匹配博弈, m_n 在上、下层均采用随机功率策略、随机价格。

6.2 下层博弈中, m_n 基于平均信道信息的功率价格

式(28)为完全信息状态下基于局部信道信息最优功率价格, 只能作为上层博弈 m_n 购买功率的价格, m_n 与UEs在下层匹配博弈中处于非完全信息

状态, 无法确定 $\frac{\sum_{n=1}^{N_s} \sqrt{\frac{\lambda_{m,k} \sigma^2}{h_{k,n}^m}}}{N_s}$, $\frac{\sum_{n=1}^{N_s} \sigma^2}{N_s}$, 需要对式(28)进行简化, 找到次优功率价格。

不失一般性, 假定 $\lambda_{m,k}$ 服从均匀分布, $h_{k,n}$ 服从Rayleigh分布, σ^2 服从高斯分布, 且 $\lambda_{m,k}$, $h_{k,n}$, σ^2 相互独立, 则 $\sqrt{\frac{\lambda_{m,k} \sigma^2}{h_{k,n}^m}}$, $\sqrt{\frac{\sigma^2}{h_{k,n}^m}}$ 是已知分布的统计量, $\frac{\sum_{n=1}^{N_s} \sqrt{\frac{\lambda_{m,k} \sigma^2}{h_{k,n}^m}}}{N_s}$, $\frac{\sum_{n=1}^{N_s} \sigma^2}{N_s}$ 分别是均值的无偏估计, N_s 较大

$$\frac{\sum_{n=1}^{N_s} \sqrt{\frac{\lambda_{m,k} \sigma^2}{h_{k,n}^m}}}{N_s} = \sqrt{\frac{\lambda_{m,k} \sigma^2}{h_{k,n}^m}} = \sigma \sqrt{\lambda_{m,k}} \frac{1}{h_{k,n}^m} \approx \sigma \sqrt{\lambda} \sqrt{\frac{1}{h}} \quad (29)$$

$$\frac{\sum_{n=1}^{N_s} \sigma^2}{N_s} = \frac{\sigma^2}{h_{k,n}^m} \approx \sigma^2 \frac{1}{h} \quad (30)$$

当迭代次数增多时, 信道逐渐被遍历, 用统计平均取代局部平均是合理的, 则式(28)可化为

$$\mu_{m,n} = \mu_{m,n}^* = \sqrt{\frac{\lambda_{m,k} h_{k,n}^m}{\sigma^2}} \frac{N_s \sigma \sqrt{\lambda} \sqrt{\frac{1}{h}}}{P + N_s \sigma^2 \frac{1}{h}} \quad (31)$$

即为5.2.2节中定义的 m_n 在下层博弈中基于平均信道信息购买切片功率的价格。

UEs与 m_n 的匹配博弈中, MVNOs处于非完全信息状态, 不可采用式(28)作为功率定价, 但 $\lambda_{m,k}$, $h_{k,n}$ 和 σ^2 都只与匹配对自身相关, $\sqrt{\lambda}$, $\frac{1}{h}$, $\sqrt{\frac{1}{h}}$ 是信道的统计平均特性, 通过系统估计容易获得, 因此, 式(20)作为下层博弈中 m_n 购买切片功率的价格是可行的, 且能够保持匹配对的独立性并分布式实现。特别地, 由式(29)、式(30)可知, 若信道服从统计分布, 式(20)容易与式(28)达到收敛一致状态, 减小层间循环次数, 将信道信息作为功率定价, 进一步提高了跟踪信道能力。

7 稳定条件及实现过程

为了描述分层匹配/Stackelberg博弈的稳定性, 定义匹配阻断集合 $\Psi(k, m_n)$: 设 $\Omega(k, m_n)$ 是UEs与 m_n 1对1匹配形成的既有匹配对集合, 若新

匹配对集合 $\Psi(k, m_n) = \Omega(k, m_n)$ ，则匹配被阻断，达到稳定。

基于信道定价的分层匹配/Stackelberg博弈实现过程如下：

- (1) m_n 均等功率条件下，进行分层博弈；
- (2) m_n 重新分配功率后，进行分层博弈；
- (3) 重复(2)，直至稳定。

8 仿真

考虑用户均匀分布的一个区域，3个MVNOs向1个InP租用资源，向8个UEs提供业务，InP的信道抽象成8个切片，切片到UEs的信道包含大尺度衰落和小尺度衰落，大尺度衰落由 d^{-2} 决定，8个用户的损耗根据距离基站的距离分别为1 (3个)、0.1 (3个)、0.05 (2个)，所有信道的小尺度衰落服从均值相等的Rayleigh衰落，假定任一MVNO可以租用任一切片，但每一切片只能接受1个MVNO，形成24个 m_n ，UEs以随机价格向MVNO购买带宽，一经确定，博弈过程中不再变化。仿真对6.1节中定义的基于信道定价的分层匹配/Stackelberg博弈、随机定价的分层匹配/Stackelberg博弈、传统分层匹配博弈3种策略进行了性能比较。图2比较了3种机制跟踪信道的能力，当信道变化时，本文基于信道定价的分层匹配/Stackelberg博弈上、下层循环迭代2~3次达到稳定，随机定价的分层匹配/Stackelberg博弈则需要3~6次，传统分层匹配博弈百次左右迭代达到稳定占比大概2/10，多数需要更多次循环，因此，图2未画出。可见本文策略跟踪信道能力最好。

为了比较各种机制对频谱效率的改善程度，定义切片功率均等条件下、UEs-MVNOs-InPs不经匹配且信道最坏的情况为最坏情况。图3比较了6.1节定义的3种策略与最坏情况当信道变化时的系统和速率。相比最坏情况，3种匹配机制的系统速率都有较大提高，本文策略的系统速率最优，高出最坏情况大约60%，高出居中的随机定价的分层匹

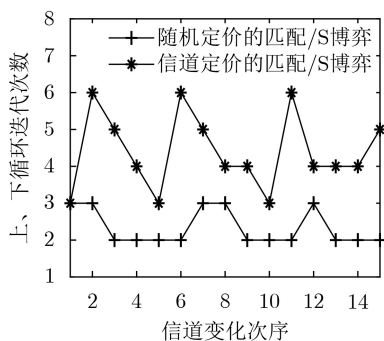


图2 不同价格机制跟踪信道能力比较

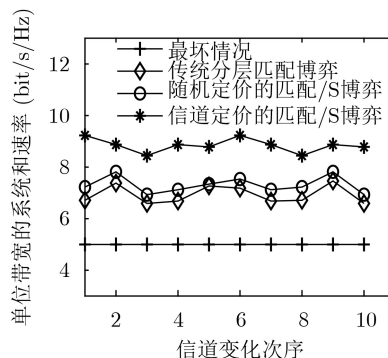


图3 不同机制的和速率比较

配/Stackelberg博弈大约15%，传统分层匹配博弈系统和速率改善最少。

考虑到传统分层匹配博弈价格完全随机，与本文所提机制进行效用比较意义不大，而随机定价的分层匹配/Stackelberg博弈为了保证功率为正，功率价格必须大于某一定值，虽然随机，但有一定范围限制，具有比较价值。因此，图4—图6比较了本文策略与随机定价分层匹配/Stackelberg博弈系统的效用，前者效用明显高于后者。综上所述，本文策略在信道跟踪、系统和速率及效用均优于其他策略。

9 结束语

针对分层博弈策略不能跟踪信道变化以及上、下层循环迭代导致的计算量过大问题，基于用户满

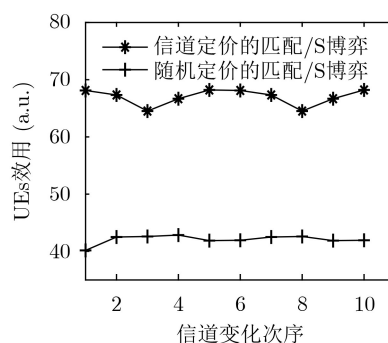


图4 信道定价策略与随机定价策略UEs效用比较

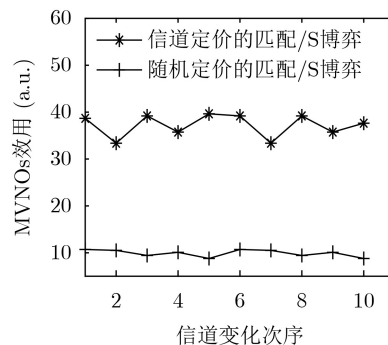


图5 信道定价策略与随机定价策略MVNOs效用比较

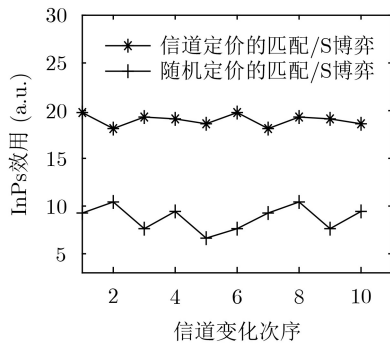


图6 信道定价策略与随机定价策略InPs效用比较

意度、系统带宽收益及切片功率收益建立了3级联合优化模型，进而用分层博弈求解，提出了基于信道定价的匹配/Stackelberg分层博弈机制。通过定义 m_n 及其与UEs的1对1匹配博弈以及与InPs的Stackelberg博弈，实现资源分配，通过信道信息非对称定价 m_n 购买功率价格，跟踪信道，加速收敛。给出了双层循环流程图及稳定条件。仿真表明本文策略在跟踪信道、资源效率、效用方面均优于其他分层博弈策略，为进一步研究高动态、高移动性环境下的无线虚拟网络资源分配策略提供了基础。

参考文献

- [1] LIANG Chengchao and YU F R. Wireless network virtualization: A survey, some research issues and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(1): 358–380. doi: [10.1109/COMST.2014.2352118](https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2352118).
- [2] LIANG Chengchao and YU F R. Wireless virtualization for next generation mobile cellular networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2015, 22(1): 61–69. doi: [10.1109/MWC.2015.7054720](https://doi.org/10.1109/MWC.2015.7054720).
- [3] PARSAEEFARD S, DAWADI R, DERAKHSHANI M, et al. Joint user-association and resource-allocation in virtualized wireless networks[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 2738–2750. doi: [10.1109/ACCESS.2016.2560218](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2560218).
- [4] DAWADI R, PARSAEEFARD S, DERAKHSHANI M, et al. Energy-efficient resource allocation in multi-cell virtualized wireless networks[C]. 2015 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband, Montreal, 2015. doi: [10.1109/ICUWB.2015.7324446](https://doi.org/10.1109/ICUWB.2015.7324446).
- [5] 王汝言, 李宏娟, 吴大鹏. 基于Stackelberg博弈的虚拟化无线传感网络资源分配策略[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(2): 377–384. doi: [10.11999/JEIT180277](https://doi.org/10.11999/JEIT180277).
WANG Ruyan, LI Hongjuan, and WU Dapeng. Stackelberg game-based resource allocation strategy in virtualized wireless sensor network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(2): 377–384. doi: [10.11999/JEIT180277](https://doi.org/10.11999/JEIT180277).
- [6] KOKKU R, MAHINDRA R, ZHANG Honghai, et al. NVS: A substrate for virtualizing wireless resources in cellular networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2012, 20(5): 1333–1346. doi: [10.1109/TNET.2011.2179063](https://doi.org/10.1109/TNET.2011.2179063).
- [7] AL-KHATIB O, HARDJAWANA W, and VUCETIC B. Spectrum sharing in multi-tenant 5G Cellular networks: Modeling and planning[J]. *IEEE Access*, 2018, 7: 1602–1616. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2886447](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2886447).
- [8] NGUYEN D H N, ZHANG Yanru, and HAN Zhu. Contract-based spectrum allocation for wireless virtualized networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(11): 7222–7235. doi: [10.1109/TWC.2018.2865924](https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2865924).
- [9] LIU Bin and TIAN Hui. A bankruptcy game-based resource allocation approach among virtual mobile operators[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(7): 1420–1423. doi: [10.1109/LCOMM.2013.052013.130959](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2013.052013.130959).
- [10] 梁靓, 武彦飞, 冯钢. 基于在线拍卖的网络切片资源分配算法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(5): 1187–1193. doi: [10.11999/JEIT180636](https://doi.org/10.11999/JEIT180636).
LIANG Liang, WU Yanfei, and FENG Gang. Resource allocation algorithm of network slicing based on online auction[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(5): 1187–1193. doi: [10.11999/JEIT180636](https://doi.org/10.11999/JEIT180636).
- [11] ZHU Kun and HOSSAIN E. Virtualization of 5G cellular networks as a hierarchical combinatorial auction[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2016, 15(10): 2640–2654. doi: [10.1109/TMC.2015.2506578](https://doi.org/10.1109/TMC.2015.2506578).
- [12] KAZMI S M A, TRAN N H, HO T M, et al. Hierarchical matching game for service selection and resource purchasing in wireless network virtualization[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(1): 121–124. doi: [10.1109/LCOMM.2017.2701803](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2701803).
- [13] YIN Rui, ZHONG Caijun, YU Guanding, et al. Joint spectrum and power allocation for D2D communications underlying cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(4): 2185–2195. doi: [10.1109/TVT.2015.2424395](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2424395).
- [14] FENG Zhiyong, JI Lei, ZHANG Qixun, et al. A supply-demand approach for traffic-Oriented wireless resource virtualization with testbed analysis[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(9): 6077–6090. doi: [10.1109/TWC.2017.2718527](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2718527).
- [15] ZHANG Xi and ZHU Qixuan. Scalable virtualization and offloading-based software-defined architecture for heterogeneous statistical QoS provisioning over 5G multimedia mobile wireless networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(12): 2787–2804. doi: [10.1109/JSAC.2018.2871327](https://doi.org/10.1109/JSAC.2018.2871327).

曾菊玲：女，1965年生，博士，副教授，硕士生导师，研究方向为新型组网技术及资源分配、能源互联网。

张春雷：男，1992年生，硕士生，方向为新型组网技术及资源分配。

蒋砺思：女，1991年生，博士生，方向为MIMO及新型组网技术。

夏凌：男，1995年生，硕士生，方向为新型组网及资源分配。