

一种人与人和物到物业务共存下的异构蜂窝网络柔性接入策略

田辉* 何雷 马文峰 王聪

(陆军工程大学野战工程学院 南京 210007)

摘要: 针对人与人(H2H)和物到物(M2M)业务共存的异构无线网络, 该文设计了一种根据业务特性的代理节点的网络选择策略, 用博弈论对以保障两类业务服务质量(QoS)需求和网络负载均衡为目标的代理节点网络选择问题进行建模, 并分析了该博弈模型纳什均衡(NE)的存在性和可行性; 同时, 提出了基于学习自动机的分布式网络-信道选择算法(DNCSALA), 求得该博弈的纳什均衡。仿真结果表明, 所提算法能够获得与穷举搜索算法相近的性能, 可满足共存场景中不同类型业务的QoS需求并提高网络资源利用率。

关键词: 异构蜂窝网; H2H和M2M共存; 网络选择; 博弈论

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)08-1918-08

DOI: 10.11999/JEIT190676

A Flexible Network Access Scheme in Heterogeneous Cell Networks with H2H and M2M Coexistence

TIAN Hui HE Lei MA Wenfeng WANG Cong

(College of Field Engineering, Army Engineering University, Nanjing 210007, China)

Abstract: Considering the problem of agents' network selection for Human-to-Human(H2H) and Machine-to-Machine (M2M) traffic in heterogeneous wireless networks, an agents' network selection scheme based on the characteristic of traffic is designed. Game theory is adopted to solve the problem of network selection to satisfy difference in traffic's Quality of Service (QoS) requirements. The existence and feasibility of the Nash Equilibrium (NE) of the proposed game are also analyzed. Then, a Distributed Network-Channel Selection Algorithm based on Learning Automata (DNCSALA) is presented to obtain the NE of the proposed game. In simulations, the proposed algorithm can achieve a near optimal performance compared to the exhaustive search, satisfy the QoS requirements of different types of traffic, and improves the efficiency of network resources.

Key words: Heterogeneous cell networks; Human-to-Human(H2H) and Machine-to-Machine(M2M) coexistence; Network selection; Game theory

1 引言

未来5G网络包含了多种不同类型的无线接入技术的异构网, 如LTE, WCDMA, TD-SCDMA以及WiFi等^[1,2]。此外, 网络中的节点类型也是异构的, 除了包含传统的人类型通信(Human-Type Communications, HTC)用户以外, 还有海量的机器类型通信(Machine-Type Communications, MTC)设备。由于人与人(Human-to-Human, H2H)和物到物(Machine-to-Machine, M2M)两类业

务特性各异, 所以其服务质量(Quality of Service, QoS)需求也有很大的差异^[3,4]。因此在这种异构网络环境下, 如何保证类型各异节点的QoS需求已经成为5G网络中一个亟待解决的问题。

在研究异构网络中的QoS保障问题中, 首先要解决的问题就是选择哪个网络接入, 即网络选择问题。学者们已经设计了很多网络选择算法^[5-9], 如基于概率的网络选择算法^[5,6]、在线的网络选择算法^[7]、基于服务时间的网络选择算法^[8]以及基于潜博弈的网络选择算法^[9]等。然而, 这些研究成果都是针对H2H通信, 没有考虑M2M通信的特点, 因此这些已有的网络选择算法无法直接应用到H2H和M2M业务共存下的网络选择问题。

在M2M通信中, 也有很多学者研究在异构网络中如何设计有效的策略来保证不同类型MTC设备的QoS需求^[10-14]。其中, 文献^[10]提出了一种异

收稿日期: 2019-09-03; 改回日期: 2020-02-16; 网络出版: 2020-03-12

*通信作者: 田辉 jaytianhui@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61771486, 61671472), 江苏省博士后科研资助计划项目(2019K090)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61771486, 61671472), Jiangsu Planned Projects for Postdoctoral Research Funds (2019K090)

构蜂窝网络中基于组的MTC设备随机接入资源分配策略。文献[11]研究了异构网络中MTC设备和HTC用户共存场景下的下行用户分配问题,提出了一种基于博弈论的用户分配策略。文献[12]设计一种上行异构蜂窝小区间协调准入控制和调度策略,提升MTC设备的传输成功概率,降低HTC用户的阻塞概率。文献[13]设计了一种异构网络中针对M2M业务的自适应速率分配策略,以满足不同M2M业务类型的QoS需求。针对M2M异构网络,文献[14]设计了一种基于喷泉码的协同策略,实现节点的最小速率保障。然而,这些文献所提出的策略不能用于解决通过选择不同异构网络接入以保障H2H和M2M两类业务QoS需求的问题。此外,由于MTC设备受到能力和尺寸的限制,无法在一个MTC设备上实现接入多个网络的功能。然而在实际应用过程中,一个MTC设备会产生多种类型的M2M业务,不同M2M业务的QoS需求存在较大的差异。因此,很有必要设计一种能够在MTC设备上实现的网络选择机制,该机制能够根据M2M业务特性选择不同网络传输。

针对上述问题,本文首先考虑一种异构分层无线网络架构,利用代理节点辅助HTC用户和MTC设备进行网络选择:HTC用户和MTC设备首先将业务发送至代理节点,代理节点根据接收到业务的不同QoS需求选择不同的网络-信道接入。然后,利用博弈论对代理节点柔性接入问题进行建模分析,并分析了构建的博弈模型纳什均衡的存在性和可行性;同时,提出了基于学习自动机的分布式网络-信道选择算法(DNCSALA),来获得博弈的纳什均衡,并分析了本算法的收敛性。仿真结果表明,所提算法在最大化全网和收益的同时,还能够满足两类业务的QoS需求以及均衡网络负载。

2 异构分层网络模型

在一个异构分层网络包含 N 个异构无线接入网络、 M 个代理节点和很多个末端接入节点。为了降低HTC用户和MTC设备之间的干扰,以及考虑到MTC设备功能和设备形态的限制,异构分层网络采用基于代理接入的资源分配方式。将1个代理节点以及多个HTC用户和MTC设备构成一个组。在组内,代理节点负责根据其他节点的需求选择合适的网络资源。假设网络已经预先选定了 M 个代理节点。而代理节点与末端接入节点之间可通过距离和业务类型划分组,具体方法不在本文的讨论范围内。

异构无线接入网络集合表示为 $\mathcal{N}=\{1, 2, \dots, N\}$,代理节点集合表示为 $\mathcal{M}=\{1, 2, \dots, M\}$ 。假设每个异构无线接入网络都具有多个带宽不同的信道,令

K_j 表示异构无线接入网络 $j(\forall j \in \mathcal{N})$ 具有的信道数目,而该网络的信道集合可表示 $\mathcal{K}_j = \{1, 2, \dots, K_j\}$ 。假设网络资源受限,每个异构无线接入网络只能为接入节点分配一个信道,每个信道可考虑同时服务多个代理节点。令 CH_k^j 表示网络 $j \in \mathcal{N}$ 的第 $k \in \mathcal{K}_j$ 个信道, S_k^j 表示信道 CH_k^j 能够同时服务代理节点的数目。在信道模型中, γ 表示路径衰落因子,代理节点 $i(\forall i \in \mathcal{M})$ 与网络 $j(\forall j \in \mathcal{N})$ 之间的信道增益表示为 h_{ij} ,代理节点 i 与网络 j 之间噪声 n_{ij} 可建模为独立、0均值、方差为 σ_{ij}^2 的加性高斯白噪声。

3 异构网络的柔性接入问题

代理节点负责为其组内节点选择合适的网络-信道,以满足组内节点业务的QoS需求,均衡网络负载。我们定义代理节点这种网络选择的方式为柔性接入。在异构网络的柔性接入中,每个代理节点首先需要将业务对所选的网络-信道满意程度进行量化。为此,定义满意度为代理节点所获得的无线资源与业务QoS需求之间的背离程度。满意度的取值范围为 $[0, 1]$,其中满意度为0,表示没有资源分配给该业务。而满意度为1,则表示获得的无线资源能够非常好地满足业务的需求。

根据业务对无线资源需求¹⁾以及文献[11,15]的相关结果,可以将共存场景中的业务划分成两大类:柔性业务和刚性业务。针对柔性业务,代理节点的满意度具备如下特征:业务满意度随着分配带宽的增加,呈现线性或指数形式增长趋势。这与传统的业务特性非常符合,因此柔性业务主要是指传统的H2H业务,如视频在线播放、上网、下载文件等业务。而针对刚性业务,代理节点的满意度具备两个特征:(1)随着分配带宽的增加,满意度呈现阶跃式增长趋势,一旦分配的带宽能够满足节点需求之后,满意度迅速增加;(2)随着分配资源继续增加,满意度提升缓慢。这一特征与M2M业务非常符合,因此刚性业务主要是指M2M业务,如智能电网、远程医疗以及跟踪与定位等。

为了方便数学分析,需要用数学表达式给出业务满意度与分配的无线资源之间关系。对于刚性业务,代理节点的满意度函数 $\text{Sa}^r(b)$ 可表示为

$$\text{Sa}^r(b) = (b/b_{\text{req}})^\kappa / [1 + (b/b_{\text{req}})^\kappa] = b^\kappa / (b_{\text{req}}^\kappa + b^\kappa) \quad (1)$$

其中, b 为分配的带宽大小, b_{req} 为该业务所需的带宽值,即门限值。 κ 为曲线陡峭因子, κ 越大,曲线越陡。

对于柔性业务,借鉴文献[16]的优化问题数学建模思想,代理节点的满意度函数 $\text{Sa}^f(b)$ 可表示为

¹⁾本文中主要考虑业务对带宽资源的需求。

$$\text{Sa}^f(b) = \ln(1+b)/\ln(1+b_{\max}) \quad (2)$$

其中, b_{\max} 表示整个异构网络中所有信道的带宽最大值。

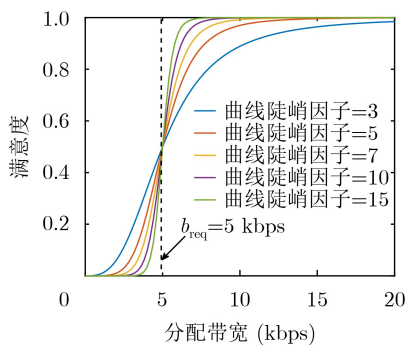
下面分析上述两个数学模型的合理性。图1(a)给出了刚性业务的满意度随分配带宽变化的仿真曲线图。从中可知,当分配带宽小于5 kbps时,满意度很低。当分配带宽一旦大于业务所需的带宽值5 kbps时,满意度快速增长。而后继续增加分配带宽,满意度增加缓慢。同时,通过调整曲线陡峭因子的数值,可以改变曲线的增长率,可是适应多种类型的刚性业务特性。故可以得到,所设计的函数模型能够满足刚性业务满意度特征。如图1(b)给出了柔性业务的满意度随分配带宽变化的仿真曲线图。从中可知,满意度随着分配带宽的增加而不断的增长,说明所设计的函数模型能够满足刚性业务满意度。同时,仿真中的满意度曲线增长率是前快后慢,激励用户采用效率更高的方式使用带宽资源,即用小带宽获得较高满意度,可促进网络的负载均衡。综上所述,设计的两种满意度函数模型是能够满足刚性和柔性业务特性需求。

不失一般性,假设代理节点 $i(\forall i \in \mathcal{M})$ 选择信道 $\text{CH}_k^j(\forall j \in \mathcal{N}, \forall k \in \mathcal{K})$ 。将代理节点 i 选择信道 CH_k^j 的收益表示为 $\text{Payoff}_{i,j,k}$,其表达式为

$$\text{Payoff}_{i,j,k} = \text{Sa}_{i,j,k} \log_2 \left(1 + P_i |h_{i,j}|^2 / \sigma_{i,j}^2 \right) / n_k^j - g_k^j b_{i,j,k} \quad (3)$$

其中, $\text{Sa}_{i,j,k}$ 表示代理节点 i 的满意度之和, n_k^j 表示选择信道 CH_k^j 的代理节点数目, P_i 为代理节点 i 的发送功率, $b_{i,j,k}$ 为代理节点 i 选择信道 CH_k^j 后所获得的带宽。假设在代理节点 i 中存在 W_1^i 种刚性业务和 W_2^i 种柔性业务,因此, $\text{Sa}_{i,j,k}$ 可表示为

$$\text{Sa}_{i,j,k} = \sum_{s=1}^{W_1^i} \left\{ (b_{i,j,k})^\kappa / [b_{s,i,\text{req}}^\kappa + (b_{i,j,k})^\kappa] \right\} + W_2^i \ln(1+b_{i,j,k}) / \ln(1+b_{\max}) \quad (4)$$



(a) 刚性业务满意度随分配带宽变化仿真图

其中, $b_{s,i,\text{req}}$ 表示代理节点 i 中第 s 个刚性业务所需的带宽值。式(4)的第1项表示针对所有刚性业务代理节点 i 的满意度之和,第2项表示所有柔性业务满意度之和。因此,所有业务的满意度越高,代理节点的收益也就越高。

式(3)中的参数 g_k^j 表示信道 CH_k^j 的价格,其计算公式为

$$g_k^j = \left[\ln(1+r_{kj}n_k^j) \right] / \left[\beta \ln(1+C_k^j) \right] \quad (5)$$

其中, r_{kj} 表示信道 CH_k^j 所能达到的最大传输速率, β 为常数。信道 CH_k^j 的价格将随着选择该信道的代理节点数目增加而提高。因此,利用这个价格机制,迫使代理节点选择节点数目较少的信道,从而达到均衡网络负载的目的。根据价格机制,定义反映整个网络资源利用效率的负载均衡指数为LB,可表示为

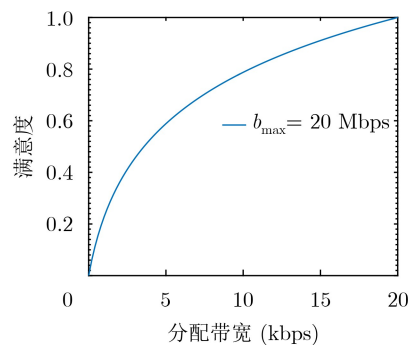
$$\begin{aligned} \text{LB} &= 1 / \left[\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{K_j} \frac{1}{M} (n_k^j - \bar{n})^2 \right] \\ &= M / \left[\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{K_j} (n_k^j - \bar{n})^2 \right] \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $\bar{n} = M / \sum_{j=1}^N K_j$ 表示每个信道上的平均代理节点数目。根据式(6)可知, LB越大,网络的负载均衡性能越好。

从式(3)–式(5)可以看出,代理节点愿意选择那些既能够满足其业务需求又能够降低花费的信道接入。全网和收益可以定义为

$$u_{\text{sum}} = \sum_{i \in \mathcal{M}} \sum_{j \in \mathcal{N}} \sum_{k \in \mathcal{K}_j} \text{Payoff}_{i,j,k} \quad (7)$$

注意如果代理节点选择信道 CH_k^j ,那么 $\text{Payoff}_{i,\tilde{j},\tilde{k}} = 0(\forall \tilde{j} \in \mathcal{N}, \tilde{k} \in \mathcal{K}_{\tilde{j}}, \tilde{j} \neq j, \tilde{k} \neq k)$ 。为了提高整个网络的性能,这里将柔性接入问题重新定义为:每个代理节点都在以最大化 u_{sum} 为目标,且符



(b) 柔性业务满意度随分配带宽变化仿真图

图1 刚性业务与柔性业务满意度随分配带宽变化仿真图

合网络资源限制下,选择网络-信道接入,在满足各自组内业务QoS需求的同时,均衡网络负载,进一步提高网络资源利用率。它可以正式地表示为

$$\left. \begin{aligned} & \max u_{\text{sum}}, \\ & \text{s. t. } \text{Co}_k^j : n_k^j \leq S_k^j, \\ & \quad \forall j, k, 1 \leq j \leq N, 1 \leq k \leq K_j \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中, $\text{Co}_k^j (\forall j \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{K}_j)$ 表示选择信道 CH_k^j 的代理节点数目约束条件。

4 代理节点的异构网接入博弈

4.1 问题建模

博弈论是求解基于竞争优化问题的一种有效的工具。本节中将详细阐述利用博弈论对柔性接入问题式(8)进行建模分析。首先介绍几个符号的定义。将代理节点 i 的选择策略表示为 s_i , 其中 $s_i = \text{CH}_k^j$ 表示代理节点 i 选择信道 CH_k^j 。 s_{-i} 表示为除代理节点 i 外所有其他代理节点的选择策略。由于很难提前知道哪些策略组合是不可行的, 所以 u_{sum} 不能直接作为每个代理节点的收益函数。受文献[17]中博弈模型的启发, 可将代理节点 i 的收益函数定义为

$$\begin{aligned} u_i(s_i, s_{-i}) &= u_{\text{sum}} + \sum_{j \in \mathcal{N}} \sum_{k \in \mathcal{K}_j} \xi \Theta \\ & \cdot \left(S_k^j - \sum_{i \in \mathcal{M}} \delta(s_i - \text{CH}_k^j) \right) \\ &= u_{\text{sum}} + \sum_{j \in \mathcal{N}} \sum_{k \in \mathcal{K}_j} \xi \Theta \left(S_k^j - n_k^j \right) \end{aligned} \quad (9)$$

其中, 函数 $\Theta(x)$ 被定义为: 当 $x < 0$ 时, $\Theta(x) = x$; 当 $x \geq 0$ 时, $\Theta(x) \geq x$ 。 ξ 为一个非负常数。为了确保当 $n_k^j > S_k^j$ 时, 代理节点 i 的收益小于 0, 所以 ξ 被设置成一个很大的数值。 $\delta(x)$ 为冲激函数, 注意 $\sum_{i \in \mathcal{M}} \delta(s_i - \text{CH}_k^j) = n_k^j$ 。式(9)等号后面的第 2 项表示式(8)的约束条件。

然后, 代理节点的异构网接入博弈可定义为

$$\mathcal{G} = [\mathcal{M}, \{\mathcal{S}_i\}_{i \in \mathcal{M}}, \{u_i\}_{i \in \mathcal{M}}] \quad (10)$$

其中, \mathcal{M} 表示博弈的参与者, 即所有代理节点。 \mathcal{S}_i 表示代理节点 i 网络-信道选择策略集合, 则有 $\mathcal{S}_i = \{\text{CH}_0^0, \text{CH}_1^1, \dots, \text{CH}_{K_1}^1, \dots, \text{CH}_1^N, \dots, \text{CH}_{K_N}^N\}$ 。注意 $s_i = \text{CH}_0^0$ 表示代理节点 i 没有选择任何信道接入。由于 $u_i = u_e, \forall i, e \in \mathcal{M}$, 所以博弈 \mathcal{G} 具有共同的收益函数。这里假设所有参与者都是理性的, 自私的, 且非合作的, 都是以最大化收益函数为目标来选择策略。

当 $s_i = \text{CH}_k^j$ 时, 设函数 $\mathcal{V}(s_i, s_{-i})$ 定义为

$$\mathcal{V}(s_i, s_{-i}) = u_{\text{sum}} + \xi \left[\Theta(S_k^j - n_k^j) - \Theta(S_k^j - n_k^j + 1) \right] \quad (11)$$

定理 1 \mathcal{G} 是一个潜博弈, 其潜函数为 \mathcal{V} 。

证明 假设 $s_i = \text{CH}_k^j$ 和 $s'_i = \text{CH}_{k'}^{j'}$ 分别是代理节点 i 的任意两个不相同的策略。那么, 对于 $\forall s_{-i} \in \mathcal{S}_i$, 都有

$$\begin{aligned} & u_i(s_i, s_{-i}) - u_i(s'_i, s_{-i}) \\ &= u_{\text{sum}} + \sum_{j \in \mathcal{N}} \sum_{k \in \mathcal{K}_j} \xi \Theta(S_k^j - n_k^j) - u'_{\text{sum}} \\ & \quad - \sum_{j' \in \mathcal{N}} \sum_{k' \in \mathcal{K}_{j'}} \xi \Theta(S_{k'}^{j'} - n_{k'}^{j'}) \\ &= u_{\text{sum}} + \xi \Theta(S_k^j - n_k^j) + \xi \Theta(S_{k'}^{j'} - n_{k'}^{j'}) \\ & \quad - u'_{\text{sum}} - \xi \Theta(S_k^j - n_{k'}^{j'}) - \xi \Theta(S_{k'}^{j'} - n_{k'}^{j'}) \end{aligned} \quad (12)$$

其中, n_k^j 和 $n_{k'}^{j'}$ 分别表示当网络-信道选择策略组合为 (s_i, s_{-i}) 时, 选择信道 CH_k^j 和 $\text{CH}_{k'}^{j'}$ 的代理节点数目。 $n_{k'}^{j'}$ 和 n_k^j 分别表示当网络-信道策略组合为 (s'_i, s_{-i}) 时, 选择信道 CH_k^j 和 $\text{CH}_{k'}^{j'}$ 的代理节点数目。由于 $n_k^j = n_{k'}^{j'} + 1$ 和 $n_{k'}^{j'} = n_k^j + 1$, 因此式(12)可以进一步表示为

$$u_i(s_i, s_{-i}) - u_i(s'_i, s_{-i}) = \mathcal{V}(s_i, s_{-i}) - \mathcal{V}(s'_i, s_{-i}). \quad (13)$$

根据文献[18]对于潜博弈的定义, 可以得出定理1中的结论。 证毕

4.2 纳什均衡分析

本节将分析博弈 \mathcal{G} 纳什均衡的存在性和可行性。首先根据文献[18]中潜博弈的性质可知, 当一个博弈模型被证明为是有限顺序潜博弈时, 该博弈一定至少存在一个纯策略纳什均衡。因此定理1的物理意义在于确定了博弈 \mathcal{G} 是可以求解的, 因为博弈 \mathcal{G} 是一个有限顺序潜博弈, 所以该博弈模型一定会存在一个纯策略纳什均衡。下面分析博弈 \mathcal{G} 的纳什均衡和帕累托最优之间关系。

引理 1 能够最大化 u_i 的策略组合一定是博弈 \mathcal{G} 的一个可行的帕累托最优纳什均衡, 如果 $\sum_{j \in \mathcal{N}} \sum_{k \in \mathcal{K}_j} S_k^j \geq M$ 。

证明 假设最大化 u_i 的策略组合为 $\{s_i^0\}_{i \in \mathcal{M}} \subset \{\mathcal{S}_i\}_{i \in \mathcal{M}}$ 。对于某一个 e , $u_e(s_e, s_{-e}) > u_e(s_e^0, s_{-e}^0)$ 。很明显, 不存在其他策略组合 $\{s_i\}_{i \in \mathcal{M}} \subset \{\mathcal{S}_i\}_{i \in \mathcal{M}}$ 满足 $u_i(s_i, s_{-i}) \geq u_i(s_i^0, s_{-i}^0), \forall i \in \mathcal{M} \setminus e$ 。

因此, 没有一个代理节点在不减少其他代理节点收益的情况下, 能够增加自己的收益。根据文献[18]对帕累托最优的定义可知, 策略组合 $\{s_i^0\}_{i \in \mathcal{M}}$ 为博弈 \mathcal{G} 的一个帕累托最优解。此外, 对于任意 $i \in \mathcal{M}$, 如果 $s'_i \in \mathcal{S}_i, s'_i \neq s_i^0$ 是代理节点的另一个策略, 则可以得到 $u_i(s'_i, s_{-i}^0) < u_i(s_i^0, s_{-i}^0)$ 。

也就是说, 对于任意一个代理节点, 如果它单方面地更改自己的策略, 那么它无法获得高于策略

组合 $\{s_i^o\}_{i \in \mathcal{M}}$ 的收益。根据文献[18]中纳什均衡的定义,网络-信道选择策略组合 $\{s_i^o\}_{i \in \mathcal{M}}$ 也是博弈 \mathcal{G} 的一个纳什均衡。很明显,当 $\sum_{j \in \mathcal{N}} \sum_{k \in \mathcal{K}_j} S_k^j \geq M$ 时,可以直接得到 $u_i(s_1^o, s_2^o, \dots, s_M^o) \geq 0$ 。根据式(9)的定义,策略组合 $\{s_i^o\}_{i \in \mathcal{M}}$ 也是一个可行解。所以引理1得证。

引理1的物理意义在于找到了纳什均衡与帕累托最优之间的联系,在应用过程中,通过求解最佳收益的纳什均衡就可以获得整个优化问题的最优解,从而保证博弈 \mathcal{G} 解的最优性。如果对于优化问题式(8)没有约束条件,那么博弈 \mathcal{G} 的每一个纳什均衡都能作为它的一个解。然而,对于任意一个纳什均衡很难判断是否一定满足约束条件。这个问题就是纳什均衡的可行性问题。本节的接下来部分将对这个问题进行讨论。

引理2 不满足约束条件 $\{Co_k^j | \forall j, k, j \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{K}_j\}$ 的策略组合不是博弈 \mathcal{G} 的纳什均衡,如果 $\xi > \xi_{th}$,其中, ξ_{th} 为单个代理节点网络-信道选择带来的最大收益,其表达式为 $\xi_{th} = \max_{i \in \mathcal{M}, s_i \in \mathcal{S}_i} \{u_{sum}(s_i, s_{-i}) - u_{sum}(0, s_{-i})\}$ 。

证明 假设策略组合 $\{s_i\}_{i \in \mathcal{M}}$ 是一个违背约束条件 $\{Co_k^j | \forall j, k, j \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{K}_j\}$ 的纯策略纳什均衡。则 $s_i \neq CH_0^j$,且 $u_i(s_i, s_{-i}) < 0, \forall i \in \mathcal{M}$ 。

设策略组合 $\{s_i\}_{i \in \mathcal{M}}$ 不满足约束条件 Co_k^j 。根据定理1,对于该策略组合中任意一个策略 $s_i = CH_k^j \neq CH_0^j$,则有

$$\begin{aligned} & u_i(s_i, s_{-i}) - u_i(0, s_{-i}) \\ &= \mathcal{V}(s_i, s_{-i}) - \mathcal{V}(0, s_{-i}) \\ &= u_{sum}(s_i, s_{-i}) - u_{sum}(0, s_{-i}) \\ &+ \xi \left(S_k^j - \sum_{ii \in \mathcal{M}} \delta(s_{ii} - CH_k^j) \right) \\ &- \xi \left(S_k^j - \sum_{ii \in \mathcal{M}, ii \neq i} \delta(s_{ii} - CH_k^j) \right) \quad (14) \end{aligned}$$

下面分两种情况讨论式(14)的化简。首先,根据假设 $S_k^j < \sum_{ii \in \mathcal{M}} \delta(s_{ii} - CH_k^j)$,如果 $S_k^j < \sum_{ii \in \mathcal{M}, ii \neq i} \delta(s_{ii} - CH_k^j)$,那么 $\sum_{ii \in \mathcal{M}} \delta(s_{ii} - CH_k^j) - \sum_{ii \in \mathcal{M}, ii \neq i} \delta(s_{ii} - CH_k^j) = 1$ 。所以式(14)可以进一步表示为: $u_i(s_i, s_{-i}) - u_i(0, s_{-i}) = u_{sum}(s_i, s_{-i}) - u_{sum}(0, s_{-i}) - \xi$ 。所以,当 $u_{sum}(s_i, s_{-i}) - u_{sum}(0, s_{-i}) < \xi$ 时,有 $u_i(s_i, s_{-i}) - u_i(0, s_{-i}) < 0$ 。

对于第2种情况,如果 $\sum_{ii \in \mathcal{M}, ii \neq i} \delta(s_{ii} - CH_k^j) \leq S_k^j < \sum_{ii \in \mathcal{M}} \delta(s_{ii} - CH_k^j)$,则有 $S_k^j = \sum_{ii \in \mathcal{M}, ii \neq i} \delta(s_{ii} - CH_k^j)$ 。在这种情况下,式(14)可简化为

$$\begin{aligned} & u_i(s_i, s_{-i}) - u_i(0, s_{-i}) \\ &= u_{sum}(s_i, s_{-i}) - u_{sum}(0, s_{-i}) \\ &+ \xi \left(S_k^j - \sum_{ii \in \mathcal{M}} \delta(s_{ii} - CH_k^j) \right) \\ &= u_{sum}(s_i, s_{-i}) - u_{sum}(0, s_{-i}) - \xi \quad (15) \end{aligned}$$

类似地,当 $u_{sum}(s_i, s_{-i}) - u_{sum}(0, s_{-i}) < \xi$ 时,有 $u_i(s_i, s_{-i}) - u_i(0, s_{-i}) < 0$ 。

综上所述,对于以上两种情况都有,当 $u_{sum}(s_i, s_{-i}) - u_{sum}(0, s_{-i}) < \xi$,都有 $u_i(s_i, s_{-i}) - u_i(0, s_{-i}) < 0$ 。然而这一结论与纳什均衡的定义相矛盾。因此,假设不成立,即 $\{s_i\}_{i \in \mathcal{M}}$ 不是纳什均衡。当网络-信道选择策略组合不满足其他约束条件时,其证明过程类似。因此,该引理得证。

从引理2中,可以看出,当 $\xi > \xi_{th}$ 时,博弈 \mathcal{G} 的纯策略纳什均衡一定满足约束条件 $\{Co_k^j | \forall j, k, j \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{K}_j\}$,即为可行的纳什均衡。因此, ξ_{th} 可认为是纳什均衡可行的参数 ξ 门限值。引理2的物理意义在于判定满足约束条件下博弈 \mathcal{G} 解空间的方法,在应用过程中,通过一种简单方法可判定纳什均衡可行性,或者说,通过调整参数 ξ ,可使所有纳什均衡都成为可行的解。

5 基于学习自动机的分布式网络选择算法

本文设计一种基于学习自动机的分布式网络-信道选择算法(Distributed Network-Channel Selection Algorithm based on Learning Automata, DNCSALA),利用有限反馈信息获得纳什均衡,无需要全局信息和一个中心控制器,可实现性较大。

假设基站能够获得所有代理节点的信道信息 $\{h_{ij}\}_{\forall i \in \mathcal{M}, \forall j \in \mathcal{N}}$,而所有代理节点却不知道。为了应用学习算法,本文将博弈 \mathcal{G} 拓展成一个混合策略形式。设 ψ_i 为代理节点 i 的混合策略,而 $\mathbf{p}_i = \{p_{i0}^0, p_{i1}^1, \dots, p_{iK_1}^1, \dots, p_{i1}^j, \dots, p_{iK_j}^j, \dots, p_{i1}^N, \dots, p_{iK_N}^N\}$ 表示对应策略的概率分布,其中 p_{ik}^j 表示代理节点 i 选择信道 CH_k^j 的概率。

如果混合柔性接入博弈是相继轮流迭代的,那么该博弈也可以建模成由学习自动机构成的随机博弈。每一个代理节点代表了一个学习自动机,自动机的行为就是代理节点的网络-信道策略。 $\mathbf{p}_i(t) = \{p_{i0}^0(t), p_{i1}^1(t), \dots, p_{iK_1}^1(t), \dots, p_{i1}^j(t), \dots, p_{iK_j}^j(t), \dots, p_{i1}^N(t), \dots, p_{iK_N}^N(t)\}$ 表示第 i 个自动机在 t 时刻的行为概率分布。第 i 个自动机的归一化收益函数,记为 $\gamma_i(t)$ 。设 $\gamma_i(t) = \alpha u_i(t)$,其中 $u_i(t)$ 表示第 i 个自动机在 t 时刻的收益函数,而 $0 < \alpha < 1$ 是一个确保反应函数位于区间 $[0, 1)$ 的参数。在每次迭代过程中,每个自动机根据自己当前时刻的行为概率分布,选择一个行

动。在获得反应函数后，自动机更新行为概率分布。每个自动机不停地重复这个过程，直至某一行为的概率为1或者接近1。算法的详细内容如表1所示。

由于博弈 \mathcal{G} 具有共同的收益函数，根据文献[19]中的定理4.1，如果步长 ζ^s 足够小，DNCSALA能够收敛到一个纳什均衡。当存在多个纳什均衡时，可重复运行DNCSALA，选择收益最高的那个纳什均衡作为博弈 \mathcal{G} 的解。在传统的学习自动机算法中，步长 ζ^s 是一个预先设定的常数，其大小对收敛速度具有很大的影响。步长值越大，收敛速度越大，但是会导致与最优解之间的差距变大。本文设计一种自适应调整步长机制来增加收敛速度。该机制的主要思想是：在迭代初期采用小步长，随着迭代次数的增加，步长的大小也在增加。

6 仿真结果分析

在仿真过程中，考虑将功能相近且距离较近的节点分为一组。因此，仿真中有理由假设1个代理节点只发送1种类型的业务。那么，按照发送业务的类型，网络中的代理节点可划分成两类：柔性代理节点(Flexible Agent Node, FAN)和刚性代理节点(Rigid Agent Node, RAN)。令 M_f 表示柔性代理节点的数目， M_r 表示刚性代理节点的数目。仿真中的其他参数设置如下：假设仿真区域为100 m×100 m矩形场景内，异构无线接入网络的数目 N 为3，每个网络中能够提供接入信道的数目为2，其中6个信道的归一化带宽为{0.5, 0.9, 0.5, 0.8, 1, 0.6}。每个信道的服务能力为3。路径损耗因子 $\Upsilon=4$ ，且 $\beta=10$ 。假设所有代理节点都采用相同的发射功率 P ，那么在发送端的平均信噪比(SNR) $\gamma^{\text{ave}}=P/\sigma^2$ 。为了对比所提算法的性能，仿真中采用几种对比算法：NSSL算法是指文献[9]设计的采用随机学习的网络选择算法。在该算法中，用户以最大化吞吐量和均衡网络负载为目的来选择信道。ES算法是指

穷举搜索算法。RS算法表示随机选择算法。本节所有仿真结果都是通过MATLAB仿真软件采用获得蒙特卡洛仿真方法所获得。

图2给出了代理节点的行为概率进化曲线图。其中，对于自适应步长仿真场景中，相关参数设置如下：迭代40次内的步长 $\zeta_1^s=0.1$ ，迭代40次至90次内的步长为 $\zeta_2^s=0.2$ ，之后的步长为 $\zeta_3^s=0.3$ 。图2表明，DNCSALA具有很好的收敛性能。从这些结果可知，步长越大，收敛速度越快。此外，当DNCSALA采用不同的步长时，即使在同一个信道状态条件下，该算法也会收敛到不同的纳什均衡。

图3描述了不同算法的全网和收益性能对比曲线图。其中，与NSSL算法相比，本文所提算法在全网和收益方面能够获得更好的性能。此外，随着 γ^{ave} 的增加，NSSL算法与本文所提的算法之间的性能差异会越来越大。由于没有利用任何信息，RS算法的性能最差。对于DNCSALA，由于大多数情况下都会存在多个纳什均衡，当步长 ζ^s 增加以后，该算法容易错过最优或近似最优的纳什均衡。所以，DNCSALA的性能会随着步长 ζ^s 的增加而降低。

图4描述了针对不同算法下针对两种业务传输时代理节点的满意度对比图。从中可知，DNCSALA获得的满意度最高，能够保证两类业务的QoS。而没有利用任何信息的RS算法满意度最低。由于一旦满足刚性业务的带宽需求，代理节点的满意度增加非常快。因此，对于这3种算法，在传输刚性业务时，代理节点获得的满意度要高于传输柔性业务所获得的满意度。

图5给出了不同算法的负载均衡指数对比图。根据式(6)可知，负载均衡指数LB也可看作每个信道上代理节点数目方差的倒数。所以，当每个信道上的代理节点数目越接近平均值 \bar{n} ，LB越大。从图5可知，由于采用信道价格机制，DNCSALA以及穷

表 1 基于学习自动机的分布式网络选择算法(DNCSALA)

- (1) 首先，初始化每个代理节点第0时刻的行为概率分布 $\mathbf{p}_i^j(0)$ 为 $\mathbf{p}_i^j(0) = 1 / \left(1 + \sum_{j \in \mathcal{N}} K_j \right)$, $\forall i \in \mathcal{M}, j \in \mathcal{N}$ 。每一个代理节点根据自己的行为概率分布 $\mathbf{p}_i(0)$ 选择一个行为²⁾;
- (2) 在每一个时刻 $t > 0$ ，每一个代理节点都根据当前时刻的概率分布 $\mathbf{p}_i(0)$ 选择一个行为 $(s_i(t))$;
- (3) 基站根据所有代理节点的行为，计算出收益，并将其广播给所有代理节点;
- (4) 在获得反应函数之后，每一个代理节点根据式(16)，更新自己的行为概率分布，其中 $0 < \zeta^s < 1$ 表示步长参数；
$$\left. \begin{aligned} p_{ik}^j(t+1) &= p_{ik}^j(t) - \zeta^s \gamma_i(t) p_{ik}^j(t), & s_i(t) &\neq \text{CH}_{ik}^j \\ p_{ik}^j(t+1) &= p_{ik}^j(t) + \zeta^s \gamma_i(t) (1 - p_{ik}^j(t)), & s_i(t) &= \text{CH}_{ik}^j \end{aligned} \right\} \quad (16)$$
- (5) 如果对于任意 $i \in \mathcal{M}$ ，其行为概率分布存在一个元素接近1，确切地说等于0.99，那么算法停止。否则，跳转到步骤(2)。

²⁾每一个代理节点按照其行为概率分布将0~1区间范围内，划分成不同的区域，其中每个行为对应的区域大小等于其概率。然后，代理节点产生一个0和1之间的随机数，选择随机数位于区域所对应的行为。

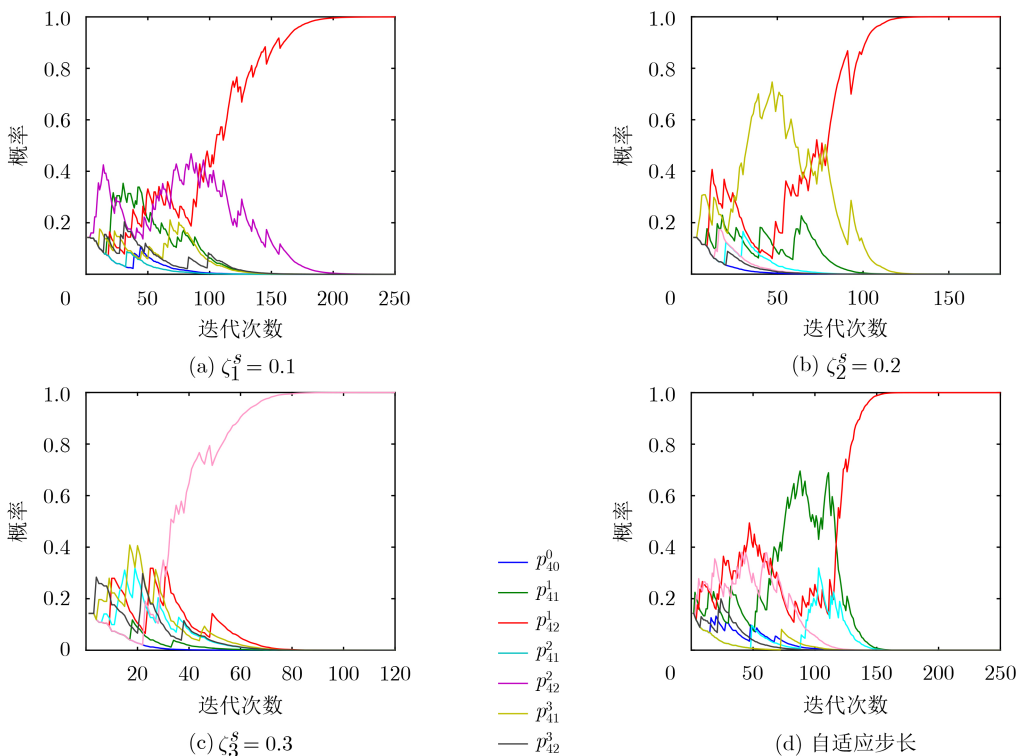


图2 DNC SALA中刚性代理节点4的行动概率进化曲线图, ($\gamma^{ave} = 5$ dB, $M_f = 4$, $M_r = 4$, $\mathbf{b}_{req} = \{0.5, 0.6, 0.7, 0.7\}$)

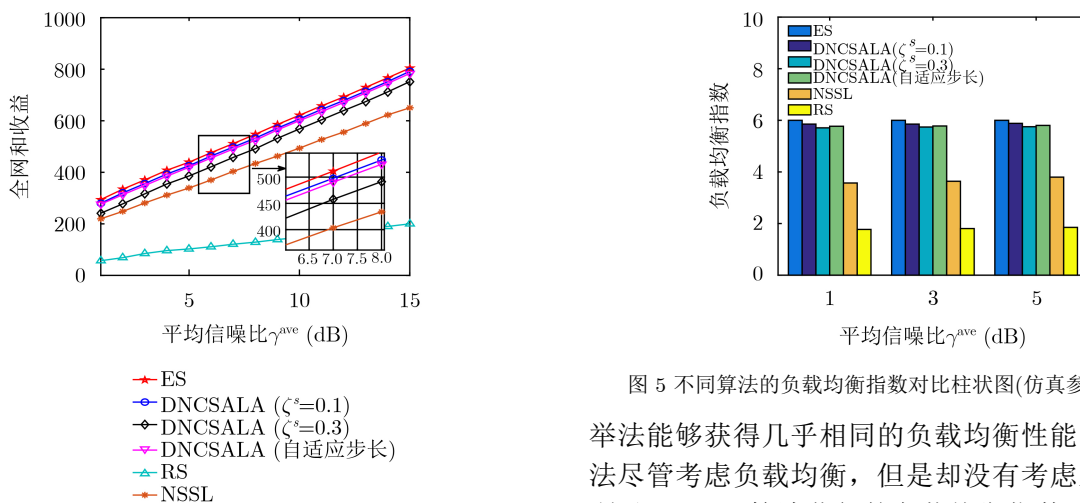


图3 不同算法下全网和收益随SNR变化曲线图(仿真参数同图2)

图5 不同算法的负载均衡指数对比柱状图(仿真参数同图2)

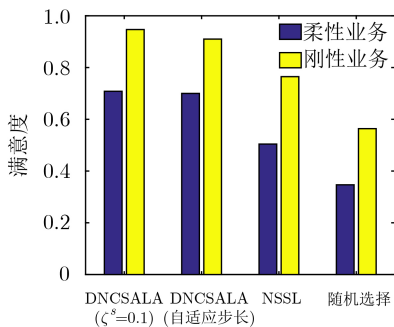


图4 不同算法的满意度性能对比柱状图(仿真参数同图2)

举法能够获得几乎相同的负载均衡性能。NSSL算法尽管考虑负载均衡，但是没有考虑业务特性。所以，NSSL算法获得的负载均衡指数要低于本文所提两种算法。

7 结论

本文采用博弈论对异构无线网络中代理节点的柔性接入问题进行建模。经证明，所构建的博弈为潜博弈，即至少具有一个纯策略纳什均衡。同时，还推导了纳什均衡可行性的充分条件，并提出了一种分布式的DNC SALA网络-信道选择算法，来获得纳什均衡，并分析了该算法的收敛性。仿真结果表明，DNC SALA只需要有限反馈信息，实现难度低。而且该算法可以通过自适应步长机制在收敛速度和性能之间获得一个很好的折衷。所以，DNC SALA

具有较好的实用价值。此外, 相比NSLS算法和RS算法, 所提算法能够在负载均衡、业务质量保证以及全网和收益方面获得更好的性能。

参 考 文 献

- [1] AGIWAL M, ROY A, and SAXENA N. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(3): 1617–1655. doi: [10.1109/COMST.2016.2532458](https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2532458).
- [2] AKPAKWU G A, SILVA B J, HANCKE G P, *et al.* A survey on 5G networks for the Internet of Things: Communication technologies and challenges[J]. *IEEE Access*, 2018(6): 3619–3647. doi: [10.1109/ACCESS.2017.2779844](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2779844).
- [3] WANG Hai and ABRAHAM O F. A survey of enabling technologies of low power and long range Machine-to-Machine communications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(4): 2621–2639. doi: [10.1109/COMST.2017.2721379](https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2721379).
- [4] XIA Nian, CHEN H H, and YANG C S. Radio resource management in Machine-to-Machine communications—a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(1): 791–828. doi: [10.1109/COMST.2017.2765344](https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2765344).
- [5] 李宁, 林家儒. CDMA/OFDMA异构网络中最小化中断概率的网络选择方案[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(12): 2965–2970. doi: [10.3724/SP.J.1146.2011.00387](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2011.00387).
LI Ning and LIN Jiaru. Network selection strategy for minimizing outage probability in CDMA/OFDMA heterogeneous networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(12): 2965–2970. doi: [10.3724/SP.J.1146.2011.00387](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2011.00387).
- [6] KUMAR A, MALLIK R K, and SCHOBER R. A probabilistic approach to modeling users' network selection in the presence of heterogeneous wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(7): 3331–3341. doi: [10.1109/TVT.2013.2297437](https://doi.org/10.1109/TVT.2013.2297437).
- [7] DU Zhiyong, WU Qihui, and YANG Panlong. Dynamic user demand driven online network selection[J]. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(3): 419–422. doi: [10.1109/LCOMM.2014.011214.132617](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2014.011214.132617).
- [8] 杜白, 李红艳, 龙彦. 最小最大剩余服务时间的异构网络选择算法[J]. *通信学报*, 2015, 36(8): 104–109. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2015231](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2015231).
DU Bai, LI Hongyan, and LONG Yan. Network selection algorithm in heterogeneous wireless networks to minimize the maximum residual service time[J]. *Journal on Communications*, 2015, 36(8): 104–109. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2015231](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2015231).
- [9] TSENG L C, CHIEN F T, ZHANG Daqiang, *et al.* Network selection in cognitive heterogeneous networks using stochastic learning[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(12): 2304–2307. doi: [10.1109/LCOMM.2013.102113.131876](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2013.102113.131876).
- [10] KWON T and CHOI J W. Multi-group random access resource allocation for M2M devices in multicell systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(6): 834–837. doi: [10.1109/LCOMM.2012.041112.112568](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2012.041112.112568).
- [11] LIU Dantong, CHEN Yue, CHAI K K, *et al.* Opportunistic user association for multi-service HetNets using Nash bargaining solution[J]. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(3): 463–466. doi: [10.1109/LCOMM.2014.012314.140090](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2014.012314.140090).
- [12] LIU Yi, YUEN C, CAO Xianghui, *et al.* Design of a scalable hybrid MAC protocol for heterogeneous M2M networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2014, 1(1): 99–111. doi: [10.1109/JIOT.2014.2310425](https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2310425).
- [13] HUANG Yao, TIAN Hui, ZHANG Jie, *et al.* Rate allocation scheme for Machine-to-Machine service based on 3GPP in heterogeneous wireless networks[J]. *China Communications*, 2013, 10(9): 65–71. doi: [10.1109/CC.2013.6623504](https://doi.org/10.1109/CC.2013.6623504).
- [14] NESSA A, KADOCH M, and RONG Bo. Fountain coded cooperative communications for LTE-A connected heterogeneous M2M network[J]. *IEEE Access*, 2016(4): 5280–5292. doi: [10.1109/ACCESS.2016.2601031](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2601031).
- [15] SHAFIQ M Z, JI Lusheng, LIU A X, *et al.* Large-scale measurement and characterization of cellular Machine-to-Machine traffic[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2013, 21(6): 1960–1973. doi: [10.1109/TNET.2013.2256431](https://doi.org/10.1109/TNET.2013.2256431).
- [16] YE Qiaoyang, RONG Beiyu, CHEN Yudong, *et al.* User association for load balancing in heterogeneous cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(6): 2706–2716. doi: [10.1109/TWC.2013.040413.120676](https://doi.org/10.1109/TWC.2013.040413.120676).
- [17] 钟卫. 有限反馈认知无线电动态频谱共享技术研究[D]. [博士学位论文], 上海交通大学, 2011.
ZHONG Wei. Limited feedback dynamic spectrum sharing in cognitive radio systems[D]. [Ph.D. dissertation], Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [18] MONDERER D and SHAPLEY L S. Potential games[J]. *Games and Economic Behavior*, 1996, 14(1): 124–143. doi: [10.1006/game.1996.0044](https://doi.org/10.1006/game.1996.0044).
- [19] SASTRY P S, PHANSALKAR V V, and THATHACHAR M A L. Decentralized learning of Nash equilibria in multi-person stochastic games with incomplete information[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1994, 24(5): 769–777. doi: [10.1109/21.293490](https://doi.org/10.1109/21.293490).

田 辉: 男, 1987年生, 讲师, 研究方向为M2M通信、资源分配、协同通信。

何 雷: 男, 1978年生, 讲师, 研究方向为无人机智能平台、无线通信网络、军事运筹学。

马文峰: 男, 1974年生, 副教授, 研究方向为物联网、5G通信。

王 聪: 男, 1975年生, 副教授, 研究方向为物联网、计算机网络。

责任编辑: 余 蓉