



计算机科学

COMPUTER SCIENCE

面向铁路集装箱的高可靠低时延无线资源分配算法

胥昊, 曹桂均, 闫璐, 李科, 王振宏

引用本文

胥昊, 曹桂均, 闫璐, 李科, 王振宏. 面向铁路集装箱的高可靠低时延无线资源分配算法[J]. 计算机科学, 2022, 49(6): 39-43.

XU Hao, CAO Gui-jun, YAN Lu, LI Ke, WANG Zhen-hong. [Wireless Resource Allocation Algorithm with High Reliability and Low Delay for Railway Container](#)[J]. Computer Science, 2022, 49(6): 39-43.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于生成对抗网络的位置隐私博弈机制](#)

Location Privacy Game Mechanism Based on Generative Adversarial Networks

计算机科学, 2021, 48(10): 266-271. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.200900021>

[基于延迟接受的多用户任务卸载策略](#)

Multi-user Task Offloading Based on Delayed Acceptance

计算机科学, 2021, 48(1): 49-57. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.200600129>

[结合非完全信息博弈的 SIR 传播模型](#)

SIR Propagation Model Combing Incomplete Information Game

计算机科学, 2020, 47(6): 230-235. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.190400164>

[基于“奖励制度”的 DPoS 共识机制改进](#)

Improvement of DPoS Consensus Mechanism Based on Positive Incentive

计算机科学, 2020, 47(2): 269-275. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.190400013>

[基于博弈论的空间数据中心私有云资源分配管理分析](#)

Analysis of Private Cloud Resource Allocation Management Based on Game Theory in Spatial Data Center

计算机科学, 2020, 47(11A): 373-379. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.200500106>

面向铁路集装箱的高可靠低时延无线资源分配算法

胥昊^{1,2} 曹桂均² 闫璐^{1,3} 李科² 王振宏²

1 中国铁道科学研究院研究生部 北京 100081

2 中国铁道科学研究院通信信号研究所 北京 100081

3 中国铁道科学研究院科技和信息化部 北京 100081

(18612113434@163.com)

摘要 智能集装箱系统通过信息的实时采集和传输,提高了集装箱的运转效率。为了保证集装箱终端的超可靠低时延通信,文中提出以短包的形式传输信息,研究多小区铁路集装箱终端上行传输系统的和速率最大化问题,提出了一个频谱资源分配策略,多个小区间共用频谱资源,小区内的终端通过竞争获取频谱。首先,采用博弈论模型构建这种竞争关系,并证明了纳什均衡解的存在,其最好的纳什均衡解就是系统和速率最大化的全局最优解;然后,设计了一种分布式迭代算法,该算法只需要局部信息交互,并在理论上证明了当平滑系数足够小时,算法能以任意高的概率收敛到最好的纳什均衡点;最后,对所提算法进行了仿真验证。仿真结果表明,所提算法的收敛速度较快,且优于BRD算法和No-regret算法。

关键词: 超可靠低时延;短包;频谱资源分配;博弈论;纳什均衡解

中图分类号 TN911

Wireless Resource Allocation Algorithm with High Reliability and Low Delay for Railway Container

XU Hao^{1,2}, CAO Gui-jun², YAN Lu^{1,3}, LI Ke² and WANG Zhen-hong²

1 Postgraduate Department, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China

2 Signal and Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China

3 Science and Information Technology Department, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China

Abstract The intelligent container system improves the container operation efficiency through the real-time collection and transmission of information. In order to ensure the ultra reliable and low delay communication of container terminals, this paper proposes to transmit the information in the form of the short packets, and studies the sum rate maximization of the uplink transmission system for the railway container terminals in the multi cells. This paper proposes a spectrum resource allocation problem. Multiple cells share spectrum resources, and the terminals in the cells obtain the spectrum through competition. The game theory model is used to construct this competition relationship, and Nash equilibrium solution is proved. The best Nash equilibrium solution is the global optimal solution for system and rate maximization. Then, a distributed iterative algorithm is designed, which only needs local information interaction. It is proved theoretically that when the smoothing coefficient is small enough, the algorithm can converge to the best Nash equilibrium point with any high probability. Finally, the proposed algorithm is verified by simulation. Simulation results show that the proposed algorithm has fast convergence speed and is better than best response dynamics (BRD) algorithm and No-regret algorithm.

Keywords Ultra reliable and low delay, Short packets, Spectrum resource allocation, Game theory, Nash equilibrium solution

1 引言

作为一种高效率和高协作的运输方式,集装箱已成为国际多式联运的关键装备,90%的国际贸易货运都是通过基于集装箱运输的多式联运完成的^[1-2]。我国早期建设的集装箱

管理系统包括集装箱追踪管理系统、集装箱运输系统、集装箱调度系统等,这些系统在一定程度上提升了铁路集装箱货运的运营效率^[3]。近年来,铁路集装箱货运增长率始终保持在30%以上。随着铁路集装箱运输的快速发展,现有的集装箱信息识别技术、追踪定位技术和数据传输技术已不能满足

到稿日期:2021-12-13 返修日期:2022-03-11

基金项目:国家自然科学基金(U1834211);中国铁道科学研究院集团有限公司科研课题(2021YJ101)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(U1834211) and Key Programs of Technological R&D of China Academy of Railway Sciences(2021YJ101).

通信作者:闫璐(dickxh@163.com)

集装箱运输数字化、信息化的需要^[4-5]。

6G 通信技术融合了地面通信系统的容量优势和卫星通信系统的广覆盖优势,构建了覆盖陆地、海洋和空中的立体化新一代通信系统^[6-8]。基于 6G 通信的智能集装箱系统,可以准确获取货物的位置、状态和安全信息,提升集装箱运输的信息化水平,解决集装箱货物的安全运输问题^[9]。智能集装箱运输的货物的物质属性更多的是通过数字化、信息化来表示,系统对数据传输的可靠性和时延具有较高的要求^[10-11]。

在物联网系统中,信息通常是以短包形式传输的。传统的香农容量更适用于长包通信,当信息以短包形式传输时,香农容量是不可达的,因而不适用^[12-13]。对于给定的系统配置与传输可靠性要求,在一定的传输时延条件下,编码分块长度必须满足一定的约束条件。为了满足未来通信提出的更高传输性能要求,研究有限编码分块长度对系统性能的影响十分重要^[14-15]。

本文考虑了铁路集装箱上行传输系统,在每个小区中,每个信道只分配给该基站服务的其中一个集装箱,而每个集装箱可以占用多个信道,因此单个小区内不存在干扰,而小区之间存在干扰。为了保证超可靠低时延通信,本文采用短包传输方式,研究了通过调整信道资源分配来最大化系统和速率的优化问题。对于这个非凸的整数优化问题,采用松弛方法将其转化为一个凸优化问题,并建模为一个非合作博弈模型,理论证明了所构建的模型存在纳什均衡解。然后,为了找到最优的均衡解,提出了一种分布式的信道选择算法,并分析了算法的收敛性。最后通过仿真的方式与其他算法进行对比,验证了所提算法的性能较优。

2 铁路集装箱上行传输系统模型

2.1 问题形成

本文研究铁路集装箱节点数据传输网络的上行传输系统,部署有 M 个基站(Base Stations, BSs)和 K 个集装箱节点(Container Nodes, CNs)。若基站和节点的集合分别为 \mathcal{M} 和 \mathcal{K} ,则有基站 $m \in \mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\}$,节点 $k \in \mathcal{K} = \{1, 2, \dots, K\}$ 。假设每一个集装箱节点和基站分别只配备一根天线,每一个 CN 只接入一个基站, K_m 表示在基站 m 服务的小区所有集装箱节点的集合。那么对于任意的基站 $m, n \in \mathcal{M}$,可以得到以下关系:1) $\mathcal{K}_m \subseteq \mathcal{K}$; 2) 若 $m \neq n$,则 $\mathcal{K}_m \cap \mathcal{K}_n = \emptyset$; 3) $\bigcup_{m \in \mathcal{M}} K_m = \mathcal{K}$ 。假设该网络采用复用因子为 1 的正交频分多址接入技术,即网络内所有小区使用整体的频谱资源。整个频谱资源被划分到 C 个彼此正交的信道上,信道的集合为 $\mathcal{C} = \{1, 2, \dots, C\}$ 。假设每个信道的带宽小于相干带宽,那么每个信道是平坦衰落的。在每个小区中,每个信道只能分配给该基站服务的其中一个 CN,而每个 CN 可以占用多个信道,因此单个小区内不存在干扰,而小区之间存在干扰。

在所有小区中占用信道 $c \in C$ 的集装箱节点 CNs 表示为 $b = [b_1, b_2, \dots, b_M]$,其中 $b_m \in \mathcal{K}_m$ 表示与基站 m 相关联并占用信道 c 的 CN。为了便于表述,这里省略了信道记号 c 。显然, $b \in \mathcal{B} = \{b | b_m \in \mathcal{K}_m, m \in \mathcal{M}\}$ 。从 CN b_m 到 BS m 的信道系数为 $g_{b_m, m}$, CN b_m 的发射功率为 p_{b_m} ,传输信号为 x_{b_m} 且满足 $\mathbb{E}(|x_{b_m}|^2) = 1$,因此在 BS m 处接收到来自 CN b_m 的信号为:

$$y_{b_m} = p_{b_m} g_{b_m, m} x_{b_m} + \sum_{n=1, n \neq m}^M p_{b_n} g_{b_n, m} x_{b_n} + z_{b_m} \quad (1)$$

其中, z_{b_m} 为加性高斯白噪声 $CN(0, \sigma_{b_m}^2)$ 。

根据以上的分析,BS m 接收到 CN b_m 的信干噪比(Signal to Interference Plus Noise Ratio, SINR)为:

$$r_{b_m} = \frac{p_{b_m} h_{b_m, m}}{\sum_{n=1, n \neq m}^M p_{b_n} h_{b_n, m} + \sigma_{b_m}^2} \quad (2)$$

其中, $h_{b_n, m} = |g_{b_n, m}|^2$ 表示从 CN b_n 到 BS m 的信道增益。

为了保证超可靠低时延通信,本文采用短包传输的方式,这种传输方式下即使 SINR 非常高,解码错误率也不会变为 0,这导致了香农公式在这种情况下不再适用。本文利用一种新的公式来刻画在较短的块长度传输条件下,集装箱节点数据传输的可实现速率、解码错误概率和传输延迟之间的关系^[16]。对于给定的有限块长 L ,信道解码率为:

$$R(L, \epsilon) = C_s - \sqrt{\frac{V}{L}} Q^{-1}(\epsilon) + \mathcal{O}\left(\frac{\log L}{L}\right) \quad (3)$$

其中, C_s 为基于无限块长下的香农容量; V 表示信道散度,用于衡量信道相对于具有相同容量的确定性信道的随机性; ϵ 表示期望的解码错误概率; Q^{-1} 是高斯 Q 函数的逆函数, $Q(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 。

根据以上公式,可以得到接收 b_m 传输信息的近似译码率 R_{b_m} 如下:

$$R(r_{b_m}) \approx C_s(r_{b_m}) - \sqrt{\frac{V(r_{b_m})}{L}} Q^{-1}(\epsilon_{b_m}) \quad (4)$$

其中, $C_s(r_{b_m}) = \log_2(1 + r_{b_m})$, 并且 $V(r_{b_m}) = (1 - (1 + r_{b_m})^{-2}) (\log_2 e)^2$ 。显然,与信道容量相比,这种近似增加了速率惩罚项,以将最大信道错误概率 ϵ 保持在有限的块长度 L 上,与 $1/\sqrt{L}$ 成正比。

本文通过调整信道资源分配来最大化系统和速率的优化问题。由于不同信道上的资源优化问题是相互独立的,因此信道 $c \in C$ 的优化问题为:

$$P: \max_{b \in \mathcal{B}} \sum_{m=1}^M R(r_{b_m})$$

问题 P 是一个非凸的整数优化问题,需要对其进行近似,将其转化为一种易于求解的形式。

2.2 问题转化

由于 P 中的优化目标是一个复杂的复合函数,因此难以求解。首先对函数 $\log_2(1 + r_{b_m})$ 进行松弛操作,表达式如下:

$$\log_2(1 + r_{b_m}) \geq -\frac{\alpha}{r_{b_m}} + \beta \quad (5)$$

式(5)的等号在 $r_{b_m} = r'_{b_m}$ 时严格成立,且 $\alpha = \frac{r'_{b_m}}{1 + r'_{b_m}}, \beta =$

$$\log_2(1 + r'_{b_m}) + \frac{1}{1 + r'_{b_m}}。$$

速率 $R(r_{b_m})$ 重写为:

$$R(r_{b_m}) = \log_2(1 + r_{b_m}) - \sqrt{\frac{(1 - (1 + r_{b_m})^{-2})}{L}} \frac{Q^{-1}(\epsilon_{b_m})}{\ln 2} \\ = \log_2(1 + r_{b_m}) - \mu \sqrt{1 - (1 + r_{b_m})^{-2}} \quad (6)$$

其中, $\mu = \frac{Q^{-1}(\epsilon_{b_m})}{\sqrt{L} \ln 2}$ 。

令 $\eta(x) = -\sqrt{1 - \left(1 + \frac{1}{x}\right)^{-2}}$, 其中 $x = \frac{1}{r_{bm}}$, 它是一个

凹函数, 对 $\eta(x)$ 求导, 得到:

$$\frac{d\eta(x)}{dx} = x^{-2} \left(1 + \frac{1}{x}\right)^{-3} \left(1 - \left(1 + \frac{1}{x}\right)^{-2}\right)^{-\frac{1}{2}} = \psi(x) \quad (7)$$

通过公式代换和 $\eta\left(\frac{1}{r_{bm}'}\right)$ 在可行点 $\frac{1}{r_{bm}'}$ 处的一阶泰勒展

开, 得到 $R(r_{bm})$ 在可行点 $\frac{1}{r_{bm}'}$ 处的下界为:

$$\begin{aligned} R(r_{bm}) &\geq -\frac{\alpha}{r_{bm}} + \beta + \mu\psi\left(\frac{1}{r_{bm}'}\right) \left(\frac{1}{r_{bm}} - \frac{1}{r_{bm}'}\right) \\ &= \left(\mu\psi\left(\frac{1}{r_{bm}'}\right) - \alpha\right) \frac{1}{r_{bm}} + \beta - \mu\psi\left(\frac{1}{r_{bm}'}\right) \frac{1}{r_{bm}'} \\ &= \phi\left(\frac{1}{r_{bm}}, \frac{1}{r_{bm}'}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

显然, 对于 $m \in \mathcal{M}$, $R(r_{bm}) \geq \phi\left(\frac{1}{r_{bm}}, \frac{1}{r_{bm}'}\right)$, 当 $\frac{1}{r_{bm}} = \frac{1}{r_{bm}'}$ 时, 等号成立。

问题 P 转化为一个下界的优化问题 P_1 :

$$P_1: \max_{b \in \mathcal{B}} \sum_{m=1}^M \phi\left(\frac{1}{r_{bm}}, \frac{1}{r_{bm}'}\right)$$

当 $\frac{1}{r_{bm}} = \frac{1}{r_{bm}'}$ 时, 问题 P 和问题 P_1 等价。

2.3 基于博弈论的分析

优化问题建模为一个策略型博弈模型, $\mathcal{G} = \{\mathcal{M}, \{\mathcal{A}_m\}_{m \in \mathcal{M}}, \{u_m\}_{m \in \mathcal{M}}\}$, 其中 \mathcal{M} 为所有参与者的集合, \mathcal{A}_m 表示参与者 $m \in \mathcal{M}$ (基站) 的动作空间, u_m 表示参与者 $m \in \mathcal{M}$ 的效用函数^[17-18]。在 \mathcal{G} 中, 每个参与者 (基站) 的动作空间中的每个元素都是一个二元变量, 表示是否选择这个 CN, 并包含如下两个约束: 1) 每个动作中只有一个集装箱节点占用信道 $c \in \mathcal{C}$; 2) 空间中的所有集装箱节点需与参与者相关联。因此, $\mathcal{A} = \mathcal{A}_1 \times \mathcal{A}_2 \times \dots \times \mathcal{A}_M$ 表示所有参与者可选择的联合动作空间, $a_{-m} \in \mathcal{A}_1 \times \dots \times \mathcal{A}_{m-1} \times \mathcal{A}_{m+1} \times \dots \times \mathcal{A}_M$ 表示除 m 外所有参与者的策略分配空间, 其中 \times 表示笛卡尔乘积, 效用函数的表达式由定理 1 给出。

定理 1 \mathcal{G} 是一个完全势博弈。

证明: 令 $\Phi = \sum_{m=1}^M \phi\left(\frac{1}{r_{bm}}, \frac{1}{r_{bm}'}\right)$ 作为 \mathcal{G} 的势函数。该势函数可以重写为:

$$\begin{aligned} &\sum_{m=1}^M \phi\left(\frac{1}{r_{bm}}, \frac{1}{r_{bm}'}\right) \\ &= \sum_{m=1}^M \left(\frac{\sum_{n=1, n \neq m}^M p_{b_n} h_{b_n, m} + \sigma_{b_m}^2}{p_{b_m} h_{b_m, m}} + \vartheta_{b_m} \right) \\ &= \underbrace{\frac{\sum_{n=1, n \neq m}^M p_{b_n} h_{b_n, m} + \sigma_{b_m}^2}{p_{b_m} h_{b_m, m}}}_{u_m(a_m, a_{-m})} + \sum_{l=1, l \neq m}^M \frac{\theta_{b_l} p_{b_l} h_{b_l, l}}{p_{b_l} h_{b_l, l}} + \sum_{m=1}^M \vartheta_{b_m} \\ &= \underbrace{\sum_{l=1, l \neq m}^M \frac{\theta_{b_l} \left(\sum_{n=1, n \neq m, n \neq l}^M p_{b_n} h_{b_n, l} + \sigma_{b_l}^2 \right)}{p_{b_l} h_{b_l, l}}}_{v(a_{-m})} + \sum_{m=1}^M \vartheta_{b_m} \end{aligned}$$

其中, $\theta_{b_m} = \mu\psi\left(\frac{1}{r_{bm}'}\right) - \alpha$, $\vartheta_{b_m} = \beta - \mu\psi\left(\frac{1}{r_{bm}'}\right) \frac{1}{r_{bm}'}$ 。

假设任意一个参与者 $m \in \mathcal{M}$ 单方面改变其动作策略, 从 a_m 到 a_m' , 根据以上公式, 有如下等式成立。

$$\Phi(a_m', a_{-m}) - \Phi(a_m, a_{-m}) = u_m(a_m', a_{-m}) - u_m(a_m, a_{-m}) \quad (9)$$

因此, \mathcal{G} 是一个完全势博弈。

3 基于博弈论的分布式信道选择算法设计

3.1 基于博弈论的分布式信道选择算法描述

\mathcal{G} 是一个完全势博弈, 至少存在一个纳什均衡解, 并且其中一个为势函数最大化的全局最优解^[19-20]。通过迭代更新可行点 $\frac{1}{r_{bm}'}$, 纳什均衡解可以近似为优化问题 P 的最优解, 具体的算法流程如算法 1 所示。

算法 1 基于博弈论的分布式信道选择算法

1. 设置初始迭代值 $t=0$, 以及初始的策略 $a^* = \{a_m^*\}$, $m \in \mathcal{M}$ 。
2. 对于每个迭代时刻 $t=1, 2, \dots$, 执行下面的操作:
3. 根据最优的策略 $a^* = \{a_m^*\}$, $m \in \mathcal{M}$ 和式(2), 更新 r_{bm}^t 。
4. 对于每个迭代时刻 $n=1, 2, \dots$, 执行下面的操作。
5. 根据一个固定的概率分布 $q_m = \frac{1}{M}$, 随机选择一个参与者, 记为 m 。

参与者 m 等概率地从它的策略集合 \mathcal{A}_m 中选择一个实验行动策略 a_m , 而其他参与者的策略选择保持不变, 即 $a_{-m}(n) = a_{-m}(n-1)$ 。

6. 参与者 m 更新策略的选择依据以下规则:

$$\begin{cases} p_m^{a_m}(n) = \frac{(1+\lambda) \frac{1}{\tau} u_m(a_m, a_{-m}(n-1))}{(1+\lambda) \frac{1}{\tau} u_m(a_m(n-1)) + (1+\lambda) \frac{1}{\tau} u_m(a_m, a_{-m}(n-1))} \\ p_m^{a_m(n-1)}(n) = 1 - p_m^{a_m}(n) \end{cases}$$

其中, λ 是学习参数, τ 是平滑系数。上式中采用归一化的效用函数。如果行动策略 a_m 被选择, 令 $a^*(n) = a(n)$; 否则 $a^*(n) = a(n-1)$ 。

7. 对于任意的 n , 如果任意一个参与者 b 的转移概率 $p_m(n)$ 都趋近于 1, 即大于 0.99, 那么循环停止, 最优策略 $a^* = a^*(n)$; 否则返回步骤 5。
8. 如果 P 中的目标函数的增加小于一个给定小阈值, 则算法结束, 得到最优的信道选择策略; 否则返回步骤 2。

3.2 算法收敛性分析

下文给出算法 1 中内层循环的收敛性分析。

定理 2 固定 r_{bm}' 的情况下, 如果所有参与者都执行算法 1 提出的信道分配学习算法, 那么内层循环能够收敛到一个唯一的参与者策略组合的平稳分布, 如式(10)所示:

$$\pi(\hat{a}) = \frac{(1+\lambda) \frac{1}{\tau} \Phi(\hat{a})}{\sum_{a \in \mathcal{A}} (1+\lambda) \frac{1}{\tau} \Phi(a)} \quad (10)$$

证明: 设 $\chi(n)$ 为算法内循环第 n 次迭代的信道分配状态。显然, $\chi(n)$ 是一个不可约且非周期性的马尔可夫过程。接下来将验证由式(10)决定的过程是可逆的, 也就是说, 对于任意的策略 $a, \hat{a} \in \mathcal{A}$, 有以下等式成立:

$$\pi(a)P(\hat{a}|a) = \pi(\hat{a})P(a|\hat{a}) \quad (11)$$

其中, $P(\hat{a}|a)$ 表示由状态 a 到状态 \hat{a} 的转移概率。

当 $\hat{a} = a$ 时, 式(11)显然成立。当 $\hat{a} \neq a$ 时, 一个参与者 m 改变它的占用信道, 将导致网络状态中的一个元素发生改变, 即 $a = (a_m, a_{-m})$ 和 $\hat{a} = (\hat{a}_m, a_{-m})$, 从而得到下面的等式:

$$\pi(a)P(\hat{a}|a) = \frac{1}{M} \left(\frac{(1+\lambda)^{\frac{1}{\tau}\Phi(a)}}{\sum_{a' \in \mathcal{A}} (1+\lambda)^{\frac{1}{\tau}\Phi(a')}} \right) \left(\frac{(1+\lambda)^{\frac{1}{\tau}u_m(\hat{a}_m, a-m)}}{(1+\lambda)^{\frac{1}{\tau}u_m(a)} + (1+\lambda)^{\frac{1}{\tau}u_m(\hat{a}_m, a-m)}} \right) = \nu (1+\lambda)^{\frac{1}{\tau}(\Phi(a)+u_m(\hat{a}_m, a-m))}$$

其中, $\nu = \nu_1 \nu_2$, $\nu_1 = \frac{1}{M \sum_{a' \in \mathcal{A}} (1+\lambda)^{\frac{1}{\tau}\Phi(a')}}$, 以及 $\nu_2 =$

$$\frac{1}{(1+\lambda)^{\frac{1}{\tau}u_m(a)} + (1+\lambda)^{\frac{1}{\tau}u_m(\hat{a}_m, a-m)}}$$

相似地,可以得到:

$$\pi(\hat{a})P(a|\hat{a}) = \nu (1+\lambda)^{\frac{1}{\tau}(\Phi(\hat{a})+u_m(a_m, a-m))}$$

将式(9)代入上式中,则:

$$\pi(a)P(\hat{a}|a) = \nu (1+\lambda)^{\frac{1}{\tau}(\Phi(\hat{a})+u_m(a_m, a-m))} = \pi(\hat{a})P(a|\hat{a})$$

因此,可以推导出:

$$\sum_{a \in \mathcal{A}} \pi(a)P(\hat{a}|a) = \sum_{a \in \mathcal{A}} \pi(\hat{a})P(a|\hat{a}) = \pi(\hat{a})$$

上式是马尔可夫过程的平衡方程,定理得证。

定理 3 固定 r_{bn}^l 的情况下,当 τ 足够小时,算法 1 内层循环以任意高的概率收敛到 \mathcal{G} 的最佳纳什均衡点。

证明:由定理 1 可知,令 a^{opt} 表示最大化势函数的最优信道分配策略,也是 \mathcal{G} 的最佳纳什均衡解。

根据定理 2 可知,所提算法收敛到唯一的平稳分布。当 τ 足够小时,有 $(1+\lambda)^{\frac{1}{\tau}\Phi(a^{opt})} \geq (1+\lambda)^{\frac{1}{\tau}\Phi(a)}, \forall a \in \mathcal{A} \setminus \{a^{opt}\}$ 。根据式(10),参与者策略组合的唯一平稳分布为 $(0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$, 其中 1 表示最优信道分配的概率,其他非最优的概率都是 0。因此,

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \pi(a^{opt}) = 1$$

上式表明,所提学习算法以任意高的概率收敛到 \mathcal{G} 的最佳纳什均衡解。内层循环得到的解 a^{opt} 是势函数最大化的全局最优解,并用于外层循环的更新。随着 r_{bn}^l 的不断更新,内层循环优化的势函数趋近于问题 P 的优化目标。

4 仿真分析

假设智能集装箱范围内覆盖有 3 个小区,每个小区的中心部署 1 个 BS 和 3 个集装箱节点。基站的位置为 $\{[10, 20]; [40, 80]; [70, 50]\}$, CN 的位置为 $\{[0, 0], [40, 60], [60, 20]; [30, 110], [50, 130], [80, 100]; [80, 80], [120, 70], [90, 30]\}$ 。有限块 $L=100$, 解码错误概率 $\epsilon=10^{-9}$ 。系统带宽设置为 5 MHz, 分为 $S=4$ 个子信道。噪声功率谱密度为 -174 dBm/Hz, 信道衰落模型为 $128.1+37.6 \log d$ dB, 其中 d 是 CN 和 BS 之间的距离, CN 的发射功率为 1 W^[21]。

图 1 给出了在 4 个子信道下每个小区随着算法迭代而选择不同 CN 占用该子信道的变化趋势。图 1 中,从上到下 4 个子图分别表示 4 个不同的子信道。对于每个子图的纵坐标,1 表示每个小区的第一个 CN, 2 表示每个小区的第二个 CN, 3 表示每个小区的第三个 CN。每个子图的每条曲线表示随着迭代次数的变化,每个小区的 CN 占用该信道的变化

情况。例如,最下面的子图表示这个子信道在 3 个小区内被不同编号的 CN 选择占用的情况,30 次迭代后选择策略收敛。最终选择结果是:小区 1 内服务的第 1 个 CN 占用了这个子信道,小区 2 内服务的第 3 个 CN 占用了这个子信道,小区 3 内服务的第 2 个 CN 占用了这个子信道。

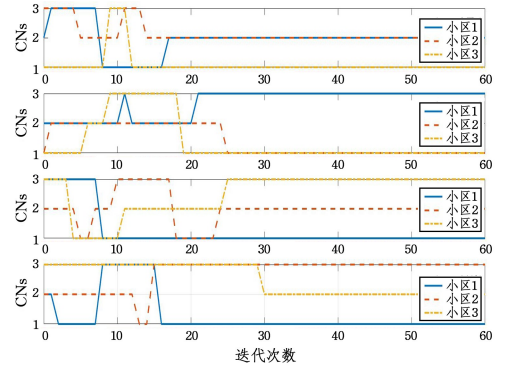


图 1 不同子信道下每个小区随算法迭代而选择不同 CN 占用该子信道的变化趋势

Fig. 1 Each cell selects different CNs to occupy the sub-channels with algorithm iterations under different subchannels

图 2 给出了本文算法在不同平滑系数下的收敛趋势以及与 BRD (Best Response Dynamics) 算法^[22] 和 No-regret 算法^[23] 的比较结果。从图 2 可以看出,随着迭代次数的增加,所提算法和已知两种算法的性能都逐步提高,并在经过一定的迭代次数后趋于稳定。当平滑系数为 2 时,本文算法和 BRD 算法的最终性能相似。当平滑系数为 8 和 10 时,本文算法的最终性能优于 BRD 算法的最终性能。平滑系数 τ 在算法中主要用来更新参与者 m 的策略选择概率。若 m 选择目前策略的概率更大,则在这一时刻就更倾向于选择新的策略,否则选择策略将倾向于保持不变。平滑系数 τ 可以用来调节选择概率的大小,当平滑系数 τ 变得极小时,若 $u_m(a(n-1)) - u_m(a_m, a_m(n-1)) > 0$, 则使得 $p_m^a(n)$ 趋近于 0, 选择策略倾向于不变,反之,倾向于选择新的策略。在这种情况下,每次迭代参与者都是选择对自己最好的策略,这是一种贪婪的选择策略,可能会导致最终只能收敛到局部最优。如果平滑系数 τ 增大,反而使得每次迭代会有一些的概率去探索新的策略,而不是贪婪地只选择目前对自己最好的策略,这有助于遍历更优的策略,算法性能相应会提高,但代价是收敛的速度会减慢。因此,选择合适的平滑系数能够在保证系统性能的情况下加快算法的收敛。本文算法中平滑系数数值是通过经验设置的,在后续研究中,将研究迭代次数和效用函数值与平滑系数之间的关系,提出自适应的平滑系数函数。

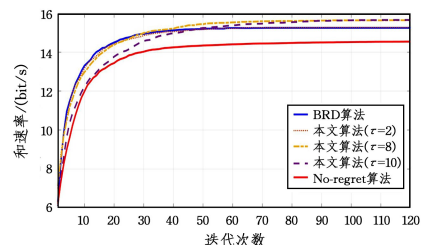


图 2 所提算法在设置不同平滑系数下的收敛趋势

Fig. 2 Convergence trend of the proposed algorithm with different smoothing coefficients

结束语 本文针对多个小区多个集装箱的上行数据传输系统,为了保证超可靠低时延通信,研究了采用短包传输时系统和速率最大化问题。利用博弈论模型,研究了多个终端竞争获取频谱资源的问题,设计了一种分布式迭代算法,该算法能以较快的速度收敛到最优解,并对算法的收敛性进行了证明。仿真结果验证了所提算法具有较快的收敛速度和较好的性能。在下一步的研究中,将考虑用户公平性,提出相应的算法优化系统传输性能。

参考文献

- [1] LI Y H. Analysis of Key Technologies of Intelligent Container Internet of Things System[J]. China Automatic Identification Technology, 2019, 80(5): 48-52.
- [2] LI Z. Study on optimization of empty container transport in multimodal transport of containers[J]. International Core Journal of Engineering, 2020, 6(2): 28-36.
- [3] LIU Q F. A Tentative Study on the Development Strategy of Railway Container Transportation[J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(9): 34-39.
- [4] HUANG M Z, LI G H, LIN X L, et al. Convergence Application of Railway Logistics and Blockchain[J]. Railway Computer Application, 2020, 29(3): 11-14.
- [5] CHO S Y, CHAE M S, SHIN K H. Reliability analysis of the integrated navigation system based on real trajectory and calculation of safety margin between trains[J]. IEEE Access, 2021, 9: 32986-32996.
- [6] YOU X H, YIN H, WU H Q. On 6G and Wide-Area IoT [J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(1): 3-11.
- [7] YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts[J]. Science China (Information Sciences), 2021, 64(1): 5-78.
- [8] ZENG Y, XU X. Toward environment-aware 6G communications via channel knowledge map[J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(3): 84-91.
- [9] YAN L, FANG X, HAO L, et al. Safety oriented resource allocation for space-ground integrated cloud networks of high-speed railways[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 8(12): 47-2759.
- [10] ZHOU C X, LEE B K, LI H B. Integrated optimization on yard crane scheduling and vehicle positioning at container yards[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Elsevier, 2020, 38(C): 663-688.
- [11] JAAFAR S N, HAMZA K E, AL-SALIHI V A. Proposed base-station location optimization with genetic algorithm scheme for LTE network radio planning[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1094(1): 1-10.
- [12] HO C D, NGUYEN T V, THE T H, et al. Short-packet communications in wireless-powered cognitive IoT networks: performance analysis and deep learning evaluation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(3): 2894-2899.
- [13] CHOI J, PARK J. MIMO design for internet of things: joint optimization of spectral efficiency and error probability in finite blocklength regime[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(20): 15512-15521.
- [14] SALEHI F, NEDA N, MAJIDI M H, et al. Max-Min Fairness with Selection Combining Strategy on Cooperative NOMA: A Finite Blocklength Analysis[C]// 2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit). 2021: 43-48.
- [15] HU Y, SERROR M, WEHRLE K, et al. Finite blocklength performance of cooperative multi-terminal wireless industrial networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(7): 5778-5792.
- [16] YANG W, DURISI G, KOCH T, et al. Quasi-static multiple-antenna fading channels at finite blocklength[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2014, 60(7): 4232-4265.
- [17] MONDERER D, SHAPLEY L S. Potential games [J]. Games and Economic Behavior, 1996, 14(1): 124-143.
- [18] FLEISCHHACKER A, CORINALDESI C, LETTNER G, et al. Stabilizing energy communities through energy pricing or PV expansion[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 728-737.
- [19] LI K. How to stabilize a competitive mobile edge computing environment: a game theoretic approach[J]. IEEE Access, 2019, 7: 69960-69985.
- [20] CHEN X, WU C, CHEN T, et al. Information freshness-aware task offloading in air-ground integrated edge computing systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(1): 243-258.
- [21] ACCESS E U T R. Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects; 3GPP TR 36. 814, Tech. Rep. [S]. 2010.
- [22] BUZZI S, COLAVOLPE G, SATURNINO D, et al. Potential games for energy-efficient power control and subcarrier allocation in uplink multicell OFDMA systems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2012, 6(2): 89-103.
- [23] LHAZMIR S, OUALHAJ O A, KOBANE A, et al. Matching game with no-regret learning for IoT energy-efficient associations with UAV[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2020, 4(4): 973-981.



XU Hao, born in 1983, Ph.D, associate researcher. His main research interests include high speed railway communication system and synthetic automation of marshalling yard.



YAN Lu, born in 1982, Ph.D, associate researcher. Her main research interests include railway signal and communication, comprehensive dispatching technology.