

认知无线网络中的基站节能策略及纳什均衡研究

马晓彤^{1,2}, 金顺福^{1,2}, 刘建平^{1,3}, 霍占强⁴

(1. 燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 河北省计算机虚拟技术与系统集成重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;
3. 河北科技师范学院数学与信息科技学院, 河北 秦皇岛 066004; 4. 河南理工大学计算机科学与技术学院, 河南 焦作 454000)

摘 要: 认知无线网络在提高频谱利用率的同时, 带来了通信能耗增大的问题。在满足用户体验质量的前提下, 引入绿色通信的理念, 面向基站提出一种新型节能策略。通过构建具有抢占式优先服务和单重工作休假机制的二维离散时间马尔可夫随机模型, 运用矩阵几何解方法, 从系统节能率、信道利用率、认知用户平均延迟及认知用户中断率等方面评估节能策略的系统性能, 并综合理论分析结果和仿真统计结果, 验证节能策略的有效性。从经济学角度出发, 构造收益函数, 设计非线性智能优化算法, 研究认知用户数据分组的纳什均衡与社会最优行为, 面向认知用户制定授权频谱的定价方案。针对不同的系统参数, 进行系统实验, 验证定价方案的合理性。

关键词: 认知无线网络; 节能策略; 单重工作休假; 智能优化; 定价方案

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Study on energy saving strategy and Nash equilibrium of base station in cognitive radio network

MA Xiao-tong^{1,2}, JIN Shun-fu^{1,2}, LIU Jian-ping^{1,3}, HUO Zhan-qiang⁴

(1. School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. The Key Laboratory for Computer Virtual Technology and System Integration of Hebei Province, Qinhuangdao 066004, China;

3. Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao 066004, China;

4. College of Computer Science and Technology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Spectrum utilization can be improved in cognitive radio network (CRN), however, the problem of increasing communication energy consumption was also brought. Under the premise of ensuring the experience quality of system users, the concept of green communication in CRN was introduced, and a novel energy saving strategy for base station was proposed. Accordingly, a two-dimensional discrete time Markov stochastic model with preemptive priority service and single working vacation was established. Using the method of a matrix geometric solution, the system performance of the energy saving strategy was evaluated in terms of energy saving rate, channel utilization, average delay of secondary users and interruption of secondary users. The theoretical analysis results and the simulation results verify the effectiveness of the energy saving strategy. From the perspective of economics, a profit function was constructed and a nonlinear optimization algorithm was designed to investigate the Nash equilibrium and the socially optimal behavior of the secondary user packets, then a pricing policy of licensed spectrum for secondary users was formulated. In view of different system parameters, the system experiment was carried out to validate the rationality of the pricing policy.

Key words: cognitive radio network, energy saving strategy, single working vacation, intelligent optimization, pricing policy

1 引言

随着无线电通信技术的飞速发展和智能终端

设备的广泛普及, 频谱资源紧张的状况日渐突出^[1]。频谱需求增加与频谱资源短缺之间的矛盾, 致使传统固定频谱分配方式^[2]的弊端愈发显现。以提高频

收稿日期: 2016-01-27; 修回日期: 2016-06-18

通信作者: 金顺福, jsf@ysu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61472342, No.61572379)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61472342, No.61572379)

谱利用效率为目标的认知无线电技术^[3]，有效缓解了频谱危机。与此同时，受科学技术发展与环境保护需求的共同驱使，绿色通信^[4]的理念在无线通信领域应运而生。

认知无线电技术的出现，打破了由传统固定频谱分配方式造成的频谱资源利用率不高的局面^[5]。通过感知频谱环境，并基于相关的学习和决策算法，认知无线电可以自适应地改变系统工作参数，如传输功率、载频、调制方式等^[6]。运用认知无线电技术的网络称为认知无线网络，在该网络中，认知用户机会式地占用未被授权用户使用的授权频谱^[7]。

无线通信领域中，作为主要设备的基站因其巨大的能量消耗引起人们的普遍关注。Das 等^[8]运用集中式方法识别活跃的基站，用区域频谱效率作为评价节能策略的性能指标，利用具有全局搜索能力并且能够减少搜寻空间范围的遗传算法，确定所需基站的最小数量以及天线的有效垂直角度，在满足目标流量需求的情况下，做到高效率节能。Jang 等^[9]采用基站间相互协作的思想，将7个遵循网络拓扑结构的蜂窝网组成一个集团簇，每个集团簇的中心基站及其周围的中继站实行不关闭策略，使中心基站能更有效地调度关闭基站上的数据至其他基站，达到节能的目的。

本文在认知无线网络中的基站端引入半休眠模式，提出一种新型节能策略。根据当前数据分组的到达情况以及休眠参数的工作机制，基站可以在唤醒阶段、休眠阶段、低速传输阶段和监听阶段之间转换，以达到既提高频谱效率又节省能量开销的目的。为了研究认知用户的纳什均衡与社会最优行为，基于万有引力思想设计智能优化算法，寻求非线性收益函数中的社会最优到达率。针对不同的系统参数，面向认知用户制定合理的授权频谱定价方案。

2 能量节省策略及系统模型

2.1 能量节省策略

传统的非认知无线网络中，所有用户都处于相同的地位，节能策略对用户的影响也是相同的^[2]；传统的认知无线网络中，虽然用户被分为认知和授权2类用户，但在没有数据分组需要传输的情况下，基站端依然处于开启状态，造成巨大的能量浪费^[10]。针对以上2种网络弊端，在认知无线网络

中^[11]，本文在基站端引入半休眠模式，结合授权用户与认知用户的随机行为以及休眠计时器的工作机制，使基站在唤醒阶段、休眠阶段、低速传输阶段以及监听阶段之间转换，提出一种新型的节能策略。没有认知用户数据分组传输时的休眠阶段与有认知用户数据分组的低速传输阶段共同构成半休眠期。

1) 唤醒阶段到半休眠期。在唤醒阶段，授权用户具有较高的优先级，认知用户只能机会式地进行传输。授权用户和认知用户的数据分组连续交替地传输。当授权、认知用户的数据分组都完成传输并且缓存为空时，基站将关闭部分空中接口进入半休眠期以节省能量。

2) 半休眠期到唤醒阶段。半休眠期的开始时刻激活休眠计时器，用以限制半休眠期的最大长度，保证用户的响应性能。以下3种情况将导致处于半休眠期的基站转换到唤醒阶段。①无论休眠计时器是否到期，授权用户数据分组的到达都将直接终止半休眠期，使基站重新进入唤醒阶段，目的是最大限度地保护授权用户的利益。②在休眠计时器没有到期并且授权用户数据分组没有到达的情况下，如果休眠阶段内有认知用户数据分组的到达，该数据分组将使基站进入低速传输阶段，即该认知用户数据分组将接受较低速率的传输服务；如果在低速传输阶段，有新的认知用户数据分组到达，当正在传输的认知用户数据分组以低速完成传输时，基站将进入唤醒阶段，进行其他数据分组的正常传输。③当休眠计时器到期时，如果恰好有新的数据分组到达或者有一个认知用户数据分组正在以低速传输，则基站将进入唤醒阶段，正在接受服务的认知用户数据分组则以正常速度重新传输。

低速传输阶段不仅能够减少能量消耗，同时，可以有效地改善认知用户数据分组的响应性能。

3) 半休眠期到监听阶段。当休眠计时器到期时，如果基站仍处于休眠阶段，即始终没有数据分组请求服务，则基站将由休眠阶段进入监听阶段。

4) 监听阶段到唤醒阶段。顾名思义，处于监听期的基站随时处于待命状态。无论是授权用户数据分组还是认知用户数据分组的到达，都将触发处于监听阶段的基站立即进入唤醒阶段。相对于低速传输阶段，监听阶段可以有效提高认知用户数据分组的响应性能，降低平均时延。

基站的阶段转换过程如图1所示。

2.2 系统模型

将时间轴划分成相等的时隙间隔，每个间隔点标记成 n ($n=1,2,\dots$)。遵循早到达系统的原则，数据分组的到达发生在时隙的首端 (n, n^+), $n=1,2,\dots$ ，而数据分组的离开只能发生在时隙 n 的末端 (n^-, n), $n=2,3,\dots$ 。

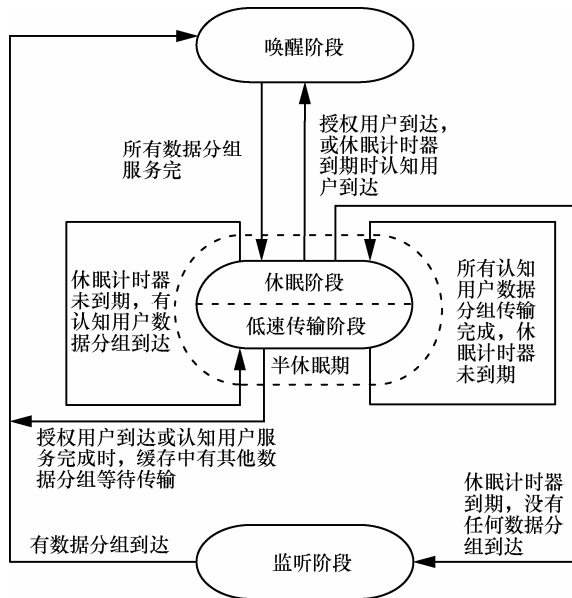


图 1 基站的阶段转换过程

假设授权用户和认知用户数据分组的到达间隔分别服从参数为 λ_{pu} ($0 < \lambda_{pu} < 1, \bar{\lambda}_{pu} = 1 - \lambda_{pu}$) 和 λ_{su} ($0 < \lambda_{su} < 1, \bar{\lambda}_{su} = 1 - \lambda_{su}$) 的几何分布；授权用户与认知用户数据分组处于唤醒阶段的传输时间分别服从参数为 μ_{pu} ($0 < \mu_{pu} < 1, \bar{\mu}_{pu} = 1 - \mu_{pu}$) 和 μ_{su} ($0 < \mu_{su} < 1, \bar{\mu}_{su} = 1 - \mu_{su}$) 的几何分布；认知用户数据分组在低速传输阶段的传输时间服从参数为 μ_v ($0 < \mu_v < 1, \bar{\mu}_v = 1 - \mu_v$) 的几何分布；假设休眠计时器的长度服从参数为 θ 的几何分布。

令 $X_n = i$ ($i = 0, 1, 2, \dots$) 和 $Y_n = j$ ($j = 0, 1, 2, 3$) 分别表示 n^+ 时刻系统中认知用户数据分组的数量（称为水平）和基站当前所处的阶段。其中， $j = 0$ 表示基站处于半休眠期，即休眠阶段或低速传输阶段； $j = 1$ 表示基站处于唤醒阶段且正在为授权用户数据分组服务； $j = 2$ 表示基站处于唤醒阶段且正在为认知用户数据分组服务； $j = 3$ 表示基站处于监听阶段。构建一个具有抢占式优先级服务和单重工作休假形式的二维离散时间马尔可夫链 $\{(X_n, Y_n), n \geq 1\}$ ，用以评价节能策略的系统性能，

其状态空间 Ω 表示为

$$\Omega = \{(i, j), i \geq 0, j = 0, 1, 2, 3\}$$

令 $\pi_{i,j}$ 表示该二维离散时间马尔可夫链的稳态分布， $\pi_{i,j}$ 定义为

$$\pi_{i,j} = \lim_{n \rightarrow \infty} P\{X_n = i, Y_n = j\}, i = 0, 1, 2, \dots, j = 0, 1, 2, 3$$

令 π_i ($i \geq 0$) 表示在稳定状态下，认知用户数据分组的数量，即系统水平的概率分布，则

$$\pi_i = (\pi_{i,0}, \pi_{i,1}, \pi_{i,2}, \pi_{i,3})$$

3 稳态分析

令 P 表示二维离散时间马尔可夫链 $\{(X_n, Y_n), n \geq 1\}$ 的一步转移概率矩阵。考虑到基站的 4 种阶段，将 P 划分成若干具有 4×4 结构的子矩阵。子矩阵的每一行、列都依次代表基站的一种阶段，系统的阶段转移与授权、认知用户的行为以及节能策略的工作机制有关。用 $B_{i,k}$ 代表系统中认知用户经过一步转移从 i ($i = 0, 1, 2, \dots$) 水平转移到 k ($k = 0, 1, 2, \dots$) 水平的转移概率子矩阵。根据一步转移原则，在一个时隙内，认知用户数据分组的个数只能减少一个、固定不变或增加一个。

1) 系统中认知用户数据分组的个数减少一个
系统中有 i ($i \geq 1$) 个认知用户数据分组，经过一个时隙，系统中认知用户数据分组的个数减少一个，即 $k = i - 1$ 。当基站的初始状态为低速传输阶段，即 $j = 0$ 时，认知用户数据分组以概率 μ_v 完成传输；当基站的初始状态为唤醒阶段，即 $j = 2$ 时，认知用户数据分组以概率 μ_{su} 完成传输。

当 $i = 1$ 时，系统中当前认知用户数据分组传输完成，且没有新的认知用户到达。子阵 $B_{1,0}$ 表示为

$$B_{1,0} = \bar{\lambda}_{su} \begin{pmatrix} \bar{\lambda}_{pu}\mu_v\bar{\theta} & \lambda_{pu}\mu_v & 0 & \bar{\lambda}_{pu}\mu_v\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{\lambda}_{pu}\mu_{su} & \lambda_{pu}\mu_{su} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

当 $i > 1$ 时，系统中当前认知用户数据分组传输完成，且没有新的认知用户到达。子阵 $B_{i,i-1}$ 表示为

$$B_{i,i-1} = \bar{\lambda}_{su} \begin{pmatrix} 0 & \lambda_{pu}\mu_v & \bar{\lambda}_{pu}\mu_v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{pu}\mu_{su} & \bar{\lambda}_{pu}\mu_{su} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

2) 系统中认知用户数据分组的个数固定不变
系统中有 $i (i \geq 0)$ 个认知用户数据分组，经过一个时隙，系统中认知用户数据分组的个数不变，即 $k = i$ 。

当 $i = 0$ 时，表示在一个时隙内仍没有认知用户数据分组的到达。子阵 $B_{0,0}$ 表示为

$$B_{0,0} = \bar{\lambda}_{su} \begin{pmatrix} \bar{\lambda}_{pu} \bar{\theta} & \lambda_{pu} & 0 & \bar{\lambda}_{pu} \theta \\ \bar{\lambda}_{pu} \mu_{pu} & W_{pu} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{pu} & 0 & \bar{\lambda}_{pu} \end{pmatrix}$$

其中， $W_{pu} = \lambda_{pu} \mu_{pu} + \bar{\mu}_{pu}$ 表示系统中授权用户数据分组的数量在非零状态下保持不变的概率。

当 $i \geq 1$ 时，需要考虑 2 种情况：①系统中当前认知用户数据分组传输完成离开系统，但又有一个新的认知用户数据分组到达系统；②系统中认知用户数据分组均未完成传输，且没有新的认知用户数据分组到达。

当 $i = 1$ 时，根据节能策略，在休眠计时器未到期的情况下，当基站的初始状态为低速传输阶段，即 $j = 0$ 时，如果系统中唯一的认知用户数据分组传输完成离开系统后，但又有一个新的认知用户数据分组到达，则基站仍保持在低速传输阶段，即 $j = 0$ 。子阵 $B_{1,1}$ 表示为

$$B_{1,1} = \begin{pmatrix} \bar{\lambda}_{pu} \bar{\theta} W_v & \lambda_{pu} W_v & \bar{\lambda}_{pu} \theta W_v & 0 \\ 0 & \bar{\lambda}_{su} W_{pu} & \bar{\lambda}_{su} \bar{\lambda}_{pu} \mu_{pu} & 0 \\ 0 & \lambda_{pu} W_{su} & \bar{\lambda}_{pu} W_{su} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

其中， $W_v = \lambda_{su} \mu_v + \bar{\lambda}_{su} \bar{\mu}_v$ 与 $W_{su} = \lambda_{su} \mu_{su} + \bar{\lambda}_{su} \bar{\mu}_{su}$ 分别表示基站处于 $j = 0$ 与 $j = 2$ 时系统中认知用户数据分组的数量在非零条件下保持不变的概率。

当 $i > 1$ 时，系统中至少有 2 个认知用户。不同于 $i = 1$ 的情况，在休眠计时器未到期的情况下，当基站处于低速传输阶段，即 $j = 0$ 时，系统中一个认知用户数据分组传输完成后，无论有无新的认知用户数据分组到达，基站都将转变为唤醒阶段，即 $j = 2$ 。子阵 $B_{i,i}$ 表示为

$$B_{i,i} = \begin{pmatrix} \bar{\lambda}_{su} \bar{\lambda}_{pu} \bar{\mu}_v \bar{\theta} & \lambda_{pu} W_v & \bar{\lambda}_{pu} \theta W_v + \lambda_{su} \bar{\lambda}_{pu} \mu_v \bar{\theta} & 0 \\ 0 & \bar{\lambda}_{su} W_{pu} & \bar{\lambda}_{su} \bar{\lambda}_{pu} \mu_{pu} & 0 \\ 0 & \lambda_{pu} W_{su} & \bar{\lambda}_{pu} W_{su} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

3) 系统中认知用户数据分组的数量增加一个
系统中有 $i (i \geq 0)$ 个认知用户数据分组，经过一个时隙，系统中认知用户数据分组的数量增加一个，即 $k = i + 1$ 。当基站的初始状态为低速传输阶段，即 $j = 0$ 时，认知用户数据分组以概率 μ_v 完成传输；当基站的初始状态为唤醒阶段，即 $j = 2$ 时，认知用户数据分组以概率 μ_{su} 完成传输。

当 $i = 0$ 时，系统中有新的认知用户数据分组到达。子阵 $B_{0,1}$ 表示为

$$B_{0,1} = \lambda_{su} \begin{pmatrix} \bar{\lambda}_{pu} \bar{\theta} & \lambda_{pu} & \bar{\lambda}_{pu} \theta & 0 \\ 0 & W_{pu} & \bar{\lambda}_{pu} \mu_{pu} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{pu} & \bar{\lambda}_{pu} & 0 \end{pmatrix}$$

当 $i \geq 1$ 时，系统中正在接受服务的认知用户数据分组没有完成传输，且有新的认知用户数据分组到达系统。子阵 $B_{i,i+1}$ 表示为

$$B_{i,i+1} = \lambda_{su} \begin{pmatrix} \bar{\lambda}_{pu} \bar{\mu}_v \bar{\theta} & \lambda_{pu} \bar{\mu}_v & \bar{\lambda}_{pu} \bar{\mu}_v \theta & 0 \\ 0 & W_{pu} & \bar{\lambda}_{pu} \mu_{pu} & 0 \\ 0 & \lambda_{pu} \bar{\mu}_{su} & \bar{\lambda}_{pu} \bar{\mu}_{su} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

至此，转移概率矩阵 P 中的所有子阵都均已给出，分别用 A_0 、 A_1 、 A_2 表示 $B_{i,i-1} (i \geq 2)$ 、 $B_{i,i} (i \geq 2)$ 、 $B_{i,i+1} (i \geq 1)$ 。转移概率矩阵 P 形成一个分块三对角形式如下

$$P = \begin{pmatrix} B_{0,0} & B_{0,1} & & & \\ B_{1,0} & B_{1,1} & A_2 & & \\ & A_0 & A_1 & A_2 & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots \end{pmatrix}$$

P 的结构表明，系统的转移只能发生在相邻的水平。因此，二维离散时间马尔可夫链 $\{(X_n, Y_n), n \geq 1\}$ 可以视为拟生灭过程。运用矩阵几何解，可以推导出系统的稳态分布 $\pi_{i,j}$ 。

转移概率矩阵 P 的拟生灭链 $\{(X_n, Y_n), n \geq 1\}$ 正常返的充分必要条件是矩阵二次方程 $R^2 A_0 + R A_1 + A_2 = R$ 的最小非负解 R 的谱半径 $SP(R) < 1$ ，且随机阵

$$B[R] = \begin{pmatrix} B_{0,0} & B_{0,1} \\ B_{1,0} & B_{1,1} + R A_0 \end{pmatrix}$$

有正左不变向量。二维离散时间马尔可夫链的平稳分布满足

$$\begin{cases} \pi_k = \pi_1 \mathbf{R}^{k-1}, & k \geq 2 \\ (\pi_0, \pi_1) \mathbf{B}[\mathbf{R}] = (\pi_0, \pi_1) \\ \pi_0 \mathbf{e} + \pi_1 (\mathbf{I} - \mathbf{R})^{-1} \mathbf{e} = 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, \mathbf{e} 是 4 维全 1 列向量, \mathbf{I} 为 4 维单位矩阵。

通过式(1)可以给出系统稳态分布 $\pi_i (i=0,1,2,\dots)$ 的数值解。

4 性能指标与系统实验

4.1 性能指标

系统节能率 ϕ 定义为所提节能策略的整体节能水平。尽管在监听阶段没有任何数据分组需要传输,但基站处于待命状态,实时监听授权或认知用户数据分组是否到达。因此,监听阶段的能耗一般要高于低速传输阶段。令 1 、 ρ_H 、 ρ_L 、 0 分别表示基站处于休眠阶段、低速传输阶段、监听阶段以及唤醒阶段时的节能水平。系统节能率 ϕ 表达式为

$$\phi = 1 \cdot \pi_{0,0} + \rho_H \sum_{i=1}^{\infty} \pi_{i,0} + \rho_L \sum_{i=0}^{\infty} \pi_{i,3}$$

认知用户数据分组平均时延 W 定义为一个认知用户数据分组从进入系统的时刻开始到其成功传输完成的时刻为止的平均时隙间隔。运用 Little 公式^[10], 认知用户数据分组平均时延 W 的表达式为

$$W = \frac{1}{\lambda_{su}} \sum_{i=0}^{\infty} i (\pi_{i,0} + \pi_{i,1} + \pi_{i,2} + \pi_{i,3}) \quad (2)$$

认知用户中断率 ω 定义为因授权用户数据分组的到达迫使正在接受服务的认知用户数据分组中断传输并返回缓存的概率。认知用户中断率 ω 的表达式为

$$\omega = \sum_{i=0}^{\infty} (\pi_{i,0} \lambda_{pu} \bar{\mu}_v + \pi_{i,2} \lambda_{pu} \bar{\mu}_{su})$$

信道利用率 ψ 定义为单位时隙内信道被授权或认知用户数据分组正常占用的概率。在系统阶段为 $j=0$ 或 $j=2$ 的情况下,如果认知用户数据分组数量大于 1,则信道处于占用状态;在系统阶段为 $j=1$ 的情况下,信道一定处于占用状态。因此,信道利用率 ψ 的表达式为

$$\psi = \sum_{i=0}^{\infty} \pi_{i,1} + \sum_{i=1}^{\infty} (\pi_{i,0} + \pi_{i,2})$$

4.2 系统实验

利用数值及仿真实验,评估休眠参数 θ 对所提

节能策略的影响。文献[12]设置系统参数如下: $\mu_{pu} = 0.7$, $\mu_{su} = 0.8$ 以及 $\mu_v = 0.2$ 。图 2~图 5 分别表示休眠参数 θ 对系统节能率 ϕ 、认知用户平均时延 W 、认知用户中断率 ω 以及信道利用率 ψ 的影响。此外,在实验中,还给出半休眠模式 ($\mu_v > 0$) 与全休眠模式 ($\mu_v = 0$) 的系统性能对比,以验证本文所提节能策略的有效性。

平行于文献[13],在数值及仿真实验中分别设置节能水平 $\rho_H = 0.6$, $\rho_L = 0.4$ 。图 2 表示在不同的授权用户数据分组到达率 λ_{pu} 及认知用户数据分组到达率 λ_{su} 下,休眠参数 θ 对系统节能率 ϕ 的影响。

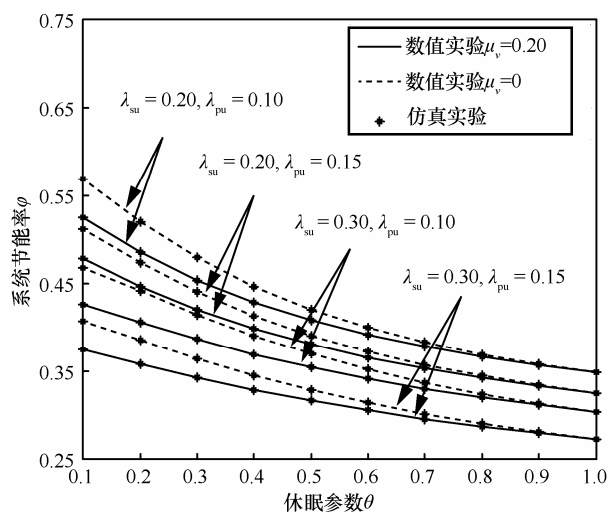


图 2 系统节能率的变化趋势

数值及仿真实验的运行环境为 Matlab 2010a, Intel(R) Core, i7-3770 CPU @ 3.40 GHz, 8.00 GB RAM。仿真结果是独立运行程序 10 次的平均值。

图 2 中,横向对比,随着休眠参数逐渐增大,系统节能率呈现下降的趋势。休眠参数表示系统结束休眠的概率,即休眠参数越大,系统结束休眠的概率越大,基站处于休眠阶段和低速传输阶段的时间越短,因此,系统节能率下降。纵向对比,固定休眠参数 $\theta = 0.5$,无论从授权用户方面还是认知用户方面,随着用户到达率的增加,系统节能率同样呈现下降的趋势。原因在于用户数据分组到达率的增加,延长了基站处于唤醒阶段的时间,系统节能率因此呈降低趋势。从图 2 还可以看出,半休眠模式 ($\mu_v > 0$) 的系统节能率略低于全休眠模式 ($\mu_v = 0$),其根本原因在于半休眠模式中低速传输阶段的引入。随着休眠参数的增加,2 种模式之间节能率的差异越来越小。休眠参数越大,低速传

输阶段占整体比重越小，系统节能率的降低程度也因此变小。

以认知用户数据分组到达率 $\lambda_{su} = 0.1$ 为例，图 3 表示在不同的授权用户数据分组到达率 λ_{pu} 下，休眠参数 θ 对认知用户平均时延 W 的影响。

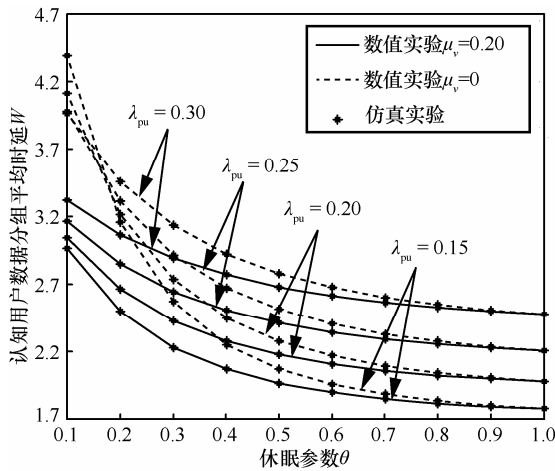


图 3 认知用户数据分组平均时延的变化趋势

图 3 中，横向对比，随着休眠参数的增大，认知用户数据分组平均时延逐渐降低。休眠参数的增大延长了基站处于唤醒阶段的时间。在传输机会相同的情况下，基站处于唤醒阶段时，次级用户数据分组的传输速度更快，从而降低了认知用户数据分组的平均时延。纵向对比，固定休眠参数，以 $\theta = 0.5$ 为例，随着授权用户到达率的增加，认知用户数据分组的平均时延逐渐增加。授权用户到达率越大，处于唤醒阶段的基站被授权用户占用的概率越大，认知用户数据分组的等待时间增大，因此，认知用户数据分组平均延迟增大。由图 3 还可以看出，与全休眠模式 ($\mu_v = 0$) 相比，半休眠模式 ($\mu_v > 0$) 下的认知用户数据分组平均时延大幅度地降低。半休眠模式中低速传输阶段的引入，有效地提高了认知用户的响应性能，且随着休眠参数逐渐变小，这种优势愈发明显。

基站节能与认知用户时延之间存在一定的矛盾。为了调和全休眠模式对认知用户平均时延的忽视，本文引入半休眠机制，以牺牲部分能耗的代价提高认知用户的响应性能，折中系统节能率与认知用户平均时延。

图 4 表示在不同的授权用户数据分组到达率 λ_{pu} 及认知用户数据分组到达率 λ_{su} 下，休眠参数 θ 对认知用户中断率 ω 的影响。

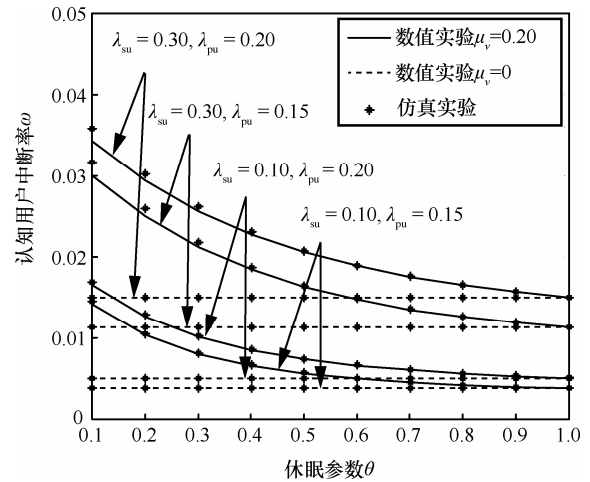


图 4 认知用户中断率的变化趋势

图 4 中，横向对比，随着休眠参数的增大，认知用户中断率逐渐降低。休眠参数越大，认知用户数据分组进行高速传输的可能性越大。认知用户数据分组高速传输意味着总传输时间变短，被新到达的授权用户数据分组中断的可能性变小，因此，认知用户中断率变小。纵向对比，固定休眠参数，如 $\theta = 0.5$ ，无论是授权用户还是认知用户数据分组到达率的增大，都会引起认知用户中断率的增大。在认知用户数据分组接受服务的过程中，新到达的授权用户数据分组抢占网络资源，认知用户被迫终止数据传输。一方面，认知用户数据分组的到达率越大，一个授权用户数据分组到达系统时恰逢信道被认知用户数据分组占用的概率也就越大；另一方面，授权用户数据分组的到达率越大，一个正在被服务的认知用户数据分组被新到达的授权用户数据分组中断的机率越大。因此，授权用户及认知用户任何一方的数据到达率增大，都将加大认知用户中断数据传输的可能性，认知用户中断率因此呈上升趋势。由图 4 可以看出，与全休眠模式 ($\mu_v = 0$) 相比，半休眠模式 ($\mu_v > 0$) 下认知用户中断率略高。半休眠模式中的低速传输阶段是引起认知用户中断率增大的主要原因。

图 5 表示在不同授权用户数据分组到达率 λ_{pu} 及认知用户数据分组到达率 λ_{su} 下，休眠参数 θ 对信道利用率 ψ 的影响。

图 5 中，横向对比，随着休眠参数的增加，信道利用率逐渐降低。当其他系统参数固定时，休眠参数越大，基站处于半休眠期的时间越短，处于唤醒阶段的时间越长。处于唤醒阶段时，认知用户数据分组传输速率高于低速传输阶段的传输速率，认

知用户数据分组占用信道的总时间变短，因此，信道利用率降低。纵向对比，固定休眠参数，如 $\theta = 0.5$ ，授权用户或认知用户数据分组到达率的增大无疑会使系统负载变大，信道的利用率因此增大。由图 5 可以看出，与全体眠模式 ($\mu_v = 0$) 相比，半休眠模式 ($\mu_v > 0$) 下信道利用率更高。在半休眠模式中的低速传输阶段，认知用户依然可以占用信道进行数据传输，从而提高信道利用率。在相同输入压力的情况下，信道利用率的提高意味着系统负载愈加均衡。

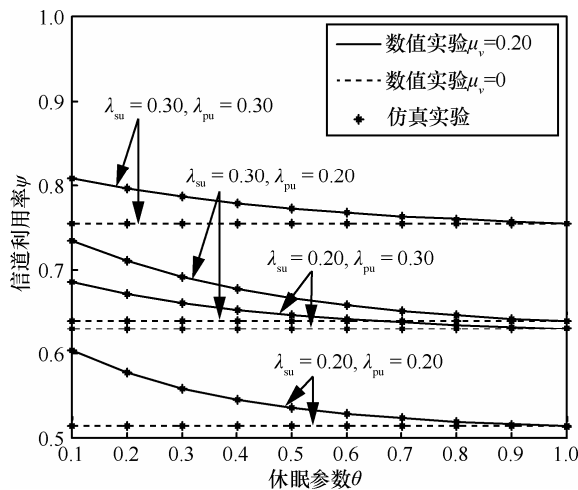


图 5 信道利用率的变化趋势

综上，本文所提的基于半休眠模式的新型节能策略在保证系统节能水平的前提下，有效降低了认知用户数据分组平均时延，并提高了信道利用率。考虑到授权用户身份的特殊性，令半休眠期内到达的授权用户立即使基站返回唤醒状态，最大限度地保护授权用户的传输质量。

5 性能优化及定价方案

根据所提节能策略，探究认知用户数据分组的纳什均衡及社会最优行为，并面向认知用户提出授权频谱的定价方案。

5.1 性能优化

认知用户传输完成将会获得一份收益。任何一个认知用户都想接入系统获得收益。然而，认知用户到达率越高，平均时延也就越大，致使收益变少。

基于所建立的系统模型，给出以下假设条件。

- 1) 令 R 表示一个认知用户数据分组传输完成获得的收益。
- 2) 令 C 表示认知用户数据分组在系统中逗留

单位时隙所耗费的成本。

3) 令 S 表示节省单位能耗带来的收益。

4) 所有认知用户数据分组的收益可以叠加。

认知用户数据分组的个人收益函数定义为 $U_i = R - CW$ 。

将系统社会收益定义为所有认知用户的个人收益与基站的节能收益之和。没有向认知用户收费前，聚合认知用户数据分组的个人收益函数，并考虑基站的节能效果，可得系统社会收益函数如下

$$U_{soc} = \lambda_{su}(R - CW) + S\phi \quad (3)$$

为了更好地探究认知用户数据分组的个人收益函数以及系统社会收益函数的变化规律，进行函数 U_i 和 U_{soc} 的数值实验。沿用第 4 节给出的实验参数，并设定 $R = 4.5$ 、 $C = 0.8$ 、 $S = 5$ 、 $\lambda_{pu} = 0.3$ 。

图 6 和图 7 分别表示认知用户数据分组的个人收益 U_i 和系统社会收益 U_{soc} 的变化趋势。

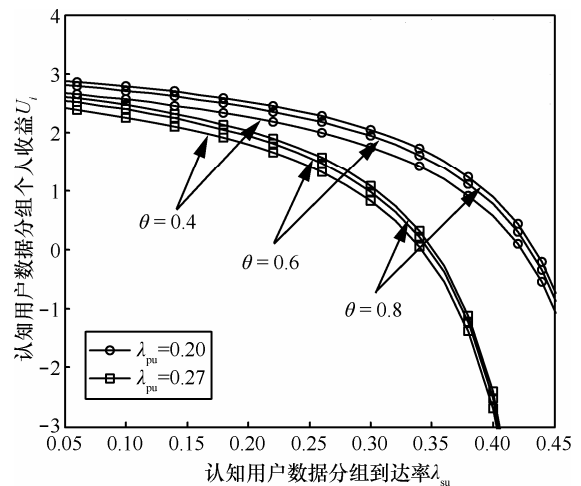


图 6 认知用户数据分组个人收益的变化趋势

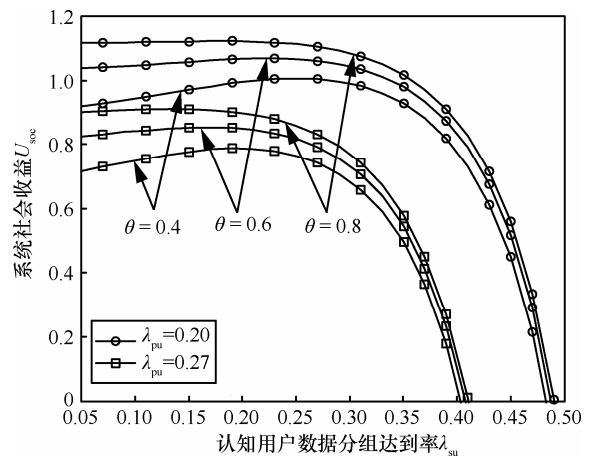


图 7 系统社会收益的变化趋势

由图 6 可以看出, 随着认知用户数据分组到达率的增大, 个人收益呈现下降的趋势。传输完成而获得的收益对于认知用户数据分组是一个巨大的诱惑, 因此, 所有的认知用户数据分组都想要进入系统获得传输机会。认知用户数据分组平均时延随着认知用户到达率的增大而增大, 从而导致个人收益减小。不难发现, 对于图 6 中的每一条曲线, 都存在唯一的认知用户数据分组到达率 λ_{su} , 使认知用户数据分组个人收益 $U_i = 0$, 该到达率称为认知用户数据分组纳什均衡到达率, 记为 λ_{su}^e 。

由图 7 可以看出, 横向对比, 随着认知用户数据分组到达率的增加, 系统社会收益呈现先上升后下降的趋势。因为在认知用户数据分组到达率较小时, 影响系统社会收益的主要因素是传输完成获得的收益, 因此, 认知用户数据分组到达率越大系统社会收益越大。在认知用户数据分组到达率较大时, 认知用户数据分组的平均时延急剧增加, 系统节能率也不断降低, 因此, 随着认知用户数据分组到达率的增大系统社会收益不断减小。纵向对比, 当休眠参数 θ 一定时, 授权用户数据分组到达率的增大在加大认知用户数据分组平均时延的同时还减弱了系统的节能率, 最终导致系统社会收益的减小。当授权用户到达率 λ_{pu} 一定时, 休眠参数的增大有效降低了认知用户数据分组的平均时延, 从而系统社会收益变大。

由于认知用户数据分组平均时延和系统社会收益函数的封闭解很难给出, 并且系统社会收益函数的严格单调性也无法确定。因此, 无论是简单的数值算法或分析方法都不适用于解决本文的优化问题。受万有引力思想^[14]的启发, 本文给出求解认知用户数据分组社会最优到达率 λ_{su}^* 以及最大社会收益 U_{soc}^* 的智能优化算法。主要步骤如下。

Step1 初始化 N 为算法中代理的个数, L 为代理位置的更新次数 (内层循环次数), K 为最优解的个数 (外层循环次数), ε 为表征计算精度的常量 (如 $\varepsilon = 10^{-6}$)。

Step2 在约束条件 $[0, 1]$ 内, 随机设置每一个代理的位置, 即 λ_{su}^h 。 λ_{su}^h 表示第 h 个代理的位置, $h \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。

Step3 计算每一个代理的质量 $M(h)$, $h \in \{1, 2, \dots, N\}$

$$U_{soc}^t = \lambda_{su}^t (R - CW^t)$$

$$worst = \min_{t \in \{1, 2, \dots, N\}} U_{soc}^t$$

$$best = \max_{t \in \{1, 2, \dots, N\}} U_{soc}^t$$

$$m(h) = \frac{U_{soc}^h - worst}{best - worst}$$

$$M(h) = \frac{m(h)}{\sum_{t=1}^N m(t)}$$

其中, W^t 是认知用户数据分组到达率为 λ_{su}^t 时的平均时延。

Step4 计算每一个代理的重力 $F(h)$, $h \in \{1, 2, \dots, N\}$

$$F_{ht} = G \frac{M(t)M(h)}{|\lambda_{su}^h - \lambda_{su}^t| + \varepsilon}$$

$$F(h) = \sum_{t=1, t \neq h}^N rand_t F_{ht}$$

其中, $rand_t$ 表示第 t 个 $[0, 1]$ 间的随机数, G 表示引力常量。

Step5 计算每一个代理的加速度 $a(h)$ 和速度 $V(h)$, 并更新其位置 λ_{su}^h , $h \in \{1, 2, \dots, N\}$

$$a(h) = \frac{F(h)}{M(h)}$$

$$V(h) = rand_h V(h) + a(h)$$

$$\lambda_{su}^h = \lambda_{su}^h + V(h)$$

Step6

if {代理位置更新次数没有达到上限 L }

then 跳转到 Step3

else if {最优解的个数没有达到上限 K }

then

$$U_{soc}^t = \lambda_{su}^t (R - CW^t), \quad \lambda[x] = \arg \max_{t \in \{1, 2, \dots, N\}} U_{soc}^t,$$

$x = x + 1$, 跳转到 Step2。

其中, $\lambda[x]$ 是一个存储最优解的数组,

$x \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。

else

$$\lambda_{su}^* = \text{average}(\lambda[x])$$

$$U_{soc}^* = \lambda_{su}^* (R - CW^*)$$

end if

Step7 输出 λ_{su}^* 和 U_{soc}^* 。

在算法中,代理的质量是一个与社会收益有关的函数。因代理质量而产生的万有引力不断牵引着代理,使其位置发生变化,最终移动到最优解的位置,即社会最优到达率 λ_{su}^* 。

万有引力算法的复杂度 T 取决于代理位置的更新次数 L 、所选的代理个数 N 以及决策变量的维数 γ 。本文中,认知用户数据分组的到达率是唯一的决策变量,因此,决策变量的维数为 $\gamma=1$ 。万有引力算法的时间复杂度 T 表示为

$$T = O(LN)$$

将几组授权用户数据分组到达率 λ_{pu} 、休眠参数 θ 以及低速传输阶段服务率 μ_i 代入算法,可以获得认知用户数据分组的社会最优到达率 λ_{su}^* 和最大社会收益 U_{soc}^* 。

表 1 为认知用户数据分组社会最优行为。

表 1 认知用户数据分组社会最优行为数值结果

授权用户数据分组到达率 λ_{pu}	休眠参数 θ	认知用户数据分组社会最优到达率 λ_{su}^*	最大社会收益 U_{soc}^*
0.20	0.40	0.252 1	1.007 3
0.20	0.60	0.224 9	1.069 8
0.20	0.80	0.181 9	1.124 1
0.27	0.40	0.196 2	0.788 9
0.27	0.60	0.168 8	0.854 9
0.27	0.80	0.125 4	0.911 8

对比表 1 及图 6 中共有的参数可以发现,每组参数下的认知用户数据分组社会最优到达率 λ_{su}^* 都小于对应的认知用户数据分组纳什均衡到达率 λ_{su}^e 。为了消除 λ_{su}^* 与 λ_{su}^e 之间的差值,对认知用户制定授权频谱定价方案。

5.2 定价方案

为了实现能量节省策略的社会最优,首要任务就是抑制认知用户数据分组的贪婪性。针对认知用户数据分组制定合理的定价方案,迫使认知用户数据分组纳什均衡到达率 λ_{su}^e 降低到社会最优到达率 λ_{su}^* 。设定授权频谱接入费用为 f , 认知用户数据分组的个人收益函数修改为

$$U_i' = R - CW - f$$

令 $U_i' = 0$, 可得到纳什均衡状态下授权频谱接

入费用 f 的表达式为

$$f = R - CW \tag{4}$$

将表 1 中的认知用户数据分组社会最优到达率 λ_{su}^* 代入式(2), 可以获得对应到达率下的认知用户平均时延 W , 再代入式(4), 获得授权频谱接入费用 f 。授权频谱接入费用的数值结果如表 2 所示。

表 2 授权频谱接入费用数值结果

授权用户数据分组到达率 λ_{pu}	休眠参数 θ	认知用户数据分组社会最优到达率 λ_{su}^*	授权频谱接入费用 f
0.20	0.40	0.252 1	2.252 4
0.20	0.60	0.224 9	2.425 4
0.20	0.80	0.181 9	2.517 4
0.27	0.40	0.196 2	1.775 1
0.27	0.60	0.168 8	1.927 6
0.27	0.80	0.125 4	2.014 6

从表 2 可以看出,在授权用户数据分组到达率一定的情况下,休眠参数越大,授权频谱接入费用越高。这是因为休眠参数越大,基站处于半休眠状态的时间越短,认知用户的平均时延越小,意味着有更多的认知用户到达系统。为了控制认知用户到达率,授权频谱接入费用要逐步提高。当休眠参数一定时,授权用户数据分组到达率的增加,使认知用户平均时延增加,致使认知用户数据分组不愿意进入系统等待。因此,降低频谱接入费用以吸引更多的认知用户数据分组。

引入授权频谱接入费用 f 后,重新计算社会收益函数 U_{soc}' 为

$$\begin{aligned} U_{soc}' &= \lambda_{su} (R - CW - f) + S\phi + \lambda_{su} f \\ &= \lambda_{su} (R - CW) + S\phi \end{aligned} \tag{5}$$

比较式(3)和式(5),可以发现,收费前后的社会收益函数是一致的。尽管对认知用户数据分组制定了定价方案,但所收取的接入费用依然是社会收益的一部分,即费用从认知用户端转移到基站端,这就是社会收益函数没有发生变化的原因。

6 结束语

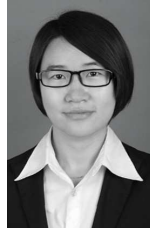
实现绿色通信与提高频谱效率具有非常重大的现实意义。本文针对以上两点,面向认知无线网络中的基站端提出一种新型的节能策略。通过构建具有抢占式优先服务和单重工作休假机制的二维

离散时间马尔可夫随机模型, 给出系统节能率、信道利用率、认知用户平均延迟及认知用户中断率等系统性能指标。系统理论及仿真实验结果表明, 本文所提策略在兼顾系统节能及提高频谱效率的同时有效降低了认知用户数据分组的平均时延, 并提高了系统负载的均衡性。从经济学角度出发, 研究了认知用户数据分组的纳什均衡及社会最优行为, 面向认知用户提出合理的授权频谱定价方案, 实现了新型节能策略下的社会最优。

参考文献:

- [1] SAHIN M E, ARALAN H. System design for cognitive radio communications[C]//International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications. c2006: 1-5.
- [2] SALEEM Y, SALIM F, REHMANI M H. Routing and channel selection from cognitive radio network's perspective: a survey[J]. Computers and Electrical Engineering, 2015, 42: 117-134.
- [3] GEIRHOFER S, TONG L, SADLER B M. Cognitive medium access: constraining interference based on experimental models[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1): 95-105.
- [4] LAY K T, CHEN J Y, LUO W D. Green communication in a relay-assisted network[C]//Intelligent Green Building and Smart Grid. c2014: 1-4.
- [5] VARADE P S, RAVINDER Y. Optimal spectrum allocation in cognitive radio using genetic algorithm[C]//Emerging Trends and Innovation in Technology. c2014: 1-5.
- [6] MALHOTRA M, AULAKH I K, VIG R. A review on energy based spectrum sensing in cognitive radio networks[C]//Futuristic Trends on Computational Analysis and Knowledge Management. c2015: 561-565.
- [7] JOSHI D R, POPESCU D C, DOBRE O A. Dynamic spectral shaping in LTE-advanced cognitive radio systems[C]//Radio and Wireless Symposium. c2013:19-21.
- [8] DAS S S, AGRAWAL P, CHANDHAR P. Energy saving in OFDMA networks through base station sleep mode using genetic algorithm[C]//Vehicular Technology Conference. c2013: 1-5.
- [9] JANG H C, HUANG P Y. Adaptive energy saving strategy for LTE-advanced networks[C]//International Conference on Ubiquitous and Future Networks. c2015: 306-310.
- [10] CHEN T, YANG Y, ZHANG H, et al. Network energy saving technologies for green wireless access networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(5): 30-38.
- [11] WU X, XU J L, CHEN M, WANG J B. Optimal energy-efficient sensing in cooperative cognitive radio networks[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2014, (10): 1-10.
- [12] ENGARAJAN B, RIZZO G, MARSAN M A. Energy-optimal base station density in cellular access networks with sleep modes[J]. Computer Networks, 2015, 78(2): 152-163.
- [13] EENEY L M, NILSSON M. Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment[C]//The 20th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. c2001: 1548-1557.
- [14] YAZDANI S, NEZAMABADI-POUR H, KAMYAB S. A gravitational search algorithm for multimodal optimization[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2014, 14(2): 1-14.

作者简介:



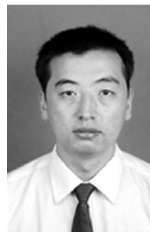
马晓彤(1990-), 女, 河北石家庄人, 燕山大学硕士生, 主要研究方向为网络资源分配与优化。



金顺福(1966-), 女, 朝鲜族, 内蒙古满洲里人, 燕山大学教授、博士生导师, 主要研究方向为网络资源分配与优化、排队论等。



刘建平(1980-), 男, 河北滦南人, 河北科技师范学院讲师, 燕山大学博士生, 主要研究方向为网络资源分配与优化、排队论等。



霍占强(1979-), 男, 河北邯郸人, 河南理工大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为计算机系统及网络的性能分析、离散时间排队理论、计算机网络协议的分析。