

基于排队时延及博弈分析的认知无线网络信道分配算法

刘军, 谢秀峰

(电子科技大学 通信抗干扰技术国家级重点实验室, 四川 成都 611731)

摘要: 提出了一种适用于认知无线网络的分布式动态频谱资源分配算法。该方法以业务分组的传输成功率作为用户的效用函数, 通过优先级排队模型求解传输时延, 并采用分布式博弈获得各用户的信道分配策略。与已有的算法相比, 所提算法对策略迭代方式进行了改进, 且采用了动态策略调整步长。各从用户根据当前感知的网络状态和其余用户的策略, 不断动态调整自身的信道选择策略。所提出的算法能够使各认知用户信道选择策略更加快速地收敛到策略均衡点, 有效抑制策略的振荡, 减小分组丢失率。基于 MATLAB 对所提出的算法的性能进行了仿真, 仿真结果验证了该算法的有效性。

关键词: 排队时延; 博弈; 认知无线网络; 动态频谱资源分配

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)06-0073-09

Cognitive network channel allocation method based on the queuing delay and game analysis

LIU Jun, XIE Xiu-feng

(National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: A new dynamic spectrum allocation method for distributed cognitive radio networks was proposed. In the method, packet transmission success rate is chosen as the utility function, the transmission delay is resolved by the priority queuing model, and the user's channel allocation strategy is achieved by distributed game. Compared with other algorithms, the policy iteration process is improved effectively, and a dynamic strategy adjustment step is adopted. Each network user dynamically adjust their channel choose strategy based on current perception of the remaining user's strategy. The proposed algorithm lets channel selection strategy converge more quickly to equilibrium point, and effectively suppresses the policy shocks. The simulation results validate the proposed algorithm.

Key words: queuing delay; game theory; cognitive radio networks; dynamic spectrum allocation

1 引言

认知无线网络 (CWN, cognitive wireless network) 技术能够感知频谱资源空洞, 提高频谱资

源的利用效率, 解决频谱资源短缺的问题, 是当前通信技术研究的重要方向^[1~3]。1999年, Joseph Mitola 等人在软件无线电的基础上提出了认知无线电 (CR, cognitive radio) 的概念^[4]。之后, 在美国联邦

收稿日期: 2011-08-23; 修回日期: 2012-01-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 基金资助项目 (2009CB320405); 国家科技重大专项基金资助项目 (2010ZX03005-002); 中央高校基本科研业务费基金资助项目 (ZYGX2011X019)

Foundation Items: The National Basic Research Program of China (973 Program)(2009CB320405); The Important National Science & Technology Specific Projects (2010ZX03005-002); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (ZYGX2011X019)

通信委员会的率先推动下^[5,6], 认知无线网络受到了学术界的高度关注。

分布式信道选择技术是认知无线网络的重要研究内容, 目前在分布式信道选择方面已经存在大量的研究成果。文献[7]提出了基于规则的频谱管理方法, 用户测量本地干扰模式, 并按规则做出独立的决策行为。文献[8]提出了一种用户可选择多个信道传输数据分组并交互各个信道的干扰价格的频谱共享方案。这些信道分配方案都假设用户是合作的, 以便更有效地协调他们的信道选择策略。

然而, 就像 Maxim Raya 指出的^[9], 用户为了能得到更高的效用, 可能并没有意愿参与协作以最大化网络/系统的性能, 因为这并不一定会最大化用户自己的效用。因此, 非合作博弈理论被用于分析和描述不同通信系统中用户的相互行为。例如, 文献[10]的研究表明, 目前基于退避的 MAC 协议可以建模为一个非合作的信道接入博弈。文献[11]研究的分布式信道选择问题表明, 在非合作多信道无线网络中, 用户的分布式自主信道选择具有纳什均衡 (NE, Nash equilibrium)。为了优化多用户系统的效用, 文献[12]提出了一种网络效用最大化方法, 研究表明, 通过用户间的信息交互, 能够以分布式的方式获得 Pareto 有效的无线信道访问策略。

Hsien-Po Shiang 等人提出了一种基于分布式博弈的信道资源分配方法^[13]。该方法适用于分布式 CRN 网络传输时延敏感的业务, 其基本思想如下: 各认知用户按照自身策略为每个分组独立选择信道, 并在传输过程中不断计算当前自身在各信道上的分组丢失率, 用以描述信道质量, 进而动态调整策略以提高分组传输成功率。这种方法最大的特点是采用认知用户在各信道上业务流量的宏观分配比例作为信道选择策略, 减小了问题分析的复杂程度, 具有比较重要的应用价值。然而该方法还存在以下缺陷: 首先, 为实时了解当前各信道的传输质量, 各用户需要不断侦听所有信道, 感知全网其余用户的信道选择行为, 据此估计当前各信道的传输质量, 会带来明显的滞后效应; 其次, 该方法在策略调整部分中使用的迭代算法收敛速度较慢, 会导致用户的策略不能及时随环境的变化调整; 最后, 该算法即使在稳定的网络环境下全网用户的策略也不能收敛到稳定的结果, 而是在均衡点附近振荡。

本文提出的算法针对 Hsien-Po Shiang 等人算法存在的问题进行了改进。首先, 要求各用户定期主动交换所采用的信道选择策略, 以提高信道质量估计的准确性。其次, 对策略迭代公式进行了改进, 使用动态调整的迭代步长, 在初始阶段使用较大的步长, 快速而粗略地逼近最优策略, 随后在到达纳什均衡点附近时使用较小的步长, 精确地逼近最优策略。算法兼顾了收敛的速度与准确性, 抑制了周期性振荡。

2 网络模型与博弈分析

2.1 网络模型

本文所提出的信道分配算法是基于如图 1 所示的认知无线网络场景, 充分考虑了认知无线网络的信道、用户、业务和传输特性。

2.1.1 信道特性

网络中存在一个公共控制信道, 用于各从用户 SU 之间进行信息交互。网络中有 N 个从用户, M 个信道, 每个信道属于一个主用户 PU。

2.1.2 用户特性

主用户 PU 是信道的授权用户, 拥有对某个信道的专属使用权, 但也只能使用该信道进行传输, 每个信道上只有一个 PU, 主用户不需要具备认知功能。从用户 SU 指未获信道授权的用户, 网络中的 SU 节点都没有获得信道授权。SU 为发送的每个分组独立选择信道, 在一段时间内 SU 可以动态地选择多条信道进行传输, 这在宏观上表现为分组流量在各信道上的分配, 不同的流量分配比例将会导致不同的传输性能。

2.1.3 业务特性

泊松过程是各类通信问题中最常用的输入模型, 在本文中对网络用户的分组到达过程使用泊松过程建模。假设信道 F_j 上的主用户 PU_j 的分组到达过程是参数为 λ_j^{PU} 的泊松过程, 从用户 SU_i 的分组到达过程是参数为 λ_j 的泊松过程。设 SU_i 对应的业务比率为 B_i (bit/s), 平均分组长度为 L_i (bit), 则其分组到达率 $\lambda_i = B_i/L_i$ 。

2.1.4 传输特性

数据传输比特率是描述用户性能所需的重要物理层参数, 由于数据传输比特率不仅与用户自身物理层的传输能力有关, 还与所选信道的带宽等情况有关, 因此, SU_i 使用不同信道 F_j 进行传输有独立的物理传输比特率 T_{ij} 。

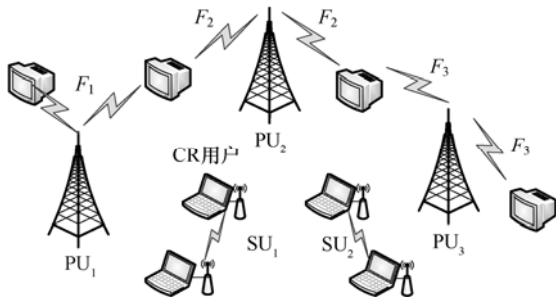


图 1 认知无线网络系统

同时由于无线介质中存在各种干扰，传输环境十分恶劣，分组传输出错不可避免，因此使用分组出错率描述信道环境的恶劣性。考虑到调制方式与纠错编码方式等因用户而异的因素对分组出错率的影响，认为不同从用户 SU_i 使用信道 F_j 进行传输有独立的分组出错率 p_{ij} 。假设这些参数在博弈算法执行时间范围内不变，可近似地将 $R_{ij}=[T_{ij}, p_{ij}]$ 作为从用户 SU_i 使用信道 F_j 的静态信道条件。

假设在本网络中使用分组出错重传的方式并对重传次数不做限制(在实际应用中，分组重传的次数是有限的)，则 SU_i 选择信道 F_j 的分组传输时间 X_{ij} 服从参数为 p_{ij} 的几何分布。根据几何分布的相关性质，分组传输时间 X_{ij} 的平均值 $E[X_{ij}]$ 与二阶原点矩 $E[X_{ij}^2]$ 的计算公式如下：

$$E[X_{ij}] = \frac{L_i}{T_{ij}(1-p_{ij})} \tag{1}$$

$$E[X_{ij}^2] = \frac{L_i^2(1+p_{ij})}{T_{ij}^2(1-p_{ij})^2} \tag{2}$$

2.2 博弈分析

在认知无线网络中，多个从用户 SU 对各信道的分布式动态共享可以视为从用户 SU 之间进行的博弈。博弈的标准表述包括 3 个要素：博弈的参与者、每个参与者可选择的策略和每个参与者的效用函数。

2.2.1 博弈的参与者

博弈的参与者是全网所有的 SU ，由于 PU 是信道的授权用户，只能使用分配给自己的信道进行传输，无法改变对信道的选择，因此 PU 并不参与博弈。虽然 PU 不参与 SU 之间的博弈也不受该博弈结果的影响，但会作为信道质量的一个决定因素对博弈的结果施加单向影响，若某信道上的 PU 业务流量很大，则 SU 在博弈中会逐步减小在该信道上分配的流量以获取更好的性能。

2.2.2 每个参与者可选择的策略

在博弈模型中，以 SU 为每个分组传输所进行

的信道选择作为博弈者的行为(action)。由于各个 SU 都试图猜测其他 SU 的信道选择，使用未被其他 SU 使用的信道进行传输，根据博弈论的分析，在参与者相互猜测彼此行动的情况下，用参与者的行为表示的纳什均衡(Nash equilibrium)不存在。

因此采用博弈论中的混合博弈，以 SU 选择各信道的概率分布来作为 SU 的策略(strategy)。根据博弈论的分析，在 SU 之间进行的博弈中，虽然以参与者的行为表示的纳什均衡并不存在，但存在以参与者的策略表示的纳什均衡，即算法所要寻找的最优策略。 SU_i 的策略可以用策略向量 s_i 来表示，其中的每个分量 s_{ij} 代表 SU_i 为每个分组选择信道 F_j 的概率。 $s_i = \{s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{iM}\}$ ，其中， $s_{ij} \in [0, 1]$ ，如图 2 所示。

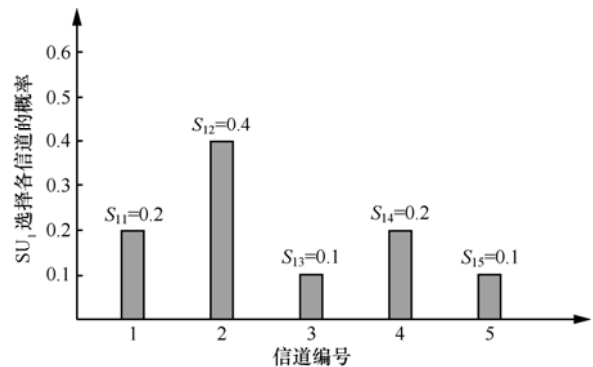


图 2 SU_1 的策略示意

将全网所有 SU 的策略集合在一起可以得到策略矩阵 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ ，策略矩阵的另一种表示方法为 $S = (s_i, s_{-i})$ ，本文中用 SU_{-i} 表示除 SU_i 之外全网所有的 SU ，而 s_{-i} 则表示除 SU_i 之外全网所有的 SU 的策略的集合。

SU_i 的策略有多重物理意义：从频域的角度看，由于各信道对应于各个物理频段， s_i 的物理意义是 SU_i 的传输功率在频域上的分配，决定了其信号的功率谱密度的形式；从时域的角度看， s_i 表示 SU_i 为每个分组选择各信道的概率分布，因此 s_i 就是 SU_i 对各信道的流量分配策略，可用排队论模型来计算。

由于用户的流量分配策略矩阵 S 对应于此时网络中各信道上的拥塞状况，能够代表当前的网络状态。要设计的博弈算法需运行于任意的网络初始状态下，该初始状态可以用全网各 SU 的初始流量分配策略矩阵 S^0 表示，算法进行过程中，各 SU 独立调整自身策略 s_i ，最终使得全网所有 SU 的策略集合达到纳什均衡代表的最优策略 S^* 。

2.2.3 效用函数选择

本文主要分析时延敏感业务的性能。为了保证此类业务的 QoS 需求,对分组时延设定了上限,当分组时延超过上限时,接收方认为该分组丢失。因此使用 SU 的总体分组传输成功率作为博弈中的效用函数(utility function)。

虽然网络中每个 SU 都以分组传输成功率作为自身的效用函数,各用户的效用函数的具体表达式是不同的,这是因为不同的 SU_i 在信道 F_j 上有不同的物理传输比特率 T_{ij} 与误码率 p_{ij} ,而这 2 个参数是 SU_i 自身在传输中获得的私人信息,仅被 SU_i 自身了解。这意味着 SU 相互不知道彼此的效用函数表达式,在此情况下进行的博弈是非完全信息博弈,分析极为复杂。而本文建立的网络模型中假设存在一条公共控制信道,各 SU 通过该信道交换彼此的私有信息。由于在本文中认为 T_{ij} 与 p_{ij} 是静态参数,因此,只要各 SU 在每个决策周期的初始阶段完成私有信息的交换,就能知道彼此的效用函数表达式,这样问题就简化为了完全信息博弈。

此外, SU_i 的分组传输成功率还与网络中其他用户的策略 s_{-i} 有关,要对 s_{-i} 做出最优反应, SU_i 首先需要通过公共控制信道与全网其他 SU 进行信息交互以获取 s_{-i} 。

3 排队时延分析

3.1 虚拟队列

引入虚拟队列(virtual queue)的概念用于衡量多个用户之间的相互影响。假设每个信道 F_j 都对应于一个虚拟队列 \tilde{Q}_j , 全网所有分配在信道 F_j 上传输的分组完成在物理队列中的排队后,都进入信道 F_j 对应的虚拟队列 \tilde{Q}_j , 在虚拟队列 \tilde{Q}_j 中排队之后,该分组才可以在信道 F_j 上进行发送,如图 3 所示。

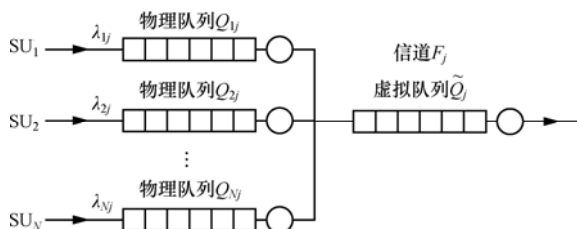


图 3 虚拟队列示意

通过引入虚拟队列的概念,将 MAC 协议中多用户争用信道 F_j 导致的额外分组时延转化为了在

信道 F_j 对应的虚拟队列 \tilde{Q}_j 中的排队时延 \tilde{W}_j , 这样就可以使用排队论中的相关公式加以计算。最终将物理队列 Q_{ij} 的分组服务时间修正为分组传输时间与虚拟队列排队时间之和。

虚拟队列的输入分组流是全网所有用户分配在信道 F_j 上的分组流量的叠加,可以视为泊松过程。

$$\tilde{\lambda}_j = \sum_{i=1}^N \lambda_{ij} \quad (3)$$

虚拟队列 \tilde{Q}_j 是一个逻辑概念,在物理上并不存在。 \tilde{Q}_j 中的分组在物理上分散在各个 SU_i 中等待被发送,虚拟队列服务时间就是该分组的传输时间,而服务端的分组处理速率就是各个 SU_i 在信道 F_j 上的分组发送速率,虽然在物理上, \tilde{Q}_j 中的分组将被不同的 SU_i 的发射机发送,但某一时刻只能有一个发射机接入 \tilde{Q}_j 对应的信道,可以等效为 \tilde{Q}_j 中只有一个速率(服务能力)可变的服务器。

3.2 效用函数

为了计算 SU_i 的效用函数 $u_i = u_i(s_i, s_{-i})$, 即 SU_i 的平均分组传输成功率 $u_i(s_i, s_{-i}) = \sum_{j=1}^M s_{ij} P(D_{ij}(s_i, s_{-i}) \leq d_i)$, 需要用到 SU_i 使用信道 F_j 传输分组的端到端时延 $D_{ij}(s_i, s_{-i})$ 的概率分布。根据对 M/G/1 队列的研究结果^[14], 分组的端到端时延 $D_{ij}(s_i, s_{-i})$ 近似服从式(4)所示的分布。

$$P(D_{ij} > t) = \rho \exp\left(-\frac{\rho}{E[D_{ij}]} t\right) \quad (4)$$

因此,要求端到端时延 D_{ij} 服从的分布,只需求解其均值 $E[D_{ij}]$, 由于分组的总时延 D_{ij} 由排队时间 W_{ij} 与服务时间 X_{ij} 2 部分组成:

$$E[D_{ij}] = E[W_{ij}] + E[X_{ij}] \quad (5)$$

根据 Pollaczek-Khinchine formula,只要知道服务时间的期望 $E[X_{ij}]$ 及其二阶矩 $E[X_{ij}^2]$, 就可以计算排队时间的均值 $E[W_{ij}]$ ^[14, 15], 在本文中假设物理队列 Q_{ij} 修正后的服务时间服从常见的指数分布,因此只需知道服务时间的期望 $E[X_{ij}]$ 。Pollaczek-Khinchine Formula 的基本表达式如下:

$$E[W_{ij}] = \frac{\lambda E[X_{ij}^2]}{2(1 - \lambda E[X_{ij}])} = \frac{1}{\mu} \frac{\rho}{1 - \rho} \frac{1 + (\sigma_s \mu)^2}{2} \quad (6)$$

4 博弈算法中的策略调整

4.1 博弈均衡解

从博弈论的角度看 CRN 网络中的 DSA，就是各 SU 通过动态调整自身对信道的选择策略，尽可能最大化自身的效用函数。在传输时延敏感业务的情况下，就是最大化自身的分组传输成功率。而使效用函数达到最大时 SU_i 的策略，就是 SU_i 的最优策略 S_i^* ，在给定描述网络环境与用户特性参数 $R_{ij}=[T_{ij}, p_{ij}]$ 的情况下，用最优策略矩阵 $S^*=\{s_1^*, s_2^*, \dots, s_N^*\}$ 表示的系统的纳什均衡是存在的，可以使用博弈论中对纳什均衡的一般算法进行求解。

$$s_i^* = \arg \max u_i(s_i, s_{-i}^*) \quad (7)$$

设从用户 SU_i 采用信道 j 传输失败的概率为 P_{ij} ，将分组传输成功率作为效用函数的表达式，得到：

$$s_i^* = \arg \max \sum_{j=1}^M s_{ij} (1 - P_{ij}(s_i, s_{-i}^*)) \quad (8)$$

式(8)中包含 N 个方程($i=1\sim N$)，联立这 N 个方程在理论上就可以得到系统的纳什均衡 $S^*=\{s_1^*, s_2^*, \dots, s_N^*\}$ 。实际应用中，网络可能处于各种初始状态，即初始的策略矩阵 S^0 是任意的，要在尽可能降低分组丢失率并兼顾公平的前提下进行信道分配，就是将初始策略矩阵 S^0 调整为纳什均衡 S^* 。由于策略矩阵 S 代表全网各用户在各信道上的流量分配比例，用户只能通过对一个个分组的发送来改变流量分配比例，因此从初始矩阵 S^0 到纳什均衡 S^* 是一个不断迭代的调整过程。

4.2 策略的迭代调整

图 4 是策略迭代调整算法的基本原理图。在迭代过程中，将排队系统视为一个黑盒，其输入为全网用户当前的策略集合 $S(n)=\{s_1(n), s_2(n), \dots, s_M(n)\}$ ，输出为全网用户当前以分组丢失率描述的信道传输质量 $P(n)=\{P_1(n), P_2(n), \dots, P_M(n)\}$ ，其中， $P_i(n)=\{P_{i1}(n), P_{i2}(n), \dots, P_{iM}(n)\}$ ，用户根据迭代公式以及信道传输质量 $P(n)$ ，对策略进行迭代调整，反复进行以上步骤，直至策略达到稳定。

如图 4 所示，本算法在每一步迭代中对 $S(n)$ 进行很小的调整来近似流量分配策略的这种渐进变化。迭代的每一步中，每个 SU 独立使用迭代公式调整自身的流量分配策略，在博弈的过程中不断进行策略迭代调整，逐步逼近纳什均衡代表的策略。

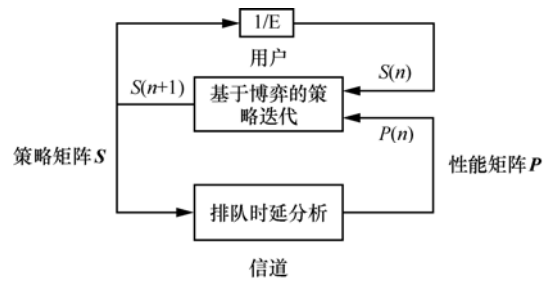


图 4 算法的基本原理示意

每一步迭代中只对策略进行很小的调整还有一个原因，在前面的排队分析中得到的分组时延 D_{ij} 的分布其实是一个统计稳态结果，理论上要在输入流量 λ_{ij} 不变的情况下运行很久之后排队系统才会达到稳态，在算法的初始阶段，认为系统已经处于稳态，如果在迭代中对 SU_i 的流量分配策略 s_{ij} 进行剧烈调整，排队系统已经达到的统计稳态将被打破，使用排队论计算的排队时延就不是实际的时延，这种瞬态性能将会如何变化就完全不得而知。而策略变化较小时，则可以认为前次的策略与本次的策略近似相等，排队系统的统计稳态将得以继续。

策略调整的幅度不能过大还与迭代算法自身的机制有关。如果 SU_i 根据最近计算得到的信道质量 P_{ij} ，发现某条信道的传输质量很好，分组丢失率低，是当前的最优信道。因此将大部分流量突然转移到该信道上，这会导致该信道的拥塞程度大增，轻则导致该信道的质量变差，不再是最优的信道，重则导致该信道的分组流量超过传输能力，发生阻塞，信道上所有分组丢失，对网络中其他用户也造成很大损失。 SU_i 发现策略调整后性能反而降低，根据算法在下次迭代中又将转移到该信道上的流量撤回，于是该信道的传输质量又变好了，下次迭代中 SU_i 又会再次将流量转移到该信道上，如此反复， SU_i 的策略会发生剧烈振荡。

根据 Hsien-Po Shiang 等人提出的算法^[13]， SU_i 根据自身选择各信道的分组丢失率 $P_{ij}(s_i(n-1), s_{-i}(n-1))$ ，选择分组丢失率最小的信道作为自己的最优信道 $F_i^*(n-1)$ ，根据自身的最优信道 $F_i^*(n-1)$ ，以及给定的策略调整步长 Δ ，其迭代公式如下：

$$s_{ij}(n) = \begin{cases} \max(0, s_{ij}(n-1) - \Delta) & , F_j \neq F_i^*(n-1) \\ 1 - \sum_{F_j \neq F_i^*(n-1)} \max(0, s_{ij}(n-1) - \Delta) & , F_j = F_i^*(n-1) \end{cases} \quad (9)$$

根据之前的分析，策略调整步长 Δ 必须很小，否则在策略调整接近均衡点时， SU_i 的效用函数值

会出现剧烈的周期性振荡，然而使用很小的策略调整步长导致收敛速度很慢。为了提高收敛速度，本文提出了动态步长的方法，在迭代的一开始采用较大的步长对均衡进行快速而粗略的逼近，而在接近均衡点时采用较小的步长对策略进行精确逼近。具体而言，每当发现系统出现周期性的振荡时，说明正在使用的策略调整步长已经无法发挥作用，此时对策略调整步长进行缩减，随后使用新的策略调整步长进行迭代直到系统再次出现振荡为止，反复进行以上的步骤直到各 SU 的策略与性能达到稳定。为了提高收敛性，本文提出的算法根据分配更多流量在性能更好的信道上的原则，采用如下迭代公式：

$$s_{ij}(n) = \frac{s_{ij}(n-1) - \Delta \log(P_{ij})}{\sum_{j=1}^M (s_{ij}(n-1) - \Delta \log(P_{ij}))} \quad (10)$$

4.3 策略迭代调整的基本步骤

Step 1 各 SU 向全网广播自己的策略

各 SU 通过公共控制信道交换自身在上个时隙中的策略，最终每一个 SU 都得知了全网所有的 SU 在上个时隙中的策略，即获得上个时隙的策略矩阵 $(s_i(n-1), s_{-i}(n-1))$ 。

Step 2 各 SU 独立计算此时的信道质量

利用上个时隙的策略矩阵 $(s_i(n-1), s_{-i}(n-1))$, SU_i 计算自身在各信道上的分组丢失率 $P_{ij}(s_i(n-1), s_{-i}(n-1))$ 用以作为对信道质量的判断依据。

Step 3 各 SU 独立进行策略调整

SU_i 根据之前步骤中得到的信息，按照迭代公式进行策略调整，提高自身效用函数值。

5 性能分析

为了进一步对比所提出的基于排队时延及博弈分析的改进策略迭代算法与 Hsien-Po Shiang 等人提出的原算法^[13]的性能，设定仿真场景如图 5 所示。其

中，配置主用户数为 5 个，从用户（认知用户）数为 5 个，网络中可用信道数目 $M=5$ 。主用户 PU_i 对应的信道固定设置为第 i 个信道，主用户对所分配的信道的使用优先级高于从用户，从用户 SU_i 初始阶段将等概率接入所有 5 个信道（当主用户正在传输数据时，使用该主用户信道的从用户传输将失败。）。

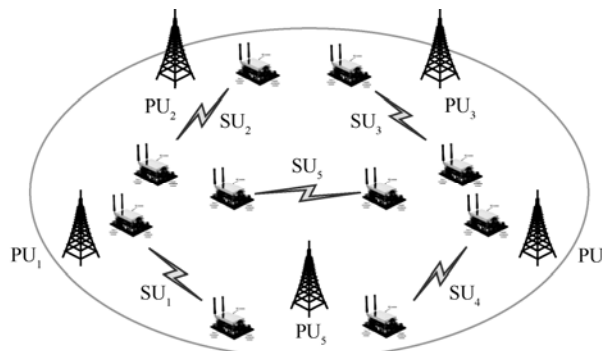


图 5 仿真场景

为了体现不同从用户使用不同信道传输质量的差异以及各从用户业务需求的不同，设定各 SU 的物理传输速率、分组出错率、业务码流比特率、平均分组长度和时延上限参数如表 1 所示。为了体现主用户信道负载的差异，设定各信道上 PU 的归一化信道负载及其二阶矩参数值如表 2 所示。

表 2 各 PU 用户的参数

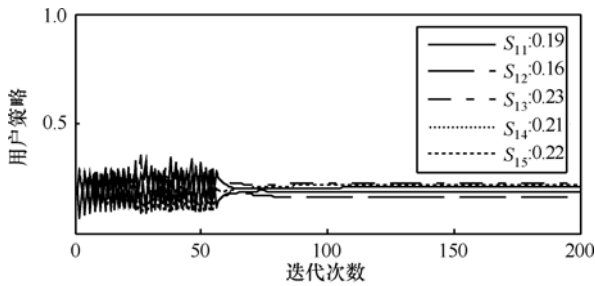
PU	归一化信道负载	归一化信道负载的二阶矩
PU ₁	0.25	1×10^{-4}
PU ₂	0.2	1×10^{-4}
PU ₃	0.15	1×10^{-4}
PU ₄	0.15	1×10^{-4}
PU ₅	0.15	1×10^{-4}

图 6~图 10 分别给出了使用基于排队时延及博弈分析的改进策略迭代算法的 SU_1 、 SU_2 、 SU_3 、 SU_4 和 SU_5 的策略（不同信道的使用概率）和分组丢失

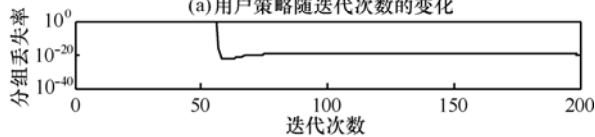
表 1 各 SU 用户的参数

SU	物理传输速率/Mbit·s ⁻¹					分组出错率					业务码流比特率	平均分组长度	时延上限
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅			
SU ₁	1.80	1.60	1.80	1.70	1.60	0.04	0.01	0.02	0.02	0.02	0.80	1 000	0.5
SU ₂	1.60	2.00	2.50	2.00	2.00	0.01	0.10	0.05	0.05	0.05	1.60	1 000	0.5
SU ₃	2.00	1.00	1.80	1.70	1.90	0.05	0.05	0.01	0.01	0.01	1.50	1 000	0.5
SU ₄	1.00	1.00	1.80	1.40	1.90	0.05	0.05	0.01	0.01	0.01	0.60	1 000	0.5
SU ₅	1.00	1.00	1.80	1.40	1.90	0.05	0.05	0.01	0.01	0.01	0.60	1 000	0.5

率 (PLR, packet loss rate) 随迭代次数的增加的变化曲线。图 11~图 15 分别给出了 Hsien-Po Shiang 等人提出的原算法的 SU₁、SU₂、SU₃、SU₃ 和 SU₅ 的策略和分组丢失率 (PLR) 随迭代次数的增加的变化曲线。图中 S_{ij} 表示从用户 i 使用第 j 个信道进行传输的概率。

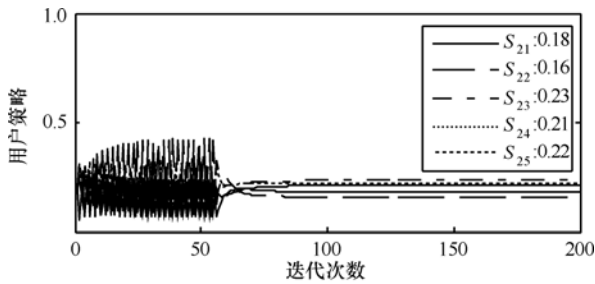


(a) 用户策略随迭代次数的变化

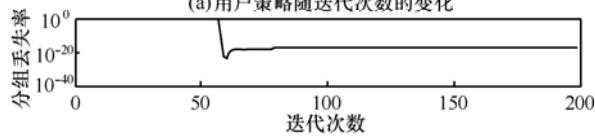


(b) 分组丢失率随迭代次数的变化

图 6 改进算法 SU₁ 的策略与分组丢失率随迭代次数的变化

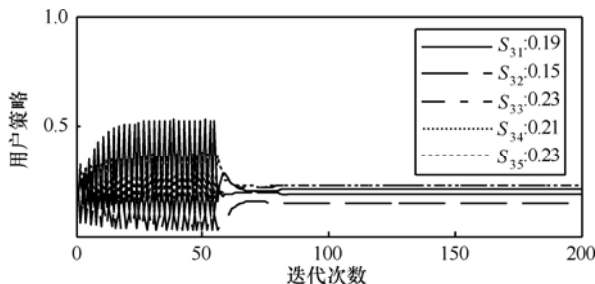


(a) 用户策略随迭代次数的变化

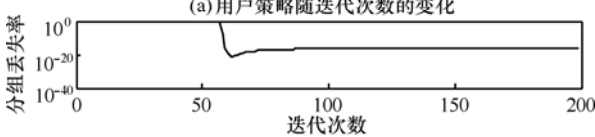


(b) 分组丢失率随迭代次数的变化

图 7 改进算法 SU₂ 的策略与分组丢失率随迭代次数的变化

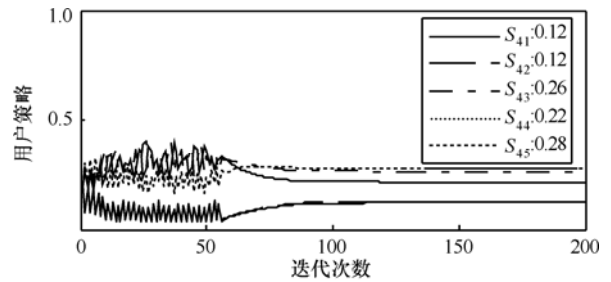


(a) 用户策略随迭代次数的变化

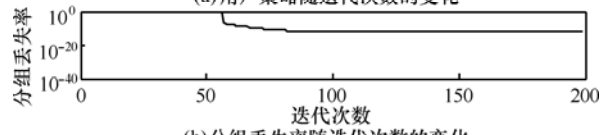


(b) 分组丢失率随迭代次数的变化

图 8 改进算法 SU₃ 的策略与分组丢失率随迭代次数的变化

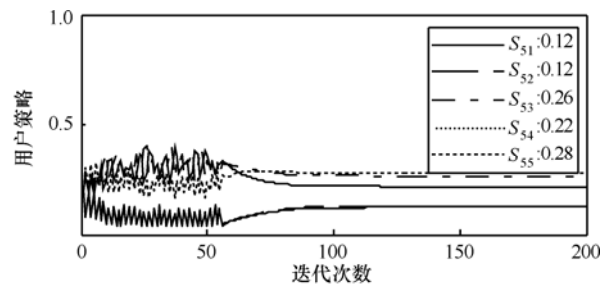


(a) 用户策略随迭代次数的变化

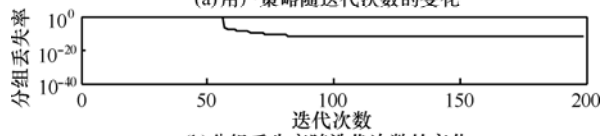


(b) 分组丢失率随迭代次数的变化

图 9 改进算法 SU₄ 的策略与分组丢失率随迭代次数的变化

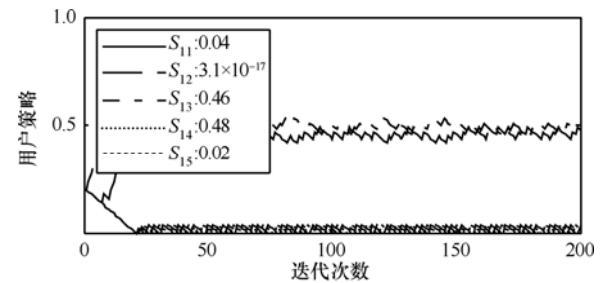


(a) 用户策略随迭代次数的变化

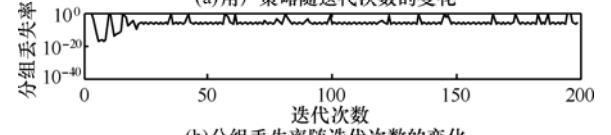


(b) 分组丢失率随迭代次数的变化

图 10 改进算法 SU₅ 的策略与分组丢失率随迭代次数的变化



(a) 用户策略随迭代次数的变化



(b) 分组丢失率随迭代次数的变化

图 11 原算法 SU₁ 的策略与分组丢失率随迭代次数的变化

仿真曲线表明，使用基于排队时延及博弈分析的改进策略迭代算法，系统可以很快(迭代次数小于 50 次)达到收敛，得到最优策略。使用 Hsien-Po Shiang 等人提出的原算法经过 200 步迭代之后，系统仍然处于振荡状态，无法收敛。

当系统稳定之后，使用基于排队时延及博弈分

析的改进策略迭代算法，各用户的分组丢失率均小于 1×10^{-10} 。使用 Hsien-Po Shiang 等人提出的原算法，各从用户 SU_i 的分组丢失率较高，均存在超过 1×10^{-5} 的情况， SU_1 、 SU_2 和 SU_3 甚至多次出现近 100% 分组丢失的现象。

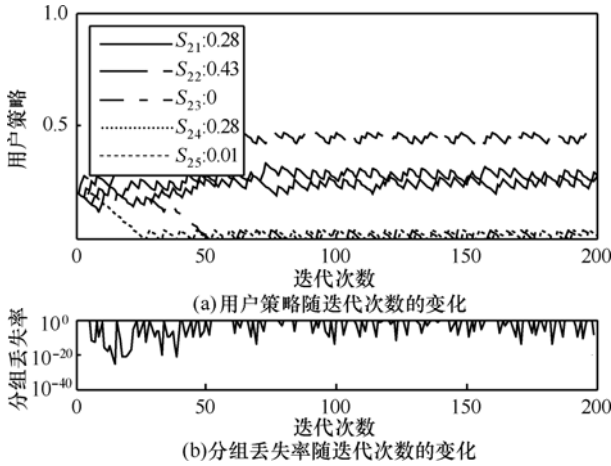


图 12 原算法 SU_2 的策略与分组丢失率随迭代次数的变化

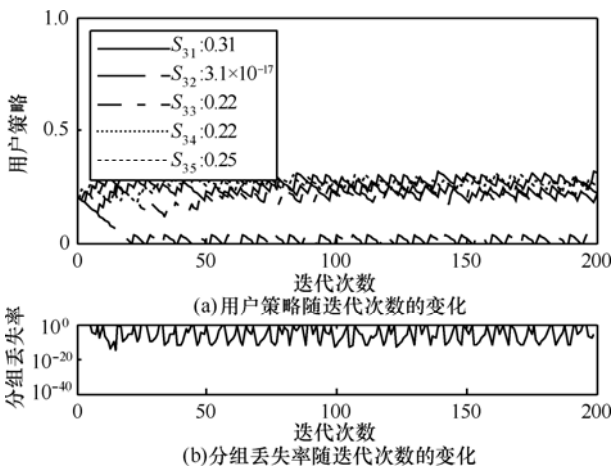


图 13 原算法 SU_3 的策略与分组丢失率随迭代次数的变化

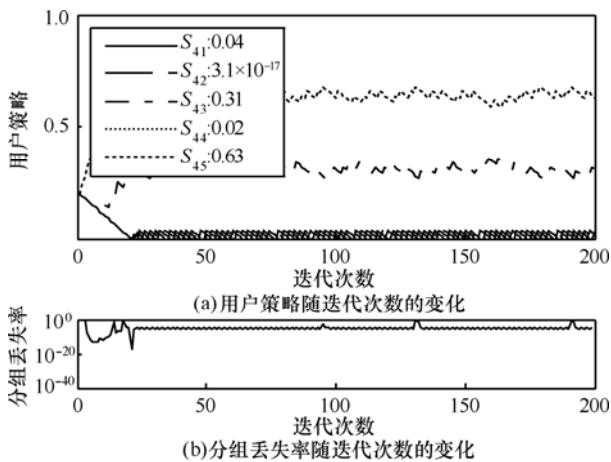


图 14 原算法 SU_4 的策略与分组丢失率随迭代次数的变化

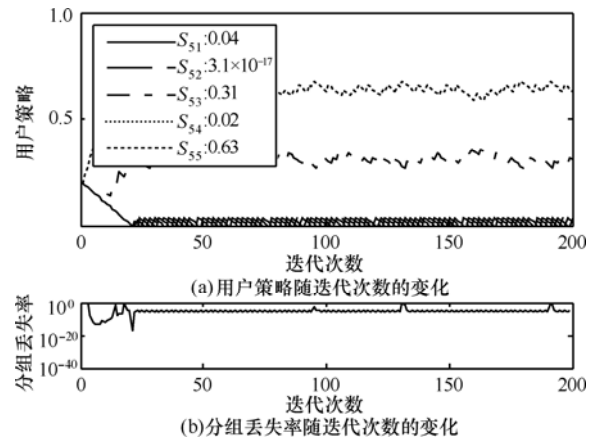


图 15 原算法 SU_5 的策略与分组丢失率随迭代次数的变化

对比图 6~图 15 中策略调整曲线以及分组丢失率变化趋势，可以发现使用基于排队时延及博弈分析的改进策略迭代算法在策略的收敛速度、稳定性和分组丢失率方面较 Hsien-Po Shiang 等人提出的原算法均有较大提高。

6 结束语

本文基于排队时延与博弈分析，为认知无线网络中的信道分配提出了一种分布式博弈算法。该算法由各从用户 SU 独立决定自身的频谱接入策略。各从用户 SU 在传输中，不断学习并调整自身的频谱接入策略以适应当前网络状态的变化，提高自身传输性能。与 Hsien-Po Shiang 等人提出的算法相比，所提算法的创新之处在于：首先，各用户在博弈周期的初始阶段主动交换所采用的信道选择策略，提高了信道质量估计的准确性；其次，对策略迭代公式进行了优化，使用动态调整的迭代步长，在初始阶段使用较大的步长，快速而粗略地逼近最优策略，随后在策略到达纳什均衡点附近时使用较小的步长，更准确地逼近最优策略。算法兼顾了收敛速度与准确性，抑制了策略振荡。

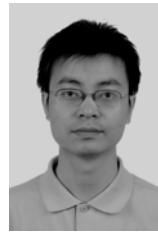
本文基于排队时延及博弈分析的改进策略迭代算法的仿真是基于静态参数进行的，信道的业务负载以及物理传输参数在仿真中均假设不发生变化；在下一步的研究中将模拟信道的业务负载和物理传输参数的时变特征，考察基于排队时延及博弈分析的改进策略迭代算法对动态变化参数的适应能力，并进一步引入机器学习及人工智能等方法对策略进行优化。

参考文献：

[1] DEMESTICHAS P, DIMITRAKOPULOS G, STRASSNER J, et al.

- Introducing reconfigurability and cognitive networks concepts in the wireless world[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2006, 1(2): 32-39.
- [2] FRANK H P, MARCOS D K. *Cognitive Wireless Networks: Concepts, Methodologies and Visions Inspiring the Age of Enlightenment of Wireless Communicaitons*[M]. Netherlands: Springer, 2008.
- [3] NIYATO D, HOSSAIN E, ZHU H. Dynamic spectrum access in IEEE 802.22 based cognitive wireless networks: a game theoretic model for competitive spectrum bidding and pricing[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2009, 16(2): 16-23.
- [4] MITOLA J, MAGUIRE G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. *IEEE Personal Communications*, 1999, 6(4):13-18.
- [5] Federal Communications Commission. Notice of Proposed Rule Making: Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands[S]. ET Docket No. 04-186(FCC 04-133), 2004.
- [6] Federal Communications Commission. Notice of Proposed Rule Making and Order: Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient, and Reliable Spectrum Use Employing Cognitive Radio Technologies[S]. ET Docket No. 03-108, 2005.
- [7] ZHENG H, CAO L L. Device-centric spectrum management[A]. *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*[C]. Baltimore, Maryland, USA, 2005. 56-65.
- [8] HUANG J, BERRY R A, HONIG M L. Spectrum sharing with distributed interference compensation[A]. *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*[C]. Baltimore, Maryland, USA, 2005. 88-93.
- [9] RAYA M, AAD I, HUBAUX J P, *et al.* DOMINO: detecting MAC layer greedy behavior in IEEE 802.11 hotspots[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2006, 5(12): 1691-1705.
- [10] LEE J W, TANG A, HUANG J W, *et al.* Reverse-engineering MAC: a non-cooperative game model[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, 25(6): 1135-1147.
- [11] FELEGYHAZI M, CAGALJ M, BIDOKHTI S S, *et al.* Non-cooperative multi-radio channel allocation in wireless networks[A]. *IEEE INFOCOM 2007 IEEE International Conference on Computer Communications*[C]. San Diego, California, USA, 2007. 1442-1450.
- [12] LEE J W, CHIANG M, CALDERBANK A R. Utility-optimal random-access control[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(7): 2741-2750.
- [13] HSIEN P S, SCHAAR M. Queuing-based dynamic channel selection for heterogeneous multimedia applications over cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2008, 10(5):896-909.
- [14] BERTSEKAS D, GALLAGER R. *Data Networks (2nd edition)* [M]. New Jersey, Prentice Hall, Inc, 1992.
- [15] KLEINROCK L. *Queuing Systems Volume I: Theory*[M]. New York: Wiley-Interscience Publication, 1975.

作者简介:



刘军(1973-),男,四川南充人,博士,电子科技大学讲师,主要研究方向为认知无线网络传输技术、自组织网络组网技术。



谢秀峰(1989-),男,四川简阳人,电子科技大学硕士生,主要研究方向为认知无线网络、无线频谱资源分配、无线网络优化。