

一种基于非对称纳什协商的认知无线电频谱共享新算法

田峰 杨震

(南京邮电大学信号与信息处理研究所 南京 210003)

摘要: 该文研究基于 MIMO-OFDMA 的认知无线电系统频谱共享的新机制。首先构造了一个基于非对称纳什协商方案的效能函数,其次通过多用户最优匹配及两两协商新算法并证明其收敛性,最终实现了基于感知贡献加权的比例公平性频谱共享。仿真结果表明提出的方案不仅实现了频谱资源的公平有效分配,而且有利于最大化频谱感知的结果。

关键词: 认知无线电; 频谱共享; 非对称纳什协商方案; 加权比例公平性; 频谱感知

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)10-2405-05

A Novel Algorithm Based on Asymmetric-Nash-Bargain-Solution for Spectrum Sharing in Cognitive Radios

Tian Feng Yang Zhen

(Institute of Signal and Information Processing, Nanjing Univ. of Post and Telecom, Nanjing 210003, China)

Abstract: A new scheme to share spectrum employing MIMO-OFDMA-based Cognitive Radio (CR) is proposed. First an Asymmetric-Nash-Bargain-Solution (ANBS)-based utility function is developed. And a new spectrum sharing algorithm based on sensing contribution weighted proportional fairness is implemented through multi-users optimal matching and two users bargaining. The experimental results show that the approach not only realizes efficient and fair allocation of the spectrum resources but also maximizes the potential of the spectrum sensing.

Key words: Cognitive Radio (CR); Spectrum sharing; Asymmetric Nash Bargain Solution (ANBS); Weighted proportional fairness; Spectrum sensing

1 引言

由于现有的频谱授权机制采用固定的频谱分配,使得频谱利用率低,造成大量频谱资源浪费^[1],而认知无线电(Cognitive Radio,CR)被认为是解决无线频谱低利用率问题的最佳方案。认知无线电具有在不影响其他授权用户即主用户(Primary Users,PU)的前提下智能地利用大量空闲频谱并且随时随地、高可靠性通信的潜能^[2,3]。因此研究认知无线电环境下的动态频谱分配和接入尤为重要。目前认知无线电尚处于初始研究阶段,关于频谱分配和接入以前的相关工作多以基站对信道的固定分配为主,造成了频谱资源的巨大浪费,虽然最近一些研究方法在实现频谱共享上取得了一些提高,但往往没有给出合适的无线操作环境且在频谱分配时没有考虑频谱感知的内容,因此还有很多不完善的地方有待提高。

本文采用基于 MIMO-OFDMA 的 CR 系统,通过基站将具有相同或相近感知信息的 CR 用户结合成组,组内用户协作感知并协商共享感知的频谱资源。本文构造了一个基于非对称纳什协商方案的效能函数,通过有效的低复杂度的多用户 Kuhn-Munkres 最优匹配和两两协商新算法并证明算法

收敛性,以基站为中心,在 CR 用户间分布式地进行子载波动态地交换,从而实现了基于感知加权的比例公平性频谱分配达到有效公平的频谱分配目标;同时也激励 CR 用户更多地投入频谱感知从而最大化频谱感知的结果。

2 认知无线电系统模型和认知网络场景描述

2.1 基于 MIMO-OFDMA 的 CR 系统模型

本文考虑采用基于 MIMO-OFDMA 的通信系统作为 CR 的系统模型。首先,由于主用户不连续地利用频谱,很容易产生一些可被 CR 重新利用的频谱空穴,CR 可插入适当数目的子载波填补这些频谱空穴;其次当主用户出现时,CR 可灵活地切换子载波,从而既不干扰主用户的通信,又能保持自身的通信不中断,自适应主用户的变化;采用 OFDM 可以提高频谱利用率、抗多径干扰,采用 MIMO 可以抗衰落,增加系统容量,因此这种高度灵活的自适应和高频谱利用率使得 MIMO-OFDMA 成为设计 CR 最合适的技术。

假定信道被完美估计,且发射信号经历慢衰落,则信道参数在子载波分配和功率加载时是固定不变的常量。考虑如图 1 所示的单蜂窝小区中由频谱感知^[4]构成的 CR 协作组,组内 CR 成员共享主用户之外的所有感知频谱,设每个 CR 节

2006-08-29 收到,2007-01-30 改回

教育部重点科技项目(206055)和江苏省高校自然科学基金重大项目(06KJA51001)资助课题

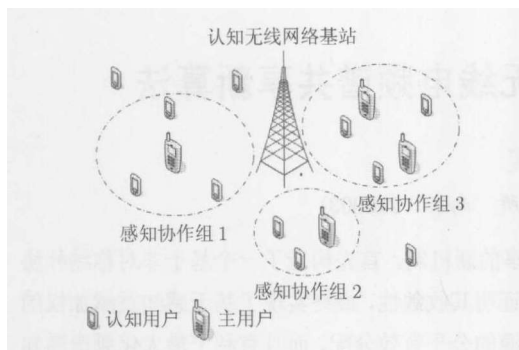


图1 认知无线网络场景

点有 T 根发射天线, R 根接收天线, 组内 CR 用户数为 K , 组内感知到的频谱, 即可用子载波数目为 N 。每个子载波只分配给一个用户使用, 即 $\sum_{k=1}^K a_{kn} = 1, \forall n$ 。同时假定用户 k

在子载波 n 上发射信号向量、接收信号向量、信道增益矩阵等系统组成均与文献[5]中描述相同, 则当独立解码时, 可得某一用户 k 的最大可达速率为

$$R_k = \sum_{n=1}^N a_{kn} W \log \left(\prod_{h=1}^{M_{kn}} \left(1 + \frac{\lambda_{kn}^{(h)} p_{kn}}{a_{kn} (\lambda_{kn}^{(h)} (q_n - p_{kn}) + N_0)} \right) \right) \quad (1)$$

其中 M_{kn} 是矩阵 $\mathbf{H}_{kn} (R \times T)$ 的秩, 且 $\{\lambda_{kn}^{(h)}\}_{h=1: M_{kn}}$ 是 $\mathbf{H}_{kn} \mathbf{H}_{kn}^H$ 的特征值。

2.2 感知协作的认知网络场景

如图1所示, 通过能量感知或波形感知^[4]等方式, CR 可以实现主用户的检测和频谱空穴的重利用。基站对各个节点的感知信息进行分析, 并根据地理定位和感知信息相关性来管理成员的加入和退出, 使得 CR 组织成协作组, 此时在协作组内各 CR 节点感知的可用频谱资源是相同的, 这样有利于频谱的有效分配。CR 节点只能在协作组内交换信道, 这种分配不与协作组外的邻居相冲突。每个节点最多加入一个组, 每个组之间是分离的, 保证不冲突。由于感知过程中每个 CR 对于基站最后融合后的感知信息贡献量是不同的, 可以用向量形式表示出来, 定义为 $\boldsymbol{\omega} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_K]$, 其中 $\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_K = 1, \forall \omega_i > 0$ 。 $\boldsymbol{\omega}$ 反映了组内 CR 对感知频谱的贡献量, 它是每个 CR 对感知所消耗的能量, 对主用户的感知时间, 以及它与主用户间的定位等有关的加权函数, 基站通过相关参数输入和感知结果相关运算可以得到具体的评价。

3 基于非对称纳什协商模型的效能函数

本文研究如何应用合作博弈论中的非对称纳什协商 (Asymmetric Nash Bargain Solution, ANBS) 模型来实现频谱共享。对于一个多用户协商问题, 通过如下的公理体系: 个人理性、弱帕累托效率、不变性、不相关选择的独立性, 可得到 ANBS 的存在性和唯一性的定理证明^[6]。从而本文构造了一个基于 ANBS 模型的效能函数实现频谱分配。协作

组中 CR 节点间频谱共享问题可以归结如下: 对于每个用户都受限于最大的传输功率 P_{\max} , 每个用户都有一个最小的速率要求 R_{\min} , 另外还受到感知权值 ω_i 的影响。优化的目标就是决定每个用户的子载波分配 \mathbf{A} 和不同子载波的功率 \mathbf{P} , 则效能函数可最大化, 即

$$\max_{\mathbf{A}, \mathbf{P}} \prod_{i=1}^K (R_i - R_{\min}^i)^{\omega_i} \quad (2)$$

其中 $R_i \geq R_{\min}^i, \forall i$; $\sum_{i=1}^K a_{ij} = 1, \forall j$; $\sum_{j=1}^N p_{ij} \leq P_{\max}, \forall i$; $\sum_{i=1}^K \omega_i = 1$ 。

设 $U = \prod_{i=1}^K (R_i - R_{\min}^i)^{\omega_i}$, 则本文通过与文献[7]中的3个

目标最大化即最大化速率、最大化最小公平、对称纳什协商 (Nash Bargain Solution, NBS) 等不同的频谱分配机制进行比较, 体现本文所提效能 ANBS 机制的加权比例公平性原则。本文提出的 ANBS, 不仅考虑了公平性和有效性的问题, 而且考虑了各 CR 用户感知的贡献量对信道分配的影响, 相比 NBS 从贡献和回报的角度考虑频谱分配, 体现了一种加权的公平性原则; 另一方面这种方案激励 CR 用户进行频谱感知, 从而最大化组内的频谱感知。如果协商解也满足对称性公理^[6], 则各权值相等, 从而可以把 NBS 看作是 ANBS 的一种特定的情况。

根据 Song 等在文献[8]中证明, 当满足限制的可用集合非空时, 存在唯一和优化的固定信道分配矩阵 \mathbf{A} 和功率分配向量 \mathbf{P} 使得优化的目标成立, 证明了存在唯一的优化方案。

4 多用户最优匹配及两两协商算法

ANBS 优化方案即式(2)的解, 是一个非线性的联合限制问题, 很难用传统方法解出。此时可将多用户协商问题分解为两两结合的协商问题, 利用二分图最优匹配方法, 使得感知协作组内的用户两两结合, 通过两用户协商子算法交换子载波, 然后协作组内的用户再次两两结合, 经过多次迭代直到最后收敛为止, 这样就大大降低了运算的复杂度。本文首先在两用户协商中采用文献[7,9]中提到的两带分割的思想, 在迭代因子 η_i 中加入感知加权变量 ω_i , 提出了基于 ANBS 模型的两用户协商新算法, 随后在多用户最优匹配中应用 Kuhn-Munkres 算法^[10], 最后证明算法的收敛性并得到算法迭代因子 η_i 的表达式。

多用户协商新算法具体如下:

步骤1 初始化信道分配: 任意分配协作组所感知的频谱给组内所有用户;

步骤2 构成两两用户匹配: 如果用户是偶数, 则用户通过 Kuhn-Munkres 算法分组构成两两用户协商对; 否则, 其中一个用户被空出将不参加该次协商;

步骤3 (步骤3-步骤7为两用户协商子算法);

协商组内用户对两两协商, 初始化组内各个链路的最小

速率要求获得子载波分配: 对于最大化速率, 最大化最小公平, $\eta_1 = \eta_2 = 1$; 对于 NBS, $\omega_1 = \omega_2 = 1/2$, 对于 ANBS, $\omega_1 \neq \omega_2$, 计算 η_1 和 η_2 ;

步骤 4 当 SNR 较高时, 从最大到最小排列子载波的序号 j : $\prod_{h=1}^M (\lambda_{1j}^{(h)} q_j)^{\eta_1} / (\lambda_{2j}^{(h)} q_j)^{\eta_2}$;

当 SNR 较低时, 从最大到最小排列子载波的序号 j : $\sum_{h=1}^M (\eta_1 \lambda_{1j}^{(h)} q_j - \eta_2 \lambda_{2j}^{(h)} q_j)$;

步骤 5 对于 $j=1, \dots, N-1$, 用户 1 占用并注水子载波 1 到 j ; 用户 2 占用并注水子载波 j 到 N ; 计算效能函数 U ;

步骤 6 选择两带分割(对应的 j)产生最大的 U 满足限制条件, 计算 \mathbf{A} , \mathbf{P} , R_1 和 R_2 ;

步骤 7 更新信道分配: 最大化速率, 最大化最小公平, 返回; NBS, ANBS, 如果 U 不能够再通过更新 η_1 , η_2 则迭代结束; 否则更新 $\eta_1 = \frac{\omega_1}{(R_1 - R_{\min}^1)^{2-\omega_1}}$, $\eta_2 = \frac{\omega_2}{(R_2 - R_{\min}^2)^{2-\omega_2}}$, 到

步骤 4;

步骤 8 重复步骤 2-步骤 7, 直到无法实现更多的提高, 多用户协商算法结束。

从仿真结果中可以看出, 两用户协商子算法中每次迭代算法复杂度为 $O(N^2)$, 可以通过使用二进制搜索将复杂度降到 $O(N \log N)$, 其中 N 为子载波个数, 而组内总的用户数为 K , 则计算组内任意两用户协商的效能矩阵 \mathbf{C} 复杂度为 $O(K^2 N \log N)$ 。Kuhn-Munkres 算法的复杂度为 $O(K^3)$ 相比文献[7]中 Hungar 算法 $O(K^4)$ 复杂度更低, 因此多用户协商算法总的复杂度为 $O(K^2 N \log N + K^3)$ 。当用户数目较多时, Kuhn-Munkres 算法收敛更快, 效果更好。仿真表明总的算法在 4-6 次循环内收敛。

算法收敛性 对于 ANBS 机制来说, 用户数为 2 时算法最优, 当 SNR 较高时和 SNR 较低时均存在可行解。以两用户协商为基础的多用户算法近似最优, 通过最优匹配并迭代最终收敛于可行解。

证明 对于 ANBS, 当用户数为 2 时, 优化的目标是

$$U = \arg \max (R_1 - R_{\min}^1)^{\omega_1} (R_2 - R_{\min}^2)^{\omega_2} \quad (3)$$

包含了 R_1 和 R_2 项, 此时可以放松信道分配矩阵 \mathbf{A} 到连续的值 $0 \leq a_{ij} \leq 1$, 则对于 a_{ij} 和 p_{ij} 的拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} L = & (R_1 - R_{\min}^1)^{\omega_1} (R_2 - R_{\min}^2)^{\omega_2} + \sum_{j=1}^N \lambda_j \left(\sum_{i=1}^2 a_{ij} - 1 \right) \\ & + \sum_{i=1}^2 \kappa_i \left(\sum_{j=1}^N p_{ij} - P_{\max} \right) - \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^N v_{ij}^1 p_{ij} \\ & - \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^N v_{ij}^2 a_{ij} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 λ_j , κ_i , v_{ij}^1 和 v_{ij}^2 均为拉格朗日乘子。

将式(1)代入, 并通过使用 KKT 条件^[11], 对上式关于 a_{ij}

求导, 可得到

$$\begin{aligned} & \left\{ \omega_1 \sum_{h=1}^{M_{1j}} \left(\log_2 \left(1 + \frac{\lambda_{1j}^{(h)} p_{1j}}{a_{1j} (\lambda_{1j}^{(h)} (q_j - p_{1j}) + N_0)} \right) \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - \frac{\lambda_{1j}^{(h)} p_{1j}}{a_{1j} (\lambda_{1j}^{(h)} (q_j - p_{1j}) + N_0) + \lambda_{1j}^{(h)} p_{1j}} \right) \right\} / \\ & \left(\sum_{j=1}^N a_{1j} W \log_2 \left(\prod_{h=1}^{M_{1j}} \left(1 + \frac{\lambda_{1j}^{(h)} p_{1j}}{a_{1j} (\lambda_{1j}^{(h)} (q_j - p_{1j}) + N_0)} \right) - R_{\min}^1 \right) \right)^{2-\omega_1} \\ & = \left\{ \omega_2 \sum_{h=1}^{M_{2j}} \left(\log_2 \left(1 + \frac{\lambda_{2j}^{(h)} p_{2j}}{a_{2j} (\lambda_{2j}^{(h)} (q_j - p_{2j}) + N_0)} \right) \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - \frac{\lambda_{2j}^{(h)} p_{2j}}{a_{2j} (\lambda_{2j}^{(h)} (q_j - p_{2j}) + N_0) + \lambda_{2j}^{(h)} p_{2j}} \right) \right\} / \\ & \left(\sum_{j=1}^N a_{2j} W \log_2 \left(\prod_{h=1}^{M_{2j}} \left(1 + \frac{\lambda_{2j}^{(h)} p_{2j}}{a_{2j} (\lambda_{2j}^{(h)} (q_j - p_{2j}) + N_0)} \right) - R_{\min}^2 \right) \right)^{2-\omega_2} \end{aligned} \quad (5)$$

定义一个正的算法迭代因子 η_i 如下:

$$\begin{aligned} \eta_i = & \omega_i / \left(\sum_{j=1}^N a_{ij} W \log_2 \left(\prod_{h=1}^{M_{ij}} \left(1 + \frac{\lambda_{ij}^{(h)} p_{ij}}{a_{ij} (\lambda_{ij}^{(h)} (q_j - p_{ij}) + N_0)} \right) - R_{\min}^i \right) \right)^{2-\omega_i} \end{aligned} \quad (6)$$

当且仅当 $\eta_i > R_{\min}^i$; 否则 η_i 为正的无穷大。

将 η_i 代入式(5), 则在高 SNR 即 $\lambda_j q_j / N_0 \gg 1$ 时, 由 $\log(1+x) \approx \log x$ 得到式(7)和低 SNR, 即 $\lambda_j q_j / N_0 \ll 1$ 时, 由 $\log(1+x) \approx x$ 得到式(8):

$$\begin{aligned} \eta_1 & \left(\sum_{h=1}^{M_{1j}} (\log_2 (\lambda_{1j}^{(h)} q_j / N_0) - 1) \right) \\ & = \eta_2 \left(\sum_{h=1}^{M_{2j}} (\log_2 (\lambda_{2j}^{(h)} q_j / N_0) - 1) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\eta_1 \left(\sum_{h=1}^{M_{1j}} \lambda_{1j}^{(h)} q_j / N_0 \right) = \eta_2 \left(\sum_{h=1}^{M_{2j}} \lambda_{2j}^{(h)} q_j / N_0 \right) \quad (8)$$

如果子载波被用户 1 使用, 即 $a_{1j}=1$, $a_{2j}=0$, 式(7)和式(8)左边将严格大于右边。同一子载波不同用户秩均相等, 另外假设所有子载波秩均相等, 则将式(7)和式(8)左右两边的差值定义为函数 f

$$\begin{aligned} f & \left(\prod_{h=1}^M \frac{(\lambda_{1j}^{(h)} q_j)^{\eta_1}}{(\lambda_{2j}^{(h)} q_j)^{\eta_2}} \right) \approx \log_2 \left(\prod_{h=1}^M \frac{(\lambda_{1j}^{(h)} q_j)^{\eta_1}}{(\lambda_{2j}^{(h)} q_j)^{\eta_2}} \right) \\ & - M(\eta_1 - \eta_2)(\log_2 N_0 + 1) \end{aligned} \quad (9)$$

$$f \left(\sum_{h=1}^M (\eta_1 \lambda_{1j}^{(h)} q_j - \eta_2 \lambda_{2j}^{(h)} q_j) \right) \approx \sum_{h=1}^M (\eta_1 \lambda_{1j}^{(h)} q_j - \eta_2 \lambda_{2j}^{(h)} q_j) / N_0 \quad (10)$$

此时看函数是否大于 0 或者小于 0 来决定是否该子载波由用户 1 或者用户 2 使用。排列子载波的序号使得 $\prod_{h=1}^M (\lambda_{1j}^{(h)} q_j)^{\eta_1} / (\lambda_{2j}^{(h)} q_j)^{\eta_2}$ 或 $\sum_{h=1}^M (\eta_1 \lambda_{1j}^{(h)} q_j - \eta_2 \lambda_{2j}^{(h)} q_j)$ 随 j 递减。固定 η_1 和 η_2 , 则 f 是 j 的单调函数。式(7)和式(8)的左边和右边描述了额外带宽对于用户 1 和用户 2 在子载波 j 上的

边际效益^[7,9]。每次迭代中 η_i 是固定的, 则算法达到可行区域的边界点。下次迭代中 η_i 被更新。假定 \bar{R}_i 是 ANBS 的解, 如果 $R_1 > \bar{R}_1$ 并且 $R_2 < \bar{R}_2$, 则 η_1 小 η_2 大, 结果用户 1 的边际效益减小, 下次信道分配的时候不利, 这就解释了算法如何收敛于 ANBS, 当式(5)保持不变时算法是收敛的。以两用户协商为基础, 多用户时通过两两最优匹配并迭代, 最终收敛于可行解, 算法近似最优。

5 仿真与性能分析

本文通过 Matlab 仿真来验证所提出机制的有效性, 为此搭建了基于 MIMO-OFDM 的 CR 系统仿真平台, 该平台的一些方针参数设置如下: 信道带宽 $B=3.2\text{MHz}$, 子载波数 $N=128$, 循环前缀 $\text{CP}=32$, 多普勒频移 $f=100\text{Hz}$, 最小速率 $R_{\min}=0$, 最大功率 $P_{\max}=200\text{mW}$, 热噪声级 $N_0=10^{-11}\text{W}$, 路径损耗因子为 4。每个 CR 用户和基站均采用 2 发 2 收天线。对于两用户情形, 用户 1 和基站之间距离 D_1 固定为 100m, 而 D_2 从 10 到 200m 改变。本文通过 Jakes 信道模型产生 2×2 的 MIMO 信道, 为互不相关的 Rayleigh 衰落信道。

图 2 显示了 ANBS 机制下 2 个 CR 用户当 $D_1 = D_2 = 100\text{m}$ (即两用户有相同的信道状况) 时不同的感知权值对速率的影响。当感知权值从 0 到 1 变化时用户 1 的速率也逐渐变大, 在二者速率之和中占有较大比重, 而权值小速率就越小, 比重也越小。当两用户的权值相同具有最高的速率之和, 只有当二者的权值差别较大时, 在 $\omega_1=0\sim 0.1$ 或 $\omega_1=0.9\sim 1$ 时, 二者的速率之和才略有下降。相同信道状况下, 权值较大的用户获得更多的频谱和更高的速率, 而速率之和在权值变化时基本保持不变, 因此这种机制鼓励用户进行频谱感知, 使得自身获得更高的速率, 从而最大化系统的频谱感知。

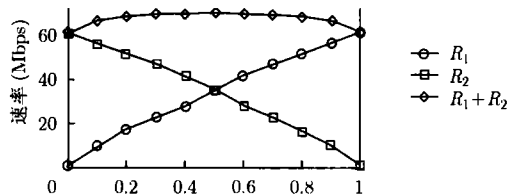


图 2 相同信道不同权值产生的速率比较

下面凡在 ANBS 机制下本文均选取 $\omega_1=0.3, \omega_2=0.7$ 和 $\omega_1=0.7, \omega_2=0.3$ 这两种情形来进行比较, 此时权值差别较大突出不同权值对速率和公平性的影响。图 3 显示了对应不同 D_2 时, 2 个用户的 ANBS, NBS, 最大化速率和最大化最小公平机制下的速率。对于最大化速率机制, 靠近基站的用户有更高的速率; 对于最大化最小机制, 两个用户有相同的速率, 当 D_2 增加时减小, 因为系统不得不适应那些最差信道状况的用户; 对于 NBS 机制, 不管 D_2 如何用户 1 的速率几乎是同样的, 用户 2 的速率当 D_2 增加的时候减小, 显示了 NBS 机制是公平的, 即用户的速率只由信道状况决定

而不被其他用户干扰; 对于 ANBS 机制, 当用户 1 的权值较大时, 不管 D_2 如何用户 1 的速率几乎是一样的, 用户 2 的速率相比较小且随着 D_2 增加而下降; 当用户 2 的权值较大时, 不管 D_2 如何用户 1 的速率还几乎是一样的, 但用户 2 的速率相比较大且随着 D_2 增加而下降, 显示了 ANBS 的加权比例公平性。

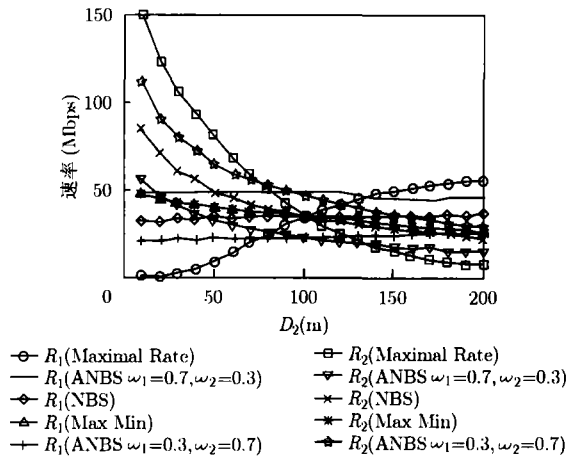


图 3 不同权值和不同信道用户速率比较

两个用户的速率比如图 4。对于最大化最小公平, 比率总是 1, 严格公平但是速率之和性能很差即无效。对于最大化速率, 比率随着不同的 D_2 极大的改变, 也是非常的不公平, 有更好信道的用户主导资源分配而其他用户饥饿。对于 NBS, 比率对于 $\log D_2$ 几乎是线性改变, 显示了比例公平性。每个用户分配到最小的可用速率, 剩下的资源根据信道状况比例分配。对于 ANBS, $\omega_1=0.3$ 和 $\omega_1=0.7$ 这两种情况比率对于 $\log D_2$ 也几乎是线性改变, 但由于加权缘故, 前者比率总小于 1, 只有当 D_2 非常大时才大于等于 1, 后者比率总大于 1, 只有当 D_2 非常小时才小于等于 1, 体现了 ANBS 的加权比例公平性。

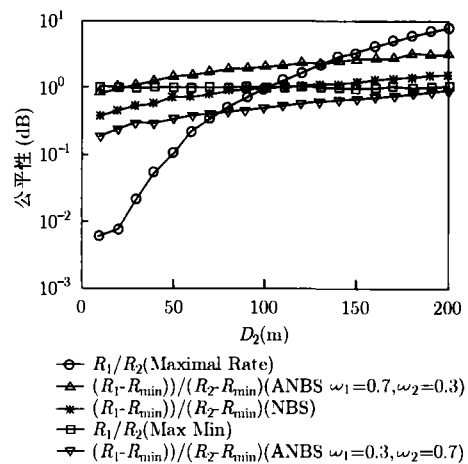


图 4 公平性比较

图 5 显示了不同 D_2 时, 4 种机制下两用户的速率之和的比较。其中最大化速率机制虽有好的速率性能但是极端不公平的; 最大化最小是最差的情形, 尤其当两个用户有非常不同的信道状况时, 有最差信道状况的用户限制了系统资源的使用; NBS 机制有着最大化速率机制和最大化最小机制之间的性能, 相对于最大化速率性能损失很小, 而且维持公平性(其中一个用户的性能是不因其他用户的信道状况而改变的); 对于 ANBS 机制, 当权值较大的用户占用好的信道时, 速率之和非常接近于最大化速率机制, 远大于 NBS 和最大化最小机制; 但权值较小的用户占用好的信道时, 速率之和相比最大化速率机制有较明显下降, 但相比最大化最小机制是相差不多的, 所以总体来讲性能要好于最大化最小机制, 接近于 NBS 机制。以上实验, 多用户情形与两用户基本一致。

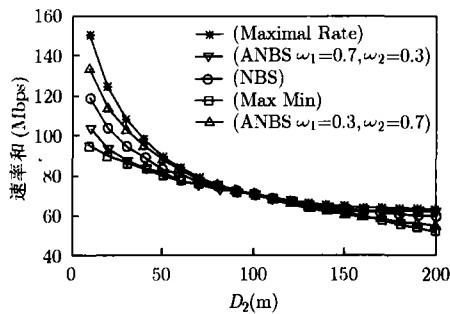


图 5 两用户速率之和比较

以下通过更多的用户进行仿真, 所有的用户随机地分布在以基站为中心的 200m 范围以内, 共享组内感知频谱。设每个用户最小速率为 0, 当然此时对于 ANBS 情形, 各用户感知权值也是随机产生的, 其他的条件与两用户时相同。如图 6 中显示了多用户时 4 种机制速率和比较。可以看出所有 4 种机制当用户增加时均有更好的性能, 这是因为多用户分集提供了不同用户独立可变信道。当用户数增加时, 随之协商对也增加, 各 CR 用户均积极参与感知, 使得它们的感知权值趋于相同, 因此 ANBS 有着 NBS 相似的性能, 同时它们都趋近于最大化速率机制, 比最大最小化机制有着更好的性能。因而这种结果也鼓励用户感知, 有利于最大化频谱感知的结果。

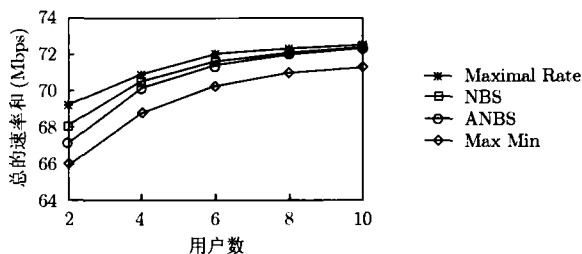


图 6 多用户时速率之和

6 结束语

本文根据不同 CR 用户具有不同的频谱感知贡献, 使用合作博弈论中的非对称纳什协商模型构造了效能函数, 实现了感知加权的比例公平性新算法, 并证明了算法的收敛性。该算法提供了一个近似优化的方案, 找到了整体速率和公平性之间的折衷, 并且该算法有着较低的复杂度。通过与其它 3 种不同的频谱分配机制进行比较, 算法不仅实现了感知频谱共享的有效性和公平性, 并且最大化频谱感知。

参考文献

- [1] McHenry M. Spectrum Occupancy Measurements. http://www.sharedspectrum.com/?section=nsf_summary. 2005.8.
- [2] Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. *IEEE JSAC*, 2005, 23(2): 201-220.
- [3] 田峰. 无线区域网WRAN和认知无线电技术. 中兴通信技术, 2006, (4): 61-64.
Tian Feng. Wireless regional area networks and cognitive radio. *ZTE Communication*, 2006, (4): 61-64.
- [4] Cabric D. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios. Proceedings of the 38th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, CA, USA, 2004, 1: 772-776.
- [5] Li G. On the optimality of downlink OFDMA MIMO systems. Proceedings of the 38th IEEE Asilomar. Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, CA, USA, 2004, 1: 324-328.
- [6] Christina M 著, 张琦译. 博弈论与经济学. 第一版. 北京: 经济管理出版社, 2005: 165-172.
- [7] Han Z. Low-complexity OFDMA channel allocation with Nash bargaining solution fairness. *IEEE Global Telecommunications Conference*, Dallas, 2004, Vol. 6: 3726-3731.
- [8] Song G. Adaptive subcarrier and power allocation in OFDM based on maximizing utility. Proceedings of the 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, Jeju, Korea, 2003, 2: 905-909.
- [9] Yu W. FDMA capacity of Gaussian multiaccess channels. *IEEE Trans. on Commun.*, 2002, 50(1): 102-111.
- [10] 戴一奇. 图论与代数结构. 第一版. 北京: 清华大学出版社, 1995: 94-98.
- [11] 解可新. 最优化方法. 修订版. 天津: 天津大学出版社, 2004: 140-144.

田 峰: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为无线通信与网络信号处理。

杨 震: 男, 1961 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线通信与网络信号处理、语音信号处理。