

认知无线电中基于 MIMO-OFDM 的限速率反馈资源分配算法

徐雷, 徐大专, 张小飞

(南京航空航天大学 信息科学与技术学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 针对基于 MIMO-OFDM 技术的认知无线电系统, 在考虑 TCM 编码的情况下提出了一种限速率反馈资源分配算法。该算法首先定义系统中各用户的有效发射模式集合; 其次, 根据链路质量指示函数, 以最大化感知协作组吞吐量为目标进行初始的资源分配; 然后, 以确保认识用户公平享用频谱资源为目标, 在认知用户间重新分配子载波和功率; 最后, 运用统计近似工具更新拉格朗日乘子并通过对在线递归方法得到渐进收敛的资源分配解。仿真结果表明, 该算法在保证授权用户权益的情况下不仅能有效提高感知协作组吞吐量, 而且能保证认识用户公平享用频谱资源, 并且具有反馈开销低的特点。

关键词: 认知无线电; 资源分配; 限速率反馈; 多输入多输出/正交频分复用; 公平

中图分类号: TN929.5

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2010)07-0096-08

Limited-rate feedback resource allocation algorithm based on MIMO-OFDM for cognitive radio systems

XU Lei, XU Da-zhuan, ZHANG Xiao-fei

(College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Limited-rate feedback resource allocation algorithm was proposed for cognitive radio systems based on multiple-input multiple-output orthogonal frequency-division multiplexing (MIMO-OFDM) technology considering the trellis coded modulation. Firstly, the algorithm defined the effective set of transmission mode per user. Secondly, it allocated the resource allocation with the goal of maximizing the collaborative awareness group throughput according to the function of link quality indicator. Thirdly, it reallocated the subcarriers and power among the cognitive users with the goal of guaranteeing the cognitive users to access the spectrum fairly. Finally, it updated the Lagrange multipliers utilizing stochastic approximation tools and obtained the asymptotic convergence solution of resource allocation by means of on-line recursion. Simulations corroborate that the algorithm not only improves the throughput of collaborative awareness group effectively but also ensures the cognitive users to access the spectrum fairly, while requiring low feedback overhead.

Key words: cognitive radio; resource allocation; limited-rate feedback; MIMO-OFDM; fairness

1 引言

随着无线用户数量及其对无线通信业务需求

的迅速增长, 无线频谱资源逐渐成为当今社会最重要的资源之一。因此, 学术界提出了某时、某地的空闲频谱可以进行二次使用的认知无线电技术, 该

收稿日期: 2009-02-13; 修回日期: 2010-05-31

基金项目: 江苏省产学研基金资助项目 (BY2009101); 航空基金资助项目 (2009ZC52036); 国家自然科学基金资助项目 (60801052); 国家教育部博士点基金资助项目 (20093218120021)

Foundation Items: Jiangsu Enterprises-Universities-Researches Fund (BY2009101); Aeronautical Science Foundation of China (2009ZC52036); The National Natural Science Foundation of China (60801052); The Ph. D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (20093218120021)

技术可以有效解决频谱资源紧缺问题^[1]。在认知无线电频谱共享网络中,使用授权频段通信的用户称为授权用户,它拥有频谱的绝对使用权;认知用户在以不影响授权用户的正常通信为前提,选择空闲频段进行通信。

MIMO 技术的核心思想是空时两维信号处理,时间维是通过数据编码引入的,空间维则是由空间分布的多个天线带来的^[2]。能有效对抗频率选择性衰落的 OFDM 技术被认为是认知无线电物理层的首选方案^[3]。OFDM 技术与 MIMO 技术的结合成为未来认知无线电系统发展的必然趋势。

已经有很多学者开始研究认知无线电系统的资源分配算法。文献[4]把一个授权用户和多个认知用户的系统建立成寡头垄断市场竞争模型,然后运用非合作博弈论为认知用户动态分配频谱资源。文献[5]在授权用户干扰功率限制和认知用户最大发射功率限制的约束条件下,为 SIMO 认知无线电系统提出联合波束形成和功率分配的新方案。文献[6]构造了一个基于非对称纳什协商方案的效能函数,通过有效的两用户协商算法,以基站为中心,在认知用户间分布式地进行子载波分配,从而实现了基于感知加权的比例公平性频谱分配,最终达到有效公平的频谱分配目标。文献[7]为基于 OFDM 技术的认知无线电系统提出了一个联合考虑子载波、比特和功率加载的低复杂度资源分配算法。文献[8]为基于 OFDM 技术的认知无线电系统提出了一个联合考虑物理层和 MAC 层的跨层资源分配方案。在上述文献中,文献[6]只是针对两认知用户的网络设计了分布式子载波分配策略,在网络规模上有很大的局限性;文献[4,5,7,8]为认知无线电系统设计集中式资源分配算法时没有考虑反馈开销对系统性能的影响,然而降低反馈开销是自适应技术走向实际应用的关键。文献[9]为基于 OFDM 技术的认知无线电系统提出了一个限速率反馈资源分配方案,但是文献[9]只是针对 SISO-OFDM 系统设计的限速率反馈资源分配方案,并且没有考虑信道编码对系统性能的影响和认知用户公平接入频谱问题。

本文在基于 MIMO-OFDM 技术的认知无线电系统中,建立了以感知协作组效用函数最大化为目标的数学模型,并且在文献[9]的基础上,提出了考虑认知用户公平接入频谱和 TCM 编码的限速率反馈资源分配算法。该算法在保证授权用户权益情况下让认知用户合理使用频谱资源,不仅有效地提高了

感知协作组吞吐量,同时保证认知用户公平享用频谱资源,并且本文提出算法具有反馈开销低的特点。

2 系统模型和用户有效发射模式集合

2.1 系统模型

认知无线电通过能量感知的方式可以实现授权用户的检测和频谱空穴的再利用;基站对各用户的感知信息进行分析,并根据地理位置信息来管理成员的加入和退出,组织感知协作组,此时在感知协作组内各用户的可用频谱资源是相同的,这样有利于频谱的有效分配^[6]。文献[6]给出了认知无线电感知协作组的框图。

图1表示认知无线电系统中用户 m 和基站的上行链路传输框架。假设感知协作组中有 M 个用户,其中 $m=1,2,\dots,M_p$ 是授权用户, $m=M_p+1,\dots,M$ 是认知用户。用户 m 有 N_t 根发射天线,基站有 N_r 根接收天线,子载波数为 K 。在自适应 TCM 编码器中,将固定速率的格码编码器和可变速率的调制器结合,通过星座图分割的方法,增大信号间最小距离,从而为系统提供额外的编码增益。所有用户使用相同的 $2L$ 维的 TCM 编码器和 Viterbi 解码器^[10]。子载波 k 上的空时编码器采用的是空时分组码,发射机的发射天线数目与子载波 k 上的空时分组码行数相等;空时译码器采用文献[11]提出的配方简化译码算法。时刻 n 用户 m 在子载波 k 上的等效信道增益如式(1)所示。

$$H[m,k|n] = \alpha \sum_{u=1}^{N_t} \sum_{v=1}^{N_r} |H_{u,v}[m,k|n]|^2 \quad (1)$$

其中, $H_{u,v}[m,k|n]$ 为发射天线 u 和接收天线 v 之间时刻 n 用户 m 在子载波 k 上的频域信道响应; α 为一个常数,它与码率有关。假定在一个空时分组码时间内,信道参数恒定,不同空时分组码的时间内可以不同。

2.2 用户有效发射模式集合

$2L$ 维的 TCM 编码 QAM 调制的误比特率 $\varepsilon_{m,k|j}$ 如式(2)所示,式(2)的有效性在文献[10]被验证。

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{m,k|j}(r_{m,k|j}, p_{m,k|j} | H[m,k|n]) \\ & = c_j \exp\left(-\frac{1.6\psi_j p_{m,k|j}}{2^{r_{m,k|j}} - 1} \times \frac{H[m,k|n]}{N_o}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, N_o 是高斯白噪声方差, c_j 和 ψ_j 的值取决于 TCM 编码器的结构和调制阶数, $c_j > 0$, $\psi_j > 0$,

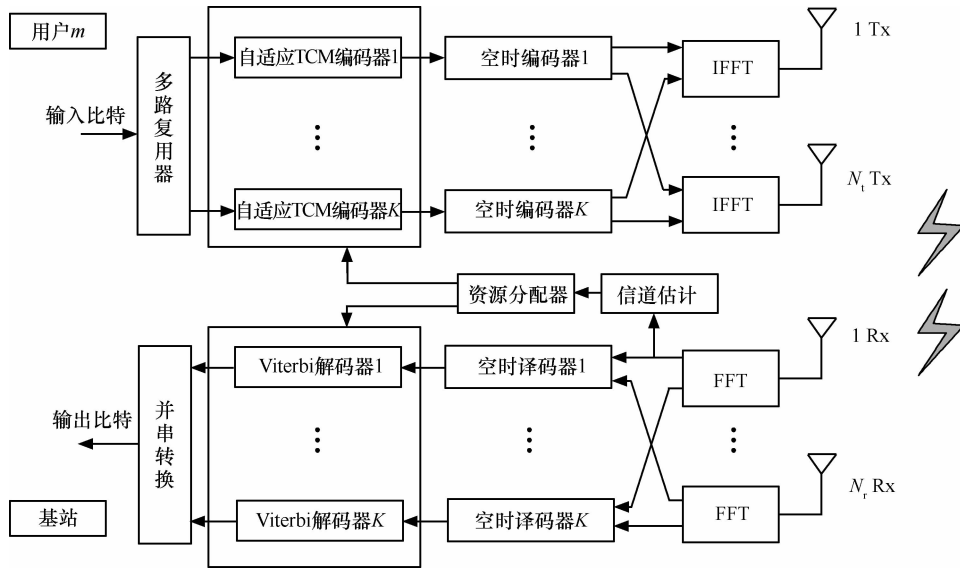


图 1 用户 m 与基站的上行链路传输框架

$r_{m,klj}$ 表示用户 m 在子载波 k 上发射模式为 j 的传输速率, $p_{m,klj}$ 是与之对应的发射功率。假设用户 m 在子载波 k 上发射速率模式集合为 $\{r_{m,klj}\}$ 。当基站知道用户 m 在子载波 k 上目标误比特率 $\varepsilon_o[m,k]$ 和发射天线 u 与接收天线 v 之间的平均信道增益 $\bar{h}_{u,v}$, $1 \leq u \leq N_t$, $1 \leq v \leq N_r$ 后, 可以通过式 (2) 计算用户 m 在子载波 k 上发射功率集合 $\{p_{m,klj}\}$ 。因此, 用户 m 在子载波 k 上的发射模式集合为 $\{(r_{m,klj}, p_{m,klj}) \mid j=1,2,\dots,J\}$, 该发射模式集合被用户和基站存储在本地空间。

当基站知道时刻 n 用户 m 在子载波 k 上的等效信道增益 $H[m,k|n]$ 后, 可以计算时刻 n 用户 m 在子载波 k 上的有效发射模式集合 $J_{m,k}(n)$, 如式 (3) 所示。

$$J_{m,k}(n) = \{j \mid \varepsilon_{m,klj}(r_{m,klj}, p_{m,klj} \mid H[m,k|n]) \leq \varepsilon_o[m,k]\} \quad (3)$$

3 认知无线电系统资源优化问题描述

为了保证认知无线电系统中授权用户的权益, 为授权用户设置最小传输速率 $[\bar{r}_o]_m$, ($m=1,\dots,M_p$); 另一方面, 为了防止系统中的认知用户滥用频谱, 为认知用户设置最大传输速率 $[\bar{r}_o]_m$, ($m=M_p+1,\dots,M$)。同时, 由于用户终端的电池能量有限, 为每个用户设置最大消耗功率限制

$[\bar{p}_o]_m$ 。认知无线电系统资源优化问题的目标是在保证用户误比特率要求和上述限制条件的基础上最大化感知协作组效用函数。因此, 可用如下的数学模型来描述:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max} : \sum_{m=1}^M U_m \left(E_h \left[\sum_{k=1}^K \sum_{j \in J_{m,k}(n)} \left(r_{m,klj} - \frac{1}{L} \right) w_{m,klj}(n) \right] \right) \\ \text{S.t} : \text{C1. } E_h \left[\sum_{k=1}^K \sum_{j \in J_{m,k}(n)} \left(r_{m,klj} - \frac{1}{L} \right) w_{m,klj}(n) \right] \geq [\bar{r}_o]_m, \\ \quad m=1,\dots,M_p \\ \text{C2. } E_h \left[\sum_{k=1}^K \sum_{j \in J_{m,k}(n)} \left(r_{m,klj} - \frac{1}{L} \right) w_{m,klj}(n) \right] \leq [\bar{r}_o]_m, \\ \quad m=M_p+1,\dots,M \\ \text{C3. } \frac{E_h \left[\sum_{k=1}^K \sum_{j \in J_{m+1,k}(n)} \left(r_{m+1,klj} - \frac{1}{L} \right) w_{m+1,klj}(n) \right]}{E_h \left[\sum_{k=1}^K \sum_{j \in J_{m,k}(n)} \left(r_{m,klj} - \frac{1}{L} \right) w_{m,klj}(n) \right]} = \frac{1}{1}, \\ \quad m=M_p+1,\dots,M-1 \\ \text{C4. } E_h \left[\sum_{k=1}^K \sum_{j \in J_{m,k}(n)} p_{m,klj} w_{m,klj}(h) \right] \leq [\bar{p}_o]_m, \forall m \\ \text{C5. } \varepsilon_{m,klj} \leq \varepsilon_o[m,k], \forall m,k,j \\ \text{C6. } \sum_{m=1}^M \sum_{j \in J_{m,k}(n)} w_{m,klj}(n) \leq 1, w_{m,klj}(n) \geq 0, \forall m,k,j \end{array} \right. \quad (4)$$

其中, $w_{m,klj}(n)$ 是时刻 n 用户 m 在子载波 k 的分配

指示函数。限制条件 C1 是保证授权用户的传输速率，C2 是限制认知用户最大传输速率，C3 是保证认知用户能公平的分享频谱资源，C4 是每个用户的功率限制，C5 保证了各用户的误比特率需求，C6 保证子载波分配解的可行性。式 (4) 的目标函数中， $U_m(x)$ 是用户 m 的效用函数。根据系统优化目标的不同，选择不同的效用函数。效用函数的表达式如下：

$$U_m(x|\Omega) = \begin{cases} x, \Omega = 1 \\ -\left[-\ln\left(\frac{x}{A_m}\right)\right]^B, \Omega = 2 \end{cases} \quad (5)$$

其中， A_m 是一个充分大的常数，确保 $0 < x/A_m < 1$ [12]。当 $\Omega = 1$ 时，优化目标是最大化系统的吞吐量；当 $\Omega = 2$ 和 $B = 1$ 时，优化目标是系统中用户进行比例公平资源分配；当 $\Omega = 2$ 和 $B = +\infty$ 时，优化目标是系统中用户进行最大—最小公平性资源分配。

4 限速率反馈资源分配算法

认知无线电资源优化数学模型 (式 (4)) 包含了对用户速率和功率取均值的操作，可以运用统计近似工具 [9,13]，采用在线递归算法得到资源分配解。用户 m 在 $n+1$ 时刻和 n 时刻的平均速率和功率满足如下关系：

$$\begin{cases} \bar{r}_m[n+1] \\ = \bar{r}_m[n] + \beta \left(\sum_{k=1}^K \sum_{j \in J_{m,k}(n)} \left(r_{m,klj} - \frac{1}{L} \right) w_{m,klj}(n) - \bar{r}_m[n] \right) \\ \bar{p}_m[n+1] \\ = \bar{p}_m[n] + \beta \left(\sum_{k=1}^K \sum_{j \in J_{m,k}(n)} p_{m,klj} w_{m,klj}(n) - \bar{p}_m[n] \right) \end{cases} \quad (6)$$

其中， β 为递归步长， $\sum_{k=1}^K \sum_{j \in J_{m,k}(n)} \left(r_{m,klj} - \frac{1}{L} \right) w_{m,klj}(n)$ 为用户 m 在时刻 n 的瞬时发射速率； $\sum_{k=1}^K \sum_{j \in J_{m,k}(n)} p_{m,klj} w_{m,klj}(n)$ 为用户 m 在时刻 n 的瞬时发射功率。把式 (6) 代入式 (2) 的效用函数中，设 β 取很小的正数，应用泰勒展式，得到式 (7)。

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M U_m(\bar{r}_m[n+1]) \\ & \approx \sum_{m=1}^M U_m(\bar{r}_m[n]) + \sum_{m=1}^M \beta U'_m(\bar{r}_m[n]) \cdot \end{aligned}$$

$$\left(\sum_{k=1}^K \sum_{j \in J_{m,k}(n)} \left(r_{m,klj} - \frac{1}{L} \right) w_{m,klj}(n) - \bar{r}_m[n] \right) \quad (7)$$

其中， $U'_m(\bar{r}_m[n])$ 表示 $U_m(\bar{r}_m[n])$ 对 $\bar{r}_m[n]$ 求导，假设 $\bar{r}_m[n]$ 已知，则最大化 $\sum_{m=1}^M U_m(\bar{r}_m[n+1])$ 等效于最大化 $\sum_{m=1}^M U'_m(\bar{r}_m[n]) \sum_{k=1}^K \sum_{j \in J_{m,k}(n)} r_{m,klj} w_{m,klj}(n)$ 。

文献[9]提出了一种统计对偶资源分配算法，本文在文献[9]的基础上，推导了暂不考虑认知用户公平性情况下的子载波分配准则。暂不考虑限制条件 C3 和 C6，设式 (4) 限制条件 C1、C2 和 C4 的拉格朗日乘子为 $\hat{\zeta}[n] = \{\hat{\zeta}_{r_m}[n], \hat{\zeta}_{p_m}[n]\}$ ，其中 $\hat{\zeta}_{r_m}[n]$ 是用户 m 在时刻 n 的速率拉格朗日乘子， $\hat{\zeta}_{p_m}[n]$ 是用户 m 在时刻 n 的功率拉格朗日乘子。式 (4) 的拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} L(\hat{\zeta}[n]) &= \sum_{m=1}^M U_m(\bar{r}_m[n]) + \\ & \sum_{m=1}^M (-1)^{I_{\{m > M_p\}}} \hat{\zeta}_{r_m}[n] \left(\bar{r}_m[n] - [\bar{r}_o]_m \right) - \\ & \sum_{m=1}^M \hat{\zeta}_{p_m}[n] \left(\bar{p}_m[n] - [\bar{p}_o]_m \right) \end{aligned} \quad (8)$$

其中， $I_{\{m > M_p\}}$ 为示性函数， $I_{\{m > M_p\}} = \begin{cases} 1, m = M_p + 1, \dots, M \\ 0, m = 1, \dots, M_p \end{cases}$ 。式 (8) 的拉格朗日对偶函数为

$$D(\hat{\zeta}[n]) = \max_{w_{m,klj}(n) \in S.T.: C6} L(\hat{\zeta}[n], w_{m,klj}(n)) \quad (9)$$

则式 (4) 的对偶问题为

$$\min_{\hat{\zeta}[n] \geq 0} D(\hat{\zeta}[n]) \quad (10)$$

由文献[9]和文献[14]定理 3.1 可知式 (4) 和式 (10) 具有零对偶间隙，所以解决式 (4) 的问题等效于解决式 (10) 的问题。然而解决式 (10) 的问题必须先解决式 (9) 的最大化问题，在已知拉格朗日乘子 $\hat{\zeta}[n]$ 的情况下，式 (9) 的优化问题可以通过“优者胜”的策略来解决 [9]。首先，定义时刻 n 用户 m 在子载波 k 上的链路质量指示函数为

$$\begin{aligned} \varphi_{m,klj}(n) &= \left(U'_m(\bar{r}_m[n]) + (-1)^{I_{\{m > M_p\}}} \hat{\zeta}_{r_m}[n] \right) \cdot \\ & \left(r_{m,klj} - \frac{1}{L} \right) - \hat{\zeta}_{p_m}[n] p_{m,klj}, \forall j \in J_{m,k}(n), \forall m \end{aligned} \quad (11)$$

其次，寻找时刻 n 子载波 k 上每个用户最有效率的

发射模式为

$$j_{m,k}^*(n) = \arg \max_{j \in J_{m,k}(n)} \varphi_{m,klj}(n), \forall m \quad (12)$$

然后, 寻找时刻 n 子载波 k 上最有效率的用户为

$$m_k^*(n) = \arg \max_m \varphi_{m,klj_{m,k}^*(n)}(n) \quad (13)$$

最后, 得到最优子载波分配为

$$\begin{cases} \hat{\zeta}_{r_m}[n+1] = \left[\hat{\zeta}_{r_m}[n] - \beta \left(\sum_{k=1}^K \sum_{j \in J_{m,k}(n)} (r_{m,klj} - 1/L) w_{m,klj}(n) - [\bar{r}_o]_m \right) \right]^+, m=1, \dots, M_p \\ \hat{\zeta}_{r_m}[n+1] = \left[\hat{\zeta}_{r_m}[n] - \beta \left([\bar{r}_o]_m - \sum_{k=1}^K \sum_{j \in J_{m,k}(n)} (r_{m,klj} - 1/L) w_{m,klj}(n) \right) \right]^+, m=M_p+1, \dots, M \\ \hat{\zeta}_{p_m}[n+1] = \left[\hat{\zeta}_{p_m}[n] - \beta \left([\bar{p}_o]_m - \sum_{k=1}^K \sum_{j \in J_{m,k}(n)} p_{m,klj} w_{m,klj}(n) \right) \right]^+, \forall m \end{cases} \quad (15)$$

本文提出的认知无线电限速率反馈资源分配算法描述如下。

步骤 1 初始化拉格朗日乘子 $\{\hat{\zeta}_{r_m}[0], \hat{\zeta}_{p_m}[0]\}$;

式 (15) 的递归步长 β , 令 $n=0$; 系统仿真时间索引 N_{um} , 单位: OFDM 符号; 效用函数选择时, 令 $\Omega=1$ 。

While ($n \leq N_{um}$)

步骤 2 初始化时刻 n 认知用户分配的子载波集合 $S_{\text{cognitive}} = \Phi$ 和子载波数目 $K_{\text{cognitive}} = 0$ 。

For $k=1:K$

①用式 (3) 计算时刻 n 用户 m 在子载波 k 上的有效发射模式集合 $J_{m,k}(n)$ 。

②如果所有用户有效发射模式集合 $J_{m,k}(n)$ 都为空集, 子载波 k 不分配给任何用户, 进入下一个子载波分配; 否则, 进入③; 存在一种特殊情况: 出现多个用户的链路质量指示函数最大值相等, 设最大值相等的用户集合为 M_{Equal} 。如果 M_{Equal} 集合中有授权用户, 则子载波 k 随机分配给 M_{Equal} 集合中一个授权用户; 否则, 子载波 k 随机分配给 M_{Equal} 集合中一个认知用户。

③用式 (11) ~ 式 (14) 得到时刻 n 的子载波分配结果 $w_{m,klj}(n)$ 。

④如果子载波 k 分配给认知用户 m 的第 j 个发射模式, 令 $w_{m,klj}(n) = 0$, $S_{\text{cognitive}} = S_{\text{cognitive}} + \{k\}$, $K_{\text{cognitive}} = K_{\text{cognitive}} + 1$ 。

$$w_{m,klj}^*(n) = \begin{cases} 1, \text{当 } m = m_k^*(n), j = j_{m_k^*(n),k}^*(n) \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

由式 (14) 的子载波分配结果和式 (3) 的有效发射模式集合可以更新用户 m 在 $n+1$ 时刻的平均速率 $\bar{r}_m[n+1]$ 和平均功率 $\bar{p}_m[n+1]$ 。速率和功率拉格朗日乘子用迭代方法进行更新^[9], 如式 (15) 所示。

End

步骤 3 ①授权用户的子载波分配结果和发射模式集合保持不变; 分配给认知用户的子载波 $S_{\text{cognitive}}$, 在认知用户间重新分配; 认知用户 m 的临时传输速率 $R_m = 0$ 和分配的子载波集合 $S_m = \Phi$, $m = M_p + 1, \dots, M$; 假设各认知用户的功率在子载波集合 $S_{\text{cognitive}}$ 上等功率分配, 并计算临时加载比特 $r_{m,k}^{\text{tmp}}$, 如式 (16) 所示。

$$r_{m,k}^{\text{tmp}} = \text{lb} \left(1 - \frac{1.6\psi_j [\bar{p}_o]_m H[m,k|n]}{K_{\text{cognitive}} \ln \left(\frac{\varepsilon_o[m,k]}{c_j} \right) N_o} \right), \quad m = M_p + 1, \dots, M; k \in S_{\text{cognitive}} \quad (16)$$

While ($S_{\text{cognitive}} \neq \Phi$)

②选择最小传输速率的认知用户为

$$m^* = \arg \min_m R_m, m = M_p + 1, \dots, M \quad (17)$$

③选择认知用户 m^* 在时刻 n 等效信道增益最大的子载波为

$$k^* = \arg \max_{k \in S_{\text{cognitive}}} H[m^*, k|n] \quad (18)$$

④更新认知用户 m^* 的速率, $R_{m^*} = R_{m^*} + r_{m^*,k^*}^{\text{tmp}}$;

$$S_{m^*} = S_{m^*} + \{k^*\}; S_{\text{cognitive}} = S_{\text{cognitive}} - \{k^*\}。$$

End

⑤各认知用户在自己的子载波集合 S_m 中用注

水原理分配功率; 并根据有效发射模式集合 $J_{m,k}(n)$ 选择合适的发射模式。

步骤 4 ①用式 (6) 更新 $n+1$ 时刻用户 m 的平均速率和功率 $\bar{r}_m[n+1]$ 、 $\bar{p}_m[n+1]$ 。

②用式 (15) 更新 $n+1$ 时刻用户 m 的速率和功率拉格朗日乘子 $\hat{\zeta}_m^*[n+1]$ 、 $\hat{\zeta}_{p_m}^*[n+1]$, 令 $n = n+1$ 。

End

步骤 1 是对本文提出算法的变量初始化; 步骤 2 是对授权用户和认知用户进行初始资源分配, 步骤 2 保证了授权用户使用频谱的绝对权力以及认知用户不滥用频谱; 步骤 3 是把步骤 2 对认知用户已经分配的子载波在认知用户间重新分配, 步骤 3 保证各认知用户能够公平地享用频谱资源; 步骤 4 更新 $n+1$ 时刻系统中各用户的平均速率和平均功率, 以及速率和功率的拉格朗日乘子。

基站利用用户的等效信道状态信息运行本文提出的算法, 得到资源分配结果 $F(n) = \{m_1^*(n), j_{m_1^*(n),1}^*(n), \dots, m_k^*(n), j_{m_k^*(n),k}^*(n)\}$, 其中 $m_k^*(n)$ 表示时刻 n 子载波 k 分配的用户, $j_{m_k^*(n),k}^*(n)$ 表示时刻 n 用户 $m_k^*(n)$ 在子载波 k 上选择的发射模式; 然后通过广播方式反馈给用户资源分配结果。

5 算法反馈开销和计算复杂度分析

系统有 M 个用户, 由于每个用户最多有 J 种发射模式, 那么子载波 k 上最多有 $J+1$ 种可能的发射模式, 因此总的反馈量最多为 $K[\text{lb}(J+1) + \text{lb}M]$ bit。

例如, 系统有 4 个用户, 每个用户有 $J=7$ 种发射模式, 那么每个子载波最多需要 5bit 来表示反馈信息。

本文提出资源分配算法中, 步骤 2 的计算量为 $O((J \times M + 1)K)$, 步骤 3 的计算量为 $O((M - M_p) \times (K_{\text{cognitive}} + 2) + 3K_{\text{cognitive}})$, 步骤 4 的计算量为 $O(4M)$, 因此总的计算量为 $O((J \times M + 1)K + 4M + (M - M_p)(K_{\text{cognitive}} + 2) + 3K_{\text{cognitive}})$ 。

6 数值仿真与性能分析

信道模型使用 IMT-2000 Vehicular Model A 六径信道。用户在子载波上目标误比特率为 $\varepsilon_o[m,k] = 1 \times 10^{-3}$; OFDM 符号有 64 个子载波; 递归步长 $\beta = 0.005$ 。 $N_t = 2$, $N_r = 2$, 子载波 k 上的空时编码器采用 Alamouti 空时分组码, 因此等效信道增益式 (1) 中 $\alpha = 1$ ^[11]; 本文采用编码速率为 2/3

的 2 维 8 状态 TCM 编码器, 式 (2) 中, $c_j = 6$, $\psi_j = 5$ ^[10]。设感知协作组有 4 个用户, 1 个授权用户, 3 个认知用户; 感知协作组中用户的目标速率为 $[\bar{r}_o] = [128 \ 32 \ 32 \ 32] = [\text{授权用户}, \text{认知用户}]$, 单位为 bit/OFDM 符号, 用户的目标功率需求 $[\bar{p}_o] = [100 \ 50 \ 50 \ 50] = [\text{授权用户}, \text{认知用户}]$, 单位为 mW; 用户在发射天线 u 和接收天线 v 之间的平均信道功率增益都为 $\bar{h}_{u,v} = 20\text{dB}$ 。

为了和本文提出的算法进行比较, 下面介绍 2 种算法。文献[15] Kim 算法: 子载波分配给最大边际效用的用户, 功率按照注水原理进行分配。文献[16]Jang 算法: 子载波分配给信道增益最大的用户, 功率按照注水原理进行分配。由于文献[15]Kim 算法和文献[16]Jang 算法没有采用限速率反馈, 并且不能保证认知用户的传输速率不超过最大速率限制, 因此, 为了和本文提出算法公平比较, 提出 Kim 算法和 Jang 算法的修改算法 KimLRF 算法、JangLRF 算法。KimLRF 算法和 JangLRF 算法采用限速率反馈, 并且当认知用户的传输速率超过其最大速率限制时, 限制该用户的传输速率为最大限制速率。

图 2 比较授权用户和认知用户在各种算法下的吞吐量。用户的调制方式为: {4QAM、8QAM、16QAM、32QAM、64QAM、128QAM、256QAM、512QAM}。图 3 比较了本文提出算法与其他算法系统吞吐量, 图 3 的仿真条件与图 2 相同。图 2 和图 3 中的横坐标是时间索引, 单位: OFDM 符号; 纵坐标是吞吐量, 采用式 (19) 计算, 单位: bit/OFDM 符号。式 (19) 中 n 代表 OFDM 符号索引号, $\bar{r}_m[i]$ 表示第 i 个 OFDM 符号用户 m 的平均传输速率。

$$T(n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M \bar{r}_m[i] \quad (19)$$

由于本文提出算法是递归算法, 因此采用本文提出算法收敛后的系统吞吐量与其他算法进行比较。在频谱利用率方面: 图 2 可以看出, Kim 算法^[15]和 Jang 算法^[16]不能保证认知用户最大传输速率的限制, 出现了认知用户滥用频谱的现象, 而本文提出算法、KimLRF 算法^[15]和 JangLRF 算法^[16]都能够满足资源优化问题的限制条件 C1 和 C2, 并且本文提出算法的授权用户传输速率最高。图 3 可以看出, 各种算法在系统吞吐量方面从高到低依次为: Kim 算法^[15]、Jang 算法^[16]、本文提出算法、KimLRF 算

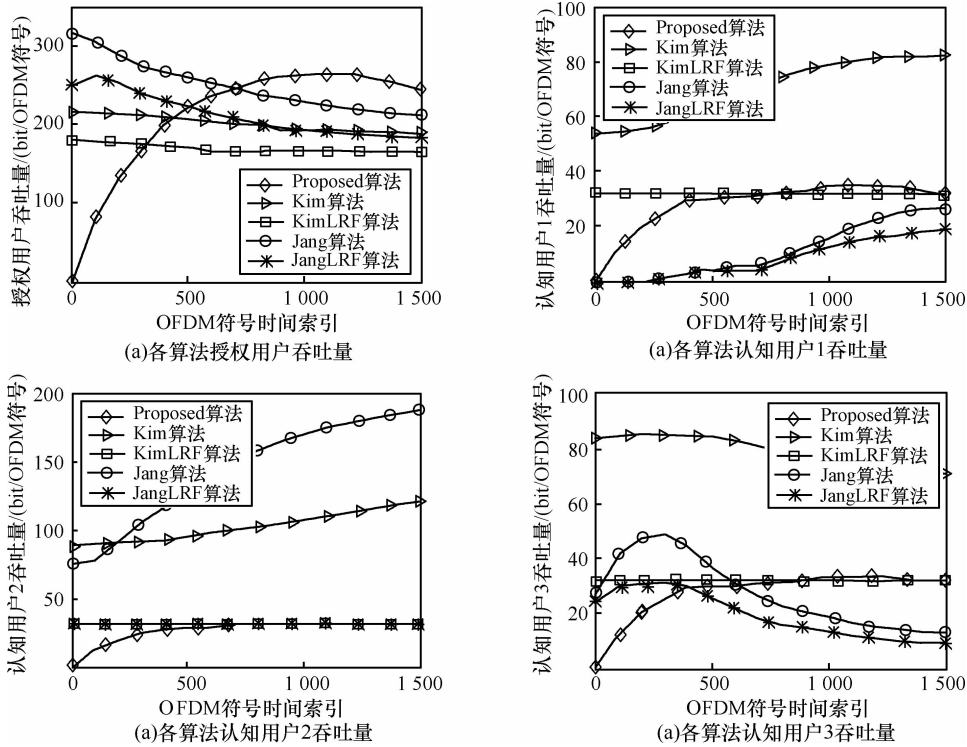


图 2 授权用户和认知用户在各种算法下的吞吐量比较

法^[15]和 JangLRF 算法^[16]。尽管 Kim 算法^[15]和 Jang 算法^[16]的系统吞吐量比本文提出算法高，但是由于没有采用限速率反馈并且不能保证认知用户最大传输速率的限制，因此和本文提出算法没有可比性。在反馈开销方面：本文提出算法、KimLRF 算法^[15]和 JangLRF 算法^[16]在每个子载波上只需要反馈 6bit；由此可以看出本文提出算法在低反馈开销的情况下可以达到很好的频谱利用率。

时刻 n 认知用户 Jain 公平指数定义如式 (20)。式 (20) 中，Jain 公平指数的值越接近 1 表明认知用户能公平享用频谱资源，Jain 公平指数的值等于 1 表明各认知用户传输速率相等。

$$Jain[n] = \frac{\left| \sum_{m=M_p+1}^M \bar{r}_m[n] \right|^2}{(M - M_p) \sum_{m=M_p+1}^M (\bar{r}_m[n])^2} \quad (20)$$

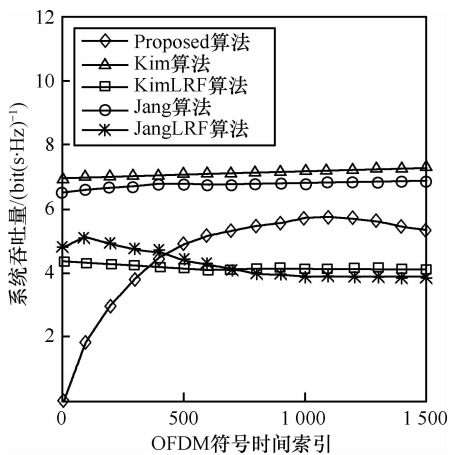


图 3 本文提出算法与其他算法系统吞吐量的比较

图 4 对本文提出算法与其他算法 Jain 公平指数进行了比较，图 4 的仿真条件与图 2 相同。系统中

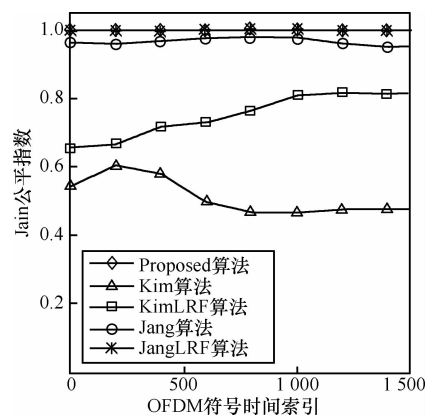


图 4 本文提出算法与其他算法 Jain 公平指数的比较

图 4 可以看出，本文提出算法和 KimLRF 算法的 Jain 公平性指数几乎等于 1，这说明本文提出算法和 KimLRF 算法能够保证认知用户公平的享用频谱资源。

源。尽管 KimLRF 算法能够保证认识用户公平的享用频谱资源,但是 KimLRF 算法的系统吞吐量小于本文提出算法。因此,本文提出算法在保证用户公平享用频谱资源的同时,能够有效提高系统吞吐量。

7 结束语

本文为基于 MIMO-OFDM 技术的认知无线电系统,在考虑 TCM 编码和认知用户公平享用频谱资源的情况下提出了限速率反馈资源分配算法。仿真结果表明,与以往的算法相比,该算法在授权用户和认知用户间合理分配资源从而有效提高了感知协作组吞吐量并且保证了授权用户的权益;同时具有低反馈开销的特点,适合实际的自适应传输应用。

参考文献:

- [1] BANSAL G, HOSSAIN M, BHARGAVA V. Optimal and suboptimal power allocation schemes for OFDM-based cognitive radio systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(11): 4710-4718.
- [2] GESBERT D, SHAFI M, SHIU D S, *et al.* From theory to practice: an overview of MIMO space-time coded wireless systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(3):281-302.
- [3] FARHANG B, KEMPTER R. Multicarrier communication techniques for spectrum sensing and communication in cognitive radios[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(4):80-85.
- [4] NIYATO D, HOSSAIN E. Competitive spectrum sharing in cognitive radio networks: a dynamic game approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(7):2651-2660.
- [5] ZHANG L, LIANG Y, XIN Y. Joint beamforming and power allocation for multiple access channels in cognitive radio networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1):38-51.
- [6] 田峰, 杨震. 认知无线电频谱分配新算法研究[J]. 通信学报, 2007, 28(9):1-7.
TIAN F, YANG Z. Study on novel spectrum allocation algorithm for cognitive radios[J]. Journal on Communications, 2007, 28(9):1-7.
- [7] ZHANG Y, LEUNG C. Resource allocation in an OFDM-based cognitive radio system[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(7): 1928-1931.
- [8] PENG Y, LIU Z, LONG H, *et al.* The research of cross-layer design between the PHY and MAC layer for OFDM-based cognitive radio network[A]. 2009 International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing[C]. Hubei, China, 2009. 290-293.
- [9] MARQUES A, WANG X, GIANNAKIS G. Dynamic resource management for cognitive radios using limited-rate feedback[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(9):1-16.
- [10] TANG L, ZHU P, WANG Y, *et al.* Adaptive modulation based on finite-rate feedback in broadcast channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(11):4449-4454.
- [11] 罗涛, 乐光新. 多天线无线通信原理与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
LUO T, YUE G X. Multi-Antenna Wireless Communication Theory and Application[M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2005.
- [12] CHENG H, ZHUANG W. QoS-driven MAC-layer resource allocation for wireless mesh networks with non-altruistic node cooperation and service differentiation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(12):6089-6103.
- [13] STOLYAR A. On the asymptotic of the gradient scheduling algorithm for multi-user throughput allocation[J]. Operation Research, 2005, 53(1):12-25.
- [14] LIU B, WANG C. Zero duality gap properties for a class of lagrangian dual problem and the convergence of its optimal path[J]. Operation Research, 2007, 11(3):1-12.
- [15] KIM K, HAN Y, KIM S. Joint subcarrier and power allocation in uplink OFDMA systems[J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(6):526-528.
- [16] JANG J, LEE K. Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 2003, 21(2):171-178.

作者简介:



徐雷(1983-), 男, 江苏南京人, 南京航空航天大学博士生, 主要研究方向为认知无线电、通信网络技术。



徐大专(1963-), 男, 江苏盐城人, 南京航空航天大学教授、博士生导师, 主要研究方向为通信信号处理、信息论、自组织网络。



张小飞(1977-), 男, 江苏淮安人, 南京航空航天大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为阵列信号处理。