

# 认知无线网络中一种新的频谱共享方法

王磊 郑宝玉 崔景伍 岳文静

(南京邮电大学 信号处理与传输研究院, 江苏 南京 210003;  
“宽带无线通信与传感网技术”教育部重点实验室 (南京邮电大学))

**摘要:** 频谱共享是认知无线网络关键技术之一。为消除认知无线网络中频率选择性信道下授权主用户与认知用户间的相互干扰, 本文提出了一种新的频谱共享方法。该方法充分利用了无线通信系统中由信道的频率选择性衰落导致的不同用户信道的不相关性, 通过求解矩阵方程获得预处理矩阵的通解, 并在主用户和认知用户发射端分别进行预处理。从而实现认知系统中主用户与认知用户之间的相互零干扰, 并使每个用户都可有效地传输数据。理论推导及系统仿真均表明, 新方法可以有效地消除授权主用户与认知用户之间的双向干扰, 实现不同用户平等地共享无线频谱资源。新方法可以提高频谱的利用率, 一定程度上缓解无线频谱资源在当前及未来无线通信领域日益紧缺的矛盾。而且新方法也同样适用于不同认知用户之间共享频谱。

**关键词:** 认知无线网络; 频谱共享; 预处理

**中图分类号:** TN92    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1003-0530(2011)07-0961-06

## New Spectrum Sharing Scheme for Cognitive Wireless Networks

WANG Lei ZHENG Bao-yu CUI Jing-wu YUE Wen-jing

(Institute of Signal Processing and Transmission, NJUPT, Jiangsu Nanjing 210003, China;  
Key Lab of “Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology” (Nanjing  
University of Posts & Telecommunications), Ministry of Education)

**Abstract:** Spectrum sharing is one of key technologies in cognitive wireless networks. In order to eliminate interference between the authorized primary user and the cognitive user over the frequency selective channels of cognitive wireless networks, a new method of spectrum sharing is presented in this paper. It is made full use in the new method that the channels between different users are not relevant due to frequency selective fading in wireless communication systems; the general solution of the pretreatment matrix is obtained by solving the matrix equation; and both the primary user and the cognitive user transmitter are pretreated in the new scheme. To eliminate the interference between the primary user and cognitive user in cognitive wireless networks while effectively send and receive data. Theoretical analysis and simulation results show that the new method can effectively eliminate the interference between the primary and the cognitive user of two-way to achieve the equality of different users to share radio spectrum resources, which can improve the efficiency of spectrum utilization and alleviate the contradiction between the increasing requirement and the scarcity of spectrum resources at present and in the further. Furthermore, the new method is also applicable to different cognitive users for sharing spectrum.

**Key words:** cognitive wireless networks; spectrum sensing; pretreatment

## 1 引言

认知无线系统的目标是在不影响主用户正常通信的前提下, 准许认知用户智能地利用已经授权给主用户的频段, 并进行可靠地通信。即主用户和认知用户共享无线频谱资源, 进而提高了网络的数据吞吐能力及无线频谱的利用率。频谱共享方法发展至今, 对于

如何去除系统中主用户受到来自认知用户干扰的问题, 已有大量研究并提出了一些共享策略<sup>[1-8]</sup>。在这些方案中, 基本都是预先消除认知用户在传输信息时对主用户接收机的干扰, 而且通常会包含很多不实际的前提条件, 如: 假设发射机事先精确获取所有信道状态信息; 认知用户预先知道全部或部分主用户的信息等。然而具备这些前提条件通常不太现实, 因为这需要无

收稿日期: 2011 年 5 月 10 日; 修回日期: 2011 年 6 月 2 日

基金项目: 国家自然科学基金项目(60972039; 61071093; 61001077); 江苏省自然科学基金重点项目(BK2010077); 信号与信息处理重庆市市级重点实验室开放研究基金项目; 南京邮电大学科研基金项目(NY210072)资助

线信道是准静态信道并需要认知用户时时跟踪所有信道的状态,同时认知用户还需要解码主用户的传输信息。可是一般认知用户是很难具备这么强的认知能力的。文献[9]提出了 VFDM 方案,用于消除认知用户对主用户的干扰。该方案先获取非目的接收端反馈到发射端的干扰信道信息,再利用与干扰信道正交的 Vandermonde 矩阵作为预处理矩阵,从而消除认知用户对主用户的干扰。该方案有效保证了主用户进行正常通信,可是这种情况下认知用户的传输性能被主用户严重干扰。所以,此类共享方案仍难以实际应用。

考虑到文献[9]研究的场景比较合理,但 VFDM 方案仅消除了认知用户对主用户单方向的干扰,且该方案中的预处理 Vandermonde 矩阵也只是众多满足预处理条件矩阵中的一种。因此有必要在该场景下研究更为完善的共享方案。本文首先通过求解矩阵方程获取满足预处理条件的矩阵通解,然后在认知用户和主用户的发射端分别进行预处理,从而消除了认知用户和主用户之间双向干扰,实现了认知系统中不同用户平等共享频谱资源。

## 2 系统模型及算法

本文研究的场景为图1所示的认知无线系统模型<sup>[9]</sup>,并假设为频率选择性信道。图中, Tx1、Rx1 为主用户的发射机和接收机,它们使用授权频段进行通信。同时 Tx2、Rx2 为认知用户的发射机和接收机,它们也希望能够使用该频段。当两发射机不共享相互信息且没有相互协作时,它们对于另一方的信息是未知的。因此,主用户发射机 Tx1 不知道认知用户发射机 Tx2 的先验信息,同样认知用户发射机也未知主用户先验信息。图中  $\mathbf{H}_{(ij)}$  是指发射机  $i$  与接收机  $j$  之间的信道,并假设该信道为  $(m+1)$  径衰落信道,且  $\mathbf{H}_{(ij)}$  的元素满足循环对称复高斯独立同分布  $N_c(0, \sigma_{ij}^2/(m+1))$ ,此时不同信道亦相互独立。

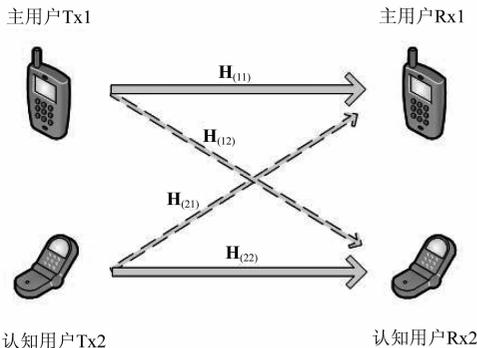


图1 主用户与认知用户频谱共享模型

Fig. 1 Spectrum sharing model for the primary user and the cognitive user  
在此场景下,主用户和认知用户接收端信号可以

表示为:

$$\mathbf{y}_1 = \mathbf{H}_{(11)}\mathbf{x}_1 + \mathbf{H}_{(21)}\mathbf{x}_2 + \mathbf{n}_1 \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_2 = \mathbf{H}_{(22)}\mathbf{x}_2 + \mathbf{H}_{(12)}\mathbf{x}_1 + \mathbf{n}_2 \quad (2)$$

其中  $\mathbf{H}_{(ij)}$  是  $N \times (N+m)$  维信道矩阵,  $\mathbf{H}_{(21)}\mathbf{x}_2$  是认知用户对主用户的干扰,  $\mathbf{H}_{(12)}\mathbf{x}_1$  是主用户对认知用户的干扰。 $\mathbf{x}_k$  是第  $k$  个用户传输的  $N+m$  维向量,其功率控制条件为:

$$\text{tr} \left( \mathbf{E} \left[ \mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^H \right] \right) \leq (N+m) \mathbf{W}_k \quad (3)$$

我们的目标是消除式(1)和(2)中的干扰项  $\mathbf{H}_{(21)}\mathbf{x}_2$  和  $\mathbf{H}_{(12)}\mathbf{x}_1$ 。对于图中主用户,定义传输向量为:

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{U}_1 \mathbf{s}_1 \quad (4)$$

这里  $\mathbf{U}_1$  是主用户的预处理矩阵,对应的传输信息为  $\mathbf{s}_1$ 。同时认知用户的传输向量为:

$$\mathbf{x}_2 = \mathbf{U}_2 \mathbf{s}_2 \quad (5)$$

这里  $\mathbf{U}_2$  是认知用户的预处理矩阵,对应的传输信息为  $\mathbf{s}_2$ 。这样,如果设计出合适的预处理矩阵  $\mathbf{U}_1$  和  $\mathbf{U}_2$ ,就可以消除用户之间产生的相互干扰,即使  $\mathbf{U}_1$  和  $\mathbf{U}_2$  需要满足如下正交条件:

$$\mathbf{H}_{(21)}\mathbf{U}_2\mathbf{s}_2 = \mathbf{0} \quad (6)$$

$$\mathbf{H}_{(12)}\mathbf{U}_1\mathbf{s}_1 = \mathbf{0} \quad (7)$$

通过相关矩阵预处理后,对于主用户和认知用户可分别得到如下并行无干扰信道:

$$\mathbf{y}_1 = \mathbf{H}_{(11)}\mathbf{U}_1\mathbf{s}_1 + \mathbf{n}_1 \quad (8)$$

$$\mathbf{y}_2 = \mathbf{H}_{(22)}\mathbf{U}_2\mathbf{s}_2 + \mathbf{n}_2 \quad (9)$$

可见,原式(1)和(2)中的干扰项  $\mathbf{H}_{(21)}\mathbf{x}_2$  和  $\mathbf{H}_{(12)}\mathbf{x}_1$  已被消除,且通过预处理将频率选择性信道转化成了并行无干扰信道。此时认知用户与主用户之间不产生相互干扰,实现了各用户以平等地位共享频谱。而且,我们还可以通过改变预处理矩阵来调整主用户和认知用户的传输速率。如一个特殊情况是当预处理矩阵  $\mathbf{U}_1$  是满秩的,这时主用户的传输速率不受预处理矩阵的影响,也就是说主用户可以完全忽视认知用户的存在。一般情况下,可以通过更换预处理矩阵来动态调整主用户和认知用户的传输速率。因此,如何选择选择预处理矩阵是该方案的关键。

通过求解矩阵方程,满足正交条件(6)和(7)的预处理矩阵的通解可表示为:

$$\mathbf{U} = (\mathbf{I} - \mathbf{H}^\dagger \mathbf{H}) \mathbf{A} \quad (10)$$

这里  $\mathbf{I}$  是单位阵,  $\mathbf{A}$  是一个随机矩阵<sup>[10,11]</sup>,  $(\cdot)^\dagger$  表示矩阵的广义逆矩阵。很显然,满足该通解的矩阵在理论上存在无穷多个,它们可由信道矩阵  $\mathbf{H}$  的零空间的任何一组基构成,并且由这种方法构成的矩阵是等价的。得到构成这些矩阵的基向量的方法有很多,如正交多项式方法或施密特正交化方法等等。

当然,为了能够确定合适的预处理矩阵,主用户需

要知道干扰信道  $\mathbf{H}_{(12)}$  (认知用户需要知道干扰信道  $\mathbf{H}_{(21)}$ ), 这种交互性在时分双工信道下是很容易做到的。这时主用户的传输向量可表示为:

$$\mathbf{x}_1 = \alpha \mathbf{U}_1 \mathbf{s}_1 \quad (11)$$

其中,  $\mathbf{s}_1$  是所传输信息,  $\mathbf{U}_1$  是与  $\mathbf{H}_{(12)}$  相关的预处理矩阵,  $\alpha$  由功率限制条件(3)决定:

$$\alpha = \sqrt{\frac{N_1 W_1}{\text{tr}(\mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1 \mathbf{U}_1^H)}} \quad (12)$$

同理, 认知用户的传输向量可表示为:

$$\mathbf{x}_2 = \beta \mathbf{U}_2 \mathbf{s}_2 \quad (13)$$

其中,  $\mathbf{s}_2$  是所传输信息,  $\mathbf{U}_2$  是与  $\mathbf{H}_{(21)}$  相关的预处理矩阵,  $\beta$  由功率限制条件(3)决定:

$$\beta = \sqrt{\frac{N_2 W_2}{\text{tr}(\mathbf{U}_2 \mathbf{S}_2 \mathbf{U}_2^H)}} \quad (14)$$

因为信道是统计独立的, 所以主用户的信息能够可靠传输。由于预处理矩阵与干扰信道的正交性, 零干扰条件总是成立的, 与认知用户的输入功率及链路无关。反之亦然, 认知用户同样不受主用户的干扰。而文献[4]中的方案仅适用于干扰用户功率很弱的情形。这样, 新的共享方法可归纳如下:

1) 首先分别获取主用户和认知用户的干扰信道信息  $\mathbf{H}$ 。该信息由非目的传输接收端反馈到发射端, 这在时分双工等系统中可以很方便地实现。

2) 根据干扰信道, 分别求出主用户和认知用户的预处理矩阵。即根据通解

$$\mathbf{U} = (\mathbf{I} - \mathbf{H}^H \mathbf{H}) \mathbf{A} \quad (15)$$

生成预处理矩阵。

3) 在主用户和认知用户发射端分别进行预处理, 消除双向干扰, 并将频谱选择性信道转换为并行无干扰信道:

$$\mathbf{y}_1 = \mathbf{H}_{(11)} \mathbf{U}_1 \mathbf{s}_1 + \mathbf{n}_1 \quad (16)$$

$$\mathbf{y}_2 = \mathbf{H}_{(22)} \mathbf{U}_2 \mathbf{s}_2 + \mathbf{n}_2 \quad (17)$$

从数学上考虑, 文献[9]的研究场景可以归为本文研究场景的一个特例, 即本文场景中, 当主用户发送端的预处理矩阵选择单位矩阵(特殊的满秩矩阵), 且认知用户发送端的预处理矩阵选择 Vandermonde 矩阵时, 新方法退化为文献[9]中的 VFDM 方案。

### 3 性能分析与仿真

基于上述理论框架, 本文在具体通信背景下分析新方法的性能和共享频谱时各用户所能达到的传输速率。考虑到 OFDM 技术已被许多无线通信系统采用, 如广泛用于 WiMAX, LTE, 802.11a/g, 802.22, DVB 等无线通信系统<sup>[12]</sup>。因此接下来以认知 OFDM 系统为例进行分析。

该 OFDM 系统中循环前缀、信息符号分组的长度分别为  $L$  和  $N$ 。它们取值的大小对于设计预处理矩阵非常关键, 同时也直接影响新方法中每个用户的性能。在无线局域网标准 IEEE 802.11a 的物理层中<sup>[12]</sup>,  $L$  和  $N$  的取值分别为  $L=16$ ,  $N=64$ 。采用基于预处理矩阵的频谱共享方法后, 信道被转化成并行无干扰信道, 且不同用户的传输速率可以统一表示成:

$$R_k = \max_{\{w_{k,n}\}} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log \left( 1 + w_{k,n} |\mathbf{H}_n^{(kk)}|^2 \right) \quad (18)$$

若采用经典的注水法进行功率分配, 每个用户可获得最大速率为:

$$w_{k,n} = \left[ \mu_k - \frac{1}{|\mathbf{H}_n^{(kk)}|^2} \right]_+ \quad (19)$$

其中,  $\mu_k$  是满足  $\sum_{n=1}^N w_{k,n} \leq N \mathbf{W}_k$  的拉格朗日乘子。

下面通过计算机仿真验证新方法的性能。

图 2 描述了在采用 OFDM 调制的认知无线系统中, 使用本文提出的基于预处理矩阵的共享方法, 并用注水法分配功率, 在不同信噪比下主用户所能达到的平均速率。仿真中, 目的信道中  $\sigma_{11} = \sigma_{22} = 1$ , 并在干扰信道中使用不同的  $\sigma$  值表示不同的干扰强度, 如  $\sigma_{21} = 1.0, 0.1, 0.01, 0$  等, 其中  $\sigma_{21} = 0$  表示无干扰情形。从图中可以清楚地看到, 主用户的平均速率曲线在  $\sigma_{21} = 1.0, 0.1, 0.01, 0$  等不同强度的干扰下是基本重合的。这意味着主用户可以忽视认知用户的存在, 没有受到任何来自认知用户的干扰。也就是说明使用新方法可以有效消除认知用户对主用户的干扰。

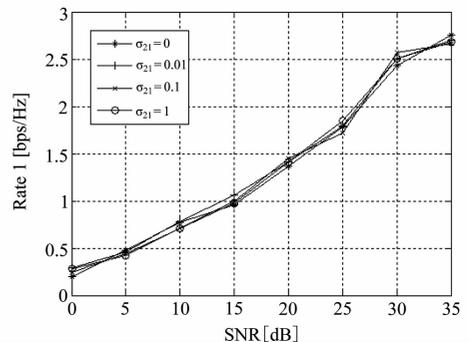
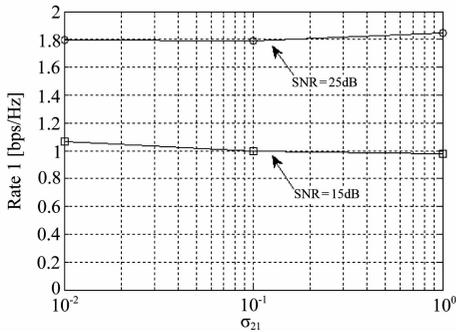


图 2 不同信噪比下的主用户速率

Fig. 2 The rate of the primary user with different signal to noise ratio

图 3 给出了在信噪比一定的情况下, 主用户平均速率随干扰强度  $\sigma_{21}$  的变化情况。该图可以更好地说明新方法可以有效消除认知用户对主用户的干扰。如图所示, 在相同信噪比下, 图 3 中主用户速率曲线在不同的干扰强度  $\sigma_{21}$  下基本是保持水平的, 主用户速率没有受到认知用户的影响, 即干扰被成功消除。

图3 不同  $\sigma_{21}$  下的主用户速率Fig. 3 The rate of the primary user with different  $\sigma_{21}$ 

很明显,类似的结论对于认知用户同样成立。图4描述了同一场景下,认知用户在不同信噪比下采用注水法进行功率分配时所能达到的平均速率。如图所示,在来自主用户  $\sigma_{12} = 1.0, 0.1, 0.01, 0$  等不同干扰强度的影响下,认知用户的平均速率曲线也是基本重合的,这表明,认知用户没有受到来自主用户的干扰的影响,即新方法有效消除了主用户对认知用户的干扰。

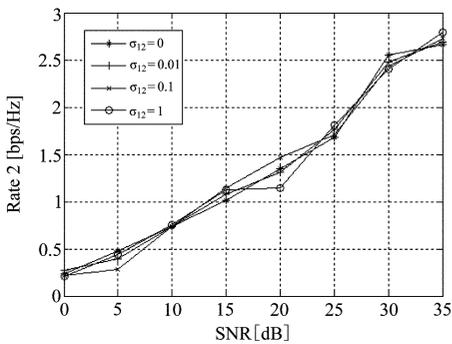


图4 不同信噪比下的认知用户速率

Fig. 4 The rate of the cognitive user with different signal to noise ratio

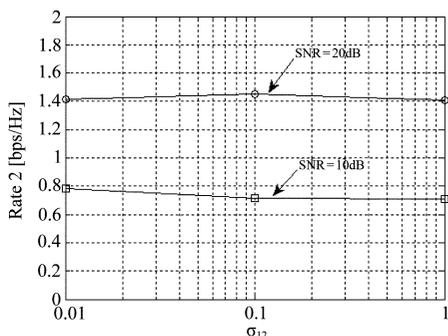
图5 不同  $\sigma_{12}$  下的认知用户速率Fig. 5 The rate of the cognitive user with different  $\sigma_{12}$ 

图5给出了在信噪比一定的情况下,认知用户平均速率随干扰强度  $\sigma_{12}$  的变化情况。从图中可以更清楚地看出,在相同信噪比下,图5中的性能曲线在不同

的干扰强度  $\sigma_{12}$  下也是基本保持水平的,认知用户同样没有受到主用户的影响,即新方法同样也有效消除了主用户对认知用户的干扰,双方可以地位平等地共享频谱资源。

通过上述仿真分析可见,采用基于预处理矩阵的认知无线网络频谱共享方法,如果设计出合理预处理矩阵,便可以有效消除认知无线网络中主用户和认知用户的相互干扰,使主用户和认知用户能够以平等的地位共享频谱资源。而且不难发现,该方法不仅适用于主用户与认知用户共享频谱资源,同样也可以用于不同认知用户之间共享感知到的可用频谱空洞。

此外,在前面介绍新方法原理时我们还提到,可以通过改变预处理矩阵来动态调整主用户和认知用户的传输速率。预处理矩阵的设计是新方法的关键,下面我们基于随机矩阵理论(Random Matrix Theory, RMT)<sup>[10, 11]</sup>分析一下预处理矩阵的秩的变化情况。这对于预处理矩阵的设计具有重要参考价值。

RMT是与无线通信领域密切相关的新理论,近年来发展迅速并受到普遍关注,在频谱感知领域也得到了很好的应用<sup>[13-18]</sup>。最近,在RMT领域中,关于元素均匀分布在单位圆上的随机矩阵的渐近收敛特性有了新的研究结果,并被成功地应用到信道容量估计、信源数量估计、波长估计、稀疏信号重建等方面<sup>[19]</sup>。众所周知,在很多实际应用中矩阵的行和列的值都非常大,RMT正是研究它们都趋向无穷大但比值趋于恒定的情况,即行和列  $R, C \rightarrow \infty$  且比值  $C/R \rightarrow \gamma$ 。限定矩阵元素分布在单位圆上,是为了保证进一步的分析是关于渐近特性的。没有该限定问题将复杂得多,因为这种情况下矩阵中幂次最高的一行将在计算大维数矩阵的矩时起着支配作用并且快速增长到无穷大,从而使渐近分析变得非常困难。通常,我们要寻找的对象是矩阵的矩,而不是行列式的矩。例如 Gaussian 随机矩阵的研究,可以通过自由(freeness)的概念<sup>[10]</sup>获得 Gaussian 随机矩阵渐近特性的显式表达式,这对于描述混合矩是至关重要的。目前关随机矩阵的最新研究表明,矩阵的渐近矩可由行列比值和矩阵元素的相分布<sup>[19]</sup>唯一决定,且可获得显式表达式。这一研究成果对于求解渐近自由随机矩阵的自由解卷积运算非常重要,而自由解卷积在许多应用中都必须用到。从随机 Gaussian 矩阵的成功应用中我们得知,通过自由解卷积提取出来的矩,包含着对应系统中很多重要的信息<sup>[20, 21]</sup>。因此关于随机矩阵的最新研究成果将在许多无线通信系统的设计中发挥重要作用。当然,这方面的研究成果还只是刚刚起步,目前还只是研究了均匀相分布,且元素均匀分布在单位圆上这一特殊情况,更一般的相

分布及矩阵元素分布下的随机矩阵渐近特性尚待更进一步的研究。

很明显,认知系统中的每个用户所能达到的传输速率与预处理矩阵的秩密切相关。因为作用于主用户和认知用户的其它矩阵都是满秩的,不影响用户的传输速率,所以,速率只随着预处理矩阵的秩的不同而发生变化。根据 RMT 可知,大系统中当维数保持一定比例  $C/R=\gamma$  ( $c>0$ ) 且  $R, C \rightarrow \infty$  时,那些分布在单位圆外面的元素却直接影响到矩阵的秩。例如,对于某些比例值  $\gamma$ ,如  $\gamma=1/4, 1/6$  等不同值时,图 6 给出了这种情况下预处理矩阵的秩的平均值分布情况。

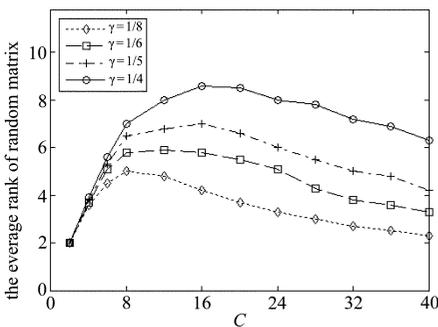


图 6 预处理矩阵秩的变化情况

Fig. 6 The various rank of the pretreatment matrix

如图 6 所示,在任何一个比值  $\gamma$  下,预处理矩阵的秩都不是随着维数线性变化的,不难发现,每一条曲线都存在一个峰值,即存在一个与最大秩对应的矩阵维数  $C^*$ ,当维数大于该值时,矩阵的秩会减小,并且减小程度随着  $C$  的增大而增大。也就是说, $C$  的选取存在一个最优值,这个值将直接影响到矩阵的秩,进而影响用户所能达到的传输速率以及用户之间干扰的消除情况。在实际应用中可以把该最优值作为参照来协调认知系统中主用户与认知用户的传输速率从而保证它们之间的相互零干扰。当然,在一些特殊需要情况下,完全可以将增大干扰作为代价,来提高某一用户的传输速率。这种折衷方案的设计以及这种情况下系统中用户所能达到的传输速率和存在的干扰情况的理论分析是我们进一步将研究的内容。

## 4 结论

为消除认知无线网络中频率选择性信道下授权主用户与认知用户间的相互干扰,本文提出了一种新的频谱共享方法。该方法充分利用了无线通信系统中由信道的频率选择性衰落导致的不同用户信道的不相关性,通过求解矩阵方程获得预处理矩阵的通解,并在主

用户和认知用户发射端分别进行预处理。从而实现认知系统中主用户与认知用户之间的相互零干扰,并使每个用户都可有效地传输数据。理论推导及系统仿真均表明,新方法可以成功地消除授权主用户与认知用户之间的双向干扰,实现不同用户平等地共享无线频谱资源。新方法可以提高频谱的利用率,一定程度上缓解无线频谱资源在当前及未来无线通信领域日益紧缺的矛盾。而且新方法也同样适用于不同认知用户之间的频谱共享。此外,我们还基于随机矩阵理论对预处理矩阵的秩进行了分析,得到了在比值确定的情况下矩阵的秩随矩阵维数的变化关系,为预处理矩阵的设计提供了相应参考。

## 参考文献

- [1] A. Carleial. Interference channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1978, 24 (1): 60-70.
- [2] H. Sato. Two-user communication channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1977, 23(2): 295-304.
- [3] N. Devroye, P. Mitran, V. Tarokh. Achievable rates in cognitive radio channels. IEEE Transactions on Information Theory[J]. 2006, 52(5):1813-1827.
- [4] A. Jovicic, P. Viswanath. Cognitive radio: An information-theoretic perspective[J]. cs/0604107, 2006.
- [5] I. Maric, R. D. Yates, G. Kramer. Capacity of Interference Channels with Partial Transmitter Cooperation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53 (10): 3536-3548.
- [6] I. Maric, A. Goldsmith, G. Kramer, et al. On the capacity of interference channels with partially-cognitive transmitter [C]. ISIT, Nice, France, Jul. 24-29, 2007.
- [7] L. H. Gropop, D. N. C. Tse. Spectrum Sharing Between Wireless Networks. IEEE Transactions on Networking [J], 2010, 18(5): 1401-1412.
- [8] L. Musavian, S. Aissa. Capacity and power allocation for spectrum-sharing communications in fading channels. IEEE Transactions on Wireless Communications [J], 2009, 8(1):148-156.
- [9] L. S. Cardoso, M. Kobayashi, Ø. Ryan, et al. Vandermonde Frequency Division Multiplexing for Cognitive Radio[C]. SPAWC, Recife, Brazil, Jul. 6-9, 2008.
- [10] M. L. Mehta. Random Matrices[M]. London: Academic Press, 2006.
- [11] A. M. Tulino, S. Verdu. Random Matrix Theory and Wireless Communications[M]. Hanover, USA: Now Publishers Inc., 2004.
- [12] IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee[Online]. A-

available: <http://grouper.ieee.org/groups/802/>, February 2, 2011.

- [13] L. Wang, B. Y. Zheng, Q. M. Meng, et al. Spectrum Sensing for Multiuser Network Based on Free Probability Theory[J]. *IEICE Trans on Comm.* 2010, E93-B(1): 65-72.
- [14] L. Wang, B. Y. Zheng, Q. M. Meng, et al. Cooperative Spectrum Sensing Based on Free Probability Theory[J]. *IEICE Trans on Comm.* 2010, E93-B(6): 1547-1554.
- [15] 王磊, 郑宝玉, 李雷. 基于随机矩阵理论的协作频谱感知[J]. *电子与信息学报.* 2009, 31(8): 1925-1929.  
L. Wang, B. Y. Zheng, L. Li. Cooperative Spectrum Sensing Based on Random Matrix Theory[J]. *Journal of Electronics & Information Technology.* 2009, 31(8): 1925-1929. (in Chinese)
- [16] L. Wang, B. Y. Zheng, J. W. Cui, et al. Cooperative Spectrum Sensing Using Free Probability Theory[C]. *GLOBECOM*, Honolulu, HI, Nov. 30-Dec. 4, 2009.
- [17] L. Wang, B. Y. Zheng, W. P. Zhu. Spectrum Sensing Using Asymptotic Behavior of Random Vandermonde Matrices[C]. *ICC.* Tokyo, Japan, Jun. 5-6, 2011.
- [18] L. Wang, B. Y. Zheng, J. W. Cui, et al. Spectrum Sensing for Cognitive OFDM System Using Free Probability Theory [C]. *IWCMC*, Caen, France, Jun. 28 - July 2, 2010.
- [19] Ø. Ryan and M. Debbah. Asymptotic Behavior of Random Vandermonde Matrices with Entries on the Unit Circle [J]. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2009, 55(7): 3115-3147.
- [20] C. S. Burrus, T. W. Parks. *DFT/FFT and Convolution Al-*

*gorithms*[M]. New York: Wiley, 1985.

- [21] G. H. Golub, C. F. V. Loan. *Matrix Computations*[M]. Baltimore, MD: John Hopkins Univ. Press, 1983.

#### 作者简介



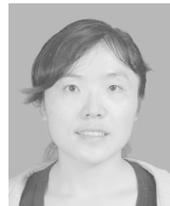
王磊(1977-),男,南京邮电大学通信与信息工程学院讲师,博士,中国通信学会会员。研究方向为现代通信中的智能信号与信息处理,认知无线网络,基于随机矩阵理论的通信信号处理等。  
E-mail:wanglei@njupt.edu.cn



郑宝玉(1945-),男,南京邮电大学教授、博士生导师,上海交通大学教授、博士生导师。目前主要研究方向为智能信号与信息处理、无线网络与通信信号处理、量子信息处理等。  
E-mail:zby@njupt.edu.cn



崔景伍(1955-),女,南京邮电大学高级工程师。研究方向为无线通信与网络信号处理、多用户协作通信技术等、认知无线电频谱共享技术等。  
E-mail:cuijw@njupt.edu.cn



岳文静(1982-),女,南京邮电大学通信与信息工程学院讲师,博士。研究方向为通信信号处理、认知无线电技术、频谱接入技术、下一代无线网络、多用户协作通信技术等。E-mail:cuijw@njupt.edu.cn