

## 频谱异构认知无线电中基于吞吐量降的空时频谱机会感知

李小强<sup>\*①</sup> 周琦<sup>②</sup> 芮茂海<sup>③</sup> 李颖<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

<sup>②</sup>(中国电子设备系统工程公司研究所 北京 100141)

<sup>③</sup>(总参通信训练基地 张家口 075100)

**摘要:** 在认知无线电(CR)中, 频谱感知是实现动态频谱接入的关键技术之一。为适当保护主用户并最大化次级用户的性能, 目前大部分相关工作均是用虚报概率和漏检概率作为感知度量来确定最佳感知参数的。但这种度量是用主次用户的碰撞概率来衡量次级用户对主用户的影响的, 没有考虑干扰强度的影响, 仅适合同构频谱环境; 在不同位置次级用户有不同接入机会的异构频谱环境中, 并不能最大化频谱利用率。为此, 该文首先定义了吞吐量降, 并提出在异构频谱环境下采用吞吐量降作为一种新的感知度量。吞吐量降是指由于次级用户占用授权频谱而导致主用户吞吐量下降的百分比。在衡量次级用户对主用户的影响时, 它综合了主次用户的碰撞概率和干扰强度两个因素; 其次, 研究了以吞吐量降为约束的次级用户吞吐量优化问题。最后, 数值仿真证实了该方案比目前几种传统方案的频谱利用率显著提高。

**关键词:** 认知无线电; 动态频谱接入; 异构频谱; 空时频谱机会; 频谱感知

**中图分类号:** TN92

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2014)11-2762-06

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2013.01975

## Spatial-temporal Opportunity Sensing Based on Throughput Loss in Spectrum-heterogeneous Cognitive Radio

Li Xiao-qiang<sup>①</sup> Zhou Qi<sup>②</sup> Rui Mao-hai<sup>③</sup> Li Ying<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

<sup>②</sup>(Institute of China Electronic System Engineering Corporation, Beijing 100141, China)

<sup>③</sup>(Communications Training Base of the General Staff Headquarters, Zhangjiakou 075100, China)

**Abstract:** Spectrum sensing is a key technology to enable dynamic spectrum access in Cognitive Radio (CR). To ensure that primary users are properly protected while maximizing the performance of secondary users, most related work considers the metrics of probabilities of missed detection and false alarm for determining optimal spectrum sensing parameters. However, these metrics only take account of the collision probability between primary user and secondary user to measure the performance impact on primary user. Since it fails to consider the impact of intensity of interference, it only adopt to homogeneous spectrum environment. In heterogeneous spectrum environment where the access opportunities of secondary user are differed by its positions, it can not maximize the spectrum utilization efficiency. So, in this paper, a new metric, throughput loss is proposed for spatial-temporal opportunity sensing firstly. Throughput loss is the average throughput loss percentage of primary user due to secondary user accesses the authorized spectrum. It is a comprehensive metric measuring impact of secondary user on primary user, and contains the collision probability and intensity of interference of two factors. Then secondary user throughput optimization problem based it is addressed. Finally, theoretical analysis and numerical simulations show that the new spectrum sensing technology proposed in this paper improves significantly the spectrum utilization efficiency compared with some traditional sensing technologies.

**Key words:** Cognitive Radio (CR); Dynamic spectrum access; Spectrum-heterogeneity; Spatial-temporal spectrum opportunity; Spectrum sensing

### 1 引言

频谱资源的供需矛盾日益凸现。而在现行的静

态频谱分配政策之下, 未被利用的频谱机会却大量存在<sup>[1]</sup>。因此, 动态频谱接入(Dynamic Spectrum Access, DSA)技术应运而生<sup>[2-5]</sup>。认知无线电(Cognitive Radio, CR)是实现 DSA 的一种重要技术<sup>[2]</sup>。其基本思想是: 次级用户(Secondary Users, SU)具有认知功能, 通过频谱感知获取频谱使用状况信息, 并依据某一规则最优地利用感知到的频谱空

2013-12-19 收到, 2014-04-11 改回

国家 973 计划项目(2009CB320403), 中国博士后科学基金(2012M512075), 和自然科学基金重点项目(61231011)资助课题

\*通信作者: 李小强 lxq123lxq@yahoo.com.cn

穴<sup>[6]</sup>。在这一过程中,需要适当保护主用户(Primary Users, PU)并最大化 SU 的性能。目前大部分相关工作均是用虚报概率和漏检概率作为感知度量来确定最佳感知参数的。但这种度量仅考虑了 PU 和 SU 的碰撞概率,没有考虑干扰强度的影响,仅适合同构频谱环境;对于不同位置的次级用户有不同接入机会的异构频谱环境并不能最大化频谱利用率<sup>[7-9]</sup>。如文献[10, 11]中,采用漏检概率不超过某一限定值的方式保护 PU,同时通过最小化虚报概率的方式最大化 SU 的接入概率。这种方法对距离主次用户比较近的情况(近似于频谱同构环境)是有效的。但当主次用户距离比较远时(频谱异构环境),主用户发射机(Primary user Transmitter, PT)信号比较弱,为达到相同的漏检概率(和碰撞概率成正比),SU 需要降低检测门限。因此导致了较高的虚报概率,降低了频谱空穴的利用率。在异构频谱环境下提高频谱利用率的关键是要找到一种既可以利用时间频谱空穴又可以利用空间频谱空穴的方案。文献[12]提出以 PT 为中心,以  $r_{no}$  为半径划分出一个禁声(no talk)区;在禁声区里面通过感知获取并使用时间频谱空穴;在禁声区外面不进行感知直接使用空间频谱空穴。这种方案(以下简称文献[12]的方案)以  $r_{no}$  为界限把时间频谱空穴和空间频谱空穴人为划分开。虽然取得了空间频谱空穴和时间频谱空穴的利用,但当  $r_{no}$  比较大时,同漏检概率约束方案一样会失去较多的空间频谱机会;  $r_{no}$  比较小时,利用空间频谱空穴的 SU 会对主用户接收机(Primary user Receiver, PR)造成较大的干扰。所以实际中  $r_{no}$  的选取难以全面兼顾。为此,文献[13, 14]对文献[12]中的方案进行了改进,即在禁声区外面依然进行频谱感知。当检测到 PT 发射信号的强度高于某一门限时, SU 不占用该授权频段;反之,则占用。该方案(以下简称文献[13]的方案)引入了空间虚报概率的概念,虽然能适当降低禁声区外面的 SU 对 PR 的干扰,但该 SU 同时也失去了部分通信机会。这两种方案都忽略了这样一个事实,即在 PT 周围任何位置空间频谱空穴和时间频谱空穴是同时存在的,本文称其为空时频谱空穴(spatial-temporal spectral hole)。对于空时频谱机会的研究,用虚报概率和漏检概率是不够的。因为虚报概率及漏检概率仅仅和碰撞概率相关,和主次用户相互干扰的强度没有关系。

为此,本文定义了吞吐量降度量,并提出在异构频谱环境下采用吞吐量降作为一种新的感知度量来研究空时频谱空穴的感知和利用。吞吐量降是指由于次级用户占用授权频谱而导致主用户平均吞吐

量下降的百分比。它综合考虑了主次用户的碰撞概率和干扰强度,适合异构频谱环境下空时频谱机会的感知和利用。为确保主用户的吞吐量降不超过给定的门限值,当对主用户的干扰比较大时,可以设置较小的碰撞概率;反之,则设置较大的碰撞概率,以便利用空间频谱空穴。此后,本文研究了以吞吐量降为度量的感知参数优化问题;最后,通过数值仿真比较了该方案和几种传统方案的吞吐量性能。结果表明该方案能明显提高频谱利用率,特别是在灰色区域附近改善效果更显著<sup>[15]</sup>。

## 2 网络和信道模型

### 2.1 网络模型

如图 1 所示,主用户网络由一台 PT, 多台 PR 组成;次级用户网络由一台次级用户发射机(Secondary user Transmitter, ST)和一台次级用户接收机(Secondary user Receiver, SR)组成。SU 机会式地占用授权给 PU 的频谱。并假定主用户系统和次级用户系统均是码率自适应的数字通信系统;PU 间歇式地占用信道,占用概率为  $q$ ;SU 则是机会式地占用信道,即只要预测到其发射对 PR 造成的影响在可接受范围内就可接入该信道;SU 周期性地感知信道,每一个感知周期由感知时隙和传输时隙组成;SU 在感知时隙末依据感知结果做出是否传输数据的判决,然后根据判决结果进行相应的操作。

如图 1 所示,PT 有一个半径为  $D_p$ (其大小由 PT 的发射功率、PR 的接收灵敏度等因素决定)的传输区域,是主用户的专有通信区域<sup>[16]</sup>;为使 PR 不受到趋于无限大的干扰, SU 只能位于主用户传输区外面;传输区外的区域对 SU 来说既有时间频谱机会又有空间频谱机会,而且在不同的位置有不同的频谱机会,是一个频谱异构的环境<sup>[7-9]</sup>。

如图 1 所示,为保护所有的 PR,我们仅需考虑位于传输区边界上的且距离 ST 最近的 PR 受到 ST

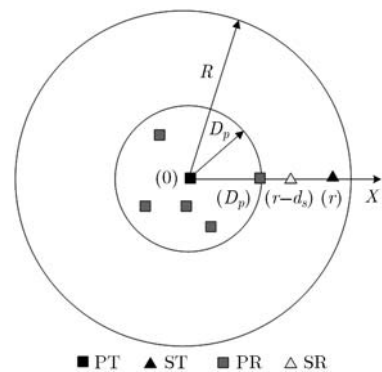


图 1 网络模型

的影响在 PR 可接受范围内就可以了, 因为这个位置的 PR 信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)最低; 同时考虑 SR 在图 1 中所示位置, 到 ST 的距离为  $d_s$ , 到 PT 的距离为  $r - d_s$  ( $r$  是 ST 到 PT 的距离), 因为这个位置的 SR 的 SINR 最低。

## 2.2 信道模型

本文考虑一个具有大尺度路径损耗和小尺度衰落的无线信道。自由空间路径损耗  $h_{\text{PL}}$  表示接收到的平均功率随传播距离的变化规律。小尺度衰落被模型化为瑞利衰落  $h_{\text{FD}}$ 。所以任意收、发信机之间的信道模型可以表示为:  $h = h_{\text{PL}} \cdot h_{\text{FD}}$ 。其中  $h_{\text{FD}} \sim \mathcal{N}(0,1)$ , 是一高斯随机变量。  $h_{\text{PL}} = A \cdot r^{-\alpha/2}$ , 这里  $A$  是一个和频率及收发信机天线增益有关的常数, 不失一般性, 令  $A = 1$ ;  $\alpha$  为路径损耗因子;  $r$  为收、发信机之间的距离。

## 2.3 感知模型

在以上信道模型下, 采用能量感知法检测主用户的出现。设 PT 的发射功率  $P_p$ , ST 的发射功率  $P_s$ 。主用户感知问题其实可以模型化为一个二元假设问题:

$$y(i) = \begin{cases} \omega(i): & \mathcal{H}_0 \\ x(i) + \omega(i): & \mathcal{H}_1 \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

这里  $\mathcal{H}_0$  表示主用户信号不存在,  $\mathcal{H}_1$  表示主用户信号存在;  $N$  为采样数, 假设各采样点之间相互独立;  $x(i)$  为 ST 接收到的 PT 信号采样值(不包含噪声),  $x(i) \sim \mathcal{N}(0, \sigma_x^2)$ , 在 2.2 节所述信道模型下可知  $\sigma_x^2 = P_p h_{\text{PL}}^2$ ;  $y(i)$  是 ST 接收的信号采样值(包含噪声);  $\omega(i)$  是噪声采样值, 它是均值为 0, 方差为  $\sigma_\omega^2$  的高斯随机变量, 即  $\omega(i) \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\omega^2)$ 。判决统计量为

$$Y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(i)^2 \quad (2)$$

则漏检概率  $p_m = \Pr\{\mathcal{H}_0 / \mathcal{H}_1\}$  和虚报概率  $p_f = \Pr\{\mathcal{H}_1 / \mathcal{H}_0\}$  分别为<sup>[15]</sup>

$$p_m(\varepsilon, N) = Q\left(\left(1 - \frac{\varepsilon}{\sigma_\omega^2(\gamma + 1)}\right)\sqrt{\frac{N}{2}}\right) \quad (3)$$

$$p_f(\varepsilon, N) = Q\left(\left[\frac{\varepsilon}{\sigma_\omega^2} - 1\right]\sqrt{\frac{N}{2}}\right) \quad (4)$$

其中  $\gamma$  是信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR),  $\gamma = P_p h_{\text{PL}}^2 / \sigma_\omega^2$ ;  $\varepsilon$  是判决门限;  $Q(x)$  是标准正态分布的尾部概率, 表示式为

$$Q(x) = \frac{1}{2\pi} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (5)$$

## 3 基于吞吐量降的空时频谱感知

如第 1 节所述, 在异构频谱环境下需要一种新的既考虑主次用户碰撞概率又考虑干扰强度的度量

指标来衡量 SU 对 PU 的影响。吞吐量降能够符合这一要求。所以, 这一部分先给出吞吐量降的定义及以吞吐量降为感知度量时的空时频谱空穴定义; 再研究以吞吐量降为感知度量的空时频谱感知技术。

### 3.1 吞吐量降

**定义 1** 吞吐量降是主用户平均吞吐量降的简称, 是指由于次级用户占用授权频谱而导致主用户平均吞吐量下降的百分比。其数学表达式为

$$k = \frac{T_p^{\text{max}} - T_p^{\text{ave}}}{T_p^{\text{max}}} \times 100\% \quad (6)$$

这里  $T_p^{\text{max}}$  是主用户最大平均吞吐量, 可以由 PT 和 PR 的位置关系、信道特性、传输功率及 PT 传输方式等因素估算出来;  $T_p^{\text{ave}}$  是假设次级用户机会式占用信道, PU 的平均吞吐量, 也可以由 PT, PR, ST, SR 的位置关系、信道特性、传输功率及 PT 占用信道概率  $q$  等因素预测。一般情况下, 主用户系统都有一些必不可少的富余吞吐量以对抗各种干扰。为了能保证主用户系统的 QoS, 需要限制吞吐量降  $k$  不超过其门限值  $k_m$ 。

使用吞吐量降作为 SU 对 PU 影响度量可以给空时频谱空穴一个新的定义。

**定义 2** 空时频谱空穴是一个包含空、时、频的多维区域。若次级用户接入该频段, 不会使主用户的平均吞吐量降超过门限值  $k_m$ , 则此时此地此频段对该次级用来说就是一个空时频谱空穴。

### 3.2 基于吞吐量降的感知优化和求解

**3.2.1 基于吞吐量降的感知优化** 如前所述, 在异构频谱环境下, 传统感知技术可能会导致较低的频谱利用率。在适当保护主用户的前提下, 为最大化次级用户吞吐量, 本文给出基于吞吐量降的频谱感知优化问题:

$$\max_{\varepsilon} T_s^{\text{ave}}, \quad \text{s.t. } k \leq k_m \quad (7)$$

这里  $T_s^{\text{ave}}$  是 SU 的平均吞吐量;  $k_m$  是能够保证 PU QoS 的最大允许吞吐量降。

在时间频谱机会的利用中, PU 对授权频谱有优先使用权, SU 只能找 PU 不使用频谱的时间段接入授权频谱; 一旦 PU 占用信道, SU 就必须立即释放当前占有的频谱。此过程中, 由于 SU 和 PU 相距距离很近, 要严格控制 SU 和 PU 同时占用信道的概率, 否则会严重干扰 PR。对于空间频谱空穴的利用, 一般要求 SU 和 PU 相距的距离比较大, 以致 SU 和 PU 通信网络的相互影响可以忽略不计; 这种情况相当于 SU 和 PU 各自独立使用同一频谱。而在本文研究的异构频谱环境下, 每一位置上 SU 既有时间频谱机会又有空间频谱机会; 为了适当利用

空间频谱空穴，本文允许 SU 和 PU 同时占有授权频谱，只要这种占用对 PR 造成的影响在 PU 许可范围内。

根据第 2 节所述模型，按授权频谱的占用情况，频谱状态可以分为以下 4 个：状态 0 表示 SU 和 PU 都未占用该频谱；状态 1 表示 PU 单独占用该频谱；状态 2 表示 SU 单独占用该频谱；状态 3 表示 SU 和 PU 同时占用该频谱。因此频谱状态集为： $S \triangleq \{0,1,2,3\}$ 。PU 间歇式地占用信道，占用概率为  $q$ 。SU 则是机会式地占用信道，即当感知到 PU 在发射时，SU 就不发射或立即停止发射；感知到 PU 未发射时，SU 就占用信道。同时考虑到感知错误(漏检概率  $p_m$  和虚报概率  $p_f$ )的影响，可以得到系统处于每一个频谱状态的概率为

$$\Pi_0 = (1-q)p_f \quad (8)$$

$$\Pi_1 = q(1-p_m) \quad (9)$$

$$\Pi_2 = (1-q)(1-p_f) \quad (10)$$

$$\Pi_3 = qp_m \quad (11)$$

$\Pi_s$  表示系统处于频谱状态  $s$  ( $s \in S$ ) 时的概率。

在第 2 节描述的系统模型下，假定信道带宽为  $B$  (Hz)；而且仅考虑由一对 PU 和一对 SU 组成的频谱异构认知无线电系统，可以用信道容量代替吞吐量。在频谱状态 1 和频谱状态 2 下 PU 和 SU 可得吞吐量分别为

$$R_1^p = B \log_2 \left( 1 + \frac{P_p D_p^{-\alpha}}{\sigma_w^2} \right) \quad (12)$$

$$R_2^s = B \log_2 \left( 1 + \frac{P_s d_s^{-\alpha}}{\sigma_w^2} \right) \quad (13)$$

这里  $\sigma_w^2$  是在信道带宽  $B$  内的加性高斯白噪声功率， $\sigma_w^2 = BN_0$ ，其中  $N_0$  是单边噪声功率谱密度； $P_p$  是 PU 发射功率； $P_s$  是 SU 发射功率<sup>[17]</sup>。

假定 PT 和 ST 均能通过自适应调制及编码实时地改变传输速率，以便收、发信机能够在给定的 SINR 下以最大可靠速率进行通信。而且假定它们使用随机高斯码表，以便发射信号可以被当成加性高斯白噪声处理。此时，当 SU 和 PU 共用同一频谱的时候(频谱状态 3)，其吞吐量分别表示为：

频谱状态 3 下 SU 吞吐量为

$$R_3^s = B \log_2 \left( 1 + \frac{P_s d_s^{-\alpha}}{\sigma_w^2 + P_p (r - d_s)^{-\alpha}} \right) \quad (14)$$

频谱状态 3 下 PU 吞吐量为

$$R_3^p = B \log_2 \left( 1 + \frac{P_p D_p^{-\alpha}}{\sigma_w^2 + P_s (r - R_p)^{-\alpha}} \right) \quad (15)$$

结合频谱状态概率式(8)至式(11)，可得 SU 平

均吞吐量为

$$T_s^{\text{ave}} = (1-q)(1-p_f)R_2^s + qp_m R_3^s \quad (16)$$

PU 平均吞吐量为

$$T_p^{\text{ave}} = qR_1^p - qp_m(R_1^p - R_3^p) \quad (17)$$

PU 最大平均吞吐量为

$$T_p^{\text{max}} = qR_1^p \quad (18)$$

把式(17)，式(16)式代入式(6)可得

$$k = (R_1^p - R_3^p)/R_1^p \cdot p_m = L \cdot p_m \quad (19)$$

其中

$$L = (R_1^p - R_3^p)/R_1^p \quad (20)$$

所以式(7)的优化问题可以转化为

$$\begin{cases} \max_{\varepsilon} [(1-q)(1-p_f)R_2^s + qp_m R_3^s] \\ \text{s.t. } L \cdot p_m \leq k_m \end{cases} \quad (21)$$

**3.2.2 问题求解** 为解决式(21)，首先引入如下引理。

**引理 1**  $p_m$  和  $T_s^{\text{ave}}$  都是  $\varepsilon$  的单调增函数。

**证明** 根据式(3)和式(4)，有

$$\frac{dp_f}{d\varepsilon} = -\frac{\sqrt{N}}{2\pi\sqrt{2}\sigma_w^2} e^{-\frac{N(\varepsilon-\sigma_w^2)^2}{4\sigma_w^4}} < 0 \quad (22)$$

$$\frac{dp_m}{d\varepsilon} = \frac{\sqrt{N}}{2\pi\sqrt{2}(\gamma+1)\sigma_w^2} e^{-\frac{N[(1+\gamma)\sigma_w^4-\varepsilon]^2}{4\sigma_w^4(1+\gamma)^2}} > 0 \quad (23)$$

所以  $p_m$  是  $\varepsilon$  的单调增函数。而且

$$\frac{dT_s^{\text{ave}}}{d\varepsilon} = -(1-q)R_2^s \frac{dp_f}{d\varepsilon} + qR_3^s \frac{dp_m}{d\varepsilon} > 0 \quad (24)$$

故  $T_s^{\text{ave}}$  也是  $\varepsilon$  的单调增函数。证毕

由引理 1 可知，式(21)中最大化  $T_s^{\text{ave}}$  等价于在可行域内寻找最大的检测门限  $\varepsilon$ 。首先确定式(21)中  $\varepsilon$  的可行域。注意除了约束  $L \cdot p_m \leq k_m$  外，还有两个隐含的约束，分别为  $0 \leq p_m \leq 1$  和  $\varepsilon \geq 0$ 。由式(20)可知  $L$  是一个与  $\varepsilon$  无关的量。引理 1 指出  $p_m$  是  $\varepsilon$  的单调增函数。为寻找最大的  $T_s^{\text{ave}}$ ， $\varepsilon$  应该一直增加，直到碰到由以上 3 个约束条件确定的  $\varepsilon$  可行域的边界为止。因此，最大化  $T_s^{\text{ave}}$  的理想  $\varepsilon$  值一定发生在如下所述的约束边界上：

(1)如果  $k_m/L < 1$ ，理想  $\varepsilon$  值将在吞吐量降约束条件的边界上，即  $p_m = k_m/L$ 。把它代入式(3)可得理想  $\varepsilon$  值为

$$\varepsilon^* = \sigma_w^2(1+\gamma) \left[ 1 - \sqrt{\frac{2}{N}} Q^{-1}(k_m/L) \right] \quad (25)$$

SU 最大平均吞吐量为

$$\max(T_s^{\text{ave}}) = (1-q)[1-p_f(\varepsilon^*)]R_2^s + qp_m(\varepsilon^*)R_3^s \quad (26)$$

(2)如果  $k_m/L \geq 1$ ，理想  $\varepsilon$  值在  $p_m = 1$  或  $p_f = 0$  产生。由式(3)和式(4)可以看出，当  $\varepsilon \rightarrow \infty$  时，正好就是  $p_m \rightarrow 1$  且  $p_f \rightarrow 0$ 。因为  $L \leq k_m$  隐含的意思

是无论  $\varepsilon$  取何值, SU 都不会对 PU 产生有害的影响, 所以此时最大化 SU 吞吐量的最优策略是不用进行频谱感知直接使用授权频段。这种情况下 SU 的最大平均吞吐量是

$$\max(T_s^{\text{ave}}) = R_2^s + q(R_3^s - R_2^s) \quad (27)$$

#### 4 数值计算和分析

可以设置如下的一个通信场景: 在 WCDMA 3G 移动通信系统中, 移动终端接收由基站发出的数据包(这是一种码率自适应的数字通信系统), 构成主用户系统。而在基站小区外有一无线路由器, 一笔记本电脑通过 WIFI 链接此无线路由器接入 Inter 网下载数据包, 构成次级用户系统(也是一种码率自适应的数字通信系统)。现在为提高频谱利用率, 允许次级用户在不对主用户系统造成有害干扰的情况下, 机会式地接入主用户所用频谱。该认知无线电系统的参数设置如表 1 所示。并就吞吐量和频谱利用率两个指标同基于漏检概率约束的感知技术、文献[12]中的感知技术、文献[13]中的感知技术进行了比较。

表 1 参数设置

参数名称	数值
PU 发射功率 $P_p$	5000 mW
SU 发射功率 $P_s$	1000 mW
PU 占用信道概率 $q$	0.4
采样率 $f_s$	6 MHz
噪声功率 $\sigma_\omega^2$	$2.3886 \times 10^{-11}$ mW
路径损耗因子 $\alpha$	3.5
PU 通信范围 $D_p$	$1.1564 \times 10^4$ m
SU 通信距离 $d_s$	$7.3011 \times 10^3$ m
SU 活动范围外半径 $R$	$4.4230 \times 10^4$ m
采样数 $N$	1400
虚报概率上限 $\bar{p}_f$	$9.26 \times 10^{-3}$
吞吐量降上限 $k_m$	5%
漏检概率上限 $\bar{p}_m$	0.05
禁声区半径 $r_{\text{no}}$	$2.7775 \times 10^4$ m
信道带宽 $B$	3 MHz

需要说明的是表 1 中参数  $\bar{p}_f$  的选取是为保证在文献[13]中的感知技术下 PU 最大吞吐量降不超过 5%。在基于碰撞概率约束的方案中漏检概率上限  $\bar{p}_m$  被设置为 0.05, 同样是为了保证 PU 吞吐量降不超过 5%。文献[12]和文献[13]中的方案存在禁声区半径  $r_{\text{no}}$  的设置。在本文数值计算中, 设定在  $r_{\text{no}}$  处 PU

不进行感知, 直接使用授权频谱, 致使 PU 吞吐量降达到 5%。而对于文献[13]中的方案, 使用和文献[12]中的方案相同的禁声区半径  $r_{\text{no}}$ ; 在禁声区半径  $r_{\text{no}}$  内, 漏检概率  $\bar{p}_m$  设置为 0.05。如此设置参数其目的是为了这些方案有一个共同的 PU 吞吐量降, 以便于性能的比较。另外, 由于除本文建议的方案外其他几种方案都是用 PU 接入概率来衡量其频谱利用性能的, 为了便于比较本文把接入概率都换算成了 SU 吞吐量。

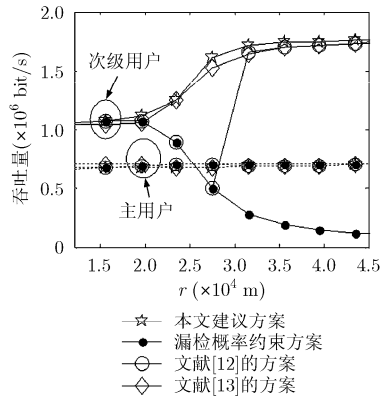
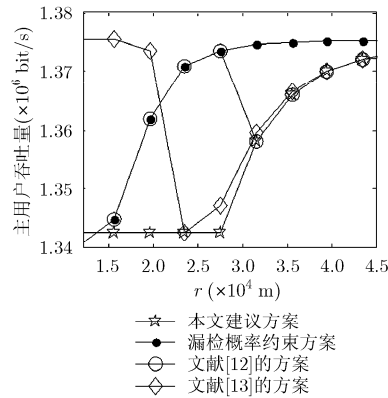
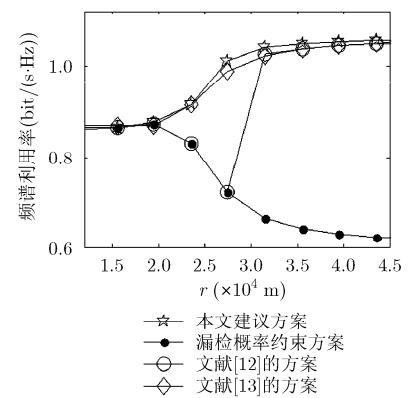
图 2 给出了  $r$  从  $D_p$  到  $R$  变化时, 4 种方案主用户吞吐量的变化曲线。如图 2 所示, 本文建议方案的 SU 吞吐量最大; 其次是文献[13]中的方案; 再次是文献[12]中的方案; 最差的是基于漏检概率约束的方案。4 种方案下 PU 吞吐量变化非常小, 最大下降 5%。基于漏检概率约束的方案比其他几种性能明显差很多, 特别是在  $r$  比较大的区域。这是因为基于漏检概率约束的方案没有考虑空间频谱机会的存在。文献[12]和文献[13]中的方案虽然考虑了空间频谱机会的存在, 但他们以  $r_{\text{no}}$  为界限把时间频谱空穴和空间频谱空穴人为划分开。没有认识到频谱空穴的时间特性和空间特性是同时存在且不可分割的。而本文建议方案充分利用了空时频谱空穴, 获得了较高的 SU 吞吐量, 特别是在灰色区域内改善尤为明显<sup>[15]</sup>。

图 3 单独给出了 PU 吞吐量随  $r$  的变化曲线。如图 3 所示, 本文建议感知技术较其他几种感知技术的 PU 吞吐量要稍小一些。正是因为这一微小的代价却换取了 SU 吞吐量较大的提高。

图 4 给出了 4 种感知方案频谱利用率随  $r$  的变化曲线, 其中频谱利用率是指单位带宽(1 Hz)上主用户吞吐量之和。如图 4 所示, 本文建议方案的频谱利用率也比其余 3 种方案的高。

#### 5 结束语

本文研究了以往几种感知技术的不足, 提出了适合异构频谱环境下空时频谱机会利用的感知度量——吞吐量降。该度量在衡量次级用户对主用户的影响时, 综合了主用户的碰撞概率和干扰强度两个因素, 为异构频谱环境下同时利用空间频谱空穴和时间频谱空穴提供了可能。然后, 研究了以吞吐量降为约束的次级用户吞吐量优化问题。最后, 通过数值仿真验证了该方案比目前几种传统方案的频谱利用率显著提高, 特别是在灰色区域改善更加显著。

图 2 主次用户吞吐量随  $r$  的变化曲线图 3 主用户吞吐量随  $r$  的变化曲线图 4 频谱利用率随  $r$  的变化曲线

### 参考文献

- [1] Federal Communications Commission. Spectrum policy task force report[R]. Washington DC, 2002.
- [2] Datla D, Wyglinski A M, and Minden G J. A spectrum surveying framework for dynamic spectrum access networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(8): 4158-4168.
- [3] Xu Y, Anpalagan A, Wu Q, *et al.*. Decision-theoretic distributed channel selection for opportunistic spectrum access: strategies, challenges and solutions[J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2013, 15(4): 1689-1713.
- [4] Xu Y, Wang J, Wu Q, *et al.*. Opportunistic spectrum access in cognitive radio networks: global optimization using local interaction games[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2012, 6(2): 180-194.
- [5] Xu Y, Wang J, Wu Q, *et al.*. Opportunistic spectrum access in unknown dynamic environment: a game-theoretic stochastic learning solution[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(4): 1380-1391.
- [6] Mitola J. Cognitive radio—an integrated agent architecture for software-defined radio[D]. [Ph.D. dissertation], Royal Institute of Technology, Stockholm, 2000.
- [7] Li H. Cooperative spectrum sensing via belief propagation in spectrum-heterogeneous cognitive radio systems[C]. 2010 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Sydney Australia, 2010: 1-6.
- [8] Wu Q, Ding G, Wang J, *et al.*. Spatial-temporal opportunity detection for spectrum heterogeneous cognitive radio networks: two-dimensional sensing[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(2): 516-526.
- [9] Ding G, Wang J, Wu Q, *et al.*. Spectrum sensing in opportunity-heterogeneous cognitive sensor networks: how to cooperate?[J] *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(11): 4247-4255.
- [10] Zhang J, Qi L, and Zhu H. Optimization of MAC frame structure for opportunistic spectrum access[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(6): 2036-2045.
- [11] Ding G, Wu Q, Song F, *et al.*. Joint exploration and exploitation of spatial-temporal spectrum hole for cognitive vehicle radios[C]. 2011 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing, Xi'an, China, 2011: 1-4.
- [12] Tandra R, Mishra M, and Sahai A. What is a spectrum hole and what does it take to recognize one?[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(5): 824-848.
- [13] Han W, Li J, Liu Q, *et al.*. Spatial false alarms in cognitive radio[J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(5): 518-520.
- [14] Han W, Li J, Li Z, *et al.*. Spatial false alarm in cognitive radio network[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(6): 1375-1388.
- [15] Wei Z, Feng Z, Zhang Q, *et al.*. Three regions for space-time spectrum sensing and access in cognitive radio networks[C]. IEEE 2012 Global Communications Conference, California USA, 2012: 1283-1288.
- [16] Mai V, Devroye N, and Tarokh V. On the primary exclusive region of cognitive networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(7): 3380-3385.
- [17] Cover T M and Thomas J A. Elements of Information Theory [M]. 2nd Edition, New York: Wiley-Interscience, 1990: 261-280.

李小强：男，1974年生，博士生，研究方向为认知无线电频谱感知、资源管理。

周琦：男，1975年生，硕士，高级工程师，研究方向为短波数据通信、认知无线电。

芮茂海：男，1972年生，副教授，研究方向为移动通信、无线频谱管理。