

基于 Markov 方法的空时频谱空穴的联合感知和接入^①

李小强^{②*} 贝 艳^{**} 李 颖^{***} 赵炜铭^{****} 李彦军^{*****}

(* 解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

(** 济南军区装备部 济南 250002)

(*** 中国电子设备系统工程公司研究所 北京 100141)

(**** 中国兵器工业新技术推广研究所 北京 100089)

(***** 解放军 68241 部队 宝鸡 721305)

摘 要 为改善频谱利用效率,把 Markov 方法引入到和位置相关的机会式频谱接入系统模型中。推导了各个信道状态的稳态概率,研究了各稳态概率随虚报概率的变化规律,在此基础上,根据频谱空穴的感知准确度与主、次用户相对位置的关系,在不同的主用户区域采用不同的约束条件对次级用户的吞吐量进行优化,以充分利用空时频谱空穴。根据以上研究,提出了一种新颖的基于 Markov 方法的空时频谱空穴的联合感知和接入方案。理论分析和数值计算表明,该方案能有效利用频谱空穴的空时特性,极大地提高频谱利用率。

关键词 频谱感知,动态频谱接入(DSA),空时频谱空穴,Markov 链

0 引 言

频谱资源的供需矛盾日益凸现,而在现行静态频谱分配政策下未被利用的频谱机会却大量存在^[1]。在这种情况下动态频谱接入(dynamic spectrum access, DSA)技术应运而生^[2-4]。机会式频谱接入(opportunistic spectrum access, OSA)是实现 DSA 的一种重要模型^[2],其基本思想是:次级用户具有认知功能,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穴^[5]。近年来,基于 Markov 方法的 DSA 技术^[6-13]引起了学术界的广泛关注。但是文献[6-9]都对 DSA 假设频谱感知是理想的,没有考虑实际感知错误。文献[10]给出了不完美频谱感知时 DSA 的分析公式,但是研究对象是开放频段的无线网络。文献[11]提出了一种基于 Markov 链的 DSA 方案,该方案考虑了感知错误对 MAC 层接入的影响。文献[12]基于 Markov 模型,考虑到频谱感知和信道切换对认知网络吞吐量的影响,从 MAC 帧结构设计的

角度研究了 OSA 系统的容量优化问题。但文献[11-12]研究的是时域频谱空穴的感知和利用,没有涉及空域频谱空穴的利用。文献[13]为最大化空时频谱机会的利用提出了一种位置相关的 OSA 接入策略,但此策略没有考虑主用户和次级用户的数据流到达方式,简单地认为次级用户对频谱的占用是随时的,这显然不符合实际情况。为此,本文基于 Markov 方法,提出了一种和位置相关的 OSA 方案,推导了各个信道状态的稳态概率,并研究了各稳态概率随虚报概率的变化规律。在此基础上,先采用空间频谱感知,估计次级用户与主用户发射机的距离,依此距离确定次级用户是在主用户发射机电波覆盖区域的黑色区域、灰色区域、过渡区域还是白色区域^[14];然后根据不同区域内对主用户的保护方式建立对次级用户的约束,结合感知准确度与主次用户位置的关系,优化感知门限,从而调整主次用户占用信道的稳态概率,使得次级用户的吞吐量得到优化;最后提出了一种新颖的基于 Markov 方法实现空时频谱空穴的联合感知和接入的方案。

① 973 计划(2009CB320403)资助项目。

② 男,1974 年生,博士;研究方向:认知无线电频谱感知和资源分配;联系人,E-mail:lxq1231xq@yahoo.com.cn
(收稿日期:2013-05-06)

1 系统模型

1.1 机会式频谱接入场景

在不干扰主用户频谱使用(或者对主用户的干扰受限)的前提下,允许多个次级用户机会式地接入授权频谱,就构成了动态频谱接入网。在实际应用中常常出现这样的场景。文献^[15]指出,在开放频段通常有较高的通信负荷,而在授权频段通常却是较低(如 TV 频段)或是中等(如一些蜂窝移动通信频段)的频谱利用率。因此 IEEE 802.22^[16]建议在不对授权用户(如电视接收机)造成有害干扰的情况下重复使用潜在的 TV 频谱机会。

为了在授权频段机会式地利用空时频谱空穴,本文考虑如图 1 所示的通信场景。该场景由一对固定的主用户通信对(即主用户发射机(primary transmitter, PT)和主用户接收机(primary receiver, PR))和一对暂时停留在某一位置上的次级用户通信对(即次级用户发射机(secondary transmitter, ST)和次级用户接收机(secondary receiver, SR))构成。主用户对频谱的使用有优先权,次用户只能机会式地接入该授权频段。这里沿用文献^[14]中黑色区域(以 PT 为圆心, D_B 为半径的区域)、灰色区域(D_B 到 D_C 的环形区域)、过渡区(D_C 到 D_W 的环形区域)、白色区域(D_W 以外的区域)的概念。SR 不能位于黑色区域内;如图 1 所示,SR 可以位于 PT 的灰色区域、过渡区域和白色区域内。这样的通信非常依赖于次级用户的感知能力。

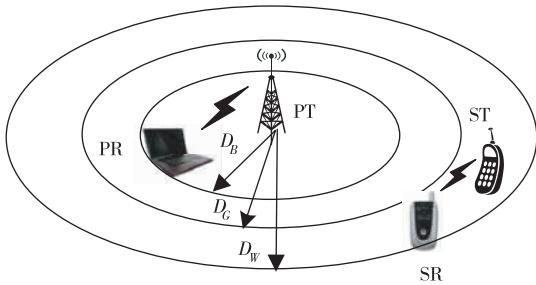


图 1 通信场景

1.2 频谱感知模型

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_{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_{FD} 。所以任意收、发信机之间的信道模型可以表示为: $h = h_{PL} \cdot h_{FD}$ 。其中 $h_{FD} \sim CN(0,1)$, 是一复高斯随机变量。 $h_{PL} = A \cdot r^{-\alpha/2}$, 这

里 A 是一个和频率有关的常数,不失一般性令 $A = 1$; α 为路径损耗因子; r 为收、发信机之间的距离。

在这种信道模型下,若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如下的一个二元假设问题:

$$y(i) = \begin{cases} \omega(i) : H_0 \\ x(i) + \omega(i) : H_1 \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

这里 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), $x(i) \sim CN(0, \sigma_x^2)$, 在上述信道模型下可知 $\sigma_x^2 = P_p h_{PL}^2$; $y(i)$ 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, 单边功率谱密度为 σ_ω^2 的复高斯随机变量,即 $\omega(i) \sim CN(0, \sigma_\omega^2)$ 。判决统计量为

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

则漏检概率 $p_m = \Pr\{H_0/H_1\}$ 和虚警概率 $p_f = \Pr\{H_1/H_0\}$ 表示如下^[17]:

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

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

其中 $\gamma = P_p h_{PL}^2 / \sigma_\omega^2$ 是信噪比(SNR), ε 是判决门限, Q 是标准正态分布的尾部概率:

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

1.3 数据流模型

为详细研究图 1 所示场景,假设主用户数据流以速率为 λ_p 的泊松过程到达信道,即相继到达的主用户之间的时间间隔服从均值为 $\frac{1}{\lambda_p}$ 的指数分布;以速率为 μ_p 的泊松过程离开信道,即在信道中的平均驻留时间服从均值为 $\frac{1}{\mu_p}$ 的指数分布。假定次级用户以速率为 λ_s 的泊松过程到达信道,以速率为 μ_s 的泊松过程离开信道。

2 主用户优先的 Markov 模型分析

根据前文所述系统模型,并考虑到次级用户存在感知错误,可把信道分为 4 个状态:空闲(状态 0)、主用户占用(状态 1)、次级用户占用(状态 2)、

主用户和次级用户共同占用(状态3)。定义信道状态空间 $S \triangleq \{0, 1, 2, 3\}$ 。用 $X(t)$ ($t \geq 0, X(t) \in S$) 表示信道的占用情况,则 $X(t)$ 是一个四状态的连续时间马尔科夫过程^[18]。信道状态转移过程见图 2。

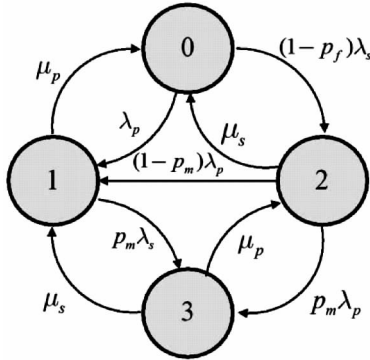


图 2 信道状态转移图

当以上网络活动趋于稳定时,信道活动也趋于稳定。设信道处于状态 s 的概率为 Π_s , 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Pr(X(t) = s) = \Pi_s, s \in S \quad (6)$$

根据流平衡(flow-balance)理论,即流入任一状态 s 的速率之和等于流出该状态的速率和,可以得到支配该系统的方程^[19],再加上概率归一化方程,可得如下方程组:

$$\begin{cases} \lambda_p \Pi_0 + \mu_s \Pi_3 + (1 - p_m) \lambda_p \Pi_2 = (\mu_p + p_m \lambda_s) \Pi_1 \\ \mu_p \Pi_1 + \mu_s \Pi_2 = [\lambda_p + (1 - p_f) \lambda_s] \Pi_0 \\ p_m \lambda_s \Pi_1 + p_m \lambda_p \Pi_2 = (\mu_s + \mu_p) \Pi_3 \\ \Pi_0 + \Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 = 1 \end{cases} \quad (7)$$

在方程组的条件下容易证明主用户占用信道的概率 Π_b 和未占用信道的概率 Π_i 用下式表示:

$$\Pi_b = \Pi_1 + \Pi_3 = \frac{\lambda_p}{\lambda_p + \mu_p} \quad (8)$$

$$\Pi_i = \Pi_0 + \Pi_2 = \frac{\mu_p}{\lambda_p + \mu_p} \quad (9)$$

若令 $p_t = 1 - p_f$, 则方程组的解为

$$\begin{aligned} \Pi_0 &= \frac{\Pi_i (p_m \lambda_s + \mu_s + \mu_p) \mu_s + \lambda_p (\mu_s + p_t \mu_p)}{(p_m \lambda_s + \mu_s + \mu_p) (\mu_s + \lambda_p + p_t \lambda_s) - p_m \lambda_p \mu_p} \\ \Pi_1 &= \frac{\Pi_b (\mu_s + \lambda_p + p_t \lambda_s) (\mu_s + \mu_p) - p_m \mu_p (\lambda_p + p_t \lambda_s)}{(p_m \lambda_s + \mu_s + \mu_p) (\mu_s + \lambda_p + p_t \lambda_s) - p_m \lambda_p \mu_p} \\ \Pi_2 &= \frac{\Pi_i (p_m \lambda_s + \mu_s + \mu_p) (\lambda_p + p_t \lambda_s) - \lambda_p (\mu_s + \mu_p)}{(p_m \lambda_s + \mu_s + \mu_p) (\mu_s + \lambda_p + p_t \lambda_s) - p_m \lambda_p \mu_p} \\ \Pi_3 &= \frac{\Pi_b (\mu_s + \lambda_p + p_t \lambda_s) p_m \lambda_s + p_m \mu_p p_t \lambda_s}{(p_m \lambda_s + \mu_s + \mu_p) (\mu_s + \lambda_p + p_t \lambda_s) - p_m \lambda_p \mu_p} \end{aligned} \quad (10)$$

可以证明,当 $\lambda_p, \mu_p, \lambda_s, \mu_s, N, \sigma_w^2, r$ 为正常数时, Π_0 和 Π_1 是 p_f 的单调递增函数,而 Π_2 和 Π_3 是 p_f 的单调递减函数。

3 次级用户吞吐量优化

如图 3 所示,假设主用户发射机(PT)位于坐标原点。PR、ST、SR 的坐标如图 3 括号中所示。ST 到 SR 的通信方向与 X 轴夹角为 φ , PT 到 PR 的通信方向与 X 轴的夹角为 θ 。 d_{ps} 表示 PT 到 SR 的距离; d_{sp} 表示 ST 到 PR 的距离。 r 为 ST 到 PT 的距离。 r_p 和 r_s 分别为主用户和次级用户的通信距离,式为

$$d_{ps} = \sqrt{r^2 + r_s^2 + 2rr_s \cos \varphi} \quad (11)$$

$$d_{sp} = \sqrt{r^2 + r_p^2 - 2rr_p \cos \theta} \quad (12)$$

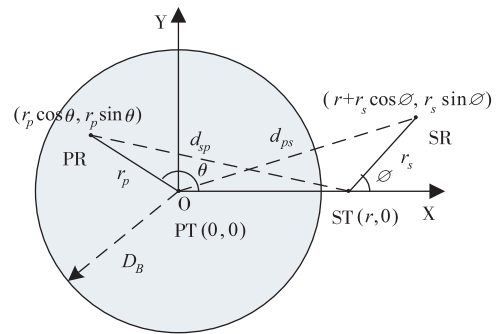


图 3 主、次用户位置关系

于是在各个信道状态下单位带宽内主次用户的最大信息速率^[20]如下:

$$R_2^s = \log_2 \left(1 + \frac{P_s r_s^{-\alpha}}{\sigma_w^2} \right) \quad (\text{状态 2, 次级用户}) \quad (13)$$

$$R_3^s = \log_2 \left(1 + \frac{P_s r_s^{-\alpha}}{\sigma_w^2 + P_p d_{ps}^{-\alpha}} \right) \quad (\text{状态 3, 次级用户}) \quad (14)$$

$$R_1^p = \log_2 \left(1 + \frac{P_p r_p^{-\alpha}}{\sigma_w^2} \right) \quad (\text{状态 1, 主用户}) \quad (15)$$

$$R_3^p = \log_2 \left(1 + \frac{P_p r_p^{-\alpha}}{\sigma_w^2 + P_s d_{sp}^{-\alpha}} \right) \quad (\text{状态 3, 主用户}) \quad (16)$$

于是主、次用户的平均吞吐量如下:

$$T_p = \Pi_1 R_1^p + \Pi_3 R_3^p \quad (17)$$

$$T_s = \Pi_2 R_2^s + \Pi_3 R_3^s \quad (18)$$

3.1 灰色区域吞吐量优化

当 ST 位于灰色区域时,由于 ST 和 PR 的距离比较近,对 PR 的干扰比较大,因此应该严格控制 PT 和 ST 同时工作的概率,所以灰色区域内次级用户吞

吐量的优化问题可以公式化为

$$\text{目标函数: } \max_{p_f} (T_s) = \max_{p_f} (\Pi_2 R_2^s + \Pi_3 R_3^s) \quad (19)$$

$$\text{约束条件: } p_d \geq \bar{p}_d, p_f \leq \bar{p}_f \quad (20)$$

其中 $\bar{p}_d, \bar{p}_f$ 分别为灰色区域中对检测概率 p_d 和虚报概率 p_f 的最低要求^[14]。

由于检测概率 $p_d = 1 - p_m$, 于是由式(3)可得检测门限

$$\varepsilon = \sigma_w^2 \left[1 + \gamma - \frac{\sqrt{2\gamma+1}}{N} Q^{-1}(1 - p_d) \right] \quad (21)$$

把式(21)代入(4)式可得

$$p_f = Q \left\{ \left[\gamma - \frac{\sqrt{2\gamma+1}}{N} Q^{-1}(1 - p_d) \right] / \sqrt{N} \right\} \quad (22)$$

因此当模型中次级用户、主用户的到达率和离开率确定后,式中 $\Pi_0, \Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$ 仅仅是 p_f 的函数。前面我们介绍过, $\Pi_0, \Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$ 分别是信道处于状态 0、1、2、3 时的稳态概率。由前文所述可知式(19)的目标函数是 p_f 的减函数。只需求出满足约束条件式(20)的最小 p_f , 并代入式(19)就可得最大次级用户吞吐量。由式(22)可得最佳虚报概率为

$$p_f^* = Q \left\{ \left[\gamma - \frac{\sqrt{2\gamma+1}}{N} Q^{-1}(1 - \bar{p}_d) \right] / \sqrt{N} \right\} \quad (23)$$

式(20)的约束条件限制了次级用户只能在灰色区域工作^[14], 从而有

$$Q^{-1}(\bar{p}_f) \frac{1}{\sqrt{N}} = \gamma - \frac{\sqrt{2\gamma+1}}{N} Q^{-1}(1 - \bar{p}_d) \quad (24)$$

若有 $\bar{p}_f = 1 - \bar{p}_d$, 解这个方程可得灰色区域边界处的信噪比为

$$\gamma_g = \frac{2Q^{-1}(\bar{p}_f) [Q^{-1}(\bar{p}_f) + \sqrt{N}]}{N} \quad (25)$$

而 $\gamma_g = \frac{P_p r^{-\alpha}}{\sigma_w^2}$, 解之得灰色区域的边界为

$$D_G = \sqrt[\alpha]{\frac{P_p}{\gamma_g \sigma_w^2}} = \sqrt[\alpha]{\frac{NP_p}{2Q^{-1}(\bar{p}_f) [Q^{-1}(\bar{p}_f) + \sqrt{N}] \sigma_w^2}} \quad (26)$$

灰色区域次级用户最大平均吞吐量为

$$\Pi_2(p_f^*) R_2^s + \Pi_3(p_f^*) R_3^s \quad (27)$$

3.2 过渡区域和白色区域的吞吐量优化

当 ST 位于过渡区或者白色区域时,则感知准确度达不到要求,即 $p_d < \bar{p}_d$ 和 $p_f \leq \bar{p}_f$ 不能同时得到满足^[14],需对约束条件做如下调整:

$$\text{目标函数: } \max_{p_f} (T_s) = \max_{p_f} (\Pi_2 R_2^s + \Pi_3 R_3^s) \quad (28)$$

$$\text{约束条件: } \Pi_1 R_1^p + \Pi_3 R_3^p \geq k T_{pmax} \quad (29)$$

其中 $0 \leq k \leq 1$, 是一个比例系数; T_{pmax} 是主用户最大平均吞吐量,在本文研究模型中:

$$T_{pmax} = \Pi_b R_1^p \quad (30)$$

于是式(29)变为

$$\Pi_1 R_1^p + \Pi_3 R_3^p \geq k \Pi_b R_1^p \quad (31)$$

从而得

$$\Pi_3 \leq (1 - k) \Pi_b R_1^p (R_1^p - R_3^p)^{-1} \quad (32)$$

如前所述,在 PT 和 ST 距离为 r 时, Π_3 是 p_f 的减函数;目标函数 T_s 也是 p_f 的减函数。因此使 T_s 取得最大值的最佳虚报概率为

$$p_f^* = \Pi_3^{-1} [(1 - k) \Pi_b R_1^p (R_1^p - R_3^p)^{-1}] \quad (33)$$

其中 $\Pi_3^{-1}(\cdot)$ 是 Π_3 对 p_f 的反函数。

值得注意的是在 PT 和 ST 距离为 r , Π_3 在 $p_f = 0, p_m = 1$ 时取得最大值

$$\Pi_{3max} = \frac{\Pi_b [(\mu_s + \lambda_p + \lambda_s) \lambda_s + \mu_p \lambda_s]}{(\lambda_s + \mu_s + \mu_p) (\mu_s + \lambda_p + \lambda_s) - \lambda_p \mu_p} \quad (34)$$

而此时主用户正好取得最小吞吐量:

$$T_{pmin} = T_{pmax} - \Pi_{3max} (R_1^p - R_3^p) \quad (35)$$

当 $T_{pmin} \geq k T_{pmax}$ 时,表明次级用户无论感知结果如何,对主用户的影响都在约定范围内。因此此时可不感知授权频段的使用情况,直接使用频率。也就是说此时进入了白色区域,可以求出白色区域边界:

$$D_W = T_{pmin}^{-1} (k T_{pmax}) \quad (36)$$

其中 $T_{pmin}^{-1}(\cdot)$ 是 T_{pmin} 对 r 的反函数。而当 $T_{pmin} < k T_{pmax}$ 时,需要调整感知门限选择式(33)所示的最佳虚报概率。

4 空时频谱机会的感知和接入联合设计方案

我们把前面所述的空时频谱机会的感知和接入设计方案总结如下:

(1) ST 根据接收到的 PT 发射信号强度探测它到 PT 的距离 r ^[21]。

(2) 根据式(26)和式(36)分别计算灰色区域边界 D_G 和白色区域边界 D_W 。

(3) 根据 r 的大小判断 ST 位于灰色区域、过渡区域还是白色区域。

(4) 如果 ST 位于灰色区域,则根据式(23)求出

最佳虚报概率,并根据式(4)求得最佳感知门限进行感知接入。

(5) 如果 ST 位于过渡区域,则根据式(33)求出最佳虚报概率,并根据式(4)求得最佳感知门限进行感知接入。

(6) 若 ST 位于白色区域,则直接令 $p_f = 0$, $p_m = 1$ 。此时相当于主用户和次用户分别独立接入信道。

5 数值计算和分析

这一部分数值计算的共同条件为: $P_p = 1 \text{ W}$, $P_s = 1 \text{ W}$, $r_p = 8 \text{ m}$, $r_s = 8 \text{ m}$, $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$; $\lambda_p = 90 \text{ s}^{-1}$, $\mu_p = 60 \text{ s}^{-1}$, $\lambda_s = 140 \text{ s}^{-1}$, $\mu_s = 60 \text{ s}^{-1}$; $\alpha = 3.6$, $\sigma_w^2 = 0.0001 \text{ W/Hz}$, $N = 20$; $D_B = 9 \text{ m}$ 。

图 4 和图 5 显示了在灰色区域内,且目标函数和约束条件分别如式(19)和式(20)时的稳态概率和主、次用户吞吐量。在前面所述数值计算条件下由式(26)可得灰色区域边界 $D_C = 14.06 \text{ m}$,因此图 4 和图 5 中的横坐标 r 从 $D_B = 9 \text{ m}$ 到 $D_C = 14.06 \text{ m}$ 。图 4 中显示的是各稳态概率及最佳虚报概率随 r 的变化规律;而图 5 中显示的是主用户吞吐量 T_p 和次级用户吞吐量 T_s 随 r 的变化规律,并分别和最大主用户吞吐量 $T_{p\max}$ 及时域最大次级用户吞吐量 $T_{s\max}^*$ 进行了比较。这里 $T_{s\max}^*$ 是按照时间频谱空穴计算的结果, $T_{s\max}^* = \Pi_i R_2^s$ 。图 4 和图 5 显示在灰色区域中各状态稳态概率变化不大,吞吐量也变化不大,特别是图 5 中次级用户的吞吐量小于利用时间频谱空穴的最大次级用户吞吐量。这是因为在灰色区域中为保护主用户,仅仅限制次级用户和主用户的共存概率 Π_3 ,导致在 r 较大时的空间频谱空穴未被利用。

图 6、图 7 和图 8、图 9 分别显示了在过渡区域和白色区域内,目标函数和约束条件分别如式(28)和式(29)时的稳态概率和主、次用户吞吐量,其中式(29)中的 $k = 0.95$ 。由式(36)可以计算出这两个区域的分界线 $D_W = 19.39 \text{ m}$ 。由图 6 可以看出,在过渡区域中主、次用户的共存概率 Π_3 迅速增长,导致图 7 中的次级用户吞吐量迅速增长,而主用户的吞吐量则保持不变。和图 5 中的次级用户吞吐量进行比较,图 7 中的次级用户吞吐量增加非常明显。这是因为采用式(29)的约束条件同时兼顾了空间频谱空穴和时间频谱空穴的利用。图 8 中显示在白色区域各状态的稳态概率基本不变;图 9 中显示在

白色区域中随着 r 的增大,主、次用户吞吐量逐渐趋于最大值。这是因为随着 PT 和 ST 的距离 r 增大,主、次用户之间的相互干扰越来越小,直到可以忽略不计,相当于各自独立使用相同的频率。

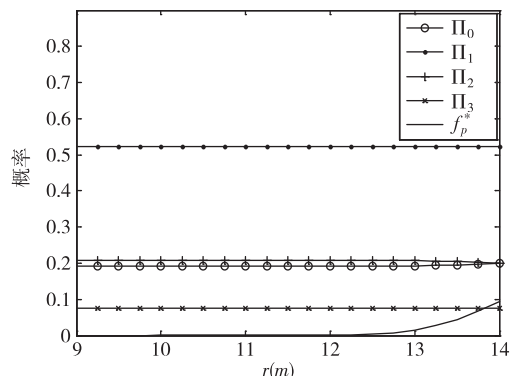


图 4 灰色区域中的稳态概率

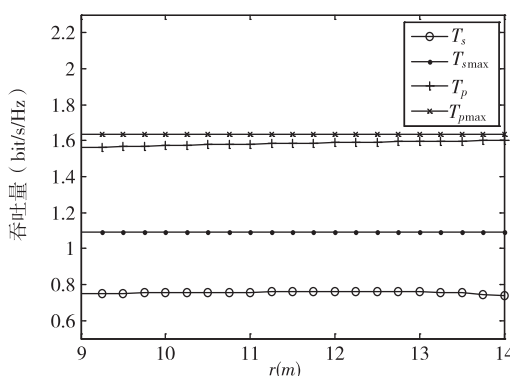


图 5 灰色区域中的主、次用户吞吐量

图 10 给出了本文建议方案和传统的只利用时间频谱空穴方案^[6]的次级用户吞吐量的比较。传统方案取 $\bar{p}_m = 0.1$;本文建议方案 $k = 0.9632$,是在传统方案取 $\bar{p}_m = 0.1$ 时最小的 k 值。由图 10 可以看出,本文建议方案具有较高的频谱利用率。特别是在 r 比较大的情况下,这种优势更加明显。这是因为本文建议方案利用了空时频谱空穴,而传统方案只利用时间频谱空穴,忽略了空间频谱空穴。

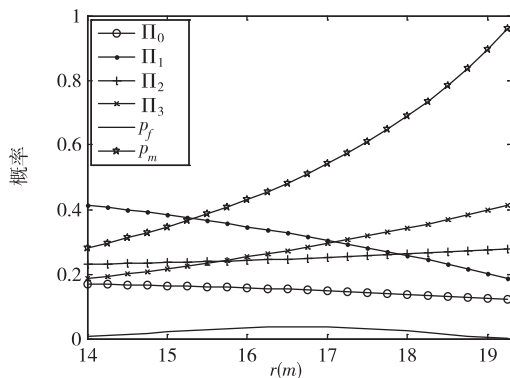


图 6 过渡区域中的稳态概率

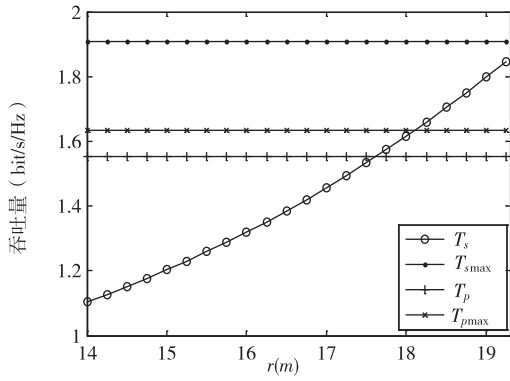


图7 过渡区域中的主、次用户吞吐量

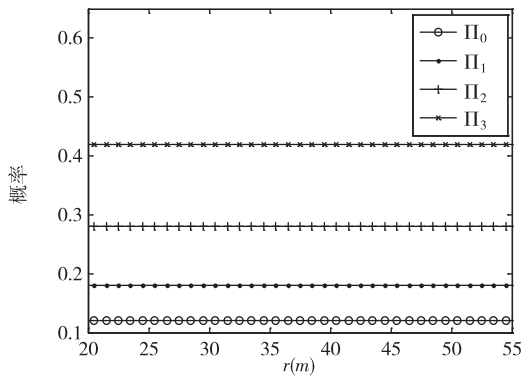


图8 白色区域中的稳态概率

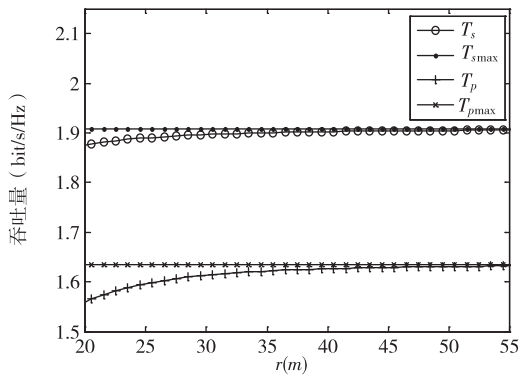


图9 过渡区域中的主、次用户吞吐量

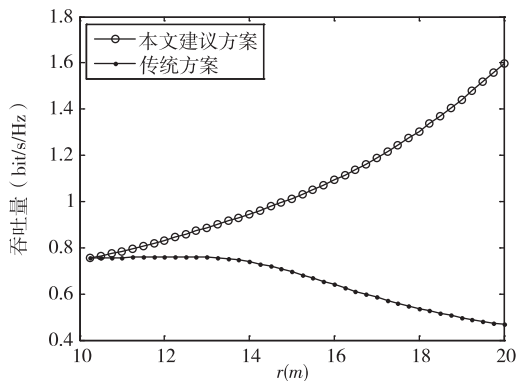


图10 本文建议方案 and 传统方案的比较

6 结 论

为充分利用空时频谱机会,本文把 Markov 方法引入到和位置相关的动态频谱接入系统模型中,提出了一种新颖的基于 Markov 方法的空时频谱空穴的联合感知和接入方案。主要贡献如下:(1)引入了主、次用户数据到达和离开的 Markov 模型,更加贴合实际;(2)把频谱空穴空时特性随主、次用户的相对位置变化转换为随感知准确度的变化,次级用户只需调整感知门限,就可达到优化吞吐量并限制对主用户影响的目的;(3)提出了一种新的使用空时频谱机会的感知和接入联合设计方案,不像以前的工作,只考虑次级用户距离主用户近时利用时域频谱空穴的情况;(4)既利用了时域频谱空穴又利用了空域频谱空穴,因此在保证对主用户的影响小于某一门限时,大大提高了次级用户的吞吐量,所以大幅提高了频谱利用率。但是,本文的模型仅研究了一对主用户和一对次级用户通信的情况,尚需进一步研究更加普遍的情况,如一对主用户和多对次级用户通信网的情况,或者更复杂的主用户通信网和次级用户通信网共存的情况。

参考文献

- [1] McHenry M A, McCloskey D. New York city spectrum occupancy measurement September 2004. <http://www.sharedspectrum.com>; Shared Spectrum Company, 2004
- [2] Akyildiz I F, Lee W Y, Vuran M C, et al. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless network: a survey. *Elsevier Computer Networks*, 2006, 50: 2127-2159
- [3] Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(2): 201-220
- [4] Le V, Feng Z, Bourse D, et al. A cell based dynamic spectrum management scheme with interference mitigation for cognitive networks. *Wireless Personal Communications*, 2009, 49(2): 275-293
- [5] Tandra R, Mishra M, Sahai A. What is a spectrum hole and what does it take to recognize one? *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(5): 824-848
- [6] Wang B, Ji Z, Liu K J, et al. Primary-prioritized Markov approach for dynamic spectrum allocation. *IEEE Transactions on Communications*, 2009, 8(4): 1854-1865
- [7] Capar F, Martoyo I. Comparison of bandwidth utilization for controlled and uncontrolled channel assignment in a spectrum pooling system. In: *Proceedings of the IEEE Ve-*

- hicular Technology Conference, Birmingham, UK, 2002. 1069-1073
- [8] Xing Y, Chandramouli R, Mangold S, et al. Dynamic spectrum access in open spectrum wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24:626-636
- [9] Su H, Zhang X. Cross-layer based opportunistic MAC protocols for QoS provisionings over cognitive radio mobile wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(1):118-129
- [10] Wong D T C, Hoang A T, Liang Y, et al. Dynamic spectrum access with imperfect sensing in open spectrum wireless networks. In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Las Vegas NV, 2008. 2765-2770
- [11] Yao Y, Feng Z, Li W, et al. Dynamic spectrum access with QoS guarantee for wireless networks: a Markov approach. In: Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference, Miami, USA, 2010. 1-5
- [12] Zhang J, Qi L, Zhu H. Optimization of MAC frame structure for opportunistic spectrum access. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(6):2036-2045
- [13] Ding G, Wu Q, Song F, et al. Joint exploration and exploitation of spatial-temporal spectrum hole for cognitive vehicle radios. In: Proceedings of the International Conference on Signal Processing, Communication and Computing, Xi'an, China, 2011. 1-4
- [14] Wei Z, Feng Z, Zhang Q, et al. Three regions for space-time spectrum sensing and access in cognitive radio networks. In: Proceedings of the IEEE Global Cognitive Radio and Networks Symposium Conference, Anaheim, USA, 2012. 1301-1306
- [15] FCC. Spectrum policy task force report. Washington: ET Docket, 2002
- [16] IEEE 802.22 working group on wireless regional area networks. <http://www.ieee802.org/22/>; IEEE, 2009
- [17] Liang Y, Zeng Y, Peh E, et al. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2008, 7(4):1326-1337
- [18] Papoulis A. Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, 4th edition. New York: McGraw-Hill, 2002. 695-784
- [19] Kulkarni V G. Modeling and Analysis of Stochastic Systems. New York: CRC Press, 1995. 234-245
- [20] Cover T M, Thomas J A. Elements of Information Theory. 2nd edition. New York: Wiley-Interscience, 2006. 261-280
- [21] Chittre S D, Dasgupta S, Ding Z. Distance estimation from received signal strength under log-normal shadowing: bias and variance. *IEEE Signal Processing Letters*, 2009, 16(3):216-218

Joint sensing and access for special-temporal spectrum holes based on Markov approach

Li Xiaoqiang^{*}, Bei Yan^{**}, Li Ying^{***}, Zhao Weiming^{****}, Li Yanjun^{*****}

(^{*} Institute of Communications Engineering, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007)

(^{**} Armament Department of the Jinan Military Region, Jinan 250002)

(^{***} Institute of China Electronic System Engineering Corporation, Beijing 100141)

(^{****} Advanced Technology Generalization Institute of Ordnance Industries, Beijing 100089)

(^{*****} Military of 68241, Baoji 721305)

Abstract

A Markov approach was applied to a location related opportunistic spectrum access (OSA) system to improve the spectrum utilization. The steady-state probability of each channel state was derived, and the variation of the steady-state probability with false alarm probability was studied. According to the relationship between the accuracy of sensing spatial-temporal spectrum holes and the relative position of primary users and secondary users, the throughput of secondary users was optimized by adopting different constraint conditions in different primary regions so as to make full use of spatial-temporal spectrum holes. At last, a novel scheme for joint sensing and access for spatial-temporal spectrum holes based on the Markov approach was proposed. The results of theoretical analysis and numerical computation show that the scheme takes efficient advantage of the spatial-temporal characteristics of the spectrum holes, greatly improving the spectrum utilization efficiency.

Key words: spectrum sensing, dynamic spectrum access (OSA), spatial-temporal spectrum holes, Markov chains