

认知无线电周期性合作频谱感知研究^①刘鑫^② 谭学治 郭世增

(哈尔滨工业大学通信技术研究所 哈尔滨 150080)

摘 要 为了降低对认知无线电授权用户的干扰和提高认知无线电的能量检测性能,提出了采用合作频谱感知和周期性检测授权用户的频谱感知算法。该算法可使认知无线电在每个感知周期内先检测后传输,如果检测到授权用户存在,认知无线电需要搜索新的空闲信道继续通信。为了对此合作频谱感知算法进行优化,给出了二重迭代优化算法,通过优化本地感知时间和合作用户数,认知无线电能够获得最大的吞吐量和最小的搜索时间。仿真表明:上述方法计算量较低,并且相比以往算法,当信噪比(SNR)为 5dB 时,吞吐量提高了 6.3%,搜索时间降低了 25%。

关键词 认知无线电, 合作频谱感知, 能量检测, 吞吐量, 搜索时间

0 引言

认知无线电是一种提高频谱利用率的智能无线电技术,频谱感知作为认知无线电的核心技术需要迅速、准确地识别空闲频段^[1,2]。能量检测是认知无线电常用的频谱感知方法,能量检测不需要授权用户信号的任何先验信息并且简单、易行^[3]。但是当授权用户由于处于阴影或者多径衰落而成为隐终端时,认知无线电接收到的授权用户信号的能量较弱,因此能量检测的性能会非常低^[4]。文献[5]提出,通过多个认知用户合作感知频谱,能够有效地克服隐终端问题。文献[6]提出了非合作的周期性频谱感知方法,该方法能够降低对授权用户的干扰。文献[7]提出了合作频谱感知和吞吐量的折衷模型,该模型通过优化感知时间可以获得最大的吞吐量,但是没有考虑合作开销对模型吞吐量的影响。文献[8,9]研究了认知无线电的信道搜索策略,发现信道搜索策略基于单用户检测,并未考虑合作频谱感知对信道搜索的影响。针对以上不足,本文提出了周期性的合作频谱感知算法,并充分考虑到感知时间和合作开销对认知无线电吞吐量和搜索时间的影响,提出了吞吐量和搜索时间的优化问题,给出了二重迭代优化算法。仿真表明,通过优化本地感知时间和合作用户数,能够使认知无线电获得较高

的吞吐量和较低的搜索时间,并且其计算量也较低。

1 能量检测与合作频谱感知

1.1 能量检测

因为能量检测不需要授权用户的先验信息,因此被广泛地应用于认知无线电。图 1 是能量检测的模型。首先将接收信号 $y(t)$ 通过带通滤波器选择出适合认知无线电工作的频段,然后将滤波器的输出信号的幅度平方并在观测时间 T 内积分。将积分器的输出 $T(y)$ 和预先设定的门限 λ 作比较,如果 $T(y)$ 大于 λ , 判断授权用户存在,用 H_1 表示;如果 $T(y)$ 小于 λ , 判断授权用户不存在,即信道空闲,用 H_0 表示。

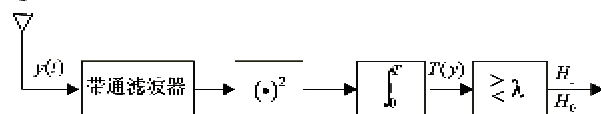


图 1 能量检测模型

认知无线电的频谱感知可以看作二元假设问题,接收信号的表达式为

$$y(t) = \begin{cases} n(t) & H_0 \\ s(t) + n(t) & H_1 \end{cases} \quad t = 1, \dots, M \quad (1)$$

式中 $s(t)$ 为授权用户信号,功率为 σ_s^2 ; $n(t)$ 为高斯

① 国家自然科学基金(61071104)和国家科技部重大专项(2009ZX03004-001)资助项目。

② 男,1984 年生,博士;研究方向:认知无线电;联系人,E-mail: liuxinstar1984@gmail.com
(收稿日期:2011-10-28)

白噪声,均值为0,方差为 σ_n^2 ; M 是授权信号的采样点数。如果滤波器的带宽为 W ,采样点数 M 表示为

$$M = 2TW \quad (2)$$

则能量统计值 $T(y)$ 可以看作是 M 个采样点的平方累积和,表示为

$$T(y) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |y(t)|^2 \quad (3)$$

通常 $T(y)$ 可以近似为高斯分布,因此能量检测的虚警概率(P_f)和检测概率(P_d)

$$\begin{cases} P_f = P(T(y) \geq \lambda | H_0) \\ \quad = Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_n^2} - 1\right)\sqrt{TW}\right) \\ P_d = P(T(y) \geq \lambda | H_1) \\ \quad = Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_n^2} - \gamma - 1\right)\sqrt{\frac{TW}{2\gamma + 1}}\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\gamma = \sigma_s^2/\sigma_n^2$ 为授权用户的接收信噪比;函数 $Q(x)$ 为正态互补积分函数。

1.2 合作频谱感知

能量检测面临隐终端问题的挑战,即认知用户处于阴影效应或者严重的多径衰落时,认知无线电观测到的授权信号的能量较弱,因此不能够准确地感知到授权用户,所以为了提高感知性能,多个认知用户采用合作的方式共同感知授权用户。如图2所示,认知用户3是隐终端,认知用户1和2是辅助终端,这3个用户将观测到的授权用户的信息发送给类似于基站的融合中心,融合中心合并接收到的所有感知信息并对授权用户的存在与否做出最后判决,这样由于认知用户1和2的帮助,用户3的检测概率得到了提高。

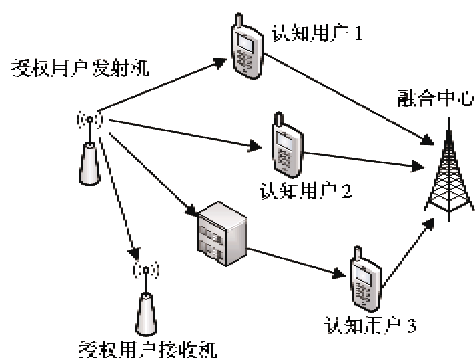


图2 合作频谱感知模型

假设认知网络中有 N 个认知用户,每个用户的能量统计值为 $T(y_i)$ ($i = 1, 2, \dots, N$)。融合中心对接收到的所有能量统计值累积求和,因此融合中心合并后的能量统计值为

$$Z(y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T(y_i) \quad (5)$$

将式(5)带入式(4),认知无线电合作检测的虚警概率(Q_f)和检测概率(Q_d)为^[10]

$$\begin{cases} Q_f = Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_n^2} - 1\right)\sqrt{NTW}\right) \\ Q_d = Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_n^2} - \bar{\gamma} - 1\right)\sqrt{\frac{NTW}{2\bar{\gamma} + 1}}\right) \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\bar{\gamma}$ 是 N 个认知用户的平均信噪比。

2 认知无线电周期性合作频谱感知算法

认知无线电正常通信的前提是不能对授权用户产生干扰,因此认知无线电在通信过程中需要定期地侦测授权用户,防止由于授权用户的突然出现而产生不必要的干扰。一个有效的解决方法是让认知无线电周期性地感知频谱。如图3所示,把认知无线电在信道a的传输时间划分成若干个感知周期,每个感知周期内,认知用户要先对信道a的授权用户进行检测,如果授权用户不存在,在本周期接下来的时间内认知无线电可以进行数据传输,否则认知无线电需要退出正在使用的信道a,进入信道搜索阶段。当认知无线电寻找到一个新的空闲信道b,认知无线电可以迅速切换到信道b继续周期性的频谱感知与数据传输。

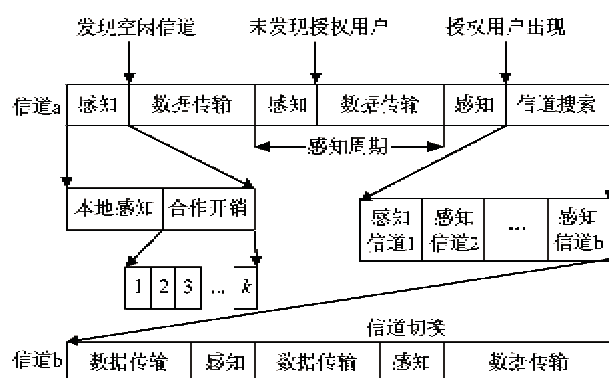


图3 认知无线电周期性感知算法

认知无线电采用联合频谱感知时,感知时间应该包含两部分:本地感知和合作开销。每个认知用户在本地图感时间内对授权用户进行观测,然后在合作开销期间通过一个公共信道将感知信息发送给融合中心。为了节省公共信道的带宽以及避免认知用户之间的发送冲突,本文假设认知无线电采用TDMA方式发送感知信息,即每个用户只能在分配

给自己的时隙中发送感知信息,因此合作开销的时间应该与参与合作检测的认知用户的个数成正比。因此当参与合作检测的认知用户的个数增加时,认知无线电的检测性能虽然会提高,但是合作开销也会增加,所以当 N 个用户都参与到合作检测中系统反而不会取得较好的性能。

假设认知无线电的感知周期为 T_p , 本地感知时间为 T_s , 合作开销为 T_r , 搜索时间为 T_f 。如果参与协作检测的用户数为 k , 则

$$T_r = k\xi \quad (7)$$

式中 ξ 为合作开销中每个时隙的时间长度。认知无线电的数据传输时间 T_d 为

$$T_d = T_p - T_s - T_r \quad (8)$$

认知无线电使用授权用户的信道可能出现两种情况。一种是认知无线电准确地检测到授权用户不存在,此时认知无线电的通信速率为

$$C_1 = W \log_2 \left(1 + \frac{P_T}{\sigma_n^2} \right) \quad (9)$$

式中 P_T 为认知无线电的发射功率,这种情况发生的概率是 $1 - Q_f$ 。另一种情况是认知无线电没有准确地检测到授权用户的存在,认知用户和授权用户同时在信道中进行通信,此时认知无线电的速率为

$$C_2 = W \log_2 \left(1 + \frac{P_T}{\sigma_n^2(1 + \gamma)} \right) \quad (10)$$

这种情况发生的概率为 $1 - Q_d$ 。因此认知无线电在传输时间内的吞吐量为

$$R = T_d(C_1 P_{H_0}(1 - Q_f) + C_2 P_{H_1}(1 - Q_d)) \quad (11)$$

式中 P_{H_0} 和 P_{H_1} 分别表示假设 H_0 和 H_1 出现的概率。

3 合作感知算法的优化

3.1 感知时间的优化

感知时间优化的目标是通过选择最佳的本地感知时间和合作检测的用户数,使得认知无线电的吞吐量达到最大,同时还需要保证认知无线电的检测概率和虚警概率满足最低的需求。感知时间的优化问题表示为

$$\begin{aligned} & \max_{T_s, k} R \\ \text{s. t. } & Q_f \leq \alpha \\ & Q_d \geq \beta \\ & 1 \leq k \leq N, k \in Z \end{aligned} \quad (12)$$

式中 α 和 β 分别是虚警概率的上限和检测概率的下限,并且满足 $\alpha \leq 0.5$ 和 $\beta \geq 0.5$ 。根据式(6),虚警概率可由检测概率表示为

$$Q_f = Q(Q^{-1}(Q_d) \sqrt{2\gamma + 1} + \bar{\gamma} \sqrt{kTW}) \quad (13)$$

定理 1: 仅当 $Q_d = \beta$ 时,吞吐量 R 能够取得最大值。

证明: 当 $Q_d > \beta$ 时,根据式(13),由于函数 $Q(x)$ 是单调递减函数,因此 Q_f 是关于 Q_d 的增函数,所以有 $Q_f > Q_f(\beta)$, 根据式(11),我们有 $R < R(\beta)$ 。因此当 $Q_d = \beta$ 时, R 能取得最大值。

根据式(13)和定理 1,优化问题(12)可以进一步简化为

$$\begin{aligned} & \max_{T_s, k} \psi(T_s, k) = (v(k) - T_s)(1 - Q(\varphi + \sqrt{T_s \tau(k)})) \\ \text{s. t. } & \mu(k) \leq T_s \leq v(k) \\ & 1 \leq k \leq N, k \in Z \end{aligned} \quad (14)$$

式中 $\varphi, \tau(k), u(k)$ 和 $v(k)$ 分别表示为

$$\begin{aligned} \varphi &= Q^{-1}(\beta) \sqrt{2\gamma + 1} \\ \tau(k) &= kW\bar{\gamma}^2 \\ u(k) &= (Q^{-1}(\alpha) - Q^{-1}(\beta) \sqrt{2\gamma + 1})^2 / kW\bar{\gamma}^2 \\ v(k) &= T_p - k\xi \end{aligned} \quad (15)$$

对于优化问题(14)可以采用二重优化方法进行求解^[11],即固定其中一个参数优化另一个参数,然后固定优化后的参数求解另一个参数的优化,迭代优化直到两个参数均收敛。因为 k 是 $1 \sim N$ 的整数,通过枚举的方法即可获得最优值,因此下一步主要探讨当 k 给定时,是否存在最优的 T_s 。

定理 2: 当给定 $k = k^*$, 并且满足 $\alpha \leq 0.5$ 和 $\beta \geq 0.5$ 时,存在 $T_s^* \in [0, v(k^*)]$ 使得 $\psi(T_s^*, k^*)$ 取得最大值。

证明: 对函数 ψ 取关于 T_s 的偏导数,可以得到

$$\begin{aligned} \psi'(T_s, k^*) &= \frac{\partial \psi}{\partial T_s} \\ &= \tau(k^*) \frac{v(k^*) - T_s}{2\sqrt{2\pi T_s \tau(k^*)}} \exp(-(\varphi + \sqrt{T_s \tau(k^*)})^2 / 2) \\ &\quad - (1 - Q(\varphi + \sqrt{T_s \tau(k^*)})) \end{aligned} \quad (16)$$

因为函数 $Q(x) \leq 1$, 因此根据式(16)能够得到

$$\begin{aligned} \lim_{T_s \rightarrow 0} \psi' &= +\infty \\ \lim_{T_s \rightarrow v(k^*)} \psi' &< -(1 - Q(\varphi)) \leq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)表明存在 $T_s^* \in [0, v(k^*)]$ 使得 $\nabla \psi = 0$, 即 T_s^* 是函数 ψ 的一个极值。下面需要说明这个极

值是最大值,因此我们还需要证明函数 ψ 是凹函数,即 $\psi'' < 0$ 。对 ψ 取关于 T_s 的二阶偏导数得

$$\psi'' = 2Q'_f - (v(k^*) - T_s)Q''_f \quad (18)$$

其中 $Q_f = Q(\varphi + \sqrt{T_s\tau(k^*)})$, Q'_f 和 Q''_f 分别是 Q_f 关于 T_s 的一阶和二阶偏导数。因 $Q(x)$ 是减函数,因此有 $Q'(x) < 0$, 即有 $Q'_f < 0$ 。 Q''_f 可表示为

$$Q''_f = \frac{1}{4\sqrt{2\pi T_s}} \left(\frac{1}{\sqrt{T_s\tau(k)}} + \varphi + \sqrt{T_s\tau(k)} \right) \exp(-(\varphi + \sqrt{T_s\tau(k)})^2/2) \quad (19)$$

因为 $Q_f \leq \alpha \leq 0.5$, 所以有 $\varphi + \sqrt{T_s\tau(k)} \geq 0$, 根据式(19)可知 $Q''_f > 0$ 。将 $Q'_f < 0$ 和 $Q''_f > 0$ 代入式(18)可知 $\psi'' < 0$, 因此 $T_s^* \in [0, v(k^*)]$ 时 $\psi(T_s^*, k^*)$ 是凹函数,换句话说 $\psi(T_s^*, k^*)$ 能够取得最大值。

定理2说明优化问题(式(14))的解是存在的,接下来我们采用二重迭代优化方法对其进行求解。

3.2 二重迭代优化算法流程

步骤1:初始化

(1)将认知用户根据它们的接收 SNR 从高到低排列,即第一个用户的 SNR 最高,最后一个用户的 SNR 最低;

(2)设置 T_s 的误差精度 $\rho = 10^{-3}$;

(3)令 $i = 1, k^{(i)} = 1$ 以及 $T_s^{(i)} = v(1)/2$ 。

步骤2: k 的优化

(1)给定 $T_s^{(i)}$, 枚举 $k = 1 \sim N$, 并计算前 k 个用户参与联合频谱感知的平均信噪比 $\bar{\gamma}$ 及相应的 $\psi(T_s^{(i)}, k)$;

(2)查找 $k^* = \arg\max_k \psi(T_s^{(i)}, k), k = 1, 2, \dots, N$;

(3)令 $k^{(i+1)} = k^*$, 算法转入步骤3。

步骤3: T_s 的优化

(1)设置 $T_s^{\min} = \mu(k^{(i+1)})$ 和 $T_s^{\max} = v(k^{(i+1)})$;

(2)根据式(16),如果 $\text{sign}(\psi'(T_s^{\min}, k^{(i+1)})) \neq \text{sign}(\psi'(0, k^{(i+1)}))$, 令 $T_s^{(i+1)} = T_s^{\min}$, 算法转入步骤4;否则算法转入步骤3的(3);

(3)设置 $\eta = (T_s^{\min} + T_s^{\max})/2$, 如果 $\text{sign}(\psi'(\eta, k^{(i+1)})) = \text{sign}(\psi'(T_s^{\min}, k^{(i+1)}))$, 令 $T_s^{\min} = \eta$; 否则令 $T_s^{\max} = \eta$;

(4)如果 $|T_s^{\max} - T_s^{\min}| > \rho$, 算法转入步骤3的(2);否则算法转入步骤3的(5);

(5)设置 $T_s^{(i+1)} = (T_s^{\min} + T_s^{\max})/2$, 算法转入步骤4。

步骤4:算法的收敛

(1)设置 $i = i + 1$;

(2)如果 $|T_s^{(i)} - T_s^{(i-1)}| < \rho$ 并且 $k^{(i)} = k^{(i-1)}$, 算法转入步骤4的(3);否则,算法转入步骤2;

(3)设置 $T_s^* = T_s^{(i)}$ 和 $k^* = k^{(i)}$, 算法结束。

上述算法中 $\text{sign}(x)$ 是符号函数,即 $x < 0$ 时, $\text{sign}(x) = -1$; 当 $x \geq 0$ 时, $\text{sign}(x) = 1$ 。将认知用户按照 SNR 从高到低排列是因为, SNR 越高的认知用户,其检测性能越高,因此可获得的吞吐量越大。

3.3 搜索时间优化

如果在某个感知周期内的感知阶段,认知无线电发现授权用户正在使用该频段,如图3所示,认知无线电将进入信道搜索阶段。此阶段中,认知无线电将逐一检测剩余的信道,一旦发现某个信道空闲,认知用户将切换到此信道中继续数据传输。搜索阶段,认知无线电需要感知每个信道,为了使得搜索时间最小,认知无线电的本地感知时间和合作用户数与感知阶段会有所不同,因此每个信道的感知时间 T_m 表示为

$$T_m = \bar{T}_s + \bar{k}\xi \quad (20)$$

式中 $\bar{T}_s$ 和 $\bar{k}$ 分别表示搜索阶段每个信道的本地感知时间和合作的用户数。认知无线电只有当判断信道空闲时才会使用信道,因此信道被判断空闲的概率为

$$P_u = (1 - Q_f)P_{H_0} + (1 - Q_d)P_{H_1} \quad (21)$$

假设认知无线电可用信道数为 L , 那么从其它 $L - 1$ 条信道中搜索出空闲信道平均需要的时间为

$$T_f = T_m P_u + 2T_m (1 - P_u) P_u + \dots + (L - 1) T_m (1 - P_u)^{L-2} P_u \quad (22)$$

经过数学推导,式(22)可以进一步表示为

$$T_f = T_m \left[\frac{1 - (1 - P_u)^L}{P_u} - L(1 - P_u)^{L-1} \right] \quad (23)$$

为了保证认知用户能够从 $L - 1$ 条信道中寻找出一条空闲信道,所有 $L - 1$ 条信道全忙的概率应该非常小,因此我们有 $(1 - P_u)^{L-1} \leq 1$, 带入式(23), T_f 简化为

$$T_f \approx \frac{T_m}{P_u} \quad (24)$$

搜索时间优化的目的是通过选择最佳的本地感知时间 $\bar{T}_s$ 和合作用户数 $\bar{k}$ 使得搜索时间最小,因此搜索时间的优化问题可以表示为

$$\begin{aligned} & \min_{\bar{T}_s, \bar{k}} \frac{T_m}{P_u} \\ \text{s. t. } & T_m \leq T_p \\ & Q_f \leq \alpha \\ & Q_d \geq \beta \\ & 1 \leq \bar{k} \leq N, \bar{k} \in Z \end{aligned} \quad (25)$$

类似式(14),式(25)的优化问题可以进一步简化为

$$\begin{aligned} & \min_{\bar{T}_s, \bar{k}} \vartheta(\bar{T}_s, \bar{k}) = \\ & \frac{\bar{T}_s + \bar{k}\xi}{(1 - Q(\varphi + \sqrt{\bar{T}_s \tau(\bar{k})}))P_{H_0} + (1 - \beta)P_{H_1}} \\ \text{s. t. } & \mu(\bar{k}) \leq \bar{T}_s \leq v(\bar{k}) \\ & 1 \leq \bar{k} \leq N, \bar{k} \in Z \end{aligned} \quad (26)$$

定理 3: $\bar{k}$ 给定时, $\vartheta(\bar{T}_s, \bar{k})$ 是关于 $\bar{T}_s$ 的凸函数, 即 $\vartheta(\bar{T}_s, \bar{k})$ 存在关于 $\bar{T}_s$ 的极小值。

证明: 类似定理 2, 因为 $Q_f = Q(\varphi + \sqrt{\bar{T}_s \tau(\bar{k})})$, 所以 $\vartheta(\bar{T}_s, \bar{k})$ 关于 $\bar{T}_s$ 的二阶偏导数为

$$\vartheta'' = \frac{T_s((1 - Q_f)P_{H_0} + (1 - \beta)P_{H_1})Q_f'' + 2T_s Q_f'^2}{((1 - Q_f)P_{H_0} + (1 - \beta)P_{H_1})^3} \quad (27)$$

定理 2 已经证明 $Q_f'' > 0$, 因此根据式(27)可知 $\vartheta'' > 0$, 即 $\vartheta(\bar{T}_s, \bar{k})$ 是凸函数。可以利用 3.2 节的算

法解决式(26)的优化问题。

4 仿真分析

仿真中认知用户的总数 $N = 10$, 每个认知用户的接收 $\text{SNR} = -10 \sim 5\text{dB}$; 可用的授权用户信道数 $L = 20$, 信道带宽 $W = 1\text{kHz}$, 认知无线电对每个信道的虚警概率上限和检测概率下限分别是 $\alpha = 0.4$ 和 $\beta = 0.9$; 假设 H_0 和 H_1 出现的概率满足 $P_{H_0} = P_{H_1} = 0.5$; 噪声功率 $\sigma_n^2 = 0\text{dBW}$, 认知用户发射功率 $P_T = 10\text{dBW}$; 感知周期 $T = 2\text{s}$, 传送感知信息的时隙间隔 $\xi = 0.1\text{s}$ 。

图 4(a)反映了认知无线电每个感知周期内的吞吐量 R 随本地感知时间 T_s 和合作用户数 k 的变化。可以看出, 吞吐量是个凹面曲线, 符合定理 2, 当 $T_s = 0.42\text{s}$ 和 $k = 5$ 时, 最大吞吐量 $R = 3.57\text{kb}$ 。图 4(b)反映了不同用户数吞吐量随本地感知时间的变化。可以看出, 当 $T_s = 0 \sim 1\text{s}$ 时, $k = 5$ 的吞吐量要高于 $k = 1$ 和 10 的吞吐量, 这是因为当 k 较小时由于参与合作检测的用户数较少, 认知无线电的检测性能较低, 即认知无线电检测信道空闲的概率较低, 因此吞吐量也较低; 当 k 较高时, 认知无线电的合作开销较大, 用于传输数据的时间较少, 因此吞吐量也会降低。

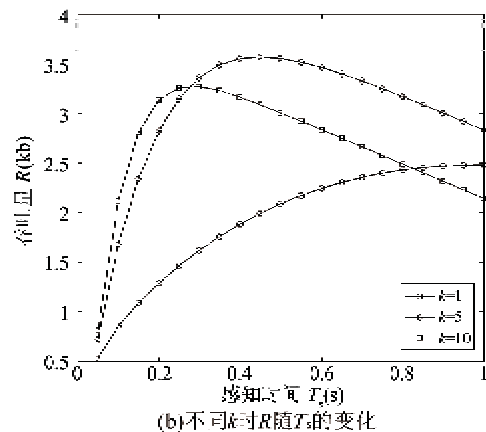
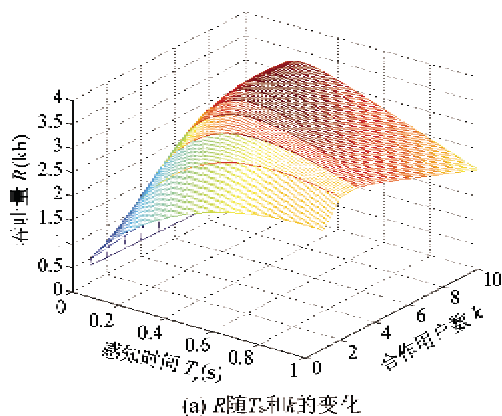


图 4 认知无线电的吞吐量变化

针对式(12)的优化问题, 本文提出了二重迭代优化算法, 该算法每次迭代只优化其中一个参数直至两个参数分别收敛。图 5 比较了本文二重迭代优化算法和穷举算法的迭代次数比较, 可以看出, 提出的算法有效地降低了计算量。图 6 给出了本文算法和文献[7]提出的算法在 $k = 5$ 和 10 时的吞吐量比

较。文献[7]由于没有考虑到合作用户数 k 引起的合作开销问题, 因此只对本地感知时间 T_s 进行了优化。如图 6 所示, 当文献[7]也考虑到合作开销时, 本文算法获得的吞吐量有显著的优势, 当平均 $\text{SNR} = 5\text{dB}$ 时, 相比文献[7]中用户数 $k = 5$ 时的最大吞吐量还要高 6.3%。

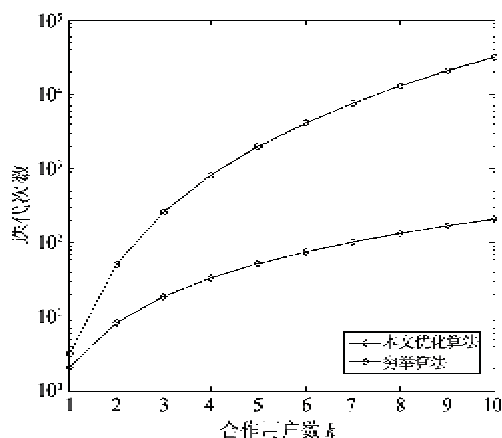


图5 算法迭代次数的比较

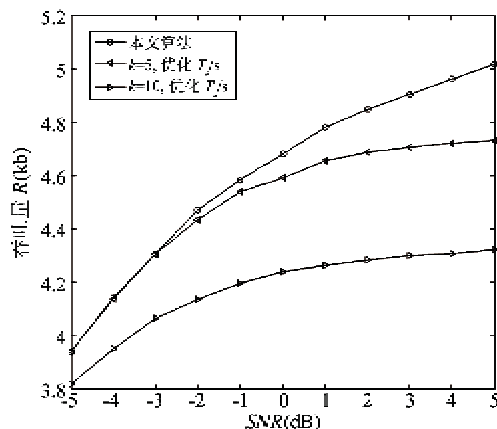


图6 吞吐量的比较

图7(a)反映了认知无线电在搜索阶段的搜索时间 T_f 随本地感知时间 $\bar{T}_f$ 和合作用户数 $\bar{k}$ 的变化。可以看出 T_f 是关于 $\bar{T}_f$ 和 $\bar{k}$ 的凸面曲线, 当 $\bar{T}_f = 0.08\text{s}$ 和 $\bar{k} = 3$ 时, T_f 的最小值约为 1.5s 。图7(b)反映了不同合作用户数时, 搜索时间随感知时间的变化。 $\bar{k}$

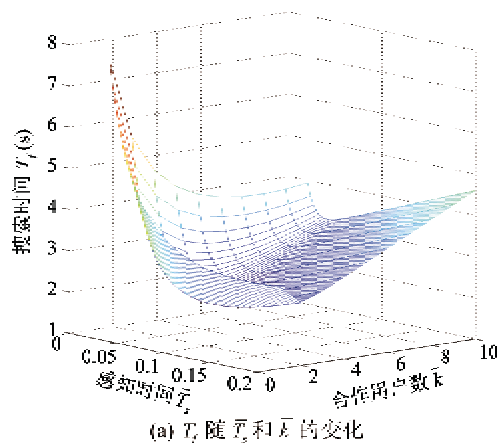
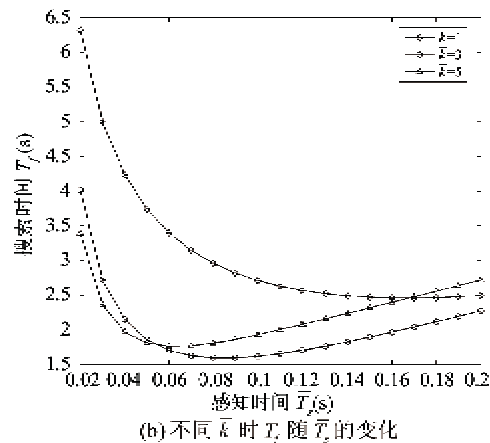
(a) T_f 随 $\bar{T}_f$ 和 $\bar{k}$ 的变化(b) 不同 $\bar{k}$ 时 T_f 随 $\bar{T}_f$ 的变化

图7 认知无线电搜索时间的变化

图8 比较了本文合作感知的搜索时间和文献[8]中提出的单用户检测的搜索时间。可以看出, 采用

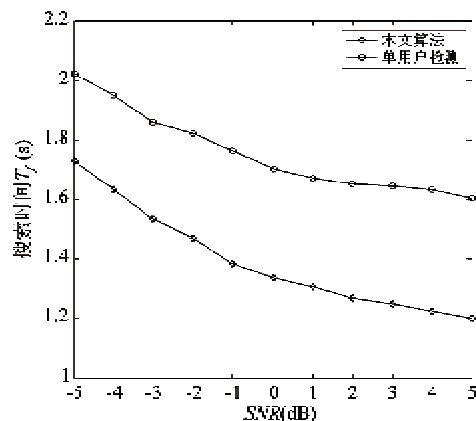


图8 搜索时间的比较

$=1$ 和 5 时的搜索时间相比 $\bar{k} = 3$ 时的较高, 这是因为 $\bar{k}$ 较小时, 认知无线电的检测性能低, 因此需要搜索更多的信道才能发现空闲信道; 而 $\bar{k}$ 较大时, 合作开销增加, 因此搜索每个信道的时间也增加。

合作感知可以极大地降低搜索时间, 当平均 $\text{SNR} = 5\text{dB}$ 时, 本文算法的搜索时间可降低约 25% 。

5 结论

本文提出了认知无线电的周期性合作频谱感知算法, 并采用二重迭代优化算法对提出的感知算法的性能进行了优化。本文算法的计算量低, 并且当 $\text{SNR} = 5\text{dB}$ 时, 相比以往算法, 认知无线电的吞吐量提高了 6.3% , 搜索时间降低了 25% 。本文感知算法能够使认知无线电及时地感知到授权用户, 充分地利用空闲的频谱资源, 极大地降低搜索延迟。下一步我们将研究周期性合作频谱感知中感知周期的选取。

参考文献

- [1] Joseph M, Gerald Q, Royal J. Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE Person Communication*, 1999, 6(4):13-18
- [2] Krenik W, Batra A. Cognitive radio techniques for wide area networks. In: Proceedings of the Design Automation Conference, California, USA, 2005. 409-412
- [3] Liu Y X, Zeng C Y, Wang H J, et al. Energy detection threshold optimization for cooperative spectrum sensing. In: Proceedings of the International Conference on Advanced Computer Control, Shenyang, China, 2010. 566-570
- [4] Yirang L, Juho P, Younghul S. Upper bound for the loss of energy detection of signals in multi-path fading channels. *IEEE Signal Processing Letters*, 2009, 16 (11): 949-952
- [5] Wei Z, Ranjan K M, Khaled B L. Optimization of cooperative spectrum sensing with energy detection in cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8 (12): 5761-5766
- [6] Zhou X W, Ye L, Young H K, et al. Detection timing and channel selection for periodic spectrum sensing in cognitive radio. In: Proceedings of the 2008 IEEE Global Telecommunications Conference, New Orleans, USA, 2008. 1-5
- [7] Liang Y C, Zeng Y H, Edward CY, et al. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks. *IEEE Transaction on Wireless Communications*, 2008, 7(4): 1326-1336
- [8] Ghasemi A, Sousa E S. Optimization of spectrum sensing for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks. In: Proceedings of the 4th IEEE Consumer Communication Networking Conference, Las Vegas, USA, 2007. 1022-1026
- [9] Wang Y, Fan C Y, Zeng Z M, et al. Research on spectrum sensing mechanisms of cognitive radio. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2008, 26 (3):230-237
- [10] Fan R F, Jiang H. Optimal multi-channel cooperative sensing in cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(3): 1128-1137
- [11] Floudas C, Pardalos P M. Encyclopedia of Optimization. 2nd edition, Berlin: Springer Press, 2009. 375-410

Research on periodic cooperative spectrum sensing in cognitive radio

Liu Xin, Tan Xuezhi, Guo Shizeng

(Communication Research Centre, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080)

Abstract

In order to decrease the interference to authorized users of cognitive radio networks and improve the energy detecting performance of the networks, a spectrum sensing algorithm that periodically detects authorized users by cooperative spectrum sensing is proposed in this paper. When using the algorithm, cognitive radio networks perform the sensing first and then the transmitting during each period, and after the presence of an authorized user is detected, the networks have to search another idle channel. To optimize the proposed cooperative spectrum sensing algorithm, a duplicate iterative optimization algorithm is given. The maximal throughput and the minimal searching time can be respectively obtained through the optimization of the local sensing time and the number of cooperative users. The simulation shows that the proposed algorithm has the lower computational quantity, and the throughput can increase by 6.3% and the searching time can decrease by 25% compared with the former algorithms under the signal noise ratio (SNR) being 5dB.

Key words: cognitive radio, cooperative spectrum sensing, energy detection, throughput, searching time