

单天线认知无线电中的协作频谱感知和无线能量传输

吕玉静, 宋志群, 刘玉涛

(中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050081)

摘要: 在单天线认知无线电中, 可以通过天线协作频谱检测来提高检测衰落信道中主用户 (Primary User, PU) 存在的传感性能; 然而, 由于协作频谱检测, 认知无线电 (Cognitive Radio, CR) 可能消耗更多的存储能量, 从而降低其传输性能; 为了保证其传输性能, 提出了一种同步协作频谱检测和无线能量传输的方案, 该方案可以收集 PU 信号的射频 (Radio Frequency, RF) 能量, 以提供频谱检测消耗的能量; 提出了时间分流模型、实现了协作频谱检测, 能量收集和数据传输的同步; 制定了适用于该方案的优化问题, 以最大化同步协作频谱检测和无线能量传输模型中认知无线电的频谱效率, 分别受限于检测的概率和收集的能量; 最后通过计算得到的最佳分配因子, 以实现了频谱效率的最大值, 并通过仿真得出了结论。

关键词: 单天线认知无线电; 协作频谱感知; 无线能量传输; 能量收集; 频谱效率

Simultaneous Cooperative Spectrum Sensing and Wireless Power Transfer in Single-antenna Cognitive Radio

Lü Yujing, Song Zhiqun, Liu Yutao

(The 54th Research Institute of CECT, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: In single-antenna cognitive radio, the sensing performance of the primary user (PU) in the fading channel can be improved by antenna cooperative spectrum detection. However, due to simultaneous cooperative spectrum sensing, CR may consume more storage energy, thereby reducing its transmission performance. In this paper, in order to ensure its transmission performance, a scheme of synchronous simultaneous cooperative spectrum sensing and wireless power transmission is proposed, which can harvest radio frequency (RF) energy of PU signals to provide energy consumed by spectrum detection. A time-division model is proposed to achieve collaborative spectrum detection, energy harvesting and data transmission synchronization. Optimization problems applicable to the scheme were developed to maximize the spectral efficiency of cognitive radio in the synchronous simultaneous cooperative spectrum sensing and wireless power transmission models, limited by the probability of detection and the energy collected. Finally, the optimal distribution factor is calculated to achieve the maximum spectral efficiency, and the conclusion is drawn through simulation.

Keywords: single-antenna cognitive radio; cooperative spectrum sensing; wireless power transfer; energy harvesting; spectrum efficiency

0 引言

随着用户对无线网络的数量和对无线服务和应用的需求的迅速增加, 有限的频谱资源和传统的静态频谱分配方法已经不能满足日益增长的无线网络需求。所以需要寻找更高效的技术即认知无线电技术, 来更好的应用频谱资源。认知无线电技术不需要改变现有的静态频谱分配策略, 可以利用频谱感知等方法确定授权频段的状态信息, 使认知无线电用户获得额外的频谱利用机会, 可以在保证授权用户通信质量的基础上提高频谱利用效率^[1]。

认知无线电系统可以在机会性地利用频谱资源的同时采集能量而不需要来自外部电网或电池的能量补充^[2-8]。在

认知无线网络中采用能量采集技术, 认知用户可以对自身的能量进行补充。由于频谱感知和传输数据都需要一定的时间, 所以认知无线电对能量进行采集的时间有限, 所以, 认知用户在一个时间周期内采集到的能量会非常有限, 因此, 需要对认知用户的数据传输需求、能量采集能力和频谱感知能力进行优化分配。文献 [9] 中, 针对授权用户和认知用户同时进行信息协作和能量采集的系统, 分别分析了理想协作、时间分配和功率分配三种情况下的系统性能。文献 [10] 通过对感知时间, 能量检测门限和行为模式进行联合优化, 选择出一组最合适的认知用户进行协同频谱感知, 使得认知无线电网的信道容量达到最大。文献 [11] 中认知用户采用功率分配的方式, 为授权用户传输数据, 同时对射频能量的信号进行采集, 在授权用户不受干扰的前提下, 对转发分配、子载波分配、功率分配和传输功率进行了联合优化。

频谱感知由于 AD 采样可能会消耗一些电路能量, 这可

收稿日期:2019-08-13; 修回日期:2019-08-29。

作者简介:吕玉静(1993-),女,河北石家庄人,在读硕士,主要从事无线通信技术方向的研究。

以减少用于数据传输的存储能量。传感能耗随着采样节点的增加而增加^[12]。因此,研究了绿色认知无线电以提高频谱感知的能量效率,即绿色认知无线电可以用更少的感知能量实现更高的感知性能^[13]。然而,仍会消耗存储的能量用于频谱感知。提出了一种能够收集附近信号的射频能量的无线能量传输技术。然后通过部署由带通滤波器、整流电路和低通滤波器组成的能量收集电路将射频能量转换为直流功率。直流电源不是固定电源^[14],其存储在通信系统的可充电电池中。认知无线电中使用无线能量传输技术来获取主用户信号的射频能量,并且所采集的能量可以补偿频谱感知带来的能量损失。然而,认知无线电不能同时实现频谱感知和能量收集。

研究了一种同时采集能量和过程信息的无线携能通信(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT)方法。已经提出时隙分配模型和功率分配模型来实现无线携能通信。在时隙分配模型中,能量收集和信息处理在不同的时隙中实现,而在功率分配模型中,利用不同的功率流执行能量收集和信息处理。基于无线携能通信,我们研究了协作频谱检测和无线携能通信。

本文通过单天线协作频谱感知技术,提出了一种用于多天线认知无线电的新型单天线认知无线电无线携能通信传输方案,以同时进行频谱检测、能量收集和数据传输。通过数学分析了单天线协作频谱检测,分别推导了其虚警概率和检测概率。研究了时间分流模型模型来实现单天线认知无线电无线能量传输,能量收集和频谱检测在同一天线中进行。

本文研究成果如下:

1) 提出了一种用于多天线认知无线电的新型协作频谱感知和无线能量传输方案,以同时进行频谱检测、能量收集和数据传输。通过数学分析了多天线协作频谱检测,分别推导了其虚警概率和检测概率。

2) 研究了时间分流模型来实现协作频谱感知和无线能量传输,能量收集和频谱检测在同一天线中进行,同时在天线分流模型中,设置能量收集和频谱感知在独立的天线中实现。

3) 制定了优化问题以使频谱最大化。在协作频谱感知和无线能量传输模型中,认知无线电的效率分别受到检测概率和采集能量的限制。已提出优化算法来解决所提出的优化问题。

本文的其余部分安排如下:系统模型在第 3 节中提出,其中分析了多天线协作频谱检测并描述了无线功率传输。然后分别描述和优化了时间分流协作频谱感知无线能量传输模型,系统性能在第 4 节中进行了仿真和讨论。最后,第 5 节中得出结论。

1 协作频谱感知

为了克服单节点频谱感知过程中的缺点,近年来,研究人员提出了多用户协作频谱感知技术。一方面可以提高

单节点检测的准确性,另一方面可以降低对认知用户的过度需求。多用户协作频谱感知使用空间分集接收技术,可以显著提高整个系统的检测性能。

其工作特征是将检测信息集成在同一频带的不同位置。在总体考虑之后,最终决定授权用户是否存在。在协作频谱感知的无线携能通信系统中,认知无线电可以同时执行协作频谱感知、无线能量传输和信息传输功能。因此,在传输过程中,可以避免对主用户的干扰,并且可以使用所收集的能量来提供传输能量。

协作频谱感知是一种认知用户共同参与检测的感知模式。在将本地用户的感知数据收集到融合中心后,进行加权融合以获得判决统计,然后进行判决。图 1 是协作频谱感知的网络结构图,包括 M 个次用户,一个主用户信号和一个融合中心。因此,第 i 个接收信号可表示为:

$$\begin{cases} x_i(n) = w_i(n) & H_0 \\ x_i(n) = h_i s(n) + w_i(n) & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N$, N 为采样点数; $s(n)$ 表示 PU 用户的发送信号, h_i 为信道增益, $w_i(n)$ 为独立同分布的 AWGN, 假设其均值为 0, 方差为 σ_w^2 。

PU 信号和噪声信号独立。

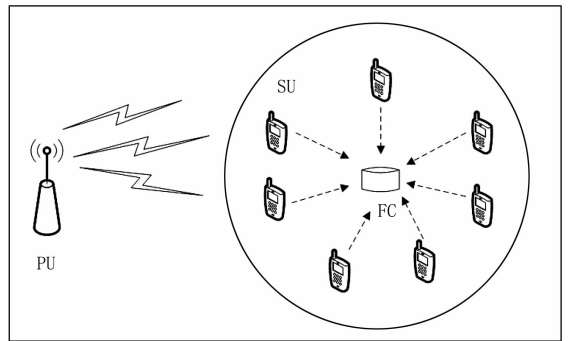


图 1 协作频谱感知网络结构图

检验统计量由下式得到:

$$\begin{cases} X \sim N(MN\sigma_w^2, 2MN\sigma_w^4) & H_0 \\ X \sim N(MN(1 + \gamma)\sigma_w^2, 2MN(1 + \gamma)^2\sigma_w^4) & H_1 \end{cases} \quad (2)$$

其中: $N(\mu, \sigma^2)$ 是均值为 μ , 方差为 σ^2 的高斯分布, γ 为信噪比, 用 λ_s 表示判决门限, 因此虚警概率和检测概率可分别表示为:

$$p_f^{soft} = Q\left(\frac{\lambda_s - MN\sigma_w^2}{\sqrt{2MN\sigma_w^4}}\right) \quad (3)$$

$$p_d^{soft} = Q\left(\frac{\lambda_s - MN(1 + \gamma)\sigma_w^2}{\sqrt{2MN(1 + \gamma)^2\sigma_w^4}}\right) \quad (4)$$

部署具有单天线的认知无线电系统和一个天线通信的主用户系统, 假设认知无线电系统通过单天线感知 PU 系统。如图 2 所示, 每个天线首先独立地感知 PU 系统并得到 PU 的能量检测统计值, 然后将感知到的所有能量统计值融合得到融合统计值, 通过检测融合统计值来判断主用户存在与否。

认知无线电系统具有单天线协作频谱检测和能量收集

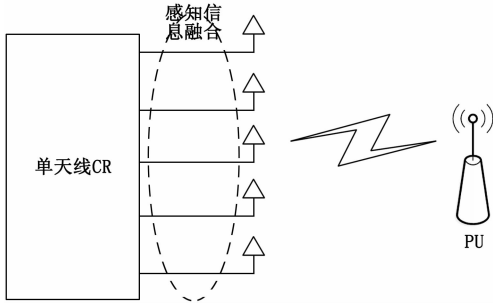


图 2 单天线协作频谱检测

功能。本文中, 单天线协作频谱检测用于检测主用户的存在, 其中的天线通过能量检测来检测主用户, 并且通过组合所有检测天线的检测结果来做出最终决定。天线的能量检测可以看作如下的二元假设问题:

$$y(m) = \begin{cases} h(m)s(m) + n(m), & H_1 \\ n(m), & H_0 \end{cases}, m = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

其中: $y(m)$ 是接收信号样本, $s(m)$ 是 PU 信号样本, $n(m)$ 是噪声样本, $h(m)$ 是 PU 和 SU 之间的信道增益, M 是采样节点的数量; H_0 和 H_1 分别表示 PU 的缺失和存在。 $P(H_0)$ 和 $P(H_1)$ 是 H_0 和 H_1 的概率, 满足:

$$P(H_0) + P(H_1) = 1 \quad (6)$$

假设检测时间为 T 且采样频率为 f_s , 有:

$$M = Tf_s \quad (7)$$

接收信号的能量统计如下:

$$\Gamma(y) = \frac{\sum_{m=1}^M \|y(m)\|^2}{M} \quad (8)$$

当 M 很大时, $\Gamma(y)$ 遵循如下的高斯分布:

$$\Gamma(y) \sim \begin{cases} N\left((1+y)\sigma_n^2, \frac{(1+y^2)\sigma_n^4}{M}\right), & H_1 \\ N\left(\sigma_n^2, \frac{\sigma_n^4}{M}\right), & H_0 \end{cases} \quad (9)$$

其中: σ_n^2 是噪声功率,

$$\gamma = \frac{\|s(m)\|^2 \|h(m)\|^2}{\|n(m)\|^2} \quad (10)$$

$\|n(m)\|^2$ 是 PSNR, 能量检测通过将能量统计与预定阈值 λ 进行比较来获得决策。检测概率和虚警概率分别如下给出:

$$P_d = P_r(\Gamma(y) > \lambda | H_1) = Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_n^2} - \rho\gamma - 1\right)\sqrt{\frac{Tf_s}{(1+\gamma)^2}}\right) \quad (11)$$

$$P_f = P_r(\Gamma(y) > \lambda | H_0) = Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_n^2} - 1\right)\sqrt{Tf_s}\right) \quad (12)$$

其中函数 $Q(x)$ 为:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{+\infty} \exp\left(-\frac{\omega^2}{2}\right) d\omega \quad (13)$$

协作频谱检测的检测概率和虚警概率如下:

$$P_d = Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_n^2} - \rho\gamma - 1\right)\sqrt{\frac{Tf_s}{(1+\rho\gamma)^2}}\right) \quad (14)$$

$$P_f = Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_n^2} - 1\right)\sqrt{Tf_s}\right) \quad (15)$$

其中: γ 是 N 个子信道的平均 PSNR。选取合适的门限可以有效提高系统的传输性能, 如果门限选取过高, 虽然检测概率较低, 但是相应的虚警概率也会降低, 如果门限选取过低, 虽然检测概率较高, 但是虚警概率也会很高。因此, 我们选取门限力求最小化总的错误概率, 即:

$$\lambda = \operatorname{argmin} P_e = \zeta(1 - Q_d) + Q_f \quad (16)$$

2 无线能量传输

在一个传输速率为时变的无线通信系统中, 其中此系统为单信道的。在本系统中, 发送端为了达到所需的信息传输速率 R_{p_i} , 可以令发送端在不同的时间 t 设置不同的发送功率 p_i 。其中, 传输速率和发送功率的关系函数, 此函数为凹函数, 且为非负的单调递增函数。此函数可在加性高斯白噪声 (AWGN) 信道中适用。在本文的系统模型中, 暂不考虑其他形式的能量消耗和干扰。

若假设 $r(\cdot) = g(p)$, 则此函数需满足以下几个条件:

- 1) $g(0) = 0$, 当 $p \rightarrow \infty$ 时, $g(p) \rightarrow \infty$
- 2) $g(p)$ 为单调递增函数
- 3) $g(p)/p$ 为关于 p 的单调递增函数, $g(p)$ 为凹函数
- 4) $g(p)$ 连续可微。

假定在某一时刻信息发送功率和传输速率的关系为:

$$g(p) = \frac{1}{2} \log_2(1 + p) \quad (17)$$

的加性高斯白噪声信道中。

在时间分配模式中, 假设一定比例 ρ 的时间分配给信息解码器用于信息的解码, 剩余比例 $(1 - \rho)$ 的时间分配给能量采集器用于能量采集。用 v 和 $h(v)$ 分别表示衰落信道状态和功率增益, 假设在任何衰落信道状态 v , 信道功率增益 $h(v)$ 是完全已知, 所有载波分配的功率之和表示为 P 。考虑慢衰落情况, 在这一过程中, 所有的信道系数都假定为常数。在无线携能通信系统接收机上, 噪声会影响每个载波上接收到的信号, 这种噪声可以建模为一种加性高斯白噪声 (AWGN), 该随机变量均值为零、方差是 σ^2 , 整体分布为正态分布。这样一来, 发射端和接收端之间的信息速率可以表示为:

$$R_{TS}(v) = \rho(v) \log_2\left(1 + \frac{h(v)P(v)}{\sigma^2}\right) \quad (18)$$

接收端采集的能量可以表示为:

$$Q_{TS}(v) = (1 - \rho(v))h(v)P(v) \quad (19)$$

时间分配方法严格意义上并没有实现信息和能量的同时传输, 因为其在时域上对信号进行了分流, 在某些时间将接收到的信号全部用于解码信息或者采集能量。相比于功率分配方法, 时间分配器比功率分配器的硬件实现更为容易, 而且信息解码器和能量采集器可以在不同的功率敏感度下进行工作。

3 系统模型

在单天线认知无线电无线携能通信系统中, CR 可以同

时执行协作频谱检测，无线功率传输和数据传输。因此，在传输过程中，可以避免对 PU 的干扰，并且可以使用所收集的能量来提供传输能量，下面对时间分流模型进行研究。

在时隙分配模型中，针对单天线用于协作频谱检测和无线能量传输的模式，如图 3 所示。假设 ρ 是分配因子，将感知和收集能量分成 ρ 和 $1-\rho$ 两部分，在一个时间周期 T 内，天线首先在时间 τ 内感知和收集能量，然后在时间 $T-\tau$ 内传输信息，检测概率和虚警概率与 ρ 有关，如下给出：

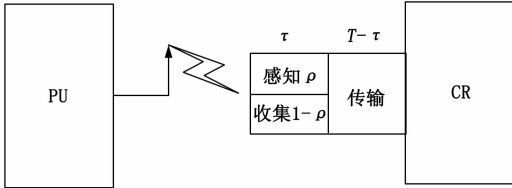


图 3 时间分流模型示意图

$$P_d = Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_n^2} - \rho\gamma - 1\right)\sqrt{\frac{Tf_s}{(1+\rho\gamma)^2}}\right) \quad (20)$$

$$P_f = Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_n^2} - 1\right)\sqrt{Tf_s}\right) \quad (21)$$

仅当准确地检测到 PU 缺失时，SU 才能发送数据。检测到的缺失概率由 $(1-P_f)P(H_0)$ 表示。

天线的总采集的功率如下给出：

$$P_H = \mu(1+P(H_1)\gamma)(1-\rho)\sigma_n^2 \quad (22)$$

目标是最大化 CR 的频谱效率，受限于检测概率高于下限并且收集的能量高于检测能量。然后给出优化问题：

$$\begin{aligned} \max \quad & \frac{T-\tau}{T}(1-P_f)P(H_0) \\ \text{s. t.} \quad & P_d \geq \alpha \\ & P_H \geq P_S \\ & 0 \leq \tau \leq T \end{aligned} \quad (23)$$

其中： α 是检测概率的下限。

为了解决优化问题 (23)，给出以下定理：

定理 1：目标函数 Φ ，只有在 $P_d = \alpha$ 时才能达到最大值。

证明 1：从 (19) 可以看出， P_f 可以用 P_d 表示如下：

$$P_f = Q(Q^{-1}(P_d)(1+\rho\gamma) + \rho\gamma\sqrt{Tf_s}) \quad (24)$$

注意到 $Q(x)$ 是单调递减函数，公式 (24) 表示 Q_f 随着 Q_d 的减小而减小，即当 Q_d 等于下限时，可以实现 Q_f 的最小值。由于当 Q_f 减小时， R 增加，所以当 $Q_d = \alpha$ 时可以取得 R 的最大值。那么 R 的最大值由下式给出：

$$R = \frac{T-\tau}{T}(1-P_f)P(H_0) =$$

$$\frac{T-\tau}{T}(1-Q(Q^{-1}(\alpha)(1+\rho\gamma) + \rho\gamma\sqrt{Tf_s})P(H_0)) \quad (25)$$

从 $P_H \geq P_S$ ，我们可以得到 $\rho \leq \rho_{\max}$ ，其中 ρ_{\max} 如下给出：

$$\rho_{\max} = \frac{\mu(1+P(H_1)\gamma)(1-\rho)\sigma_n^2}{\mu(1+P(H_1)(1-\rho)\gamma)\sigma_n^2 + P_S f_s} \quad (26)$$

当 $\rho = \rho_{\max}$ 时， R 可以达到最大值。因此，优化问题被重新定义如下：

$$\begin{aligned} \max R &= \max \frac{T-\tau}{T}(1-P_f)P(H_0) = \\ \max \frac{T-\tau}{T}(1-Q(Q^{-1}(\alpha)(1+\rho\gamma) + \rho\gamma\sqrt{Tf_s})P(H_0)) \end{aligned} \quad (27)$$

4 仿真和分析

在仿真中，传输时间为 $T=10$ s，采样频率为 $f_s=100$ Hz，PU 的存在概率为 $P(H_1) = 0.5$ ，每个采样节点的感知功率为 $P_s=0.01$ mW，噪声功率为 $\sigma_n^2=1$ mW。该信道服从 Rayleigh 分布。假设转换率 $\mu=0.1$ ，将 μ 的值代入 ρ_{\max} 的表达式中经过计算和采用二分法对 ρ_{\max} 进行计算，可得此时 $\rho = \rho_{\max} = 0.5$ 。

图 4 所示结果为，在时隙分配模型中，单天线的频谱效率随着时间 t 变化的规律。在一个时间周期 T 中，检测天线的频谱效率在一个检测周期 T 中，随着时间的增加而减小。

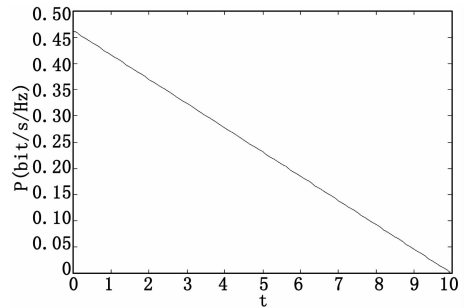


图 4 时间分流模型中检测天线的频谱效率

如图 5，为检测天线的频谱效率 R 对 $\alpha = [0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9]$ 的检测结果。可以看出随着 α 减小， R 增加。表示当检测概率 α 达到最小值时，可得 R 最大。因此，本结果证明了定理 1 的正确性。

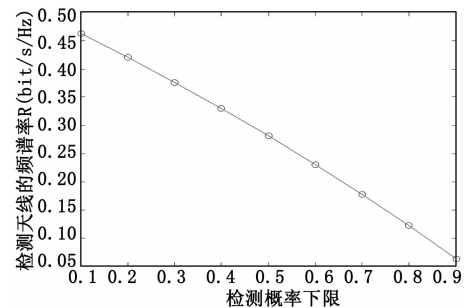


图 5 检测天线的频谱效率随检测概率的变化

5 结论

本文提出了一种用于单天线认知无线电的新型同步协作频谱检测和无线功率传输方案，以同时执行频谱检测、能量收集和数据传输。然后，根据检测概率和收集能量的约束，制定了优化问题，以最大化三个同步协作频谱检测和无线功率传输模型中认知无线电的频谱效率。从仿真中，我们可以得出：当收集的能量等于检测的能量时，可得出功率分配因子的最大值为 $\rho = \rho_{\max} = 0.5$ ，同时，由仿真分

(下转第 201 页)