

基于二分法迭代的频谱感知节能优化策略

陈长兴¹, 林 兴¹✉, 任晓岳¹, 王晓东¹, 杨 牧¹, 曾 志²

(1. 空军工程大学理学院, 西安, 710051; 2. 北京奇虎科技有限公司, 北京, 100088)

摘要 针对认知无线电(CR)系统中频谱感知技术能量效率低的问题,提出了一种基于二分法迭代寻优的联合优化算法。该算法通过联合传输功率与感知时隙进行优化,最大化地提高了CR系统的能量效率,并且在针对优化参数 ξ 的寻优过程中,使用了二分法与迭代算法结合的寻优方法。通过理论分析,与其他类似算法相比,该算法的寻优速度更快,算法复杂度更低,函数收敛速度更快,实际应用的可扩展性更强。数值仿真分析结果表明,在保证检测性能的前提下,提出的算法能够很好地解决能效的最优化问题,在恒定检测概率 $\hat{P}_d = 0.9$ 和 $\hat{P}_d = 0.7$ 条件下,所提出算法的能耗开销均低于其他算法,在系统吞吐量中所提出算法均优于其他算法,为CR系统的发展提供了理论支撑,更加符合未来CR系统的节能发展方向。

关键词 认知无线电; 频谱感知; 能量效率; 二分法; 迭代

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.05.011

中图分类号 TN925 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)05-0061-06

An Optimization Strategy of Energy Efficient in Spectrum Sensing Based on Bisection and Iteration

CHEN Changxing¹, LIN Xing¹✉, REN Xiaoyue¹, WANG Xiaodong¹, YANG Mu¹, ZENG Zhi²

(1. Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Qihoo of Beijing Science and Technology Co. Ltd, Beijing 100088, China)

Abstract: Aimed at the problem that energy efficiency of spectrum sensing is low in cognitive radio (CR) system, a joint optimization algorithm based on bisection and iteration is proposed. This algorithm sharply raises the energy efficiency of CR system by jointing transmitting power and sensing slot to reach the optimization. And in the process of optimizing parameter ξ , the methods of bisection and iteration are jointed to reach the optimization. Through theoretical analysis, compared to other algorithms, this algorithm is faster at optimization speed, lower in complexity, faster at function convergence speed and larger in space for extension in application. The results of numerical simulation show that under condition of provided detection performance, the proposed algorithm can deal with the optimization of energy efficiency well. Under conditions of the constant detection probability of $\hat{P}_d = 0.9$ and $\hat{P}_d = 0.7$, energy consumption of the proposed algorithm is lower than that of others, and the algorithm in system throughput is superior to others. This provides a theory support to CR system development, and is more in line with the energy-saving

收稿日期: 2017-03-28

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2014JM8344)

作者简介: 陈长兴(1964—),男,河北保定人,教授,博士生导师,主要从事信号与信息处理等方面的研究. E-mail:349913314@qq.com

通信作者: 林 兴(1993—),男,四川德阳人,硕士生,主要从事认知无线电频谱感知节能技术与安全问题研究. E-mail:779659127@qq.com

引用格式: 陈长兴, 林兴, 任晓岳, 等. 基于二分法迭代的频谱感知节能优化策略[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(5): 61-66. CHEN Changxing, LIN Xing, REN Xiaoyue, et al. An Optimization Strategy of Energy Efficient in Spectrum Sensing Based on Bisection and Iteration [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(5): 61-66.

trend for CR system development in the future.

Key words: cognitive radio; spectrum sensing; energy efficient; bisection; iterative

随着无线电通信技术的快速发展,人们对于频谱资源的需求不断增加。但是可用的频谱资源是有限的自然资源,频谱资源紧缺成为目前通信界的一个挑战^[1-2]。面对着这种矛盾,认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术就在这样的情况下应运而生^[3-4]。频谱感知技术作为实现CR技术最重要的前提,它决定整个CR系统的性能优劣。随着无源设备技术的发展,传感网络设备的能量消耗问题受到了通信行业的关注,比如用电池供电的传感设备,就必须考虑确保感知性能的前提下提高认知系统的能耗问题^[5-6]。

针对频谱感知传感通信设备能耗这一热门问题,在文献[7~8]中作者在迭代算法中使用黄金搜索方法来确定了最优传输功率,在混合频谱共享方案中最大化CR电系统的能量效率;在文献[9]中作者在基于正交频分复用(OFDM)的CR传输系统中,在主用户(Primary User, PU)允许的最大干扰功率内,对功率分配进行了优化,最大限度地提高能源效率;在文献[10~11]中作者提出了一种基于OFDM的CR电系统的自适应算法,在总传输功率和最大干扰电平约束条件下对功率分配进行了优化,最大限度地提高能源效率;文献[12~13]中作者针对CR系统推导出功率自适应方案,基于此提出了一种迭代算法,以确定最佳的功率分配,在峰值平均传输功率和干扰约束下最大限度地提高能源效率。但是在文献[7~13]针对CR系统的能源效率问题,没有确定最佳的持续感知时隙,然而持续感知时隙也是频谱感知技术能量开销的重要参数指标。联合最佳的传输功率和感知时隙来最大限度地提高能源效率在文献[14]中被提出,在文献中提出的2种算法有不同的算法复杂度的要求,以确定频谱感知的CR系统中联合最佳传输功率和传感持续时间的能源效率。

在本文中,我们联合优化了传输功率和感知时隙,来使能量效率达到最大(最佳共作点)。本文与文献[14]有2项主要的区别:首先,我们制定的联合优化问题作为一个问题,而在文献[14]优化问题是分为2个主要的子问题,换句话说,我们提出了一种二分法迭代寻优算法,该算法显著地降低了解决联合优化问题的复杂性。其次,对CR传输用户服务质量(QoS)的保证,我们考虑PU业务活跃量和在次级用户(Second User, SU)传输期间的再用信道概率,而在文献[14]中SU传输中断概率被作为

QoS的度量。最后通过理论分析和系统仿真验证了本文提出的方法在确保检测性能的前提下降低了能量开销,提高了能量效率。

1 系统模型的建立与模型数学化

1.1 系统模型

假设一个CR系统中只有1个PU和N个SU_s,每个固定帧时隙长度为 τ ,SU将感知PU没有使用的一些频谱空穴^[15]。固定帧时隙 τ 由感知时隙 τ_s 和数据传输时隙 τ_t 组成,即 $\tau = \tau_s + \tau_t$,其结构图见图1。SU通过对频谱的监测,当PU没有使用其授权频段,SU则决定开始传送其数据通过该授权频段,反之如果PU正在使用该频段的话,SU则选择保持静默状态。但是当SU在数据传输时隙 τ_t 内正在传输数据时,PU有可能突然到达活跃状态,这将导致对PU自身的通信质量被干扰。因此PU的用户活跃度必须被考虑。本文假设PU的活跃状态周期(即繁忙Busy“b”,空闲Idle“i”)分别为呈平均值为‘ a_b ’和‘ a_i ’的指数分布。2种状态的概率密度函数分别表示为:

$$\begin{cases} f_i(t) = \frac{1}{a_i} \exp\left(-\frac{t}{a_i}\right) \\ f_b(t) = \frac{1}{a_b} \exp\left(-\frac{t}{a_b}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f_i(t)$ 和 $f_b(t)$ 是PU空闲与繁忙的概率密度函数,其中 $t \geq 0$ 。

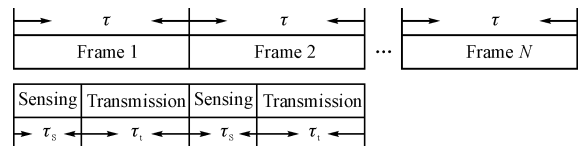


图1 认知无线网络帧结构

Fig. 1 The frame structure in CRN

因此,PU的繁忙概率 P_b 和空闲概率 P_i 能够很容易的计算出来。那么,当SU正在通过该频段传输数据的时候,PU可能开始重新活跃的概率 P_r 可以表示为^[16]:

$$P_r(t_t) = \int_{t=0}^{t_t} f_i(t) dt = 1 - \exp\left(-\frac{t_t}{a_i}\right) \quad (2)$$

在一般情况下,如果SU正确地检测到PU没有使用其授权频段,则其就会选择传输数据通过该频段,其概率为 $P_i(1 - P_r)$,如果其错误地检测到PU正在使用其授权频段进行通信,而其也会选择传输数据通过该频段,对PU造成通信干扰,其概率

为 $P_b(1-P_d)$, 其中 P_f 是 CR 系统的虚警概率, P_d 是 CR 系统的检测概率。此外, 如果 SU 正确地检测到 PU 正在使用其授权频段, 则其就会选择保持静默状态, 其概率为 $P_b P_d$, 反之, 如果 SU 错误地检测到 PU 没有使用其授权频段, 则其也会选择保持静默状态, 其概率为 $P_f P_f$ 。

1.2 模型数学公式化

本文的最大目标就是联合优化传输功率和感知时隙, 在保证 PU 和 SU 的通信质量的前提下, 来最大限度地提高 CR 系统的能量效率。为了数学模型简化所提出的问题, 我们考虑整个系统的吞吐量, 将其定义为:

$$T(\tau_s, \eta_t) = P_i C_0 \tau_t (1 - P_f(\tau_s))(1 - P_r(\tau_t)) \quad (3)$$

式中: η_t 是 SU 的信息传输功率; C_0 是 SU 在数据传输时隙 τ_t 过程中传输数据的容量。其可以通过香农公式^[17]进行计算—— $C_0 = B \log(1 + \eta_t/\sigma)$ 。其中 B 是信道带宽, σ 是传输信道中的噪声功率。所以在整个感知与传输过程中的总能量消耗表示为:

$$E(\tau_s, \eta_t) = \tau_s \eta_s + (P_i(1 - P_f) + P_b(1 - P_d)) \eta_t \tau_t \quad (4)$$

式中: η_s 是感知阶段的功率。则本文的目标数学模型——能效函数 $\Gamma(\ast)$ 的表达式可表示为:

$$\Gamma(\tau_s, \eta_t) = \frac{T(\tau_s, \eta_t)}{E(\tau_s, \eta_t)} \quad (5)$$

本文最主要的目的就是将系统的能量效率最大化, 达到能量的充分利用, 所以通过式(5), 我们可以通过对感知时隙 τ_s 和传输功率 η_t 进行优化, 联合找出最优解, 使能效函数达到最大值。因此, 通过这一思路, 我们可以构造出该问题的数学模型:

$$\max \Gamma(\tau_s, \eta_t), \text{subject} \begin{cases} \eta_{\min} \leq \eta_t \leq \eta_{\max} \\ 0 \leq \tau_s \leq \tau \\ P_r(\tau_t) \leq \epsilon \\ P_d \geq \hat{P}_d \end{cases} \quad (6)$$

式中: ϵ 为 PU 允许的最大干扰门限; \hat{P}_d 是系统要求的最小检测概率; η_{\max} 和 η_{\min} 分别为传输功率的最大值和最小值。

2 基于二分法迭代寻优能效优化算法

假设 SU 是通过能量检测方法^[18-19]来感知 PU 是否存在。我们首先对能效函数所给定的约束条件进行分析, 这里我们假设 $\tau_s = \xi \tau$, 则 $\tau_d = (1 - \xi)\tau$, 其中 ξ 是表示 τ_s 与 τ 的比值, 且 $\xi \in [0, 1]$ 。这个假设针对能效函数的优化是很有帮助的, 因为这两点原因: ①因为这个假设显著地降低了感知时隙 τ_s , 使其

达到了最佳感知时隙, 提高了收敛速度, 能够快速确定最佳工作点; ②因为其通过优化施加到能效函数的约束条件, 使其最小化, 这减少了解决优化问题的复杂度, 因此, 它使该算法比现有的算法的复杂度更简单。虚警概率 P_f 可以被 ξ 来表示:

$$P_f(\xi) = Q(\sqrt{2\gamma + 1}Q^{-1}(\hat{P}_d) + \gamma \sqrt{f_s \tau \xi}) \quad (7)$$

式中: γ 是 PU 通过传输信道的平均信噪比 (AS-NR); f_s 是能量检测的采样频率; $Q(\ast)$ 是 Q 函数。 $P_f(\xi)$ 很容易被证明是关于 ξ 的凸函数, 即 $\dot{P}_f(\xi) < 0$, $\ddot{P}_f(\xi) > 0$, 其中 $\dot{P}_f(\xi)$ 和 $\ddot{P}_f(\xi)$ 分别为 $P_f(\xi)$ 关于 ξ 的一阶函数和二阶函数^[20]。

ξ 的积分区间, 即 $\xi \in [\xi_{\min}, \xi_{\max}]$ 可以被定义为:

①通过令 $P_f(\xi) < 0.5$, 则下界 ξ_{\min} 可以被定义为 $\xi_{\min} = \left[\frac{\sqrt{1+2\gamma}Q^{-1}(\hat{P}_d)}{\gamma \sqrt{f_s \tau}} \right]^2$; ②通过式(6)的第 2 个约束

条件, 则上界 ξ_{\max} 可以被定义为 $\xi_{\max} = 1 + \frac{a_i}{\tau} \log(1 - \epsilon)$ 。此外根据 IEEE 802.22 标准^[21], 在任何无线电传输条件下, 第 1 个约束条件总是赋予 SU 的检测概率 $P_d(\xi)$ 恒等于 \hat{P}_d 。显然地, $(1 - \hat{P}_d)$ 项可以被忽略, 因为这些差异是可以被忽略不计的。因此, 近似能量消耗 \hat{E} 可以被 ξ 和 η_t 表达出闭合表达式:

$$\hat{E}(\xi, \eta_t) = \xi \tau \eta_s + \eta_t P_i (1 - P_f(\xi))(1 - \xi) \tau \quad (8)$$

而系统吞吐量 $T(\xi, \eta_t)$ 能够被 ξ 和 η_t 表达出闭合表达式:

$$T(\xi, \eta_t) = P_i C_0 (1 - \xi) \tau (1 - P_f(\xi)) \exp\left(\frac{-(1 - \xi)\tau}{a_i}\right) \quad (9)$$

因此, 近似的能效函数 $\hat{\Gamma}$ 能被计算成 $\hat{\Gamma}(\xi, \eta_t) = \frac{T(\xi, \eta_t)}{\hat{E}(\xi, \eta_t)}$ 。所以, 式(6)优化问题可以被换成关于 ξ 和 η_t 的问题:

$$\max \hat{\Gamma}(\xi, \eta_t), \text{subject} \begin{cases} \eta_{\min} \leq \eta_t \leq \eta_{\max} \\ \xi_{\min} \leq \xi \leq \xi_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

从式(10)中可以看出, 采用参数 ξ 可以减少求解优化问题的复杂性, 因为其最小化了约束条件, 比起式(6)的 4 个条件, 减少到了只有 2 个约束条件, 这将明显使得优化问题变得更加简单。

本文提出的二分法迭代寻优算法来确定联合优化 η_t 和 ξ 的最优值 η_0 和 ξ_0 , 使得 $\hat{\Gamma}(\xi, \eta_t)$ 得到最大值。二分法可以在任何给定 η_t 参数值的情况下, 定量地确定使 $\hat{\Gamma}(\xi, \eta_t)$ 最大的参数值 η_0 , 并且在算法中二分法被表示为 $\text{bisect}(f(t), t_1, t_2)$, 式中 $f(t)$ 是一类最原始定义的函数, 而 t_1 和 t_2 上述函数的时间序列的上下界。

二分法迭代寻优算法如下:

初始化: $\tau, \gamma, \hat{P}_d, a_i, a_b, \varepsilon, f_s, \eta_s, \eta_{\min}, \eta_{\max}, B, \delta$

计算: $\hat{\xi}_{\min}, \hat{\xi}_{\max}, P_i, P_b$

令: $\eta_1 = \eta_{\max}$

二分法计算 $\hat{\eta}_1 = \text{bisect}(\hat{\Gamma}(\xi, \eta_1), \hat{\xi}_{\min}, \hat{\xi}_{\max})$

令: $\hat{\xi}_{\max} = \hat{\xi}_1 \quad \eta_2 = \eta_{\min}$

二分法计算 $\hat{\eta}_2 = \text{bisect}(\hat{\Gamma}(\xi, \eta_2), \hat{\xi}_{\min}, \hat{\xi}_{\max})$

令: $\hat{\xi}_{\min} = \hat{\xi}_2 \quad k=2$

循环迭代

While ($|\hat{\Gamma}(\hat{\xi}_k, \eta_k) - \hat{\Gamma}(\hat{\xi}_{k-1}, \eta_{k-1})| > \delta$)

do $k=k+1 \quad \eta_k = (\eta_{\max} + \eta_{\min})/2$

$\hat{\eta}_k = \text{bisect}(\hat{\Gamma}(\xi, \eta_k), \hat{\xi}_{\min}, \hat{\xi}_{\max})$

if $\hat{\Gamma}(\xi, \eta_k) < 0$

then $\eta_{\max} = \eta_k \quad \hat{\xi}_{\max} = \hat{\xi}_k$

end if

end while

Return $\eta_0 = \eta_k, \xi_0 = \hat{\xi}_k \quad \Gamma_{\max} = \hat{\Gamma}(\xi_0, \eta_0)$

3 算法性能与复杂度分析

从上述的二分迭代寻优算法中明确可以看出, 在最优的参数 ξ_0 时, 该算法大大的降低了感知时隙, 加快了算法的收敛速度。该算法结合了二分法和区间半分寻优法, 以联合统一的确定 η_0 和 ξ_0 的值。这种联合计算方式有效地降低了算法的计算复杂度和增加找到最佳工作点 (ξ_0, η_0) 的处理速度。并且该算法通过了分别由 η_{\max} 和 η_{\min} 确定的 $\hat{\xi}_1$ 和 $\hat{\xi}_2$, 从根本上降低了时间序列的上下限。此外, 该算法是基于文献[20]和[22]中当传输功率 η_t 增加时, 最优感知时隙 τ_s 也会随之增加这样一个事实而设置。最优参数 $\hat{\xi}$ 与传输功率 η_t 的关系曲线见图 2, 从图中可以看出随着传输功率 η_t 的增加, 所相应的最优参数 $\hat{\xi}$ 也会随之增加, 说明了所提出算法的有效性和准确性。

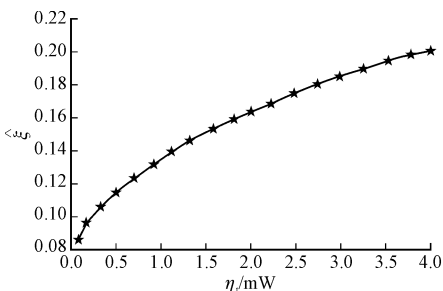


图 2 最优参数 $\hat{\xi}$ 与传输功率 η_t 的关系曲线

Fig. 2 The relationship curve of optimized parameter $\hat{\xi}$ and transmitting power η

二分法迭代寻优算法前 6 次允许的结果见表 1, $\hat{\xi}_k$ 所属的区间在每一个 k 次迭代都有所减小。从表中看出在每次迭代中, 所提出的算法有效地降低了初始传输功率 η_t 和参数 ξ_0 的值。这证明了所提出算法的优点, 与文献[14]和[20]相比, 大大降低了计算复杂度的算法, 并收敛速度更快, 缩减了感知时隙 τ_s , 降低了能量开销。

表 1 使用二分法迭代寻优算法各 η 所对应的 $\hat{\xi}_k$

Tab. 1 Corresponding $\hat{\xi}_k$ to each η by using bisection and iteration

k	$\eta_k (N)$	$\hat{\xi}_k$
1	$\eta_{\max} = 4$	$\hat{\xi}_1 \in [\hat{\xi}_{\min}, \hat{\xi}_{\max}]$
2	$\eta_{\min} = 0.01$	$\hat{\xi}_2 \in [\hat{\xi}_{\min}, \hat{\xi}_1]$
3	$\eta_3 = \frac{\eta_{\min} + \eta_{\max}}{2} = 2.12$	$\hat{\xi}_3 \in [\hat{\xi}_2, \hat{\xi}_1]$
4	$\eta_4 = \frac{\eta_{\min} + \eta_3}{2} = 1.525$	$\hat{\xi}_4 \in [\hat{\xi}_2, \hat{\xi}_3]$
5	$\eta_5 = \frac{\eta_4 + \eta_3}{2} = 1.3145$	$\hat{\xi}_5 \in [\hat{\xi}_4, \hat{\xi}_3]$
6	$\eta_6 = \frac{\eta_4 + \eta_5}{2} = 1.063$	$\hat{\xi}_6 \in [\hat{\xi}_4, \hat{\xi}_5]$

为了比较所提出的算法与现有的工程在计算复杂度, 假设所有的算法具有相同的仿真参数。设 δ_θ 为参数步长, 因此针对参数 ξ 所需的采样步数为: $X = \left(\frac{\hat{\xi}_{\max} - \hat{\xi}_{\min}}{\delta_\theta} \right)$; 类似的, 设 δ_η 为传输功率步长, 因此针对功率 η 所需的采样步数为: $Y = \left(\frac{\eta_{\max} - \eta_{\min}}{\delta_\eta} \right)$ 。各个算法的复杂度见表 2, 穷举搜索算法的复杂度为 $O(XY)$, 而线性搜索算法的复杂度则为 $O(X \log_2 X) + O(Y \log_2 Y)$ 。而本文所提出的算法是根据二分法和半区间寻优法所结合的, 半区间搜索算法与二分法搜索算法的复杂度见表 2。

表 2 算法复杂度

Tab. 2 Algorithm complexity

算法	复杂度
半区间搜索算法	$O(\log_2(X))$
二分法搜索算法	$O(\log_2(Y))$
穷举搜索算法	$O(XY)$
线性搜索算法	$O(X \log_2 X) + O(Y \log_2 Y)$
二分法迭代寻优算法	$O(\log_2(X) \log_2(Y))$

表 2 中, 二分法迭代寻优算法的复杂度最差为 $O(\log_2(X) \log_2(Y))$ 。从表中明显看出该算法比起文献[11]中的线性搜索算法和穷举搜索算法具有更小的复杂度。此外, 在该算法中, 在每 k 次迭代中区

间范围减小,表明该算法可显著减少了二分法的迭代次数,从而减少了该算法的计算复杂度。

4 仿真与结果分析

为了验证所提出算法的有效性,用 Matlab 仿真软件平台对提出的算法与已提出的算法进行对比分析,采用蒙特卡罗方法进行仿真。仿真环境参数设置:假设只存在一个 PU, 30 个 SU_s, 并且 SU 随机的分布在 5 km×5 km 的区域内, PU 也随机的在这区域内,在加性高斯白噪声环境下仿真次数为 2 000 次,采用点数为 600。各个参数的设定: $\hat{P}_d = 0.9$, $\tau = 160$ ms, $\epsilon = 0.125$, $a_i = 0.65$ s, $a_b = 0.365$ s, $f_s = 5$ MHz, $\lambda = -15$ dB, $\eta_s = 0.2$ W, $\eta_{\max} = 5$ W, $\eta_{\min} = 0.01$ W, $\sigma = 0.25$ W, $\hat{P}_f = 0.12$ 。

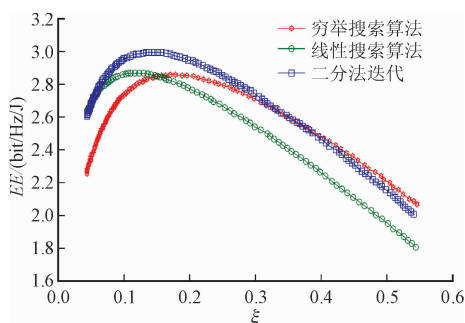


图3 参数 ξ 与能效 EE 的关系曲线图

Fig. 3 The relationship curve about parameter ξ and energy efficient EE

图3为3种算法下参数 ξ 与能效的关系性能曲线图。从图中可以明显看出,3种算法是关于参数 ξ 凸函数,即随着参数 ξ 的增大而先增大而后减小,在区间内都有能效最大值,并且大致可以从图中看出穷举搜索算法在 $\xi \approx 0.183$ 时,能效取得最大值 $EE \approx 2.835$;线性搜索算法在 $\xi \approx 0.113$ 时,能效取得最大值 $EE \approx 2.841$;而本文所提出的二分迭代寻优算法在 $\xi \approx 0.151$ 时,能效取得最大值 $EE \approx 3.06$ 。则可以很直观的看出通过二分迭代寻优算法得出的能效最优值比其他2种算法得出的结果更优,主要是由于该算法进行了参数的优化和二分法使得函数的收敛性相对于其他算法速度更快。由此,本文提出的算法提高了CR系统的能量效率。

图4为3种算法分别在恒定检测概率 $\hat{P}_d = 0.9$ 和 $\hat{P}_d = 0.7$ 条件下参数 ξ 与能耗的关系性能曲线图。从图中可以明显看出,系统预先设定的恒定检测概率对系统的能量开销具有很大的影响,设定的检测概率越高能量开销就越大。这是因为当系统要求的恒定检测概率很高时,系统为了达到指定检测概率的性能

要求,而不得通过增加感知时隙或样本采样点数来满足系统检测性能的要求,从而导致了能量开销的增加。但是通过图中的数据可以看出不管是恒定检测概率 $\hat{P}_d = 0.9$ 还是 $\hat{P}_d = 0.7$ 的情况下,其能量开销都低于其他2种算法,并且当恒定检测概率越大时该算法相对于其他2种算法的能量开销就越小。这说明了本文算法在节能方面更具有优势。

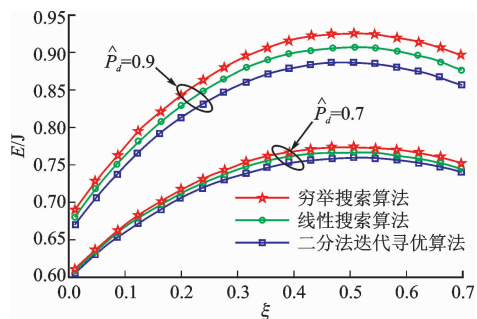


图4 在不同的恒定检测概率 \hat{P}_d 下参数 ξ 与能耗 E 的关系曲线图

Fig. 4 The relationship curve about parameter ξ and energy consumption E with different given

detection probability \hat{P}_d

图5为3种算法下参数 ξ 与系统吞吐量 T 的关系性能曲线图。从图中可以明显看出,3种算法是关于参数 ξ 单调递减函数,即随着参数 ξ 的增大而减小,当参数值 $\xi = 0.9$ 左右的时候,系统吞吐量急剧下降,直到参数 $\xi = 1$ 时吞吐量变为0,并且本文提出的算法的系统吞吐量始终大于其他算法。因为感知时隙 $\tau_s = \xi\tau$,当参数 ξ 增大时,感知时隙也随之增大,而传输时隙 $\tau_t = (1-\xi)\tau$ 则是随着参数 ξ 增大而减小,而传输时隙 τ_t 和系统吞吐量成正比的关系,则说明参数与系统吞吐量在定性分析上和定量仿真的分析结果相符合。

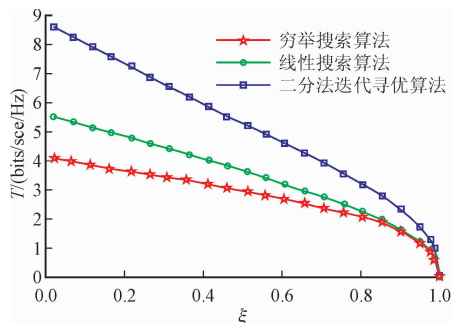


图5 参数 ξ 与系统吞吐量 T 的关系曲线图

Fig. 5 The relationship curve about parameter ξ and system throughput T

5 结语

为了解决频谱感知技术中能量效率的问题,本

文主要针对单个独立的 CR 系统的能效问题进行研究,通过使用参数 ξ 联合优化传输功率和感知时隙,最大化地提高了能量效率。并且提出了一种二分法迭代寻优算法,以确定联合优化传输功率和感知时隙的参数 ξ ,最大限度地提高了 CR 系统的能量效率。通过 Matlab 仿真和理论分析结果表明,该算法在计算复杂度和收敛速度上有着明显的优势,并且在能量开销以及系统的吞吐量上有着很明显的优势,在保证检测性能的前提下能量效率较其他算法更好,其也更适应未来低能耗的发展,为 CR 系统的优化提供了理论支撑。

参考文献(References):

- [1] CHALENDAR I, POZZI E, PARTINGTON J R. Multivariable Weighted Composition Operators: Lack of Point Spectrum, and Cyclic Vectors [J]. *Operator Theory Advances & Applications*, 2010, 202: 63-85.
- [2] AKYIDIZ I F, LEE W Y, VURAN M C, et al. Next Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey [J]. *Computer Networks*, 2006, 50(13): 2127-2159.
- [3] MITOLA J I, MAGUIRE G Q J. Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal [J]. *IEEE Pers Commun*, 1999, 6(4): 13-18.
- [4] MITOLA J I. Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio, PhD Dissertation [D]. Kista: Royal Institute of Technology, 2000.
- [5] 彭艺, 崔自如, 陈昌凯. 基于泊松模型的 WCN 频谱感知能耗问题研究 [J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2016, 38(5): 708-713.
PENG Y, CUI Z R, CHEN C K. The Research of Spectrum Sensing Energy Consumption in WCN Based on Poission Model [J]. *Journal of Yunnan University: Natural Science Edition*, 2016, 38(5): 708-713. (in Chinese)
- [6] ZHANG H, NIE Y, CHENG J, et al. Sensing Time Optimization and Power Control for Energy Efficient Cognitive Small Cell with Imperfect Hybrid Spectrum Sensing [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(99): 1-1.
- [7] QIU T, XU W, SONG T, et al. Energy-Efficient Transmission for Hybrid Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks [C] // *Vehicular Technology Conference*. IEEE, 2011: 1-5.
- [8] XIE R, YU F R, JI H. Energy-Efficient Spectrum Sharing and Power Allocation in Cognitive Radio Femtocell Networks [C] // *INFOCOM*. IEEE, 2012: 1665-1673.
- [9] ILLANKO K, NAEEM M, ANPALAGAN A, et al. Low Complexity Energy Efficient Power Allocation for Green Cognitive Radio with Rate Constraints [C] // *Global Communications Conference*. IEEE, 2012: 3377-3382.
- [10] WANG Y, XU W, YANG K, et al. Optimal Energy-Efficient Power Allocation for OFDM-Based Cognitive Radio Networks [J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(9): 1420-1423.
- [11] HASAN Z, BANSALI G, HOSSAIN E, et al. Energy-Efficient Power Allocation in OFDM-Based Cognitive Radio Systems: A Risk-Return Model [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(12): 6078-6088.
- [12] OZCAN G, GURSOY M C. Energy-Efficient Power Adaptation for Cognitive Radio Systems Under Imperfect Channel Sensing [C] // *Computer Communications Workshops*. IEEE, 2014: 706-711.
- [13] BEDEER E, AMIN O, DOBRE O, et al. Energy-Efficient Power Loading for OFDM-based Cognitive Radio Systems with Channel Uncertainties [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64: 1-1.
- [14] ZHANG L, XIAO M, WU G, et al. Energy-Efficient Cognitive Transmission With Imperfect Spectrum Sensing [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(5): 1320-1335.
- [15] PUTZ S, ANGERER A, KRIMER D O, et al. Spectral Hole Burning and Its Application in Microwave Photonics [C] // *APS March Meeting 2017*. New Orleans, Louisiana, 2017.
- [16] ZOU Y, ZHI J, YANG L, et al. Securing Physical-Layer Communications for Cognitive Radio Networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(9): 48-54.
- [17] HUTCHESON K. A Test for Comparing Diversities Based on the Shannon Formula [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1970, 29(1): 151-154.
- [18] URKOWITZ H. Energy Detection of Unknown Deterministic Signals [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2005, 55(4): 523-531.
- [19] 陈婷, 张博, 牛德智, 等. 能量检测中的 BPSK 信号最优检测门限 [J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2016, 17(4): 75-80.
CHEN T, ZHANG B, NIU D Z, et al. The Best Detection Threshold for BPSK Signals Based on Energy Detection Method [J]. *Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition*, 2016, 17(4): 75-80. (in Chinese)
- [20] WU Y, TSANG D H K. Energy-Efficient Spectrum Sensing and Transmission for Cognitive Radio System [J]. *Communications Letters IEEE*, 2011, 15(5): 545-547.
- [21] IEEE B. 802.22 Wireless RAN. Functional requirements for the 802.22 WRAN [S]. 2010.
- [22] SHI Z, TEH K C, LI K H. Energy-Efficient Joint Design of Sensing and Transmission Durations for Protection of Primary User in Cognitive Radio Systems [J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(3): 565-568.