

doi:10.3969/j.issn.1001-2400.2013.01.030

一种两跳感知系统中断性能优化方案

唐菁敏¹, 冯思泉², 龙 华¹, 刘增力¹

(1. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500;

2. 重庆电子工程职业学院, 重庆 401331)

摘要: 针对交叉共享方式下的两跳协作感知网络,研究了多个感知用户的协作感测策略,推导了在放大转发传输协议下感知系统的中断概率表达式,并提出了一种联合优化方案.在保证一定频谱感测性能指标的前提下,通过联合优化感测门限、感测时长等参数最小化感知系统的中断概率.理论分析与仿真结果表明,此优化方案能有效改善感知系统的中断性能,提升感知网络传输的可靠性.

关键词: 感知无线电;交叉共享;协作感测;协同传输;中断概率

中图分类号: TN929.53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2013)01-0177-06

Optimization scheme for outage performance in a two-hop cognitive system

TANG Jingmin¹, FENG Siqun², LONG Hua¹, LIU Zengli¹

(1. Faculty of Information Eng. and Automation, Kunming Univ. of Science and Tech., Kunming 650500, China; 2. Chongqing College of Electronic Eng., Chongqing 401331, China)

Abstract: By investigating the two-hop cooperative cognitive network in an overlay sharing(OS) mode, a cooperative detection strategy for the multiple cognitive user system is considered and outage probability formulation on the Amplify-and-Forward(AF) protocol is deduced. By optimizing the parameters such as sensing time and threshold, an optimization scheme has been proposed, which is proven to minimize the outage probability on the premise of guaranteeing fixed detection performance. Theoretical analysis and simulation result show that the optimal scheme can improve outage performance of the cognitive system and enhance transmission reliability of the cognitive network.

Key Words: cognitive radio; overlay sharing; cooperative sensing; cooperative transmission; outage probability

在交叉共享(OS)方式下,感知用户只有在授权用户未使用频段时才能使用该频段进行信息传输,因此频谱感测是感知无线电系统实现频谱共享的关键技术之一.如果频谱感测的结果不准确,则势必会对授权用户产生严重的干扰,从而限制感知无线电技术的发展和运用.因此,频谱感测是感知无线电技术的前提和先决条件,只有正确地感知到频谱使用状态,才能合理、有效地利用空闲资源.与此同时,提高频谱感测性能需要以增加感测时间为代价,这就意味着将占用更多的系统开销.为了得到可靠的感测性能,Cabric等^[1]提出协作频谱感测概念.文献[2-4]对协作频谱感测进行了进一步的分析,通过合并不同地理位置的感知无线电节点的感测结果,利用空间的宏分集的方式来避免由于单个节点独立感测时可能遭遇的多径、阴影以及本地干扰等因素所引起的感测错误,从而有效地提高了频谱感测的正确率,同时也有利于减少各个节点的感测时

收稿日期:2011-10-12

网络出版时间:2012-09-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60872157);云南省社会发展科技计划资助项目(2009CA027);云南省科技厅应用基础研究计划资助项目(2011FB035);云南省应用基础研究计划资助项目(KKSY201203029)

作者简介:唐菁敏(1979-),男,博士,E-mail: tang.min213@163.com.

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1076.TN.20120925.1056.201301.221_030.html

间,提高频谱的利用率.在感知用户使用授权频段的过程中,一旦授权用户出现,感知用户必须快速地检测到它并立即释放信道,这就要求感知用户必须周期性地对频谱进行感知.感知周期包括感知时长和传输时长两部分.从感知用户的角度来看,传输时长越长,感知系统传输性能也就越好.如何选择合适的感知时长来改善感知系统的性能是当前研究的一个热点.文献[5]研究了在保证对授权用户干扰低于允许水平前提下,通过优化感知时长最大化系统吞吐量的问题.文献[6]研究了感知用户通过选取最优感知时长来改善系统性能,同时还考虑了频谱感知过程消耗的功率.

尽管感知无线电技术能够提高频谱的利用率,但却无法提高信道容量、中断概率等系统性能,而协同通信则可有效增加传输速率,提高系统传输的可靠性^[7].在感知无线电系统中引入协同通信技术,可发挥各自的优势,有效提高系统的抗衰落性能、频谱利用率与系统性能^[8-9].在文献[8]中提到,利用空间分集可有效提高感知系统吞吐量.文献[9]提出感知用户协助授权系统传输信息,可降低授权系统中断概率.笔者首先研究了物理层的感知问题,在保证频谱感知需要达到的性能指标前提下,推导了多节点协作感知的接入概率与感知时长的理论公式;然后针对物理层的感知结果,推导了协同感知系统的中断概率闭环表达式与相应的在高信噪比条件下的近似表达式;最后以中断概率近似表达式为代价函数,提出一种优化方案,即通过优化门限和感知时长等参数使得感知系统中断概率最小化.

1 系统模型

系统模型如图 1 所示,它包括一个授权用户发射节点(PT),一个感知源节点 S,目的节点 D 和若干个感知用户节点(CU).源节点从这些 CU 节点中任意选择一个充当自己的中继节点,而其他的 CU 用户用黑色实心圆点表示,每个节点均配置单天线.在交叉共享方式下,感知用户与授权用户不能共存于同一频谱上,只有当感知用户感知到频谱不被授权用户占用时才能接入进行通信.假设中继节点 CU 是具有感知能力的感知用户,而源节点与目的节点都为不具有感知能力的感知用户.

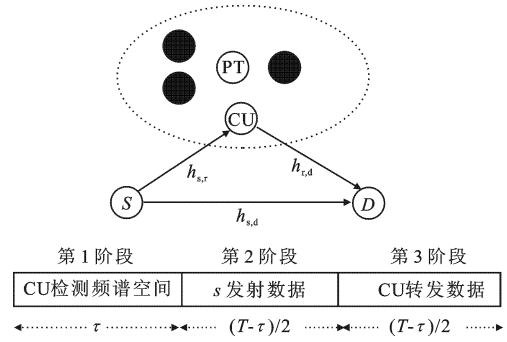


图 1 系统模型

整个感知系统传输过程可分为 3 个阶段:第 1 阶段为感知阶段,即中继节点 CU 协作感知频谱状态;第 2 和第 3 阶段为协作传输阶段.当感知到频谱空闲后,第 2 阶段源节点以广播的形式发送信息给中继和目的节点,第 3 阶段中继节点将接收到的信息放大之后转发给目的节点,最后目的节点将对这两阶段收集的信息进行接收合并.当感知到频谱不可用时,则在整个传输阶段所有感知用户保持静默.图中 T 为感知周期, τ 为感知时长.

源-目的节点信道为上行链路,用 s, d 表示.源-中继节点信道称为用户间信道,用 s, r 表示.中继-目的节点信道用 r, d 表示.授权用户发射节点到中继节点的信道用 p, r 表示.假设所有信道均为窄带频率非选择性的慢衰落信道,接收端确知信道状态信息,而发送端仅知道信道的统计特性,信道衰落系数 $h_{n,m}$ ($n \in \{p, s, r\}, m \in \{r, d\}$) 服从均值为零、方差为 $\lambda_{n,m}$ 的独立、循环对称复高斯分布,则其包络的平方 $|h_{n,m}|^2$ 服从均值为 $\lambda_{n,m}$ 的指数分布.信道中的噪声为加性高斯白噪声,其方差为 σ_n^2 .同时,假设总发射功率为 P , P_s 和 P_r 分别表示为源节点和中继节点的发送功率,且满足 $P_s + P_r = P$.

2 协作感知

2.1 单节点感知

在第 1 阶段感知用户对频谱感知来判断频段是否可用.感知模型为

$$\begin{cases} \mathcal{H}_0: y_i(m) = n_{p,i}(m) & , \\ \mathcal{H}_1: y_i(m) = P_p^{1/2} h_{p,i} x_p(m) + n_{p,i}(m) & , \end{cases} \quad (1)$$

其中, \mathcal{H}_1 表示授权用户占用频段的情况, \mathcal{H}_0 表示授权用户不占用频段的情况; $y_i(m)$ 表示第 i 个 CU 在感知

阶段接收到的第 m 个抽样信号; P_p 为授权用户发射节点的发射功率, $x_p(m)$ 为 PT 发射的第 m 个抽样信号; $n_{p,i}(m)$ 为加性白噪声第 m 个抽样信号.

当采样点数足够大时,利用中心极限定理(Central Limit Theorem, CLT),可得感知用户感测概率、虚警概率的表示式,分别为^[2]

$$P_{d,i}(\tau, \zeta) = P_r(Y_i > \zeta | \mathcal{H}_1) = Q\left(\frac{\zeta - (\sigma_n^2 + P_p \lambda_{p,i})}{(2/(\tau f_s))^{1/2} (\sigma_n^2 + P_p \lambda_{p,i})}\right), \quad (2)$$

$$P_{f,i}(\tau, \zeta) = P_r(Y_i > \zeta | \mathcal{H}_0) = Q\left(\frac{\zeta - \sigma_n^2}{(2/(\tau f_s))^{1/2} \sigma_n^2}\right), \quad (3)$$

其中, $\lambda_{p,i}$ 为授权用户发射节点到第 i 个感知用户的信道方差; f_s 表示感兴趣的频带带宽; ζ 为感测判决门限; $Q(\cdot)$ 为标准高斯互补累积分布函数,且 $Q(x) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \int_x^{+\infty} \exp(-y^2/2)^{1/2} dy$. 利用 $P_{f,i}$ 和 $P_{d,i}$ 的表达式之间的关系,消去变量 ζ , 可得

$$P_{f,i}(\tau, \zeta) = Q\left[Q^{-1}(P_{d,i}(\tau, \zeta))(1 + \gamma_{p,i}) + \gamma_{p,i}(\tau f_s/2)^{1/2}\right], \quad (4)$$

其中, $\gamma_{p,i}$ 为信噪比,且有 $\gamma_{p,i} = P_p \lambda_{p,i} / \sigma_n^2$; $Q^{-1}(\cdot)$ 为标准高斯互补累积分布函数的逆变换. 根据式(4)可知,当感测概率恒定不变时,只要感测时长足够大,即使在低信噪比的条件下,也能得到较小的虚警概率.

2.2 多节点协作感测

协作感测可利用空间分集增益有效地解决单节点感测过程中难以克服的多径衰落、阴影衰落及隐藏终端等问题,从而有效地改善系统的感测性能. 考虑到在协作感知过程中用于信令开销的频谱资源非常有限,为了节约开销,各个感知节点仅向中心控制节点传输 1 bit 的本地频谱感测结果,而中心控制节点在合并各感知节点的感测结果后得出最终的判决结果. 当前较为常用的数据融合方法主要采用 K/M 准则: 当参与协作的 M 个感知用户中有 K ($0 < K \leq M$) 个以上的用户支持某判决结果时,则中心控制节点将支持该判决.

假设各个感知用户的本地感测结果为 u_i ($1 \leq i \leq M$), 当 $\sum_{i=1}^M u_i \geq K$ 时,则中心控制节点判决结果 $u_0 = 1$. 这里, $u_i = 1$ ($0 \leq i \leq M$), 表示感测到授权用户信号; $u_i = 0$, 表示感测到频谱空洞. OR 准则 ($K=1$)、AND 准则 ($K=M$) 是 K/M 准则的特殊形式.

假设参与协作的各个感知用户采用相同的感测技术,且参数设置相同,则各感知节点的感测概率和虚警概率相等,即 $P_{f,i}(\tau, \zeta) = P_f(\tau, \zeta)$, $P_{d,i}(\tau, \zeta) = P_d(\tau, \zeta)$. 使用 K/M 准则合并各感知用户的感测结果后,可得协作感测概率 $P_D(\tau, K, \zeta)$ 和虚警概率 $P_F(\tau, K, \zeta)$ 表达式,即

$$P_D(\tau, K, \zeta) = \sum_{i=K}^M \binom{M}{i} [P_d(\tau, \zeta)]^i [1 - P_d(\tau, \zeta)]^{M-i}, \quad (5)$$

$$P_F(\tau, K, \zeta) = \sum_{i=K}^M \binom{M}{i} [P_f(\tau, \zeta)]^i [1 - P_f(\tau, \zeta)]^{M-i}. \quad (6)$$

在 OS 方式下,有两种状态感知用户可以使用授权频段: ① 授权频段处于 \mathcal{H}_0 状态,而感知用户感测到频谱空洞; ② 授权频段处于 \mathcal{H}_1 状态,而感知用户发生漏检. CU 能接入此授权频段的概率为

$$P_c(\tau, K, \zeta) = [1 - P_F(\tau, K, \zeta)]P(\mathcal{H}_0) + [1 - P_D(\tau, K, \zeta)]P(\mathcal{H}_1). \quad (7)$$

3 协作传输

当感知用户感测到频谱空闲后,感知系统开始进行数据传输. 传输过程分为两个阶段(第 2 阶段和第 3 阶段),传输时长为 $T - \tau$. 在此过程,所有感知用户通过正交信道发送信息,这里,正交信道可以采用 TDMA、FDMA 或 CDMA 方案. 在第 2 阶段,源节点以广播的形式发送信息给中继和目的节点;在第 3 阶段,中继则将接收到的源信息放大后转发给目的节点. 最后,目的节点对这两阶段接收到的信息进行最大比合并(Maximal-Ratio Combining, MRC),则 AF 协同感知系统的最大平均互信息为^[10]

$$I_{AF} = \frac{T-\tau}{2T} \log(1 + \gamma_{AF}) = \frac{T-\tau}{2T} \log\left(1 + \frac{P_s |h_{s,d}|^2}{\sigma_n^2} + \frac{P_s P_r |h_{s,r}|^2 |h_{r,d}|^2}{[P_s |h_{s,r}|^2 + P_r |h_{r,d}|^2 + \sigma_n^2] \sigma_n^2}\right), \quad (8)$$

式中, γ_{AF} 为目的节点得到的接收信号瞬时信噪比, $h_{s,d}$ 和 $h_{s,r}$ 分别表示源-目的节点与源-选择协作传输的感知中继节点 CU 的信道衰落系数。

中断概率定义为系统速率低于某个门限 R 的概率, AF 感知系统有 3 种状态会导致中断事件的发生:

- (1) 感知用户接入授权频谱, 然而在数据传输过程中传输速率过低。
- (2) 频谱未被授权用户占用而感知用户感测错误, 感知用户将不利用该频谱进行数据传输, 保持静默。
- (3) 授权用户利用频谱传输信息, 同时感知用户也感测到频谱被占用。

感知系统中断概率为

$$P_{out}(\tau, K, \zeta) = P_c(\tau, K) P_r(I_{AF} < R) + P_F(\tau, K, \zeta) P(\mathcal{H}_0) + P_D(\tau, K, \zeta) P(\mathcal{H}_1) \quad (9)$$

4 联合优化策略

有效性和可靠性是无线通信系统中的一对矛盾。一般情况下, 要增加系统的有效性, 就必须降低可靠性, 反之亦然。为了保证授权用户质量服务(Quality of Service, QoS)体系, 要求感知用户对频谱的感测必须具备较高的可靠性。另外, 由于中断概率直接地体现了感知系统的传输效率, 在感知用户频谱的感测性能满足一定的硬性指标的前提下, 以中断概率为基础尽可能地提高感知系统的传输性能。由此可见, 感知系统性能最优化问题可归纳为: 在协作感测概率满足授权系统要求的目标感测概率的前提下, 实现中断概率的最小化, 即

$$\begin{cases} \min_{K, \tau, \zeta} P_{out}(\tau, K, \zeta) \\ \text{s. t. } P_D(\tau, K, \zeta) \geq \overline{P_D} \\ \tau \in [0, T] \quad , \quad K \in (0, N] \end{cases} \quad (10)$$

由于在高信噪比下求解 $P_{out}(\tau, K, \zeta)$ 表达式太过于复杂, 因此给出一种简单的近似表达式。文献[11]给出 $P_r(I_{AF} < R)$ 的近似表达式为

$$P_r(I_{AF} < R) \approx \delta^2(\tau) \underbrace{\frac{1}{2\xi\lambda_{s,d}} \left[\frac{1}{\xi\lambda_{s,r}} + \frac{1}{(1-\xi)\lambda_{r,d}} \right]}_{\Upsilon(\xi)}, \quad (11)$$

其中, $\delta(\tau) = [2^{2TR}/(T-\tau) - 1]/\gamma$, 功率比例因子 $\xi = P_s/P$ 。中断概率表达式可近似为

$$P_{out}^a(\tau, K, \zeta) = \{ [1 - P_F(\tau, K, \zeta)] P(\mathcal{H}_0) + [1 - P_D(\tau, K, \zeta)] P(\mathcal{H}_1) \} \times \delta^2(\tau) \Upsilon(\xi) + P_F(\tau, K, \zeta) P(\mathcal{H}_0) + P_D(\tau, K, \zeta) P(\mathcal{H}_1) \quad (12)$$

以中断概率近似表达式为代价函数, 优化问题可变为

$$\begin{cases} \min_{K, \tau, \zeta} P_{out}^a(\tau, K, \zeta) \\ \text{s. t. } P_D(\tau, K, \zeta) \geq \overline{P_D} \\ \tau \in (0, T] \quad , \quad K \in (0, N] \end{cases} \quad (13)$$

当 K 值一定时, $P_D(\tau, K, \zeta)/P_F(\tau, K, \zeta)$ 与 $P_d(\tau, \zeta)/P_f(\tau, \zeta)$ 具有同样的单调性, 都为增函数^[5]。同时根据式(2), 判决门限 $\zeta(\tau)$ 可表示为

$$\zeta(\tau) = \left(\frac{2}{\tau f_s} \right)^{1/2} (\sigma_n^2 + P_p \lambda_{p,i}) Q^{-1}(P_d(\tau)) + \sigma_n^2 + P_p \lambda_{p,i} = \left(\frac{2}{\tau f_s} \right)^{1/2} A Q^{-1}(P_d(\tau)) + A \quad (14)$$

式中, $A = \sigma_n^2 + P_p \lambda_{p,i}$ 。假设 τ 和 K 值给定, 当 $\zeta = \zeta_0$ 时, 满足 $P_D(\tau, K, \zeta) = \overline{P_D}$, 可求得 $P_d(\tau) = \overline{P_d}$; 对于其他的比 ζ_0 小的判决门限 ζ_1 , 有 $P_F(\tau, K, \zeta_0) < P_F(\tau, K, \zeta_1)$ 和 $P_D(\tau, K, \zeta_0) < P_D(\tau, K, \zeta_1)$ 。根据式(12), 在高信噪比条件下必有 $P_{out}^a(\tau, K, \zeta_0) < P_{out}^a(\tau, K, \zeta_1)$ 。因此, 只有当 $P_D(\tau, K, \zeta) = \overline{P_D}$ 时, 才能使得 $P_{out}^a(\tau, K, \zeta)$ 达到最小值, 优化问题变化为

$$\begin{cases} \min_{K, \tau} P_{\text{out}}^a(\tau, K, \zeta_0) & , \\ \text{s. t. } \tau \in (0, T] & , K \in (0, N] & . \end{cases} \quad (15)$$

在 K 一定时,求解最优感测时间 τ ,使得中断概率最小化,再在 K 的变化范围内搜寻最优的 K 值.当 $K = \tilde{K}$ 时,式(15)中只剩下一个变量 τ ,优化问题变为

$$\begin{cases} \min_{\tau} P_{\text{out}}^a(\tau, \tilde{K}, \zeta_0) & , \\ \text{s. t. } \tau \in (0, T] & . \end{cases} \quad (16)$$

定理 在高信噪比条件下,必然存在一个最优感测时间 τ^* 能实现中断概率 $P_{\text{out}}^a(\tau, \tilde{K}, \zeta_0)$ 最小.

证明 对 $P_{\text{out}}^a(\tau, \tilde{K}, \zeta_0)$ 针对变量 τ 求导,可得

$$\begin{aligned} \frac{dP_{\text{out}}^a(\tau, \tilde{K}, \zeta_0)}{d\tau} &= \underbrace{[1 - \delta^2(\tau)\Upsilon(\xi)]P(\mathcal{H}_0)}_{f(\tau, \tilde{K}, \zeta_0)} \underbrace{\frac{dP_F(\tau, \tilde{K}, \zeta_0)}{d\tau}}_{g(\tau, \tilde{K}, \zeta_0)} + \\ &\quad \underbrace{\{[1 - P_F(\tau, \tilde{K}, \zeta_0)]P(\mathcal{H}_0) + [1 - \bar{P}_D]P(\mathcal{H}_1)\}}_{g(\tau, \tilde{K}, \zeta_0)} \Upsilon(\xi) \frac{d\delta^2(\tau)}{d\tau} . \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)中,

$$\frac{d\delta^2(\tau)}{d\tau} = \frac{4TR \ln 2}{\gamma^2(T-\tau)^2} 2^{2TR/(T-\tau)} (2^{2TR/(T-\tau)} - 1) , \quad (18)$$

$$\frac{dP_F(\tau, \tilde{K}, \zeta_0)}{d\tau} = \sum_{i=\tilde{K}}^M \binom{M}{i} P_f(\tau, \zeta_0)^{i-1} (1 - P_f(\tau, \zeta_0))^{M-i-1} (i - MP_f(\tau, \zeta_0)) \frac{dP_f(\tau, \zeta_0)}{d\tau} . \quad (19)$$

根据式(4),可求得
$$\frac{dP_f(\tau, \zeta_0)}{d\tau} = -\frac{\gamma_{p,i} f_s^{1/2}}{4(\pi\tau)^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\alpha + \beta\tau^{1/2})^2\right) , \quad (20)$$

其中, $\alpha = Q^{-1}(\bar{P}_d)(1 + \gamma_{p,i})$, $\beta = \gamma_{p,i}(f_s/2)^{1/2}$.很明显,当 $\tau = 0$ 时, $dP_f(\tau, \zeta_0)/d\tau = -\infty$, 而 $d\delta^2(\tau)/d\tau$ 为大于零的常数.在式(17)中, $0 < 1 - \delta^2(\tau)\Upsilon(\xi) < 1$, $\{[1 - P_F(\tau, \tilde{K}, \zeta_0)]P(\mathcal{H}_0) + [1 - \bar{P}_D]P(\mathcal{H}_1)\} \Upsilon(\xi) > 0$, 因此,有

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{dP_{\text{out}}^a(\tau, \tilde{K}, \zeta_0)}{d\tau} = -\infty . \quad (21)$$

同理,当 $\tau = T$ 时, $d\delta^2(\tau)/d\tau = +\infty$, 而 $f(\tau, \tilde{K}, \zeta_0)$ 为常数,则

$$\lim_{\tau \rightarrow T} \frac{dP_{\text{out}}^a(\tau, \tilde{K}, \zeta_0)}{d\tau} = \infty . \quad (22)$$

根据式(21)和式(22)可知,必然存在一个 τ^* 值,使得 $(dP_{\text{out}}^a(\tau, \tilde{K}, \zeta_0)/d\tau)|_{\tau=\tau^*} = 0$.在该协同通信感知系统中,若所有链路 $h_{p,r}$, $h_{s,d}$, $h_{s,r}$ 和 $h_{r,d}$ 的方差均不为零,那么在高信噪比条件下,必然存在一个最优感测时间 τ^* 能使感知系统中断概率最小.证毕.

在 $0 < K \leq M$ 和 $0 < \tau \leq T$ 范围内,最小化中断概率以及相应最优的 K^* 和 τ^* 可用以下的算法求出:

- (1) 初始化.设置 $\tilde{K} = 1, P_{\text{out}} = 1$.
- (2) 根据式(5),计算当协作感测概率达到 \bar{P}_D 时,单节点需要达到的感测概率 \bar{P}_d .
- (3) 用式(14)计算单节点感测概率为 \bar{P}_d 时的感测门限 $\zeta_0(\tau)$,然后根据式(3)和式(6)求出多节点协作虚警概率 $P_F(\tau, \tilde{K}, \zeta_0)$.将结果代入式(17),并且令式(17)等于零,解方程计算出次优感测时长 τ' ,同时求出相对应的中断概率 $P_{\text{out}}^a(\tau', \tilde{K}, \zeta_0)$.如果 $P_{\text{out}}^a(\tau', \tilde{K}, \zeta_0) < P_{\text{out}}$,则设置 $P_{\text{out}} = P_{\text{out}}^a(\tau', \tilde{K}, \zeta_0), K^* = \tilde{K}$ 和 $\tau^* = \tau'$.
- (4) $\tilde{K} = \tilde{K} + 1$,当 $\tilde{K} \leq M$ 时,返回步骤(2);否则,停止循环.

用这个算法可以较容易地计算出感知系统最小中断概率,最佳感测时长以及对各感知节点感测结果采用何种融合方式可达到最优.

仿真条件设置如下:授权用户使用信道的概率为 30%,协作感测感知用户数 $M = 6$,感测周期 $T = 20$ ms,采样频率 $f_s = 25$ kHz,目标感测概率 $\bar{P}_D = 0.99$,信噪比 $\gamma_{p,i} = -6$ dB, $\gamma = 15$ dB, $\xi = 0.5$, $R =$

1 bit/(s · Hz⁻¹), 信道方差 $[\lambda_{s,d}, \lambda_{s,r}, \lambda_{r,d}] = [1, 1, 1]$.

图 2 画出了中断概率随感测时间 τ 和 K 的变化曲线. 仿真参数设置如下: $P(\mathcal{H}_1) = 0.3, M = 6, T = 20$ ms, $f_s = 20$ kHz, $\overline{P_D} = 0.99, \gamma_{p,i} = -6$ dB, $\gamma = 15$ dB, $\xi = 0.5, R = 1$ bit/(s · Hz⁻¹), $[\lambda_{s,d}, \lambda_{s,r}, \lambda_{r,d}] = [1, 1.5, 1.5]$. 由图可见, 存在最优的 $\tau^* = 7$ ms 和 $K^* = 2$, 使中断概率 $P_{\text{out}} = 0.39$, 达到最小值.

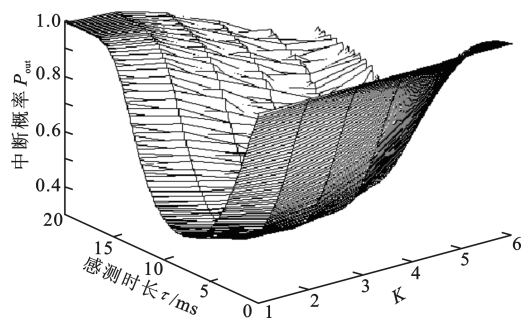


图 2 优化感知时间和多节点融合方式

5 总 结

笔者在感知无线电中引入了协同通信, 在此基础上推导了感知系统的中断概率表达式, 并提出一种以其近似表达式为优化目标、感测概率为限制条件的最优化问题及算法, 从而能增加传输速率, 提高系统传输可靠性. 结果显示, 在感测周期确定的情况下, 感测时长存在最优值, 使得中断概率最小. 另外, 在不同的场景中, 中断概率也与多节点感测结果融合方式有很大关系. 综上所述, 只有选取合适的数据融合准则, 设置恰当的感觉时长, 才能使感知系统中断性能达到最优.

参考文献:

- [1] Cabric D, Mishra S M, Brodersen R W. Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios[C]//Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2004:772-776.
- [2] Cui T, Gao F F, Nallanathan A. Optimization of Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2011, 60(4): 1578-1589.
- [3] Peh E C Y, Liang Y C, Guan Y L. Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks with Weighted Decision Fusion Schemes[J]. IEEE Trans Wireless Communications, 2010, 12(9): 3838-3847.
- [4] 丁汉清, 杨家玮, 赵志远. 认知无线中自适应分步合并协作频谱感知算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(4): 665-670.
Ding Hanqing, Yang Jiawei, Zhao Zhiyuan. Adaptive Step by Step Combination Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Systems[J]. Journal of Xidian University, 2010, 37(4): 665-670.
- [5] Peh E C Y, Liang Y C, Guan Y L, et al. Optimization of Cooperative Sensing in Cognitive Radio Networks: a Sensing-Throughput Tradeoff View[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2009, 58(9): 5294-5299.
- [6] Hoang A T, Liang Y C, Wong D, et al. Opportunistic Spectrum Access for Energy-Constrained Cognitive Radios[J]. IEEE Trans Wireless Communications, 2009, 8(3): 1206-1211.
- [7] Wang H Z, Ma S D, Ng T S. On Performance of Cooperative Communication Systems with Spatial Random Relays[J]. IEEE Trans on Communications, 2011, 59(4): 1190-1199.
- [8] Wang H, Lee J, Kim S, et al. Capacity Enhancement of Secondary Links Through Spatial Diversity in Spectrum Sharing [J]. IEEE Trans Wireless Communications, 2010, 9(2): 494-499.
- [9] Han Y, Pandharipande A, Ting S H. Cooperative Decode-and-Forward Relaying for Secondary Spectrum Access[J]. IEEE Trans Wireless Communications, 2009, 8(10): 4945-4950.
- [10] 林霏, 罗涛, 乐光新. 不同功率分配与中继位置下协同通信 SER 性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 101-105.
Lin Fei, Luo Tao, Yue Guangxin. Analysis of SER Performance for Cooperative Communications with Different Power Allocation and Relay Location[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19):101-105.
- [11] Laneman J N, Tse D N C, Wornell G W. Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior[J]. IEEE Trans Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.

(编辑: 郭 华)