

一种认知无线电周期数据传输优化机制

许瑞琛* 蒋挺

(北京邮电大学信息与通信工程学院 北京 100876)

摘要: 如何合理选择频谱感知时间和数据传输时间使系统传输效率最大化是认知无线电研究的一个重要方向, 具有极其广泛的应用背景。针对该问题, 该文提出一种认知无线电周期数据传输优化机制, 并分别给出频谱感知时间、信道搜索时间以及数据传输时间的优化计算方法。从数值及仿真结果可知, 在不同的主用户到达强度的情况下, 所得到的最优频谱感知时间、最优信道搜索时间和最优数据传输时间能够确保对主用户的保护性并有效降低数据传输延迟。

关键词: 认知无线电; 频谱感知时间; 信道搜索时间; 数据传输时间; 优化

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)07-1694-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01361

Optimization of Cycle Transmission Mechanism in Cognitive Radio

Xu Rui-chen Jiang Ting

(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Selecting appropriate spectrum sensing time and data transmission time to maximize systemic transmission efficiency is a core research region in Cognitive Radio (CR), it has comprehensive application background. In this paper, a cycle transmission optimization mechanism is proposed. In the optimization algorithm, spectrum detection time, channel searching time and data transmission time are derived respectively. Numerical and simulation results show that the obtained optimal spectrum detection time, optimal channel search time and optimal data transmission time can protect primary user's right and decrease data transmission delay effectively.

Key words: Cognitive Radio (CR); Spectrum detection time; Channel search time; Data transmission time; Optimization

1 引言

认知无线电(Cognitive Radio, CR)中, 次级用户(Secondary User, SU)的数据传输延迟涉及: 频谱感知时间(T_s)、数据传输时间(T_d)以及信道搜索时间(T_h)。考虑到数据传输延迟涉及到3种不同的时间, 因此, 如何设计合适的 T_s , T_h 和 T_d 达到最大化SU的数据传输效率的目的, 是目前CR亟待解决的问题之一。

目前, 已有多篇文献研究了如何计算最优 T_s 和 T_d 。在最优 T_s 设计方面, 文献[1]引入动态调度算法以增加频谱感知精确度, 但是该算法并没有区分 T_s 和 T_h 。文献[2]通过协作感知的方法减小频谱感知时间。但是协作感知会引入不可忽视的控制开销。文献[3]根据虚警概率的影响分析了最优频谱感

知时间, 但是该算法并没有考虑信道切换因素。文献[4,5]利用部分可观测马尔科夫决策过程预测主用户(Primary User, PU)数据暴发时段间的频谱空洞, 有效地减小了SU和PU的碰撞概率, 进而减少不必要的频谱感知时间。但是类似于文献[4,5]的预测方式需要PU使用信道的历史信息, 限制了这类算法的应用范围, 且这种预测方式的算法复杂度大, 可能会导致判断出现延迟。目前研究最优 T_d 的文献较少。文献[6]提出一种延迟约束的、用于CR多媒体的数据传输时间计算方法, 但是该方法并没有考虑信道切换和SU所需要传输数据总量对数据传输时间的影响。

基于上述分析, 现有感知时间算法大多没有区分 T_s 和 T_h , 并且没有考虑虚警概率和信道切换的影响。另外, 现有的数据传输时间计算方法均未考虑SU的数据发送需求。因此, 本文首先将 T_s 和 T_h 的求解问题描述为一个涉及虚警概率要求、漏警概率要求和信道切换影响的优化问题, 得到最优

2012-10-23 收到, 2013-04-15 改回

国家科技重大专项(2010ZX03006-006)和国家自然科学基金(61171176)资助课题

*通信作者: 许瑞琛 xurchen@126.com

频谱感知时间 T_s 及最优信道搜索时间 T_h 。随后，根据得到的最优 T_s ，SU 数据传输总量，虚警概率要求，漏警概率要求以及信道切换的影响推导了最优 T_d 的解析解。数值及仿真结果表明，本文所提出的最优 T_s ， T_h 和 T_d 的计算方法能够有效降低数据传输延迟。

2 系统模型

系统由一个 SU 和 $M+1$ 个授权信道组成。CR 系统允许 SU 在 PU 不使用授权信道的情况下接入。SU 需要发送 N 个数据包。假设第 i 个信道上 PU 的到达符合均值为 λ_i 的泊松分布，到达间隔符合 $1/\lambda_i$ 的负指数分布，并且 PU 的单次使用信道的驻留时间为 T_{pu} 。该假设和文献[4]相同。CR 中，首先需要保证对 PU 的高保护性，所以这里设虚警概率 $P_f < 0.01$ 和漏警概率 $P_m < 0.01$ 。记 P_m 和 P_f 的上限分别为 C, D 。另外为了扩大算法的应用范围，这里使用能量检测法检测 PU 信号。

为保证 PU 使用信道的优先权，这里假设 SU 采用周期检测和“always changing”信道切换方式^[7]，即在每一个传输周期内，SU 首先在频谱感知时间 T_s 内进行频谱感知。如果 PU 信号不存在，那么在数据传输时间 T_d 内传输数据；如果 PU 信号存在，那么放弃数据传输并依次检测其它 M 个信道，直至找到可供使用的信道并接入进行数据传输。此处以 SU 传输 4 个周期的数据，并被 PU 打断数据传输 1 次为例，说明 SU 的数据传输时间消耗过程。如图 1 所示，SU 首先接入第 1 信道，在传输两个周期之后，由于 PU 开始使用信道 1，SU 被迫依次搜索其它信道。SU 获得第 i 个信道可用的搜索结果，并接入信道 i 传输剩余两个周期的数据，数据传输完毕后离开系统。那么非数据传输时间消耗涉及 3 种时间：频谱感知时间 T_s ；搜索其它信道的感知时间

T_h ；更换频段进行频谱感知所需的时间 T_{ho} ^[7]。记 SU 在信道 i 的数据传输时间为 T_{di} 。

用 ON-OFF 模型^[6]描述信道的使用情况， H_0 表示 PU 信号不存在， H_1 表示 PU 信号存在。

$$\left. \begin{aligned} H_0: & y(t) = n(t) \\ H_1: & y(t) = h \cdot s(t) + n(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 $y(t)$ 为 SU 接收到的信号， $s(t)$ 表示 PU 信号， $n(t)$ 为 AWGN。根据能量检测法^[8]，SU 所接收到信号的能量为

$$x_e = \sum_{j=1}^N |y_j|^2 / N_o \quad (2)$$

如果 $x_e < \eta$ 则 SU 判断 H_0 ，如果 $x_e \geq \eta$ 则 SU 判断 H_1 。其中 y_j 为接收信号的第 j 个抽样点， $N_o = T \cdot F_s$ ， T 为感知时间， F_s 为采样频率， η 为检测门限。根据文献[8]， $n(t)$ 服从均值和方差分别为 0 和 σ_n^2 的高斯分布。 $s(t)$ 也符合高斯分布，其均值为 0，方差为 σ_s^2 。 H_0 状态下， x_e 服从自由度为 N_0 的卡方分布。 N_0 足够大时，由中心极限定理可知， x_e 服从高斯分布。 H_0 和 H_1 状态下， x_e 的均值和方差分别表示为 $\mu_0, \mu_1, \sigma_1^2, \sigma_2^2$ ^[8]，信噪比表示为 γ ，所以

$$\left. \begin{aligned} H_0: & \mu_0 = \sigma_n^2, \sigma_0^2 = [E|n(t)|^4 - \sigma_n^4] / N_0 \\ H_1: & \mu_1 = (\gamma + 1)\sigma_n^2, \sigma_1^2 = 2(\gamma + 1)^2 \sigma_n^4 / N_0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

那么漏警概率为

$$P_m(T) = \Phi((\eta - \mu_1) / \sigma_1) \quad (4)$$

其中 Φ 为标准正态分布。根据设定的 P_m 上限，可以得到检测门限 $\eta = \mu_1 - \Phi^{-1}(1 - P_m(T))\sigma_1$ 。根据 η 可以得到虚警概率

$$\begin{aligned} P_f(T) &= 1 - \Phi((\eta - \mu_0) / \sigma_0) \\ &= 1 - \Phi((\mu_1 - \Phi^{-1}(1 - P_m(T))\sigma_1 - \mu_0) / \sigma_0) \end{aligned} \quad (5)$$

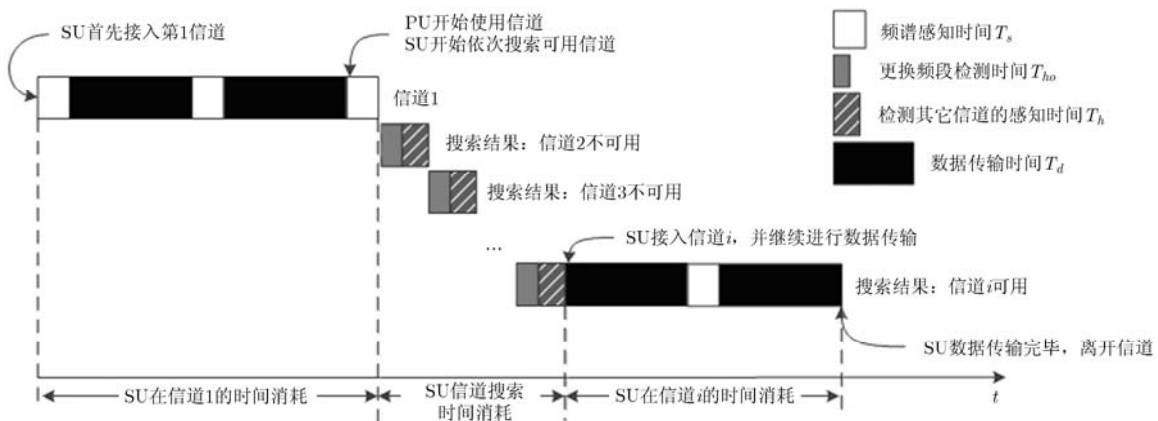


图 1 SU 时间消耗模型

3 最优频谱感知时间和最优信道搜索时间

T_s 和 T_h 的确定需要在满足预期虚警概率和漏警概率的同时, 尽量减小频谱感知时间。这里将 T_s 和 T_h 的确定过程描述为一个优化问题

$$\begin{aligned} [T_{s,\text{best}}, T_{h,\text{best}}] &= \arg \min_{T_s, T_h} f(T_s, T_h), \\ \text{s.t. } P_m &= C, P_{\text{fa}}(T_s, T_h) \leq D, T_s > 0, T_h > 0 \end{aligned} \quad (6)$$

为简便起见, 这里设 $P_m(T_s) = P_m(T_h) = C$ 。目标函数 $f(T_s, T_h)$ 为非数据传输时间消耗。假设 SU 首先工作在第 1 个信道, 那么

$$f(T_s, T_h) = T_s + (T_h + T_{ho}) \cdot (p_1(1-C) + (1-p_1)P_f(T_s)) \overline{CH} \quad (7)$$

其中 \overline{CH} 表示由于 PU 利用信道 1 而致使 SU 检测其它 M 个信道的信道总数的期望。 p_1 为 PU 实际占用信道 1 的概率, $p_1 = \lambda_1 T_{\text{pu}}$ 。为简便起见, 设 $M+1$ 个信道的 PU 到达强度和驻留时间均值相等, $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda$, 所以 $p_2 = p_3 = \dots = p = \lambda T_{\text{pu}}$ 。这里设 $T_{\text{pu}} = 1 \text{ s}$ 。

$$\begin{aligned} \overline{CH} &= 1 + 2 \cdot P_{2,\text{pu}}(T_h) + \dots + M \cdot \prod_{i=1}^M P_{i,\text{pu}}(T_h) \\ &= 1 + 2 \cdot \{p(1-C) + (1-p)P_f(T_h)\} + \dots + M \\ &\quad \cdot \{p(1-C) + (1-p)P_f(T_h)\}^{M-1} \end{aligned} \quad (8)$$

设 $\varpi = p(1-C) + (1-p)P_f(T_h)$, 化简式(8)得

$$\overline{CH} = \frac{1 - \varpi^M}{1 - \varpi} + M\varpi^{M-1} \quad (9)$$

其中 $P_{i,\text{pu}}(T_h)$ 表示 SU 在 T_h 时间内检测第 i 个信道时, 得到 PU 信号存在结果的概率。

约束条件中, $P_{\text{fa}}(T_s, T_h)$ 为频谱检测总时间内的虚警概率

$$P_{\text{fa}}(T_s, T_h) = P_f(T_s) + [P_f(T_h)]^{\overline{CH}} \leq D \quad (10)$$

由于 $\overline{CH} \geq 1, P_f(T_h) \leq 1$, 所以

$$P_f(T_s) + [P_f(T_h)]^{\overline{CH}} \leq P_f(T_s) + P_f(T_h) \leq D \quad (11)$$

为简化优化过程, 这里将式(6)中的 $P_{\text{fa}}(T_s, T_h)$ 替换为 $P_f(T_s) + P_f(T_h)$ 。式(6)的求解不是一个凸优化问题。这里使用文献[9]中的罚函数方法和枚举方法得到最优 $T_{s,\text{best}}, T_{h,\text{best}}$ 。

4 最优数据传输时间

该节讨论如何根据第 2 节得到的 $T_{s,\text{best}}$ 、虚警概率要求、漏警概率要求、不同信道的 PU 到达强度以及 SU 实际传输需求得到能够使传输效率最大化的最优数据传输时间 T_d 。

如图 2 所示, 信道 i 的周期时间可表示为

$$T = K \cdot \tau + T_s \quad (12)$$

其中 τ 为传输单个数据包所需的时间, K 为单周期传输的数据包数。设 SU 被 PU 打断前, 在信道 i 传输的数据包数为

$$N_{at} = ZK \quad (13)$$

其中 Z 为 SU 在切换信道前在信道 i 所经历的周期数, $Z = 1, 2, 3, \dots, X$, s.t. $X \geq N/K$ 。信道 i 的最优数据传输时间 T_d 的求解问题可以描述为

$$T_{d,\text{best}} = \left[\arg \max_K E(N_{at}) \right] \cdot \tau \quad (14)$$

其中 $E(N_{at})$ 为 N_{at} 的期望。这样求解 $T_{d,\text{best}}$ 就转换为求解最优单次传输数据包数 K_{best} 。

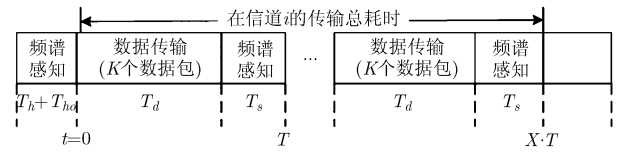


图2 单次传输数据包计算模型

PU 到达间隔符合指数分布, Z 的分布函数为

$$\left. \begin{aligned} P\{Z \geq 0\} &= 1 \\ P\{Z \geq 1\} &= (1-c-d)e^{-\lambda T} \\ P\{Z \geq 2\} &= (1-c-d)^2 e^{-\lambda 2T} \\ &\vdots \\ P\{Z \geq X_i\} &= (1-c-d)^X e^{-\lambda X T} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

令错误检测概率为 $b = C + D, a = (1-b)e^{-\lambda T}$, 可得

$$\left. \begin{aligned} P\{Z = 0\} &= 1 - a \\ P\{Z = 1\} &= a - a^2 \\ &\vdots \\ P\{Z = k\} &= a^k - a^{k+1} \\ &\vdots \\ P\{Z = X-1\} &= a^{X-1} - a^X \\ P\{Z = X\} &= a^X \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

N_{at} 的期望为

$$\begin{aligned} E(N_{at}) &= \sum_{n=0}^X nK \cdot P(Z = n) \\ &= K \cdot \left\{ (a - a^2) + 2(a^2 - a^3) + 3(a^3 - a^4) + \dots \right. \\ &\quad \left. + (X-1)(a^{X-1} - a^X) + Xa^X \right\} \\ &= K(a + a^2 + \dots + a^X) \\ &= K \cdot a(1 - a^X) / (1 - a) \end{aligned} \quad (17)$$

化简式(17)。求 $d[E(N_{at})]/d(K)$ ，得

$$d[E(N_{at})]/d(K) = \frac{-C^2EK^2 - 2BCEK + BE - B^2E - CD}{(B + CK)^2} \quad (18)$$

其中 $B = (b + \lambda \cdot T_s - b \cdot \lambda \cdot T_s)$ ， $C = (1 - b) \cdot \lambda \cdot \tau$ ， $D = N \cdot b \cdot (1 - E)$ 和 $E = 1 - e^{-\lambda \tau N}$ 。式(18)的推导过程略。

令 $d[E(N_{at})]/d(K) = 0$ ，可得

$$K_{best} = \frac{-BE + \sqrt{E(BE - CD)}}{CE} \quad (19)$$

$$T_{d,best} = K_{best} \cdot \tau \quad (20)$$

5 数据传输过程

SU 需要传输 N 个数据包，数据传输过程如图 3 所示。

6 数值和仿真结果分析

该节首先使用数值方法分析所提出最优频谱感知时间、最优信道搜索时间和最优数据传输时间的计算方法，然后使用蒙特卡罗仿真比较所提出的周期数据传输优化机制和两种已知的周期数据传输机制的性能。

仿真参数如下：系统共有 10 个信道，虚警概率和漏警概率上限分别设为 $P_f = 0.01$ ， $P_m = 0.01$ 。根据 802.22 标准^[7]， $T_{ho} = 1$ ms，选用 QPSK 调制方式， $\tau = 0.85$ ms。抽样频率为 6 MHz，噪声功率谱密度为 -174.2 dBm/Hz，PU 信号的 SNR 为 -15 dB，传输数据包总数 $N = 4000$ 。PU 到达强度为 $\lambda = \{0, 0.1, \dots, 0.9\}$ 。PU 单次使用信道时间为 $T_{pu} = 1$ s。

6.1 数值结果分析

不同 PU 到达强度下的 $T_{s,best}$ ， $T_{h,best}$ 和 \overline{CH} 如表

表 1 不同主用户到达强度下的 $T_{s,best}$ ， $T_{h,best}$ 和 \overline{CH}

| PU 到达强度 | $T_{s,best}$ (ms) | $T_{h,best}$ (ms) | \overline{CH} |
|-----------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| $\lambda = 0$ | 3.39 | 3.39 | 1.01 |
| $\lambda = 0.1$ | 3.45 | 3.35 | 1.16 |
| $\lambda = 0.2$ | 3.73 | 3.23 | 1.29 |
| $\lambda = 0.3$ | 4.25 | 3.14 | 1.54 |
| $\lambda = 0.4$ | 5.39 | 3.09 | 1.73 |
| $\lambda = 0.5$ | 6.01 | 3.01 | 1.97 |
| $\lambda = 0.6$ | 6.73 | 2.93 | 2.43 |
| $\lambda = 0.7$ | 7.40 | 2.82 | 3.39 |
| $\lambda = 0.8$ | 7.98 | 2.77 | 5.13 |
| $\lambda = 0.9$ | 8.75 | 2.73 | 9.12 |

1 所示。由表 1 可得到如下结论：随着 λ 的增加， $T_{s,best}$ 增大， $T_{h,best}$ 趋于一个最小值，且 \overline{CH} 增大。原因分析：由式(3)和式(5)可知，由于 σ_0^2 及 σ_1^2 和 T 成反比，所以 $P_f(T)$ 是 T 的减函数。当 λ 增加时，由于 PU 使用信道的概率增加使 \overline{CH} 的增大。由于 \overline{CH} 的增大，式(7)中的 $T_{h,best}$ 和 $P_f(T_{s,best})$ 成为影响目标函数的主要因素，所以为了最小化目标函数， $T_{h,best}$ 随着 λ 的增大而减小， $T_{s,best}$ 随 λ 的增大而增大。与此同时， $P_f(T_{s,best})$ 和 $P_f(T_{h,best})$ 成为影响总虚警概率(式(11))的重要因素。总虚警概率的上限也限制了 $T_{s,best}$ 和 $T_{h,best}$ 的变化范围。

不同 PU 到达强度 λ 下，根据式(20)所得到的最优数据传输时间 $T_{d,best}$ ，根据 MATLAB 计算 $d[E(N_{at})]/d(K)$ 所得到的最优数据传输时间 $T_{md,best}$ 和信道传输数据包数 $E(N_{at})$ 的关系如图 4 所示。其中 $T_{s,best}$ 由式(6)得到。如图 4 所示，在所有的 λ 取值情况下， $T_{d,best}$ 和 $T_{md,best}$ 都相近并且能够得到最大 $E(N_{at})$ 。

6.2 仿真结果分析

该部分通过仿真比较本文的周期数据传输优化机制 ADT(Adaptive Data Transmission)与文献[10]

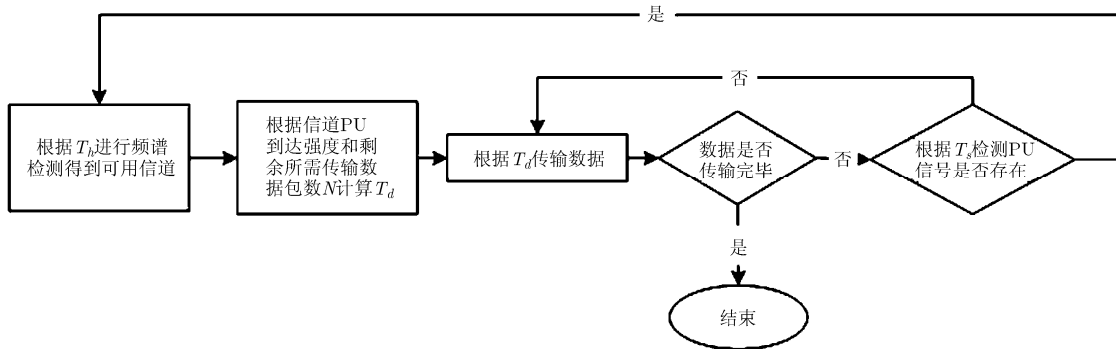


图 3 数据传输过程流程图

的吞吐量最大化数据传输方案 STT(Sensing-Throughput Tradeoff)及文献[11]的非理想感知周期数据 (Imperfect Spectrum Sensing Periodic Data, ISSPD)传输方法的系统性能。另外,通过仿真验证了本文所提出的最优频谱感知时间和最优信道搜索时间的虚警概率和检测概率。

STT 在固定帧长(100 ms)内根据 PU 占用信道的概率动态调整频谱感知时间以提高系统吞吐量;ISSPD 固定频谱感知时间(1 ms),并根据 PU 使用信道的概率得到最优数据传输时间以最大化系统吞吐量。STT 属于固定帧长的传输方法。ISSPD 和本文的 ADT 属于变帧长的传输方法,根据系统环境动态决定 SU 每次数据传输的帧长。STT 和 ISSPD 均未区分频谱感知时间和信道搜索时间,也并未考虑 SU 的数据传输需求。此外,STT 和 ISSPD 仅考虑 PU 占用信道的概率,并未考虑 PU 的到达强度。由于 3 种方案传输 4000 个数据包均需要 3400 ms,所以这里比较 3 种方案的非数据传输时间消耗。非数据传输时间消耗表示为 T_{ndc} , $T_{ndc} = T_{hc} + T_{sc}$, 其中 T_{hc} 和 T_{sc} 分别为 SU 的信道搜索时间消耗和频谱感知时间消耗。

不同 PU 到达强度下,3 种方案的 T_{ndc} 如图 5 所示。由图 5 可知:(1) 3 种方案的 T_{ndc} 均随着 PU 到达强度(λ)的增大而增大。(2) 就 T_{ndc} 而言,STT >ISSPD >ADT。原因分析:(1) λ 增加时,PU 更加频繁地接入信道且 SU 接入信道的概率减少, SU 搜索信道的概率增加,从而导致 T_{ndc} 增加。(2) λ 较小时,PU 打断 SU 数据传输的概率较小,即 SU 搜索可用信道的概率较小,这种情况下 T_{sc} 在 T_{ndc} 中的比重较大。 T_{sc} 是 T_s 增函数,是帧长的减函数,ADT 的 T_s 略小于 STT 的 T_s ,大于 ISSPD 的 T_s 。但 λ 较小时,ADT 的帧长远大于 ISSPD 和 STT 的帧长,所以 ADT 的 T_{sc} 小于 ISSPD 和 STT 的 T_{sc} 。例如 $\lambda = 0.1$ 时,ADT, STT 和 ISSPD 的 T_{sc} 和 T_{ndc} 分别为 {20.7 ms, 172.7 ms, 56.5 ms} 和 {23.2 ms, 193.4 ms, 63.1 ms}。(3) λ 较大时,PU 打断 SU 数据传

输的概率较大,即 SU 需要搜索可用信道的概率较大, SU 需要搜索更多的信道才能得到可用信道,从而使 T_{hc} 增加。并且在搜索过程中,最后得到可用信道的 T_h 会代替该传输周期的 T_s 。所以这种情况下, T_{hc} 在 T_{ndc} 中的比重较大。 T_{hc} 是 λ, P_f 和 T_h 的增函数,是帧长的减函数。当 λ 逐渐增大时,ADT 的帧长在逐渐缩小,仍大于 STT 和 ISSPD 的帧长,但是 ISSPD 和 STT 并未区分 T_h 和 T_s ,且 ADT 的 T_h 小于 STT 的 T_h ,所以 ADT 的 T_{hc} 小于 STT 的 T_{hc} 。虽然 ISSPD 的 $T_h = T_s = 1$ ms,但是其 P_f 高于 ADT 和 STT 的 P_f ,这会导致虚警事件带来的不必要的信道搜索过程,从而使 T_{hc} 增加,所以 ADT 的 T_{hc} 小于 ISSPD 的 T_{hc} 。例如当 $\lambda = 0.9$ 时,ADT, STT 和 ISSPD 的 T_{hc} 和 T_{ndc} 分别为 {853.2 ms, 4018.3 ms, 1646.5 ms} 和 {1112.8 ms, 4578 ms, 1841 ms}。

在 SNR=-15 dB 的情况下,ADT 的检测概率和虚警概率随频谱感知时间的变化情况如图 6 所示。由图 6 可知,ADT 实现预期的检测概率 $P_d \geq 0.99$, 并且其虚警概率随着感知时间的增长而降低。由表 1 可知, $T_{s,best}$ 和 $T_{h,best}$ 的最小值分别为 3.39 ms 和 2.73 ms。所以只要 PU 占用信道,那么第 3 节所得到的 $T_{s,best}$ 和 $T_{h,best}$ 均能实现所设定的检测要求($P_m \leq 0.01, P_f \leq 0.01$)。

7 结论

CR 系统中, SU 需要检测 PU 是否占用信道,若检测到 PU 未占用信道,则可以接入该信道进行数据传输。在设计频谱感知时间、信道搜索时间和数据传输时间时, SU 一方面需要对 PU 有足够的保护,另一方面要保证 CR 系统的传输效率最大。本文通过优化的方式得到了最优数据传输时间、最优信道搜索时间以及最优数据传输时间。所提出的数据传输机制能够在漏警概率和虚警概率符合预定要求的前提下,有效降低数据传输延迟。

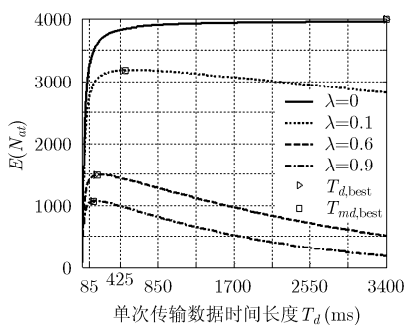


图 4 不同数据传输时间下的传输数据包期望

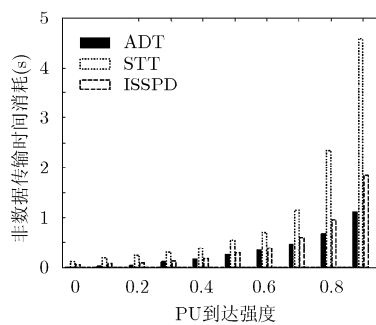


图 5 3 种传输机制的非数据传输时间消耗

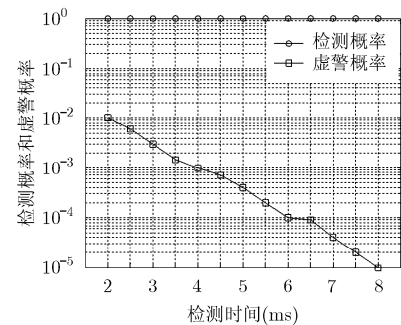


图 6 检测概率和虚警概率

参考文献

- [1] Tong A T. Opportunistic spectrum access for energy-constrained cognitive radio[C]. IEEE VTC' 2008, Barcelona Spain, 2008: 1559-1563.
- [2] Quan Z. Optimal linear cooperation for spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2008, 2(1): 28-40.
- [3] Zhang Jiang, Qi Lina, and Zhu Hongbo. Optimization of MAC frame structure for opportunistic spectrum access[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2012, 11(6): 2036-2045.
- [4] Choi Kae Won and Hossain E. Opportunistic access to spectrum holes between packet bursts: a learning-based approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2011, 10(8): 2497-2510.
- [5] Malka N, Kotagiri R, and Moshe Z. Handoff optimization using hidden Markov model[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2011, 18(7): 411-415.
- [6] Shiang H P and Van der Schaar M. Queuing-based dynamic channel selection for heterogeneous multimedia application over cognitive radio network[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2008, 10(5): 896-909.
- [7] IEEE Std 802.22. Cognitive wireless ran medium access control and physical layer specifications[S]. 2011.
- [8] Shen J, Liu S, and Wang Y. Robust energy detection in cognitive radio[J]. *IET Communication*, 2009, 3(6): 1016-1023.
- [9] Bazaraa M S, Sherali H D, and Shetty C M. Nonlinear Programming Theory and Algorithms[M]. New York: John Wiley & Sons, 2006: 469-533.
- [10] Liang Y C. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2008, 7(4): 1326-1337.
- [11] Tang W, Shakir M Z, and Imran M A. Throughput analysis for Cognitive Radio networks with multiple primary users and imperfect spectrum sensing[J]. *IET Communication*, 2012, 6(17): 2787-2795.
- 许瑞琛: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为认知无线电频谱接入机制和隐马尔科夫理论.
- 蒋挺: 男, 1962年生, 教授, 研究方向为最优屏蔽序列偶、无线传感器网络和物联网.