

# 基于隐马尔可夫模型和状态持久性的 动态频谱检测

郭德超<sup>1</sup>, 张豪<sup>2</sup>

(1. 广州中医药大学 公共卫生与管理学院, 广州 510006;

2. 广州市疾病预防控制中心, 广州 510440)

**摘要:** 针对复杂无线通信环境中的动态频谱接入进行了研究, 提出了一种基于隐马尔可夫模型和状态持久性的动态频谱检测方案; 具体来说, 提出的方案在能量窗口检测的基础上, 首先将每个主用户随时间变化的信号能量表示为一个随机过程, 然后利用隐马尔可夫模型和状态持久性的概念设计出了两种检测器来检测这些主用户和二级用户之间的差异, 并尝试根据它们的统计特征来区分信号, 从而提高可用空白频谱的检测精度和它们的动态频谱接入能力; 仿真实验结果表明, 提出的方案不仅可区分复杂无线通信环境中的传输源, 而且还可提高动态频谱检测的性能。

**关键词:** 无线通信环境; 频谱利用; 能量窗口检测; 隐马尔可夫模型; 状态持久性; 检测精度

## Dynamic Spectrum Detection Based on HMM and State Persistence

GUO Dechao<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>2</sup>

(1. School of Public Health and Management, Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou 510006, China;

2. Guangzhou Center for Disease Control and Prevention, Guangzhou 510440, China)

**Abstract:** Dynamic spectrum access problem in complex wireless communication environment is studied in this paper, and a dynamic spectrum detection scheme based on hidden Markov model (HMM) and state persistence is proposed. Specifically, on the basis of the energy window detection, firstly, the proposed scheme represents that the signal energy of each primary user changing with time is represented as a random process, secondly, two detectors are designed to detect the differences between the primary and secondary users by using the HMM and concept of state persistence, and try to distinguish the signal according to their statistical characteristics, so as to improve the detection accuracy of available white spectrum and access ability of the dynamic spectrum. The simulation results show that the proposed scheme can not only distinguish the transmission source in the complex wireless communication environment, but also improve the performance of the dynamic spectrum detection.

**Keywords:** wireless communication environment; spectrum utilization; energy window detection; HMM; state persistence; detection accuracy

## 0 引言

由于众多不同无线通信设备的使用, 使得频谱可用频段正成为一种非常有限和稀缺的资源, 因此, 有效利用资源就成为一种义务。动态频谱感知在频谱访问中起着关键作用, 必须执行频谱感知来识别许可用户的传输, 这样既可避免对它们的有害干扰, 还能发现允许认知无线电设备之间进行通信的机会。

众所周知, 静态频谱分配存在很大的局限性, 因为它在频谱中留下了未充分利用的机会, 这些机会可能出现在空间中, 但主要出现在时间中。有些地方有充分可用的频段, 但又不能被利用, 因为它们被限制在授权用户。空间

机会可以采用地理定位工具和更新频谱分配数据库以及有效的授权用户占用来发掘<sup>[1-3]</sup>。然而, 随着时间的推移, 平均利用率明显较低, 即使在高密度地区, 研究表明平均利用率也在下降<sup>[4]</sup>。这成为机会式频谱接入的巨大动机, 它可以利用授权用户的静默时段(也称为空白频谱)来建立二级(非授权)通信, 用于创建新的通信网络或改进已建立网络的性能。

为了利用这些空白频谱机会, 需要保护原有设备也称为主用户(PUs, primary users)不受干扰。希望从空白频谱获益的用户必须感知信道并寻找来自于PU的传输; 能量检测具有简单、响应时间短和计算成本低等优点, 是绝多

收稿日期: 2022-09-01; 修回日期: 2022-09-27。

基金项目: 国家自然科学基金委员会面上项目(81973979); 广东省中医药健康服务与产业发展中心(2020YJZX016)。

作者简介: 郭德超(1978-), 男, 河南方城人, 硕士, 讲师, 主要从事信息管理方向的研究。

通讯作者: 张豪(1979-), 女, 河南方城人, 硕士, 副主任医师, 主要从事疾病预防和信息管理方向的研究。

引用格式: 郭德超, 张豪. 基于隐马尔可夫模型和状态持久性的动态频谱检测[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(12): 91-97.

数无线设备的可用选择。尽管诸如循环平稳特征检测技术有较高的精度，但意味着复杂和昂贵的设备，所以很少采用。

文献 [5] 提出了一种基于匹配滤波器或循环平稳特征的检测技术，但实现起来非常复杂；文献 [6-8] 提出的能量检测技术都是在信号电平相比于噪声电平低的环境中识别 PU。这种情况使得能量检测极容易出现误报（噪声被错误地认为是 PU 信号）和漏检（PU 信号被识别为噪声而未被检测到）。而且上述研究没有解决二级用户（SUs, secondary users）的存在和它们对特定传输介质造成的干扰；文献 [9] 的方案尽管考虑了 SUs，但认为 SUs 只会导致噪声的不确定性，这使得 PU 与噪声的区分更加困难。

当感知到的 PU 功率明显高于噪声，且多个 SU 争用介质访问时，会出现不同的问题。针对这种情况，文献 [10] 假设 PU 可以通过某种第三方解决方案精确检测，但讨论的主要问题是频谱空洞的最佳利用；文献 [11] 的研究仅考虑单个 PU 的存在，认为传输遵循某种统计分布，并用一个开/关进程来表示。这时，信号被认为是非常低的，接近信噪比（SNR, signal to noise ratio）墙，并与噪声混淆；文献 [12] 基于 PU 开/关进程，利用实际测量值验证了频谱利用的马尔可夫链的存在性；文献 [13] 针对认知网络的频谱感知，提出了一种强化 Q 学习算法。但这种检测算法仅考虑 SUs 而不考虑 PUs，所以会隐舍地丢弃 PUs 留下的传输机会；为了降低频谱感知的算法复杂度，文献 [14] 提出了一种基于噪声估计和支持向量机的频谱感知算法。该算法着重于感知机制复杂度的研究，而且针对已知的子信道而言，不适用于动态频谱的感知，从而导致对感知性能的损伤。

频谱感知可以在物理层或链路层进行。在物理层，重点是有效检测 PUs 的信号，最大限度地减少误报和漏检；链路层感知关注于机会的发现和最大化，同时将空白频谱识别延迟最小化，即确定要感知的频带和感知时间。本文采用了一种跨层的方法，利用物理层获取的信息最大化链路层机会的发现，获取的信息就是关于时隙的能量检测结果。

感知机制通常采用 2 个指标进行评价。

1)  $P_{FA}$  (false alarm probability, 误报概率, 简称误报率): 当信号不存在时, 感知器报告信号存在的概率;

2)  $P_{MD}$  (missing detection probability, 漏检概率, 简称漏检率): 感知器在介质中未能报告信号的概率。

在物理层, 这两个指标是关于发射器的信号和噪声之间的区别。与 PU 识别相关的问题是在低信噪比 (SNR, signal to noise ratio) (甚至在某些情况下是负 SNR) 情况下 PU 信号和噪声之间的区别。

大多数感知技术依赖于协调的静默时段, 因此唯一可能观测到的信号来自于 PU。一般来说, 这种 PU 过程表现出在等效 SU 过程中不出现的一些特征, 很难找到 PU 和 SU 具有相同的特征; 因此, 本文提出了一种不依赖于协调

的静默时段, 而是尝试根据它们的统计特征来区分信号。具体来说, 利用隐马尔可夫模型 (HMM, hidden Markov models) 和状态持久性的概念来检测这些 PUs 和 SUs 的差异, 从而提高可用空白频谱的检测精度, 以提高它们的动态频谱接入能力; 仿真实验结果表明, 本文提出的方案不仅可区分复杂无线通信环境中的传输源, 而且还可提高频谱感知的性能。

## 1 系统模型及能量窗口检测器

在物理层,  $P_{FA}$  和  $P_{MD}$  有闭合形式的方程<sup>[15]</sup>。本文尽管采用相同的指标, 但将它们重新定义如下:

$$P_{FA} = \frac{FA}{Off_P} \quad (1)$$

$$P_{MD} = \frac{MD}{On_P} \quad (2)$$

式中,  $FA$  为检测到的误报数,  $Off_P$  为 PU 未发送的总观测数,  $MD$  为漏检数,  $On_P$  为 PU 发送的总观测数。

由诸如衰落、多径、传播问题等许多物理现象和特性导致无线介质充满了不确定性。另一个大的不确定性与发射器识别有关, 更具体地说, 发射器是否为 PU。图 1 为介质如何被一个 PU 和多个 SU 争用空白频谱的示例。

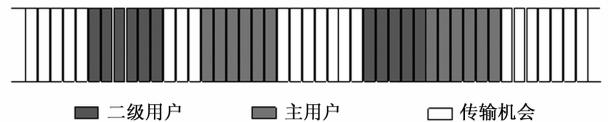


图 1 介质使用模式

在这种情况下, 时间是离散的, 而且被视为一个固定持续时隙序列。时隙持续时间可以代表硬件特性, 如响应延迟, 并且对于能量检测器来说, 假设为  $\mu s$  级。一个连续的时隙序列可以理解一个窗口。窗口有固定的长度 (时隙数), 而且窗口可以用两种方式来代表介质: 块窗口和滑动窗口。块窗口以块的方式在时间上向前推进, 然后丢弃。在这种方式中, 每个时隙是单个窗口的一部分; 滑动窗口具有先进先出 (FIFO, first in first out) 的结构, 即最新的时隙添加到队列的末尾, 而最早的时隙被删除, 以保持窗口大小不变。图 2 为一个随时间移动的滑动窗口。

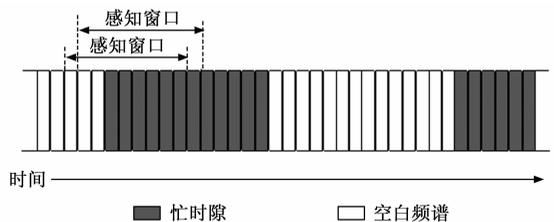


图 2 滑动窗口

能量检测器由一个滑动的观测窗口和占用参数构成, 这些参数将最终决定介质的状态。每次观测实际上是对介质的一种特定读数, 这与它在一个时隙时间内所理解的情况相对应。由于时间是一个连续的流, 在这里用一个连续

的时隙序列建模, 观测可以用来表示完整的时间 (通过对每个时隙进行观测) 或通过样本的收集。图 3 为由时间时隙的样本构成的观测窗口。

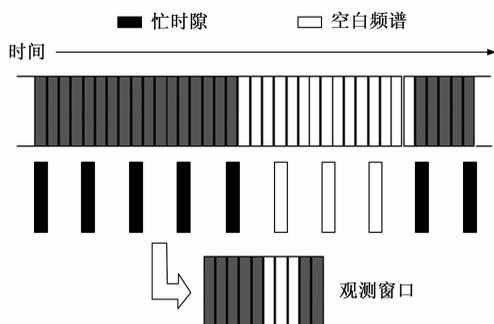


图 3 采样观测窗口

把通过能量检测识别 PU 的问题建模为对一个滑动窗口的每个时隙和窗口占用参数的二元假设:

$$Y_t = \begin{cases} W_t & t = 1, 2, \dots, T \quad \text{信号缺失} \\ W_t + X_t & t = 1, 2, \dots, T \quad \text{信号存在} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $Y_t$  是时刻  $t$  的能量级,  $W_t$  是噪声,  $X_t$  是发射器的信号功率,  $T$  是时隙持续时间。平均时隙信号电平由  $Z_y$  定义:

$$Z_y = \frac{\sum_{t=1}^T Y_t}{T} \quad (4)$$

通过式 (4) 计算的平均值意味着感知器应当在时隙的持续时间内侦听介质。平均信号电平可以通过不同的方法来得到, 如图 4 所示, 其中平均能量级相当于一个低持续时间长能量读数。通过这种方法, 可以获得更好的感知器响应, 避免重新计算。

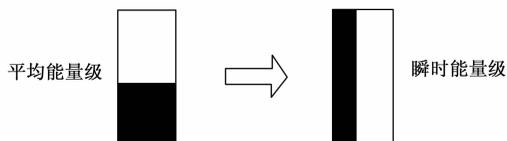


图 4 平均能量级和瞬时能量级

能量检测器的其中一个参数是  $\epsilon$ , 即一个时隙的占用阈值, 它表示高于噪声的信号电平的时隙时间的百分比。另一个参数是  $Y_z$ , 这是为了考虑时隙忙所需的等效平均值。

如果满足式 (5), 则声明该时隙已被占用 (或忙):

$$\epsilon T \leq \frac{\sum_{t=1}^{\epsilon T} Y_t}{Y_z} \quad (5)$$

最后, 当窗口中有  $\rho\tau$  个时隙被占用时, 则能量窗口检测器认为存在一个 PU, 这里  $\rho$  为窗口占用百分比参数,  $\tau$  为用时隙数表示的窗口大小。

## 2 基于 HMM 和状态持久性检测器

PU 通常表现出统计上描述良好的访问模式, 而且这种模式倾向于随时间变化不大。在复杂系统中, 有许多模式识别技术用于识别状态分布。本文提出一种基于 HMM

的技术。

HMM 方法考虑了描述系统的马尔可夫过程的存在性, 但该过程可能不被直接观测到, 但每个状态发出一个可观测的符号。从观测者的角度来看, 符号可以以给定的概率从系统的任何状态发出。HMM 的这一特性使得它成为描述复杂无线环境的强有力工具, 特别是描述所需实体的传输模式。

从感知介质的角度来看, 把可以观测到的符号建模为 0 (无能量) 或 1 (介质中的能量)。信号的来源 (当它存在时) 是隐藏的, 通过采用表示 PU 传输模式的 HMM, 有可能以某个概率确定 PU 是否是产生观测符号的源。

HMM 建模 (用  $\lambda$  表示) 由以下要素描述:

- 1) 初始概率: 定义每个状态  $i$  在系统中处于第一的概率 ( $\pi_i$ );
- 2) 转移概率: 定义从一个状态  $i$  到另一个状态  $j$  (或到相同状态) 的转移概率 ( $a_{ij}$ );
- 3) 观测概率: 表示在给定状态  $i$  中观测符号  $O$  的概率 ( $b_i(O)$ );
- 4) 状态集: 描述系统的状态的集合 ( $N$ );
- 5) 可观测符号集: 可以从状态集中观测到的符号集合 ( $M$ )。

构成 HMM 的要素选择直接影响在表示特定现象时模型的性能。需要特别注意最能代表马尔可夫过程的状态数选择。尽管没有确定的机制来得到最能代表过程的状态集, 但是观测它的行为通常会得到对所涉及的不同阶段的感知。其他要素, 包含代表过程的概率, 是通过一个称为训练的过程获得的, 这个过程基本上可以通过 Baum-Welch 和  $k$ -均值两种算法来完成。

下面来设计 2 种基于 HMM 的检测器。第一种基于完全前一后向 (CFB, complete forward-backward) 算法得到, 第二种称为传输字检测 (TWD, transmission word detection), 它是一种基于状态持久性概念和给定长度的等符号序列被观察到的概率的新方法。

设所考虑的 PU 为一个实体, 它采用某种形式的固定长度数据帧和已知调制以及比特率传输数据。通过观测 PU 的传输周期, 先设计一个描述 PU 传输特征的 3-态模型。每个状态表示传输周期内的一个阶段, 在训练过程后, 每个状态可以与一个这样的阶段相关联。不失一般性, 将给定的通信声明为: 状态 0 代表 PU 为静默的时段, 状态 2 代表 PU 活跃传送数据帧的时段, 状态 1 为小静默时段, 它可以在一个数据帧的结束和下一个数据帧的开始之间观测到。

在 PU 为唯一传输源的情况下, 该模型可以迅速识别它的特征, 但当介质可以接收第三方传输时, 就需要采取一种新的方法。当 SUs 争用空白频谱时, PU 模式并不完全存在, 因为静默时段将用于 SU 传输。然后, 模型必须尝试将观测结果与对应于 PU 传输的隐藏状态 (在本文的表示中就是状态 1 和 2) 进行匹配。下面提出通过 2 种不同的方式来实现这个目标。

### 2.1 完全前-后向算法自适应

采用 2 种不同的概率，与任意给定时刻  $t$  的可用观测窗口相关。这两个概率是前向  $\alpha_t(i)$  和后向  $\beta_t(i)$ ，定义如下：

$$\begin{cases} \alpha_t(i) = P(O_1 \dots O_t, S_t = i | \lambda) & i \in N, t = 1, 2, \dots, \tau \\ \beta_t(i) = P(O_{t+1} \dots O_\tau | S_t = i | \lambda) & i \in N, t = \tau - 1, \dots, 1 \end{cases} \quad (6)$$

前向概率  $\alpha_t(i)$  是观测一个符号序列  $O_1 O_2 \dots O_t$  和在时刻  $t$ 、隐藏状态为  $i$ 、给定一个 HMM  $\lambda$  的情况下的概率。后向概率  $\beta_t(i)$  的含义类似，即  $\beta_t(i)$  是在时刻  $t$ 、隐藏状态为  $i$ ，且从此以后，观测符号序列  $O_{t+1} O_{t+2} \dots O_\tau$  在给定一个 HMM  $\lambda$  的情况下的概率。

$\alpha_t(i)$  和  $\beta_t(i)$  可以分别通过以下递归过程计算：

1) 初始化：

$$\alpha_1(j) = \pi_j b_j(O_1) \quad 1 \leq j \leq N \quad (7)$$

2) 归纳：

$$\alpha_{t+1}(j) = \left[ \sum_{i=1}^N \alpha_t(i) a_{ij} \right] b_j(O_{t+1}) \quad 1 \leq t \leq \tau - 1 \quad 1 \leq j \leq N \quad (8)$$

3) 初始化：

$$\beta_\tau(j) = 1 \quad 1 \leq j \leq N \quad (9)$$

4) 归纳：

$$\beta_t(j) = \left[ \sum_{i=1}^N a_{ji} \beta_{t+1}(i) \right] b_j(O_{t+1}) \quad t = \tau - 1, \tau - 2, \dots, 1, \quad 1 \leq j \leq N \quad (10)$$

在每个时隙，得到一个新的观测结果，创建一个不同于前一个的观测窗口，因此必须重新计算前向和后向概率。

根据  $\alpha_t(i)$  和  $\beta_t(i)$ ，定义后验概率  $\gamma_t(j) \leq$  如下：

$$\gamma_t(j) = \frac{\alpha_t(j) \beta_t(j)}{P(O | \lambda)} = \frac{\alpha_t(j) \beta_t(j)}{\sum_{i=1}^N \alpha_t(i) \beta_t(i)} \quad (11)$$

后验概率  $\gamma_t(j)$  可以理解为观测一个符号序列  $O_1 O_2 \dots O_t$  和在时刻  $t$ 、隐藏状态为  $j$ 、且从这个相同时刻和隐藏状态开始，观测符号序列  $O_{t+1} O_{t+2} \dots O_\tau$  的概率，它通过  $P(O | \lambda)$  进行归一化， $P(O | \lambda)$  是给定 HMM  $\lambda$  的情况下，在观测窗口中观测完整符号序列的概率。然后，CFB 算法选择在观测窗口结束时后验概率最大的状态，即：

$$S_t = \arg \max_{1 \leq i \leq N} [\gamma_t(i)] \quad (12)$$

如果状态 1 或 2 是最可能的状态，则检测器将 PU 视为传输源。

### 2.2 传输字检测 (TWD)

PU 传输可以看作为一个符号序列，这些符号共同形成一个可识别的模式。比如在语音和符号之间作一个类比，其中一个语音序列构成一个要被识别的字 (单词)。传输字检测 (TWD) 的名称正是来源于此，说明了符号序列的思想，它只不过是从发射器形成一个“字”，应当在其他“声音”中进行识别。

CFB 根据后验最可能状态确定信号的来源。TWD 采用了类似的判决，但应用了不同的概念，即 TWD 在 HMM 中采用显式状态持续时间密度的概念。状态 1 和状态 2 的建模方式仍然与前面相同，但其目标不是确定系统在某一时刻

所处的特定最可能状态，而是旨在得到状态 1 或状态 2 可能产生一个观测序列的概率。这时，高概率意味着观测到的符号来自于一个 PU 传输，而低概率意味着信号尽管可以被检测到，但它不太可能来自于一个 PU。

观测序列源于一个 HMM  $\lambda (P(O | \lambda))$  产生的概率仅通过前向概率的计算给出：

$$P(O | \lambda) = \sum_{i \in C} \alpha_\tau(i) \quad C \subseteq N \quad (13)$$

因为我们只关心代表 PU 传输的状态，故  $C = \{1, 2\}$ 。这个模型没有状态到状态自身的转换，而是为每个状态定义一个持续时间概率密度  $p_i(d)$ ：

$$p_i(d) = (a_{ii})^{d-1} (1 - a_{ii}) \quad (14)$$

因此，需要调整前向概率。为此，定义最大持续时间  $D$ ，既可以限制计算成本，也可以更好地表示特定状态。由于实际表示介质中一个 PU 信号的状态是状态 2，因此，最大持续时间由式 (14) 和几何分布的期望值得到：

$$\begin{cases} Pr(X = k) = (1 - f)^{k-1} f \\ E[X] = D = 1/f \\ D = 1/(1 - a_{ii}) \end{cases} \quad (15)$$

式中， $Pr(X = k)$  为第  $k$  次转换第一次从状态  $i$  到不同状态  $j$  的概率，因此， $f = (1 - a_{ii})$ 。 $D$  是预期的  $X$ ，或在一个状态转换到另一个状态发生之前从一个状态转换到自身的预期转换次数。

前向概率分两部分计算，首先存储第一个  $D$  时间时刻的值：

$$\alpha_1(i) = \pi_i p_i(1) \cdot b_i(O_1) \quad (16a)$$

$$\alpha_2(i) = \pi_i p_i(2) \prod_{s=1}^2 b_i(O_s) + \sum_{j=1, j \neq i}^N \alpha_1(j) a_{ji} p_i(1) b_i(O_2) \quad (16b)$$

$$\alpha_3(i) = \pi_i p_i(3) \prod_{s=1}^3 b_i(O_s) + \sum_{d=1}^2 \sum_{j=1, j \neq i}^N \alpha_{3-d}(j) a_{ji} p_i(d) \prod_{s=4-d}^3 b_i(O_s) \quad (16c)$$

直至  $\alpha_D(i)$ 。

对于  $t > D$ ，其余的前向值为：

$$\alpha_t(i) = \sum_{j=1}^N \sum_{d=1}^D \alpha_{t-d}(j) a_{ji} p_i(d) \prod_{s=t-d+1}^t b_i(O_s) \quad (17)$$

除此之外，为了感知给定的符号序列是否可能来源于感兴趣的状态，需要一个缩放程序。

缩放应当完全依赖于执行时的时间时刻  $t$ ，因此它同样可以应用于任何状态，缩放原理如下：

$$\begin{cases} c_t = \frac{1}{\sum_{j=1}^N \alpha_t(j)} \\ \alpha_t^*(j) = \alpha_t(i) \cdot c_t \end{cases} \quad (18)$$

式中， $\alpha_t^*(i)$  为缩放值， $c_t$  是与时间时刻  $t$  相关的缩放系数。

这个方法无疑解决了趋于零值的问题，但它们不能反映观测序列和该序列来自于一个 PU 的概率之间的实际关系。如果观测窗口全是由一个 SU 传输产生的忙时隙，采用式 (18) 的缩放，则由式 (13) 得到的概率将接近于 1。这是由于缩放系数是所有状态的  $\alpha$  的和，而且当一个信号被检

测时(独立于源),  $\alpha_i(2)$  将占这个和的绝大部分, 所以乘积  $\alpha_i(2) * c_i$  将得到一个接近于 1 的值。

不同的缩放系数, 反映了前向概率值与观测源之间的实际关系。通过式 (18) 可以得出, 最小的  $c_i$  对应于有很高概率的观测值是仅由 PU 产生的(前向概率值的总和将高于由一个 SU 产生的值); 另一方面, 应当更新这个值, 以反映 PU 正在传输而 SU 可能正利用空白频谱的情形。这时, PU 模式不是完全存在的, 但它对系数有贡献, 这个系数比仅有 PU 传输的情况下更高, 比仅有 SU 传输的情况下更低。

在每个时刻  $t$ , 计算一个新的  $c_i$  候选值, 当前的  $c_i$  值按照以下算法进行更新:

1. if 候选  $C_i \leq$  当前  $C_i$ , then
2. 当前  $C_i \leftarrow$  候选  $C_i$
3. else
4. 当前  $C_i \leftarrow$  (权重  $w * 候选 C_i$ ) + (1 - 权重) \* (当前  $C_i$ )
5. endif

其中: 权重  $w$  是指数移动平均的系数。

TWD 通过计算式 (19) 确定一个 PU 的存在:

$$PUProb = \alpha * c_1(1) + \alpha * c_2(2) \quad (19)$$

$PUProb$  为任一状态 (1 或 2) 产生观测到的符号序列的概率。如果  $PUProb$  足够高, 则将 PU 声明为最有可能的存在。

### 3 方案性能评价

#### 3.1 仿真环境和参数设置

采用 NS-3<sup>[16]</sup> 对提出的方案性能进行评价。NS-3 是一个离散事件驱动网络仿真器, 是一个开源项目, 实现了大部分的 Internet 协议和算法, 可以进行多种网络的仿真, 包括有线网络、WiFi、4G 网络通信等; NS-3 本身也是多个项目合并而成, 采用 C++ 作为后台; 仿真中我们对 NS-3 进行改进来包含一些新的功能: 1) 创建一个从 WiFi 得到的新模块, 并扩展到集成认知无线电; 2) 对 IEEE 802.11 标准中的 DCF 机制进行修改, 以表示 PU (不需要等待退避, 只要有队列数据包就发送); 3) 创建作为介质感知器工作的应用; 4) 改变开/关应用程序, 更好地说明 PU 的行为。

在 CFB 和 TWD 中采用的 HMM 是通过仿真器的一个样本运行来训练的, 其中收集了 100 万个代表 PU 活动的符号。训练由 Baum-Welch 算法<sup>[17]</sup> 完成, 并运行 1 000 次迭代。全部仿真的时隙时间为 100  $\mu$ s, PU 数据包大小为 1 500 个字节长度, 以 1 Mbps 的物理数据速率传输。

仿真评价 TWD、CFB 和一般能量窗口检测器关于观测窗口大小对两个指标  $P_{FA}$  和  $P_{MD}$  的影响。此外, 考虑多个竞争 SU 对 3 种方案进行评价; 两个评价都是在任意传输的 PU、进行能量检测的节点和执行基于 HMM 的检测器的节点存在的情况下进行; PU 传输大约占仿真时间的 10%。

还在  $\epsilon=0.50$ 、 $\rho=0.10$  的条件下进行了试验, 在 TWD 中计算缩放系数的移动平均系数为 0.35。TWD 的一个重要

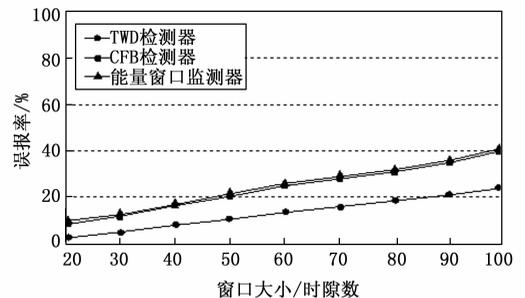
参数是阈值的定义, 如果超过该阈值, 则认为式 (19) 计算的概率高到足以表明 PU 的存在, 在仿真中, 这个值固定为 85%。

#### 3.2 观测窗口大小的评价

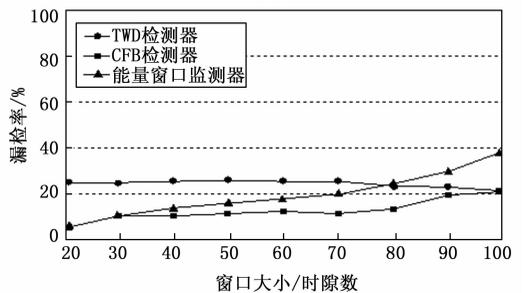
此评价的目标是确定感知机制能单独捕获 PU 的能力, 以及观测窗口大小对所考虑的指标的影响。因此, 这种情形下不存在 SUs, 期望结果是检测器能够有效地识别 PU 的访问模式。

图 5 为得到的结果。由图 5 (a) 可见, 随着观测窗口大小的增加, 误报增加。这可以用滑动窗口的机制来解释。对于窗口长度为  $\tau$  来说, 每个时隙都是接下来  $\tau$  个新窗口的一部分, 即使在 PU 关闭后, 标记其传输的时隙仍然存在于随后的窗口中。因此, 窗口越长, 这些时隙被考虑的时间就越长, 误报越多; 尽管 TWD 采用了状态持久性的概念, 但式 (15) 中得到的  $D$  值反映了介质的真实性, 这对 3 种检测器是相同的, 它是 PU 传输产生的可能的忙时隙数量。因此, 窗口大小接近这个数字会得到更好的结果。

另一方面, 漏检具有不同的行为特征, 如图 5 (b) 所示。随着窗口大小的增加, 仅 TWD 有很小的变化。这是由于 TWD 检测器寻找传输模式, 而空闲时隙对此没有什么影响。在该评价中, 明显大于  $D$  的窗口很大程度上是由空闲时隙组成的。能量窗口检测器不同于 TWD, 它具有类似于误报的倾向。滑动窗口机制仍可以解释能量窗口检测器的这种行为特征。能量窗检测器有一个延迟来声明 PU 的存在, 由第 2 节中描述的  $\rho$  来表示。窗口越大, 机制声明 PU 存在所需的 PU 传输时间就越长; 在这种情况下, CFB 在某些窗口尺寸上比 TWD 显示出更大的优势。这是由于 PU 是唯一的发射器, CFB 可以很容易地将观测到的符号与标记 PU 传输的状态联系起来。



(a) 误报



(b) 漏检

图 5 窗口大小对感知的影响

### 3.3 竞争 SU 的数量评价

在此评价中, 竞争 SU 的数量从 0 变到 5, SUs 是成对 WiFi 通信节点, 结果如图 6 所示。当有 2 个竞争 SU 时, 在图 6 (a) 和图 6 (b) 中都可以看到趋于平稳。对于能量窗口检测器, 误报率接近 100%。这一结果表明, 从观测到的总时隙和 PU 不传输的时隙来看, 几乎所有的时隙都有 SU 传输。式 (1) 表明, 如果误报数量增加, 其他传输就会到位。换句话说, 所有的空白频谱都被使用。事实上, 尽管由于空白频谱限制, 但能量窗口检测器可以有效地给出所遇到的所有空白频谱的大小; 在图 6 (b) 中, 能量窗口检测器有较好的结果, 但事实上, 低的漏检率是由于检测器在几乎所有的仿真过程中都声明 PU 的存在。

图 6 (a) 和图 6 (b) 还表明, TWD 较好地捕获了 PU 传输模式, 识别传输何时来自于 SU 并避免误报, 漏检率仍接近 20%, 是因为漏检的程度直接与 PU 预期接收的干扰有关; CFB 没有给能量检测带来任何好处。这源于它与 TWD 的两个主要区别: 在前向概率计算中嵌入的显式状态持续时间和传输状态的处理方式。CFB 强制声明 HMM 的一种状态是最可能的, 采用式 (18) 的标准缩放程序, 它无法识别当观测到的传输有很低的概率来自 PU。因此, CFB 观测介质中的信号很像能量窗口检测的方式。

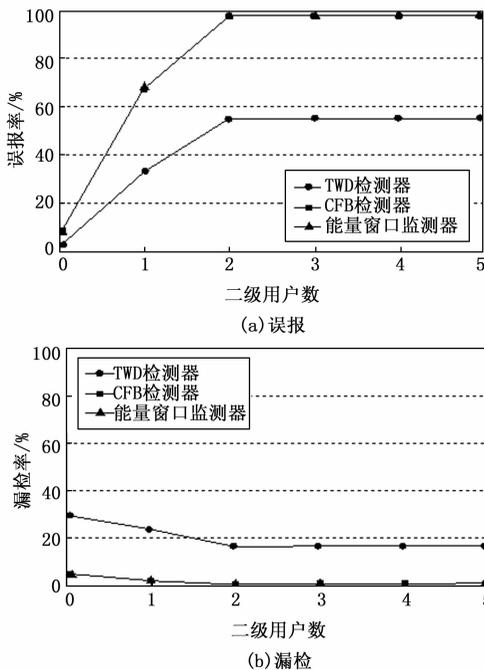


图 6 竞争 SUs 数量对感知的影响

## 4 结束语

本文在能量窗口检测的基础上, 提出了基于 HMM 模型和状态持久性的频谱能量感知方案。其中的 TWD 方案显著提高了能量检测的精度, 能得到更好的误报指标, 从而提高空白频谱的发现, 这源于对算法的改进, 特别是与缩放系数和 PUProb 阈值定义有关的改进是关键。通过略微调

整, TWD 还可用于预测信道状态, 通过避免感知被 PU 占用概率高的信道来辅助整个感知机制; 同时, 采用 HMM 来识别传输源消除了强制性静默时段 (当没有 SUs 可以传输时) 的需要。通过采用避免干扰机制, PU 识别精度的提高使得各 SU 可以自由地相互协调, 甚至可以同时访问介质, 提高动态频谱访问的性能。

### 参考文献:

- [1] 李 桐. 基于博弈理论的认知无线电频谱共享技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- [2] MAKGAMATHA A S, ZUVA T, MASONTA M T. Channel selection technique to satisfy secondary users quality of service (QoS) requirements in TV white space [C] // 2018 International Conference on Advances in Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD), Durban, South Africa, 2018: 1-8.
- [3] 李 斌, 赵成林, 南一江, 等. 一种移动授权用户频谱检测与其地理位置估计方法与装置 [P]. 中国: CN104469782B, 2018.
- [4] 张炎炎, 李文祺, 王宝聪, 等. 面向 5G 的 IMT 频谱使用效率评估 [J]. 移动通信, 2018, 42 (2): 6-10.
- [5] CHIWETE T M, HANCKE G P. Fast Convergence cooperative dynamic spectrum access for cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14 (8): 3386-3394.
- [6] 宁宏新. 多集采样和非线性最小二乘估计的频谱感知 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32 (11): 58-64.
- [7] CHATZIANTONIOU E, ALLEN B, VELISAVLJEVIC V, et al. Energy detection based spectrum sensing over two-wave and Diffuse power fading channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66 (1): 868-874.
- [8] 鲁春燕, 齐 程. 基于噪声不确定的双门限能量检测合作频谱感知算法 [J]. 电子设计工程, 2018, 26 (6): 100-104.
- [9] JAIN P P, PAWAR P R, PATIL P, et al. Narrowband spectrum sensing in cognitive radio: detection methodologies [J]. International Journal of Computer Sciences and Engineering, 2019, 7 (11): 105-113.
- [10] SULTANA A, FERNANDO X, ZHAO L. An overview of Medium access control strategies for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks [J]. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2017, 10 (5): 1113-1141.
- [11] GOHAIN P B, CHAUDHARI S, KOIVUNEN V. Cooperative energy detection with heterogeneous sensors under noise uncertainty: SNR wall and use of evidence theory [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2018, 4 (3): 473-485.
- [12] SARA M D, POPESCU D C, POPESCU D, et al. Analyzing the performance of spectrum sensing in cognitive radio systems with dynamic PU activity [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21 (9): 2037-2040.
- [13] 吴晓媛, 黎海涛. 基于 Q 学习算法的频谱感知 [J]. 国外电

子测量技术, 2019, 38 (7): 92 - 95.

[14] 聂勇, 叶翔, 翟旭平. 基于支持向量机和噪声估计的宽带频谱感知方法 [J]. 电子测量技术, 2017, 40 (2): 88 - 92.

[15] ZHENG M, LIANG W, YU H B, et al. Utility-based Opportunistic spectrum access for cognitive radio sensor networks: joint spectrum sensing and random access control [J]. Iet Communications, 2016, 10 (9): 1044 - 1052.

(上接第 90 页)

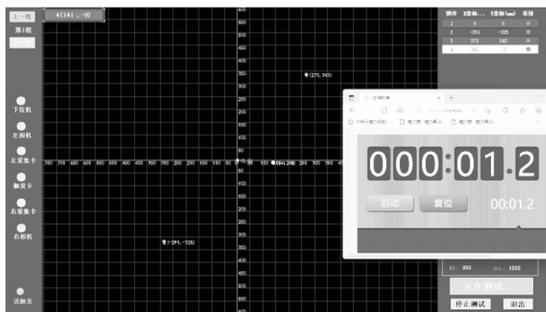


图 13 实际测试

使用能够满足数据实时显示的要求。

### 5 结束语

本文针对精度靶系统软件功能的需求分析, 参考一些该类型软件, 设计了一个采用 B/S 架构的 CCD 精度靶上位机软件, 关键设计了上位机服务器整体结构和核心模块 Netty 通信架构。通过模拟测试上位机满足通过网络稳定接收下位机传输数据的功能需求; 解决了 C/S 模式软件的扩展难度大, 维护成本高和用户后期使用升级复杂等问题。与 C/S 模式不同, B/S 模式软件的界面是基于浏览器进行首次全新开发, 和服务器采用 HTTP 进行交互。本系统软件目前前端页面部分还未完善, 存在页面布局和功能缺陷问题。

经分析选择 B/S 架构的设计思想<sup>[22]</sup>和面向对象的编程范式, 降低了各模块代码之间的耦合性, 使得软件维护的效率提升, 同时节省了软件开发的成本, 在一类具有上下位机工作属性的控制软件<sup>[23]</sup>设计方面具有重要意义。

### 参考文献:

[1] 董涛, 王铁岭. 四光幕交汇立靶改进系统 [J]. 西安工业学院学报, 2005 (6): 522 - 525.  
[2] 王泽民, 雷志勇, 李翰山, 等. 室内线阵 CCD 交汇测量系统研究 [J]. 西安工业大学学报, 2011, 31 (4): 321 - 325.  
[3] 马卫红, 倪晋平, 董涛, 等. 高精度 CCD 室内立靶测试系统设计 [J]. 光学技术, 2012, 38 (2): 180 - 184.  
[4] 樊丹丹, 于慧勇, 刘晨. 基于 B/S 架构的试验数据管理系统设计与实现 [J]. 电子测量技术, 2018, 41 (10): 50 - 54.  
[5] 丁力, 安海军. 试验数据管理系统的需求与实现 [J]. 航空计算技术, 2010 (3): 96 - 98.

[16] NS-3 Network Simulator. a discrete-event network simulator for internet system [EB/OL]. [2021 - 12 - 23]. <http://www.nsnam.org/>.

[17] PIETRAS M, KLESK P. FPGA implementation of Logarithmic versions of Baum-Welch and Viterbi algorithms for reduced precision hidden Markov models [J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2017, 65 (6): 935 - 946.

[6] 吴晓珊, 曹旭东, 王森, 等. 基于 B/S 架构的管理系统软件开发 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (2): 123 - 128.

[7] 史亚庆. 基于 B/S 架构的网络学习平台研究与实现 [D]. 西安: 西安理工大学, 2018.

[8] 刘伟, 孔袁莉, 雷斯聪, 等. 基于面向对象的通用控制软件的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (2): 145 - 150.

[9] 于大海, 袁杰, 白亮, 等. 主机控制软件在测发控系统中的应用研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (4): 102 - 105.

[10] 刘鹏, 宋为, 万俊. 基于 C/S 与 B/S 架构的科研项目管理系统 [J]. 软件导刊, 2010, 9 (1): 110 - 111.

[11] 苏东震, 陈明, 史忠植. 基于 B/S 架构的数据挖掘原型系统的设计与实现 [J]. 微电子学与计算机, 2008, 25 (12): 131 - 133.

[12] 龚鹏, 曾兴斌. 基于 Netty 框架的数据通讯服务系统的设计 [J]. 无线通信技术, 2016, 25 (1): 46 - 49.

[13] 吴晓珊. 基于 B/S 架构警用摩托车管理系统软件设计 [D]. 北京: 中国石油大学 (北京), 2019.

[14] 滕阳阳, 胡栋. 基于 Netty 的 HTTP 协议栈的扩展设计与实现 [J]. 无线通信技术, 2017, 26 (3): 38 - 42.

[15] 张存正. 网络异常行为自动识别技术研究 [D]. 北京: 北方工业大学, 2016.

[16] 曹明静. 基于网络异常行为的智能终端恶意软件检测技术研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2015.

[17] 曲豫宾, 李芳. 分布式微电网数据监控中心设计与实现 [J]. 通化师范学院学报, 2016 (12): 16 - 19.

[18] 陈纯纯. 基于 Netty+WebSocket 的社区增值服务平台的推送设计 [J]. 物联网技术, 2016, 6 (12): 89 - 91.

[19] LUTZ D J, STILLER B. A survey of payment approaches for identity federations in focus of the saml technology [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15 (4): 1979 - 1999.

[20] 刘明. 基于 Google Maps 的车辆跟踪与导航系统研究与实现 [D]. 西安: 西安工业大学, 2014.

[21] ALMADEN, GARCIA E. FOSS project spotlight: the code-labster IDE—a Free PHP, HTML, CSS and JavaScript editor [J]. Linux Journal, 2018 (287): 21 - 28.

[22] 陈泓文, 邹昶, 聂国健, 等. 基于面向对象思想的软件系统分析与设计 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2020.

[23] 曹建. 计算机网络自动检测控制系统软件开发设计 [J]. 数字技术与应用, 2020, 38 (2): 126 - 127.