宽带频谱感知中多认知用户联合检测算法研究

Fanfei Meng, Yingxin Zhao
Department of Electrical & Information Science
Nankai University, Tianjin, China

摘　要

频谱感知技术是现代通信技术中非常重要的节约信息资源，有效利用紧张频带的重要技术之一。本文基于多用户的能量判决门限感知技术，首先介绍了硬判决中常见的三种逻辑电路判决准则，并且针对他们的判决严格程度进行了分析。在硬判决的基础上，又进一步介绍了基于软判决的多用户频谱感知的方法。理论分析完成后，基于理论准则，设置了在一定置信区间内波动的正弦信号和信噪比固定的独立信道，仿真出三种准则所对应的虚警概率和检测概率曲线，并且与理论仿真曲线进行了比较。

从多用户协作的仿真结果来看，仿真过程最大程度地降低了虚警概率，提高了检测概率，基本实现了能有效检测出在空闲时段未被占用的频谱资源，借助了时分复用的思想，合理地完成了信息资源的再分配。整个计算过程依托于通信原理中的功率谱密度计算原理，对噪声功率和噪声功率进行门限判决检测，并且对噪声与信号功率之和进行二次判决检测，相对精确地反映出逻辑检测方法的感知判决性能。

关键词：多用户协作感知 能量检测 双能量门限 虚警概率 检测概率

Abstract

Spectrum sensing technology is a very important resource saving information resource in modern communication technology and one of the important technologies to effectively use a tight frequency band. Based on multi-user energy decision threshold sensing technology, this paper first introduces three common logic circuit decision criteria in hard decision, and analyzes their strictness of decision. On the basis of hard decisions, the method of multi-user spectrum sensing based on soft decision is further introduced. After the theoretical analysis is completed, based on the theoretical criteria, a sinusoidal signal that fluctuates within a certain confidence interval and an independent channel with a fixed signal-to-noise ratio are set. The false alarm probability and detection probability curve corresponding to the three criteria are simulated, and the theoretical simulation curve is simulated. Compare it.

From the simulation results of multi-user collaboration, the simulation process minimizes the probability of false alarms, increases the probability of detection, and basically realizes the detection of spectrum resources that are not occupied during idle periods, with the aid of time division multiplexing. Reasonably completed the redistribution of information resources. The entire calculation process relies on the principle of power spectral density calculation in the communication principle, threshold judgment and detection of noise power and noise power, and second decision detection of the sum of noise and signal power, relatively accurately reflecting the perception of the logic detection method. Decision performance.

Keywords: Multi-user collaboration perception; Energy detection; Dual energy threshold; False alarm probability; Detection probability

目　录

摘　要 **I**

ABSTRACT **II**

目　录 **III**

第一章 频谱感知技术发展背景 **5**

1.1研究背景及意义 5
1.2多用户协同感知的背景介绍 7
1.3 论文主要内容和章节安排 8

第二章 频谱感知技术的理论分析过程 **9**

2.1频谱感知技术能量门限检测模型 9
2.2多认知用户联合宽带频谱硬感知技术 11
2.2.1“与（and）”逻辑准则 13
2.2.2“或（or）”逻辑准则 13
2.2.3“K秩”准则 14
2.3 软判决数据融合及其安全隐患 14
2.4本章小结 19

第三章 多用户协作感知仿真结果 **20**

3.1单用户能量门限频谱感知 20
3.2多用户协作频谱认知 21

第四章 总结与展望 **26**

4.1 总结 26
4.2 展望 27

参考文献 **28**

致　谢 **30**

第一章 频谱感知技术发展背景

1.1研究背景及意义

随着我国以及世界信息技术的飞速发展，通讯产业的极度繁荣，信号传输的密度来越大，信息传输载体的容量趋于日渐饱和的地步。基于传统通讯技术

的研究，工业界利用傅里叶变换，将时间信号转换到频率信号已经成为非常成熟而容错率较高通信技术。然而，当信号以频率形式在频谱上传输时，为了保证发送者和接收者相互通信的保密性和准确性，不同信号会在占用不同频谱的基础上进行特异性传输，不同种类的信号也相应基于不同频段进行特异性传输，这就对频宽占用和划分提出了相当高的要求，频谱资源日益紧张。

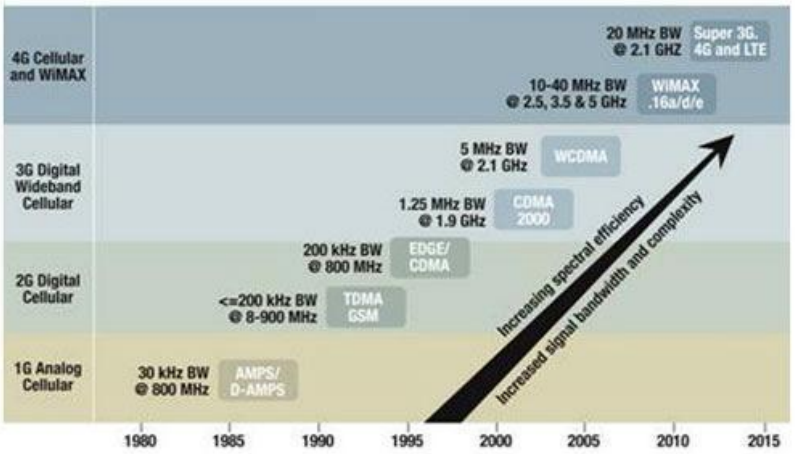

图1 1G~4G技术发展

一方面，随着微波频段技术的发展，展宽频带成为解决频谱资源紧张的途径之一，太赫兹信号和传输和光通信信号传输技术蒸蒸日上，得到了较高水平的发展，并且有望在未来得到大规模的推广和应用。这些技术的利用，让信息传输的频带呈现出一定规模的指数式增长。如图1所示，这是现代通信技术发展频谱宽度的逐渐展宽情况，反映了随着信息技术的逐渐成熟和信息交互的愈加频繁，不断拓宽频谱资源，以希望达到更高的信息传输容量和更好的信息传输速率。从1G模拟通信技术发展到现在的5G通讯时代，不仅仅是有了更快捷的交互手段，人们也在享受着信息良好加密性对个人隐私的保护。频段区域的划分同时也显现出信息传输的爆炸式增长，可见一个信息爆炸的时代正在向人们逐渐走来。

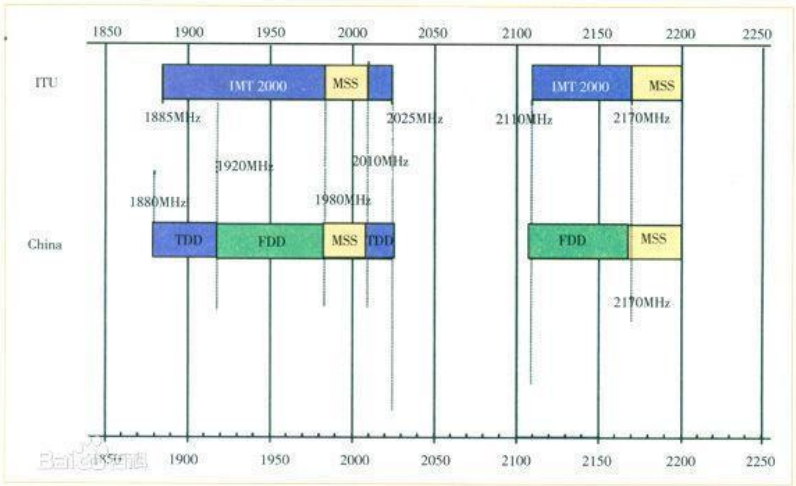

图2 频段区分示意图

另一方面，对频谱资源进行分时复用也成为无线电认知领域学者重点聚焦的问题之一。这种技术基于软件无线电开发的认知无线电，能够通过外部频谱环境，根据当前主用户的信号频带授权使用情况进行连续不停歇地感知，冲破特定频段的限制，对没有被主要信号发射与接受对象交互的授权频段进行检测。这是一种有能力增强频谱资源利用效率的智能无线电技术也可以有效地缓解无线问题。如图2所示，在划分的频段当中，仅仅有特定的部分可以用于民用领域，这部分区域也是用户授权最为紧张的部分。科学家们努力通过各种信号处理的方法，对信号频带进行分而化之，基于数字化的卷积方法，在保证容错率的情况下，让不同信号的频带占用能够最小交叉，最小干扰，最大程度利用频谱资源。如4G技术中使用的OFDM技术就是利用不同信号之间的正交频分技术，提高了频谱利用率，在此基础上利用导频技术，提高了信号的容错率，使得信息的快捷性和安全性都得到了极大程度的保障。

现代通信技术通常使用的频谱感知技术是单一个体用户授权的的频谱感知技术，可以起到实时监测发觉占用频带的作用。然而，根据通信原理中的信号衰减理论，信号在各种信道中传输时候会受到多径衰落和阴影衰落的影响，不一样的信号的信号衰减程度不同，信号与噪声的功率加成不同，接收者接受到的信号在调制解调时候会有偏差，因此影响了单一用户判决的精度。为了减轻这些问题的影响，本文提出多用户频谱感知技术。这一技术可以综合多用户授权频谱感知的结果进行，具有较高的可行性和操作性。

1.2多用户协同感知的背景介绍

多用户协同感知技术是在单用户协同感知技术的基础上发展起来的。根据前文的介绍，单用户技术是基于单用户信道对频谱信息进行感知判决，并不会收到其他信道或者其他用户的影响。然而，由于信道信噪比的千差万别，本项研究又是基于能量感知技术进行判决，在信号功率和噪声功率相差不大的时候，单用户感知判决极其容易混淆二者的情况。这时候，多用户协同感知判决的重要性就上升了。

多用户协同感知判决的原理是利用多个用户协同感知的结果进行综合判决，判决过程并不依赖单一用户判决的结果，而是在单用户判决过程中或者单用户判决完成后进行综合感知，从而大大降低判决的错误率。一般而言，多用户逻辑门电路是比较简单可行的方法，这种方法对算法的复杂程度要求很低，运算过程简单，并不直接干涉单用户判决的过程，而在单用户感知完成的时候收集每个用户的判决结果，按照预先设定的逻辑原则进行判决。逻辑原则可以简单也可以复杂，基本原则是基于最大的容错率和精度。进行合理而运算难度较低的逻辑运算过程。整个过程会结合现代数字电路理论。根据现在的发展趋势，可能以后会结合VLSI技术进行整合处理，进一步提高可信度和运行速度。但是这种方法由于缺点对单用户感知过程的监督各管理，单独依靠感知授权后的结果进行判决，往往在设计逻辑门电路时，如果对前方的感知过程有所了解的话，逻辑电路的设计过程可能会非常复杂，耗能巨大。更为严重的是，在设计逻辑门电路时的具体算法也没有办法确定。

第二种方法是多用户融合感知的过程直接参与到信息感知和判决过程的办法。其具体思路是两种，一种是在单用户感知之前利用每个信道信噪比的特点对信号与噪声的分配情况进行预先估计，大致判断出单用户判决过程中可能遇到的问题，并在后续过程中利用算法最大可能消弭不同信道特征给单用户判决结果带来的影响。这种方法也有可能会直接参与到单用户感知判决的过程，在单用户没有授权感知判决之前就对结果有所纠正，起到更好的效果。另外一种方法是在单用户感知之后，针对单用户感知的结果进行统计归类，提出更优化的算法来估计整个判决过程中的可信度并且予以融合。这个融合过程，区别于逻辑门方法之处在于，逻辑门电路并不直接或者间接参与到单用户感知的过程

，仅仅参与到单用户感知判决之后的过程。对于单用户感知前的信道情况和感知过程没有任何的参与和了解。而现在这种方法会预先接收到单用户感知，尤其是判决门限的信息。在判决门限的数学理论上，利用概率论和统计学的只是进行算法设计。这些算法一定是基于单用户判决的原理进行设计，并且深入挖掘了里面隐藏的数学关系。具有非常好的应用价值。但是这种方法的问题是在于代码繁杂，计算过程非常复杂，而且最关键的是，必须有赖于单用户的判决设计过程。如果单用户在进行算法设计的过程中缺乏数学的延展性和可导行，接下来的融合算法将非常难设计。此时不得不利用数字逻辑门电路进行重新判决。

1.3 论文主要内容和章节安排

基于以上的对信道频谱资源的分析和如何利用闲时频谱资源方法的探讨，本文在单用户能量门限判决方法的基础上提出多用户协同频谱认知系统，并且丰富结合多重数学算法进行探索研究，不仅保证了主用户分析判决的准确性和有效性，也进一步延展了未来针对干扰用户带来的负面影响的可能解决方案。

本文的文章结构如下：

第一章主要介绍现代无线通信技术频谱利用状况和短缺的现实，指出闲时频谱利用的必要性和优越性。在此基础上，提出可以进行闲时频谱判决的方法，包括判决手段和判决途径两个角度，提出了多用户协作频谱感知的两种类型和能量检测门限判决手段的概念，并且针对各自的优缺点进行了相对翔实的分析和比较。

第二章主要介绍频谱感知技术的理论分析过程和数学逻辑推导过程，在采用能量门限检测方法的基础上推导单用户频谱感知技术的数学过程，计算虚警概率和检测概率与能量门限大小值的关系。在此基础上，进一步推导多用户能量门限值与虚警概率和检测概率之间的关系。最后，介绍在频谱感知过程中可能出现的“掺沙子”干扰攻击行为，并且探讨可能的解决办法。

第三章主要介绍本次毕业设计的仿真结果，相比于先前结果的仿真比较过程，并且针对相应的仿真结果进行有针对性的分析。

第二章 频谱感知技术的理论分析过程

2.1 频谱感知技术能量门限检测模型

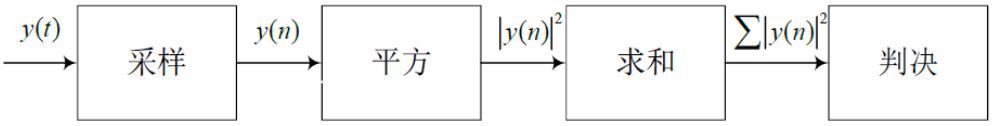

图3 能量门限检测判决流程框图

如图三所示，这是能量检测门限方法对的流程框图示意图。其基本原理是，将一定宽度的窄带信号进行提取，按照数字信号原理中的抽样检测原理，抽样频率大于频谱宽度的两倍，以便使信号可以被无失真地恢复。然后根据通信原理中的功率谱密度的计算原理，对信号强度进行平方相称以便可以计算出信号和噪声的分别功率谱。计算出来的信号功率谱密度需要和噪声功率密度相加，作为检测概率的判决能量依据。最后是将噪声功率与虚警门限功率检测判决，二者能量之和与检测概率的门限功率检测判决。

假设抽样次数为N次，定义进入检测门限的能量E为：

$$\sum_{0}^{N-1} |z(n)|^2 \tag{2-1}$$

本文仿真认为每个分立的抽样信号频谱都服从变态分布的规律。那么，$\gamma = E[|s(n)|^2]/\sigma_w^2$ 可以表示为平均信噪比，u可以表示为时间域上的频带宽度，E服从于卡方分布。与此同时，每个信道的信噪比是恒定的，而且频谱的抽样数目足够大，就可以认为噪声与信号的加权功率符合高斯分布的特征（高斯白噪声），那么能量的概率分布式为：

$$E \mid H_1 \sim N(P+\sigma_n^2, \frac{2}{N}\left(P+\sigma_n^2\right)^2) \tag{2-2}$$

那么可以推导出虚警概率:

$$P_f = Q\left(\frac{E_{th}-\sigma_n^2}{\sqrt{2/N\sigma_n^4}}\right) \tag{2-3}$$

在知道能量检测门限也可以推导出检测概率:

$$P_d = Q\left(\frac{E_{th} - (P + \sigma_n^2)}{\sqrt{2/N(P + \sigma_n^4)}}\right) \tag{2-4}$$

Q函数的定义为:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-x^2/2} d\tau \tag{2-5}$$

利用关系式消除门限值, 得到相应抽样数量的关系式:

$$N = 2[Q^{-1}(P_f) - Q^{-1}(P_d)(1 + SNR)]^2 SNR^{-2} \tag{2-6}$$

利用已经定义的Q函数来化简虚警概率和检测概率的表达式:

$$P_d = P\{E > E_{th} \mid H_1\} = Q_N\left(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{E_{th}}\right) \tag{2-7}$$

$$P_f = P\{E > E_{th} \mid H_0\} = \frac{\Gamma\left(u \mid E_{th}/2\right)}{\Gamma\left(u\right)} \tag{2-8}$$

在上述表达式中, 伽马表示非完全伽马函数, Q表示通用Marcum Q函数, E_{th} 表示用来进行检测的能量判决门限的数值。由此可以看出, 信道的噪声能量决定着最后的检测效果, 且被检测用户信号所占用的信道噪声功率较大时, 有可能产生虚警概率;

当噪声功率恒定, 假设在此信道情况为瑞利噪声特征下, 在衰落信道中, 设信噪比 γ 服从的概率分布函数为, γ 服从如下的分布:

$$f(\gamma) = \frac{1}{\gamma} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right), \gamma \geq 0 \tag{2-9}$$

在此信道特征下, 能量的检测概率可以表示为:

$$P_d = \int_x Q_N(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{E_{th}}) \tag{2-10}$$

其中, γ 为平均信噪比, 将上式中瑞利信道特征函数式带入上式中得到检测概率为:

$$P_{dRay}=s^{-\frac{E_{th}}{2}}\sum_{k=0}^{N-2}\frac{1}{k!}\left(\frac{E_{th}}{2}\right)+\left(\frac{1+\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}}\right)^{N-1}\cdot\left(e^{-\frac{E_{th}}{2\left(1+\bar{\gamma}\right)}}-e^{-\frac{E_{th}}{2}}\sum_{k=0}^{N-2}\frac{1}{k!}\left(\frac{E_{th}\bar{\gamma}}{2(1+\bar{\gamma})}\right)^{k}\right) \tag{2-11}$$

图4绘出了在能量感知中，ROC曲线在两种噪声(高斯噪声和瑞利噪声)信道下的性能，其中两种信道的功率是恒定的。总体抽样次数为1000次，设定m=5，信噪比为-5 dB，采用蒙特卡罗仿真。从仿真图像当中可以推论，高斯噪声特征信道中，能量检测的仿真和理论拟合的很好，而瑞利信道后的能量检测仿真和理论有一定的偏差。分析来看，高斯噪声的信道衰落程度是直线单一的，其信道特征固定而不变化；而通过瑞利衰落信道后的用能量判决的方法存在比较大的误差，根据分析可以知道，瑞利衰落信道是无直线信道，存在多径的情况下，包括平坦衰落和不平坦衰落，慢衰落或者是快衰落，这些都会对信号的检测与估计产生严重的影响。这些都会导致不同的瑞利衰落结果。文中的仿真主要是利用单径瑞利信道特征得到的，而实际中的瑞利信道特征往往是多径的，信号的变化性更大，因此对于瑞利衰落信道来说，理论和实验的结果会存在一定的偏差。

2.2多认知用户联合宽带频谱硬感知技术

隐终端问题是由于多种信号衰落和干扰因素，独立信道的判决用户可能无法接收到来足够大的能量来进行判决，此时会出现隐终端问题，引起判决感知能力的下降。即使信号源对的频谱正在被占用，由于隐终端问题，信道判决用户就会认为频谱没有被占用，如果这时被占用的信道被接入另一信号源，原有信息会被很严重地损坏和影响，难以复原。隐终端的问题移动通信中频谱感知技术所需要应对的巨大困难之一。下图是一个关于隐终端问题的例子和如何利用独立信道多感知判决用户来克服这个困难。考虑所示的场景，集中式移动通信感知树状网络涵盖一个信息综合融合与判决中心和3个独立信道感知判决用户CR1、CR2和CR3。主用户和CR1之间的信息传递通道被大建筑物阻挡而被大尺度衰落严重负面影响而造成信号衰弱。如果对CR1单单利用一个独立信道感知判决用户，非常有可能会无法感知到主信号的存在，隐终端问题由此产生。若CR1在主用户工作时接入信道，就会对主用户造成干扰。

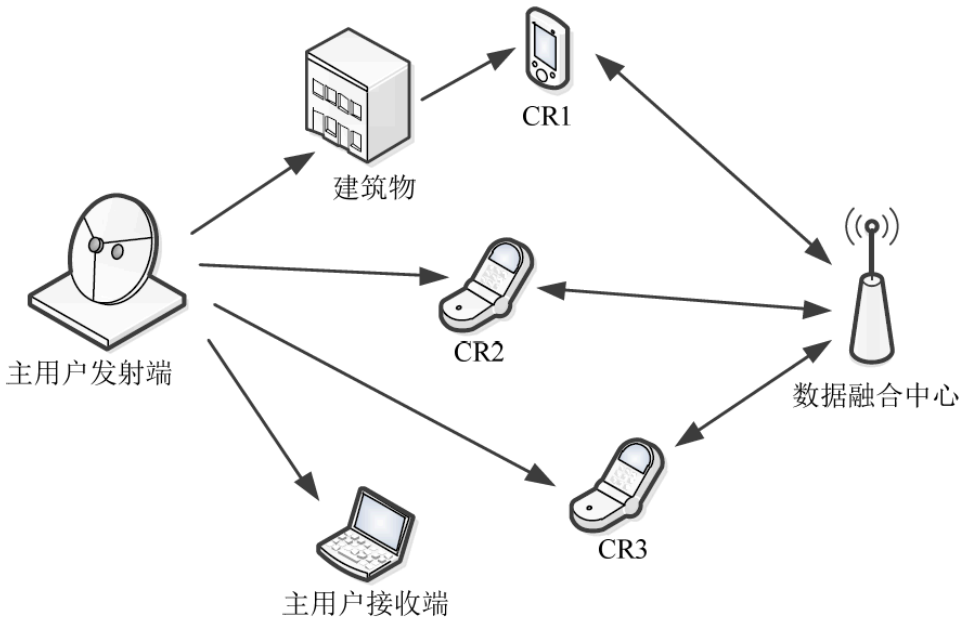

图5 无线通信网络中多用户写作感知示意图

隐终端的困境是由信道衰落和大尺度衰落造成的，多独立信道感知联合判决用户的手段是一个极其有效率的检测提升。在图6中，CR2，CR3与信息主发射端之间的交互信道处在非常理想的信号传输的状态，严重衰落或者阴影阻挡带来的认知判决困境很明显。由此可见，CR1是有能力根据CR2和CR3的认知判决反馈信息来提高最终判决结果的可信度。在图6的集中式多用户联合感知无线通信信道网络中，所有的独立信道感知联合判决用户把自己的判决反馈信息传输到数据信息综合枢纽，数据信息综合枢纽将CR1、CR2 和CR3 的判决认知反馈答案综合分析后得到有关信息发射源的信道状态的终结结论，然后把这个终结结论传递到整个无线网络信号终端。CR1在其他独立信道感知联合判决用户的帮助下摆脱隐终端的困境，其认知判决能力也有了明显有效的提高。

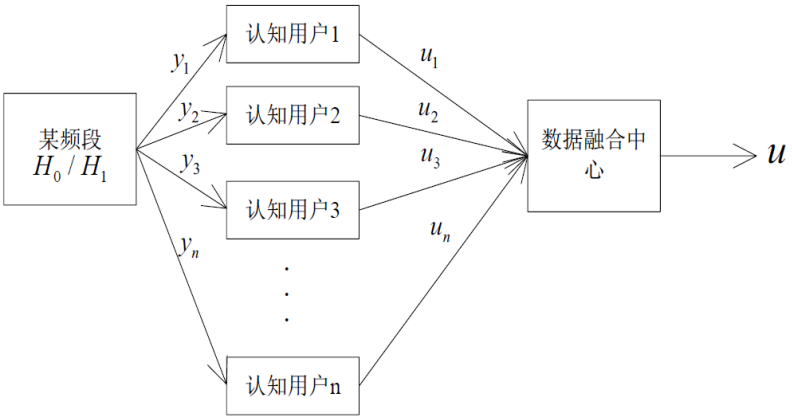

图5 无线通信网络中多用户写作感知示意图

按照图6的框图示意，处于集中性认知的条件下，y1~yn代表信道向认知用户发送的信息，u1~un代表认知用户的判决结果，然后集中到数据融合中心进行分

析判决。在硬判决协作频谱感知中，每个次用户在最开始先自我获取判决结果并且表达成1比特的信息，如果判决信道被占用，传输信息结果为“1”;如果判决信道没有被占用，传输信息结果为“0”。其中，$d_n \in \{0,1\}$ 为第i个的次用户的检测信息，总体的次用户的检测结果息融合完毕的得到的感知结果。一般而言，Y代表融合感知每个信道判决结果的汇总合集。N表示总判决感知信道数量。k表示融合之后的判决结果。当N个分立判决者进行感知，将发送信息量的值进行逻辑相加，认为和大于k的时候被判决频谱被占用。k的值决定着判决结果，硬判决有几种不同几种逻辑判决方法。接下来对于这几种逻辑判决方法进行介绍。

2.2.1“与（and）”逻辑准则

在“与”逻辑准则约束下，融合中心对所有次用户的感知结果进行综合分析后释放出一个综合结果。换言之，所有独立信道的判决用户必须结果一致，否则结果无法成立。如果存在N个独立信道判决者，进行与逻辑准则进行融合感知综合分析后的最终为:

$$Q_d = \prod_{i=1}^{N} P_{d,i} \tag{2-12}$$

$$Q_f = \prod_{i=1}^{N} P_{f,i} \tag{2-13}$$

其中 $P_{d,i}$ 表示检测概率，$P_{f,i}$ 表示用户的虚警概率.

2.2.2“或（or）”逻辑准则

每个独立感知判决者通过逻辑“或”进行综合分析。只要有一个信号的认知用户判断出来占用信息，融合感知中心就认为感知频谱被占用。假设一共有N个认知用户，那么可以推导出该逻辑准则则可以获取到总的虚警概率和检测概率:

$$Q_d = 1 - \prod_{i=1} (1 - P_{d.i}) \tag{2-14}$$

$$Q_f = 1 - \prod_{i=1} (1 - P_{f.i}) \tag{2-15}$$

与和逻辑同理，$P_{d,i}$ 表示用户的检测概率，$P_{f,i}$ 表示用户的虚警概率. 看可以看得出来，这种逻辑关系判决准则对判决频谱没有占用的条件要求非常苛刻，必须所有认知用户认为频谱没有占用才可以断定频谱状态为空闲。

2.2.3“K秩”准则

“K秩”准则，是认为有N个独立信道感知判决用户中至少要有K个用户反馈频谱被占用,否则认为信道没有被占用。可以看出K=N时，“K秩”准则跟AND与逻

辑情况一样，K==1的情况下，“K 秩”准则跟 OR或逻辑检测情况一样。那么可以总结为以下关系式：

$$Q_d = \sum_{i=K}^{N} C_N^i \prod_{j=1}^{i} P_{d.j} \prod_{m=1} (1 - P_{d.m}) \tag{2-16}$$

$$Q_f = \sum_{i=K}^{N} C_N^i \prod_{j=1}^{i} P_{d.j} \prod_{m=1} (1 - P_{f.m}) \tag{2-17}$$

通常来说，一旦更注重于漏检概率的准确性时，我们在或准则情况下提升检测门限的数值来优化检测性能，与之相反的情况时，降低检测门限的数值来在与准则系统中获得更良好的检测性能。

2.3 软判决数据融合及其安全隐患

2.2 主要介绍硬判决方法对主用户信息进行融合感知的方法，每个独立信道判决用户把判决信息以1比特信息量{0，1}的形式发送给融合判决中心，“1”和“0”分别表示信号源的信道被占用(H1)或没有被占用(H0)。这种数据形式使得判决传输过程中信道占用量不高，可是检测效果并不是非常理想。

和2.1.1的方法相比较，融合中心并不是要等到独立信道判决用户认知完成后才进行统一综合分析，而是要在独立认知用户进行判决时就要加入观测，利用协作分集方法对收集来的结果进行感知。因而，软判决算法能有更卓越的认知能力和准确度。在众多软判决感知算法中，序贯-概率比-检查与测试手段(Sequential Probability Ratio Test, SPRT)最为常见，可以应用的区域也很宽泛，其基本原理是针对每个独立信道感知用户收集的数据信息di在H1、H0事件下的先验概率P(di|H1)和P(di|H0)随机抽样分析，计算出判决统计量Sn.

$$S_n = \prod_{n}^{i=0} \frac{P\left(d_i \mid H_1\right)}{P\left(d_i \mid H_0\right)}, n = 1.2,3... \tag{2-18}$$

在pre-false probability P01和陋警概率P10条件下，比较认知综合分析结果Sn与预先设定的能量检测门限值(η0，η1)，可以得到主用户频谱占用情况的准确判断。

序贯概率比检测(SPRT)的优势是在能够保证同样的频谱检测效果的前提下，并不固定检测样本的数量，相比于要求固定检测样本数量而言时间成本更为

低廉。然而，序贯概率比检测(SPRT)算法的良好性能先决条件是认知检测判决用户都是友好的，缺乏一定程度上的安全自我保护机制。自我保护能力地下和抗恶意干扰能力的脆弱一定程度上使SRPT算法受到恶意用户的SSDF恶意干扰，以至于打压了SPRT算法对于主用户可用频谱状态的判决能力。

依照恶意攻击的目标，存在两种SSDF恶意干扰类型：Always－free和Always－false.第一种是Always－busy恶意干扰：干扰者一直发送主用户频谱状态被占用的虚假数据，融合中心会误认为主用户始终位于“繁忙”状态，以便非法恶意攻击用户长期占用闲置的频谱资源。第二种类型是Always－free攻击：恶意用户始终一直发送主用户频谱状态没有被占用的虚假数据，融合中心会误认为主用户始终位于“空闲”状态，以便非法恶意用户对主用户的发射信号进行干扰。目前，另一种算法，TNA算法是利用信任节点辅助的安全协作感知方案，目的是消除干扰者对SPRT软判决算法的负面作用，可是对于扰者的不定期间断性SSDF干扰动作效果并不明显。根据干扰者的干扰方式，存在两种SSDF干扰类型：持续性和间歇性。在持续性SSDF干扰动作情况下，干扰者不断地上传虚假感知信息，因而传递出很低的可信度，从而极其容易被融合中心识别。于是，干扰者转变干扰方式，间歇性地上传判决信息，进行动态的判决信息捏造虚假行为。在真实或虚假感知信息的交替式上传过程中，干扰者有方法地使其处于可信状态，因而避开检测，并加深其对协作频谱感知判决的威胁。

针对软判决数据融合存在的安全隐患，有的学者也提出了基于反馈声誉的信任机制。首先，着手搭建反馈的网络模型，仔细构建多独立信道用户协作认知综合判决中的认知信息和判决信息的交流；其次，添加了个体-肯定次数和个体-抱怨次数，进行个体性质的反馈判决数据的信任值评价体系;最后，利用反馈判决数据的信任值评价体系，完成了声誉值的量化过程。

（1）反馈网络模型

协作频谱感知中的认知用户通常被区分为两种类型：请求感知用户(Request Sensing User, RSU) 和协作感知用户(Cooperative Sensing User, CSU)。这种划分用户类型的标准是灵活的，不是固定的。当每个独立感知判决用户因为阴影效应、多径衰落和“终端隐藏”等因素的存在，没有能力独立获取信号源发射者(Primary User, PU)信道占用状态的认知判决时，会引发利用独立信道

多用户判决综合认知的请求，此时的要求者的名字定义为RSU；这个时候，如果此独立信道用户参加到其他的感知个体发出的多协作频谱认知综合判决时，定义为CSU.

当要求认知综合判决的个体在试图利用信号源的频谱资源的时候，首先必须要甄别信号源的频谱到底是不是在可以利用的状态。产生在RSU、CSU和信息综合终端(FC) 之间的认知信息和判决信息频繁交流，这是能够利用图6所示的反馈数据综合无线通信网络模型来刻画的。

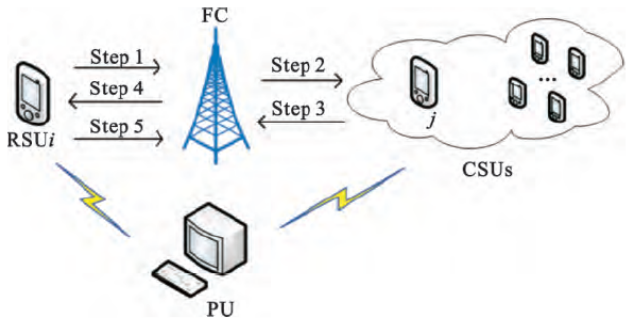

图6 反馈网络模型

步骤一：请求感知用户Sui加密传递判决要求到信息综合终端FC，请求信息综合终端协作发现CSU来一起判决信号发射源的频谱资源是否处于可以利用的限度；

Step 2：信息综合终端认知通过无线通信网络的广播系统来整体请求数据协助，寄希望于有感知判决技能的CSU来发送独立的认知感知判决数据；

Step 3：如果SUj收到广播信息后，发现自己有能力参与主用户频谱状态的认知判决，那么会参与到协作认知独立信道用户群组，认知协作用户组内的一切独立信道认知用户分析判决主用户的频谱状态，互相之间没有任何影响。

Step 4：信息综合终端汇集认知综合判决的分析信息后，会利用相关的数据融合算法进行认知分析信息综合，并将分析后的的认知综合决定答案提交给SUi；

Step 5：Sui会把认知分析综合的数据信息收集起来进行判决频谱的占用状态，之后把这个决策的结果反馈给FC中心。根据反馈结果中队主用户频谱状态的判断和分析，FC操作认知信息和反馈数据的匹配工作，完成对本轮协作频谱感知综合判决中充当CSU角色感知独立用户的信任值更新.

在反馈网络模型中，一般而言，恶意用户进行“掺沙子”干扰的可能性主要集中于Step 5. 为了估计“掺沙子”干扰带来的的负面效果，引入网络信任误差的概念(一般以nte表示)，衡量“掺沙子”干扰给整个信道频谱判决感知系统计算误差值带来的数量效应。设 $t_j^{'}$ 为网络中任一认知用户SUj的实际信任值，tj为通过信任机制量化出的信任值，N为整个认知无线电系统中的独立信道感知用户总数，那么nte的估算数学表达式如下所示:

$$nte = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\sqrt{\frac{(t_j^{'} - t_j)}{t_j}} \qquad (2\text{-}19)$$

nte的数值越小，说明“掺沙子”干扰动作针对整个认知无线网络的信任值计算影响越小。仿真分析中，将具体分析nte值的情况。

(2)反馈声誉评估模型

为了减缓甚至阻止“掺沙子”干扰和减少nte的值，总结出每次多用户协作频谱感知结果后，收集每个RSU反馈的主用户实际频谱状态数据。非常仔细评估结果释放中的独立性和差异性特点，添加认知独立个体的正确频率和个体false频率，完成了针对每一个CSU个体的反馈信任值评价体系的构建。

(a)个体肯定次数: 遇到RSU的信任值评估的信号源终端频谱实际可利用信息和由CSU释放的判决数据有能力匹配一致，本文称之为“个体肯定”。p_{ij} 表示要求综合判决感知用户SUi的感知反馈信息与协作独立信道频谱感知判决用户SUj的感知数据匹配的个体肯定的频数; p表示整个认知无线网络当中个体肯定频数的相加总和。

(b)个体抱怨次数: 当RSU传达的主用户信道频谱的实际占用状态与CSU负责汇聚的感知匹配数据结果不能够取得一致的时候，学术界一般会把这种现象称之为“个体抱怨”。c_{ij} 表示要求频谱认知判决主用户SUi的反馈信息与独立信道判决用户SUj的感知数据无法取得一致的个体用户抱怨次数; c表示整个无线通信认知网络中个体抱怨次数的总频数和。

反馈声誉 f_{ij} 的意义体现在在于对个体肯定持积极态度，对个体抱怨持负面惩罚态度。SUi之于SUj的个体肯定频数与SUi之于SUj的反馈抱怨频数成正比例关系; 个体抱怨频次增多，反馈声誉 f_{ij} 会下降。注意到整个无线认知网络中个体

肯定与个体抱怨的发生的综合分析情况，引入新概念“反馈调节因子λ”，影响 f_{ij} 的计算与估计，间接完成对无限认知网络当中个体肯定次数上升的鼓励或个体抱怨次数增加的抑制的目标。p越大，越有帮助于 f_{ij} 的提升；相反的是，c 越大，则会使 f_{ij} 下降。“反馈调节因子λ”的另一作用是，信道频谱信息干扰者如果不停地进行“掺沙子”攻击，造成无线通信判决系统中的每个独立判决用户抱怨频数总数量的没有间断攀升，进而造成持续降低其反馈信任值的量化和评估。

反馈的调节因子λ的评价数学公式如下：

$$\lambda = e^{\frac{p}{c}} \tag{2-20}$$

Sui针对SUj的反馈信任值 f_{ij} 能够归纳成：

$$f_{ij} = \frac{p_{ij}}{p_{ij} + c_{ij} \cdot \lambda} \tag{2-21}$$

针对SUj，总结归纳无线通信判决体系中所有的综合判决用户对其反馈声誉，那么反馈声誉向量Fj为：

$$F_i = \left[f_{1j}, f_{2j}, \cdots f_{ij} \cdots f_{nj} \right] \tag{2-22}$$

式中： fnj是无线认知网络中的第N个独立判决综合用户SUn对于SUj的反馈声誉。

(3) 信任值量化

在操作和运算独立个体的的反馈声誉评价和计算，“掺沙子”干扰行为的出现，会使一些独立信道感知个体的反馈声誉向量出现不稳定的波动。所以，在量化独立信道感知个体的信任值之前，对其反馈声誉向量采取偏离分析是非常有必要的。针对任何一个独立信道感知个体SUj，它的反馈声誉向量Fj的偏离分析如下所示：

$$D(F_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(f_j - \overline{f_j} \right)^2 \tag{2-23}$$

式中：fj为Fj中的数据均值；D(Fj)为反馈声誉向量Fj的方差偏离量，目的是全

景展示独立信道感知个体反馈声誉偏差度。设θ为信任值的threshold大小，是能够分开可信用户和恶意用户重要参量。除此之外，f_{ij} ∈[0，1]，且SUj的信任值tj大体上也位于[0，1]的区间之内。所以，θ是能够被利用去挖掘和评估Fj的偏离分析，再加上Fj的方差偏离量D(Fj)，量化出tj。通常而言θ≥0.5，这个结论可是直接被利用在Fj的偏离分析中，如果数值过大，非常有可能造成很大的的信任值量化偏差。所以根据这样一个特殊情况，本文在分析量化的过程中对θ进行拆分半量代入，并且作为D(Fj) 的门限值，计算和分析SUj的信任值tj。当D(Fj) ≤ $\frac{\theta}{2}$ 时，Fj的方差偏离量数值比较低，这代表Fj中的数据分布相对均匀，遭遇“掺沙子”干扰的负面效应比较低，可以利用Fj中的数据均值得出SUj的信任值；但是当D(Fj)＞ $\frac{\theta}{2}$ 时，Fj的方差偏离量数值比较大，这代表Fj中的数据不稳定性大，遭遇“掺沙子”干扰的负面效应比较大，需要添加进来一个相对而言比较保守准则，计算和分析Fj的中间值和最小值计算得到SUj的信任值的大小。

2.4本章小结

本章主要介绍频谱感知技术的理论分析过程和数学逻辑推导过程，在采用能量门限检测方法的基础上推导单用户频谱感知技术的数学过程，计算虚警概率和检测概率与能量门限大小值的关系。在此基础上，进一步推导多用户能量门限值与虚警概率和检测概率之间的关系。最后，介绍在频谱感知过程中可能出现的“掺沙子”干扰攻击行为，并且探讨可能的解决办法。

第三章 多用户协作感知仿真结果

3.1单用户能量门限频谱感知

本节首先利用单用户能量门限的方法对主用户内的频谱情况进行判决，进而再分析多用户协作感知过程中的提高和优化。在这次仿真当中设置了三路信道，每个信道的信噪比为5 dB,-8 dB,-10 dB，三个信道相互独立没有相互干扰并且进行相对独立的判决。在第一阶段单用户分别进行频谱感知，分别绘制出判决的虚警概率曲线和检测概率曲线。

在仿真中，假设本频段信号带宽W=5*10^4，根据奈奎斯特采样定律与蒙特卡

罗定律，采样频率F=10^5 Hz.那么采样信号的周期T=0.001.整个过程中，重复次数为5000次，设置信道的噪声和信号功率是固定的，能量门限的对三个信道分别为:200~600，500~900，700~1300，每隔20递增增加。信号波形为正弦信号，初始相位为 $\frac{\pi}{6}$，函数表达式为 $sig = 2\sin(\frac{2\pi W}{F_s t} + \frac{\pi}{6})$，其中t为置信参数，会随着抽样次数的变化而不断变化。

虚警概率的计算方法：让每次重复时候噪声功率与当前门限的能量值进行比较，如果噪声功率大于当前门限功率，那么就会在虚警概率统计值上加1。虚警概率检测值和总重复次数的比值就是虚警概率。

检测概率的计算方法：先让每次重复时候噪声功率与当前门限的能量值进行比较，如果噪声功率小于当前门限功率，在比较信号功率与噪声功率之和是否大于能量门限。如果大于，那么就会在检测概率统计值上加1。检测概率检测值和总重复次数的比值就是检测概率。

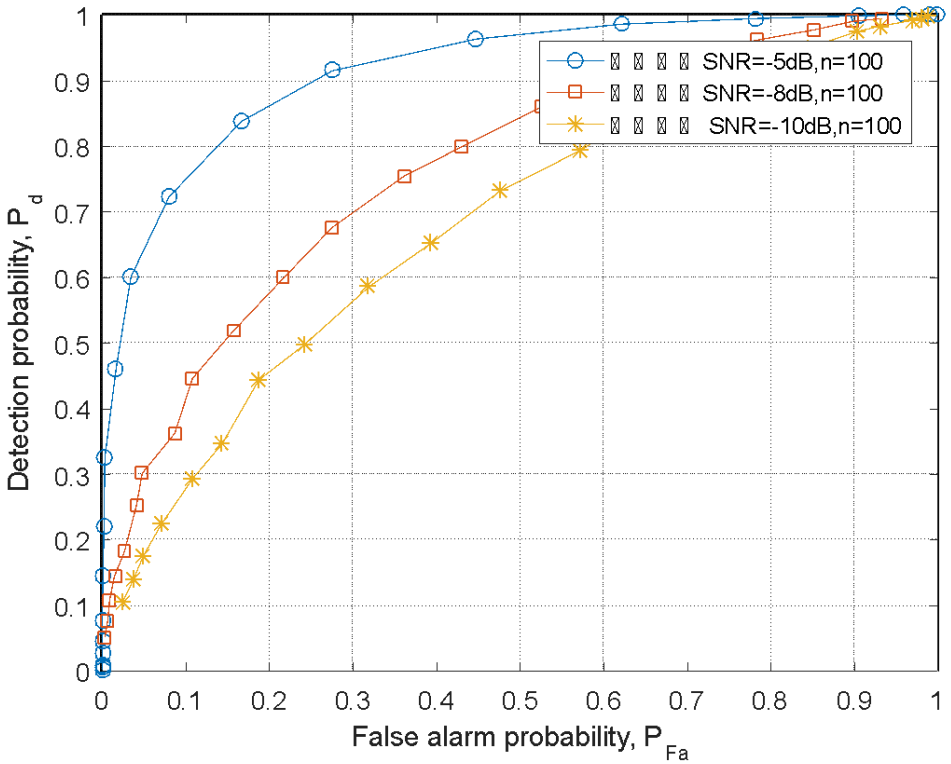

图7 单用户多信道独立检测判决结果示意图

如图7所示为单用户能量检测门限独立信道各自的判决结果。此判决结果以虚警概率和检测概率的曲线关系为主要依据，检测概率越高，说明判决结果越

精确，曲线的斜率越大。那么从图中可以观察出，当信道信噪比比较低的时候，单用户能量检测门限的方法判决效果比较好。因为在这种情况下，噪声的功率相对较小，对于主信号的干扰程度比较低，使能量检测判决门限的方法具有很好的认知能力。

3.2多用户协作频谱认知

本节依然利用能量门限的方法对主用户内的频谱情况进行判决，但是在多单用户的基础上延伸出多用户协作频谱感知判决。本次仿真依然设置了三路信道，每个信道的信噪比仍然为5 dB,-8 dB,-10 dB, 三个信道相互独立没有相互干扰并且进行相对独立的判决。在第一阶段单用户分别进行频谱感知，然后融合中心将分别收集三路信道的感知结果进行融合感知判决，得到对主用户信道占用状态的最终认知。在融合中心获取感知结果之前，三个独立信道感知用户不相互交流信息，独立感知的结果生成为三路信号相互独有，不受其他信道判决结果的影响。

在本次仿真中，依然假设本频段信号带宽W=5*10^4，根据奈奎斯特采样定律与蒙特卡罗定律，采样频率F=10^5 Hz.那么采样信号的周期T=0.001.整个过程中，重复次数仍然设定为5000次，设置信道的噪声和信号功率是固定的，能量门限的对三个信道分别为：200~600，500~900，700~1300，每隔20递增增加。信号波形为正弦信号，初始相位为 $\frac{\pi}{6}$ ，函数表达式 $sig = 2\sin(\frac{2\pi W}{F_s t} + \frac{\pi}{6})$ ，其中t为置信参数，会随着抽样次数的变化而不断变化。

虚警概率的计算方法：让每次重复时候噪声功率与当前门限的能量值进行比较，如果噪声功率大于当前门限功率，那么就会在虚警概率统计值上加1。虚警概率检测值和总重复次数的比值是独立信道的虚警概率值，将此结果发送给综合判决的融合中心。融合中心会将不同的虚警概率值判决为0，1，然后利用逻辑门电路对不同信道的逻辑判决结果进行逻辑运算，最终得到对主信道虚警概率的判断。

检测概率的计算方法：先让每次重复时候噪声功率与当前门限的能量值进行比较，如果噪声功率小于当前门限功率，在比较信号功率与噪声功率之和是

否大于能量门限。如果大于，那么就会在检测概率统计值上加1。检测概率检测值和总重复次数的比值就是检测概率。融合中心会将不同的检测概率值判决为0，1，然后利用逻辑门电路对不同信道的逻辑判决结果进行逻辑运算，最终得到对主信道检测概率的判断。

三种准则仿真结果：

“AND”逻辑仿真结果

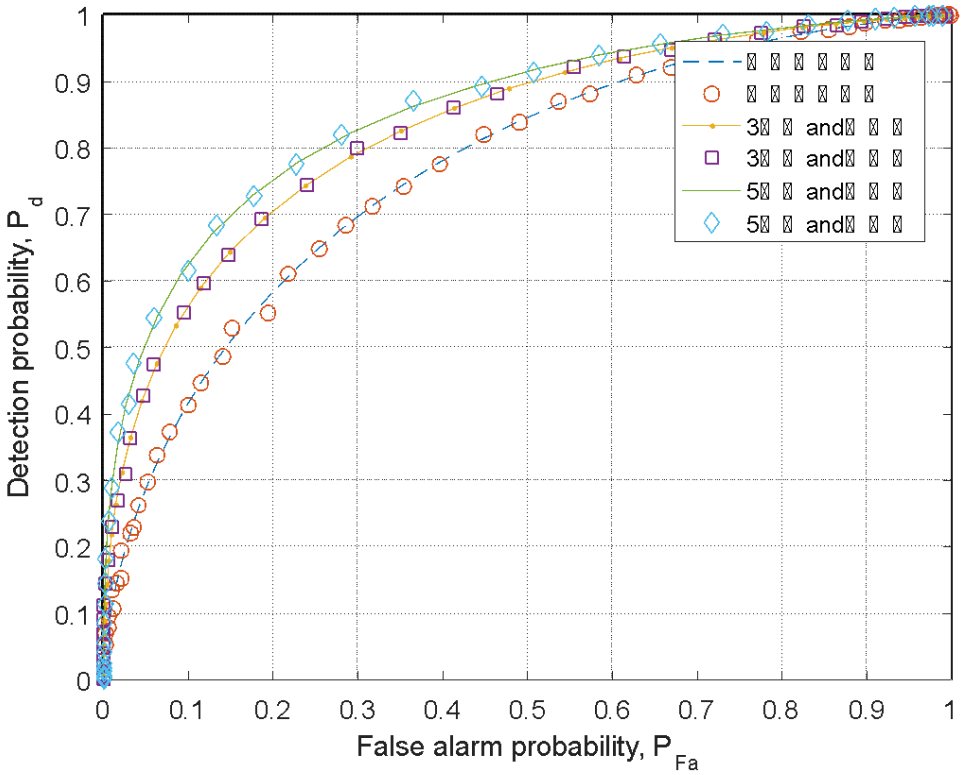

图8 “AND”逻辑虚警概率与检测概率曲线图

如图8所示分别为五个用户和三个用户能量检测门限独立信道各自的判决结果，他们的信噪比皆为-8 dB。

这种判决方法要求必须所有参与判决的用户都认为信道中信号存在，才可以综合判决主用户的信道频谱被占用。实线和虚线分别是理论值和仿真值的结果，可以看出二者的相差程度并不算大。说明了仿真拟合的效果较为理想。此判决结果以虚警概率和检测概率的曲线关系为主要依据，检测概率越高，说明判决结果越精确，曲线的斜率越大。

从图中也可以观察出，当信道信噪比比较低的时候，多用户能量检测门限的方法判决效果依然比较好。因为在这种情况下，噪声的功率相对较小，对于主信号的干扰程度比较低，使能量检测判决门限的方法具有很好的认知能力。相比于单用户能量门限的频谱认知方法，从两个结果的对比可以很清晰地看出多用户协作频谱认知判决的方法，检测概率相对于虚警概率的曲线的斜率更高，说明判决效果更好。

“OR”逻辑仿真结果

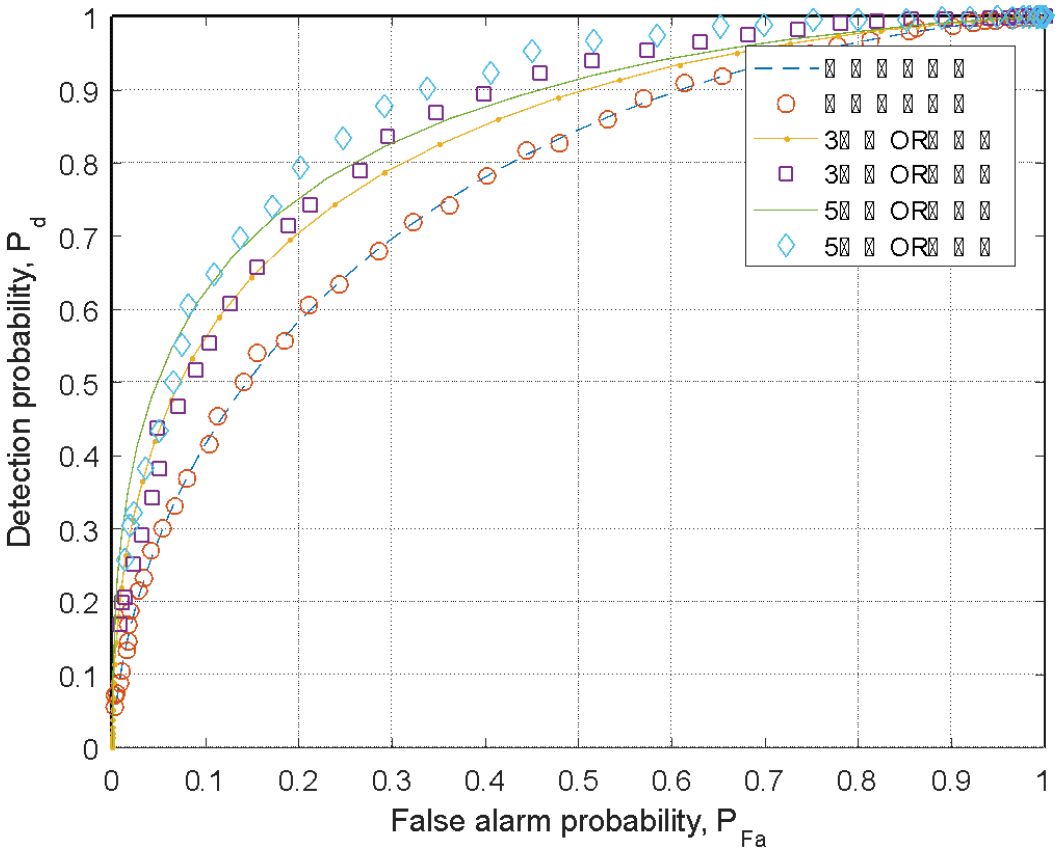

图9“OR”逻辑虚警概率与检测概率曲线图

如图9依然分别为五个用户和三个用户能量检测门限独立信道各自的判决结果。他们的信噪比皆为-8 dB。这种判决方法要求只要有一个参与判决的用户都认为信道中信号存在，就可以判决主用户的信道频谱被占用。

在判决准确性上，虚警概率和检测概率的曲线斜率变化大体相当，但是“OR”逻辑准则拥有更高的检测概率。说明当放宽了判决要求的时候，检测概

率会有相应的性能提升。

“K秩”准则仿真结果

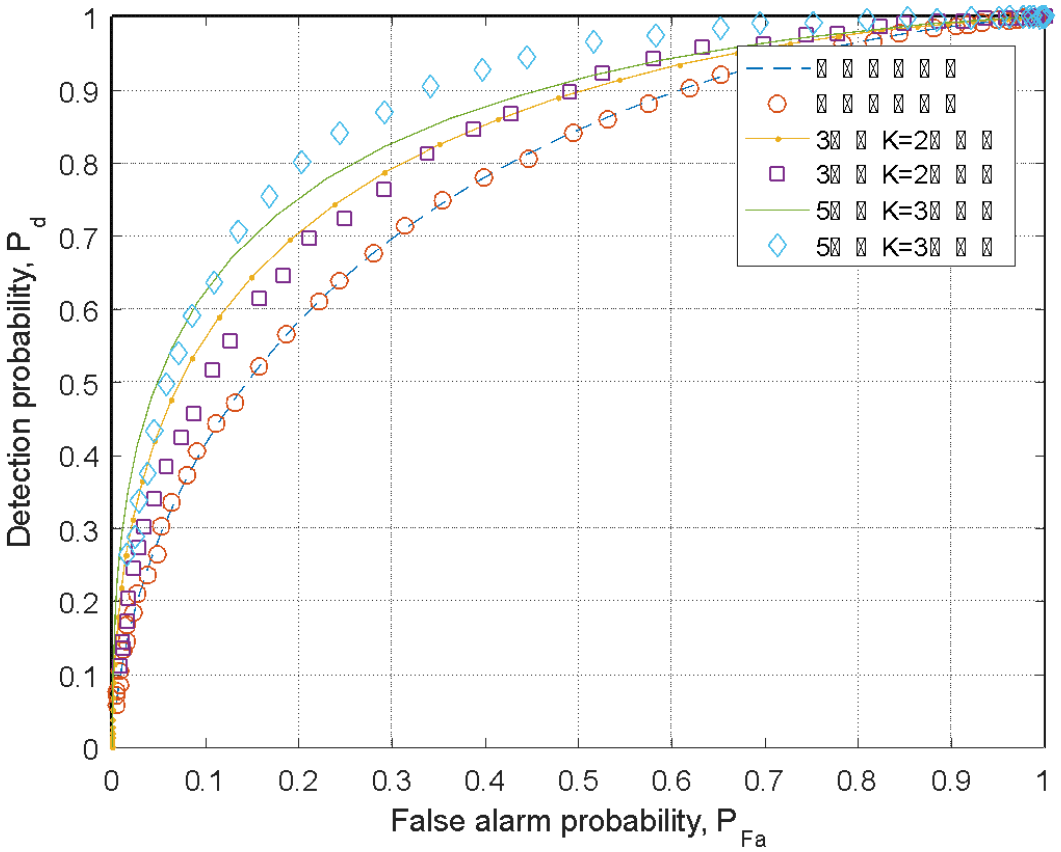

图10 “K秩”准则虚警概率与检测概率曲线图

如图10依然分别为五个用户和三个用户能量检测门限独立信道各自的判决结果。所有信道信噪比皆为-8 dB。根据前文所述的“K秩”准则，在三用户判决时，设定K=2，即有两个或者两个以上参与判决的用户都认为信道中信号存在，就可以判决主用户的信道频谱被占用；在五用户判决时，设定K=3，即有三个或者三个以上参与判决的用户都认为信道中信号存在，就可以判决主用户的信道频谱被占用。在判决准确性上，虚警概率和检测概率的曲线斜率变化仍然与前两者仿真结果大体相当。严密来看，其准确性能介于“AND”逻辑准则和“OR”逻辑准则之间，说明判决标准介于两者之间时，检测性能也是介于两者之间。

3.3 本章小结

本章分别从单用户能量门限频谱感知和多用户协作频谱认知两种角度出发

, 利用相同的信道信噪比特点和相同的信号传输频带带宽进行认知判决, 比较出两者的结果, 并且绘制出了检测概率与虚警概率之间的曲线关系。在多用户协作频谱认知的框架下, 分别设置了三种准则进行探究, 比较他们的准确性趋势, 得出了判决标准和检测准确性之间的大致关系。

第四章 总结与展望

4.1 总结

本文通过介绍无线通信网络中闲时频谱状态的多用户判决的背景, 数学逻辑推导和相关分析以及最后的代码仿真, 清晰有调理地介绍了这一成果的来龙去脉和实验结果。其核心思想是在于利用信道相互独立的特点, 噪声功率和信号功率恒定, 利用浮动的能量门限进行综合判决, 体现了科学研究的严密性和逻辑性。在多用户硬判决检测过程中, 本文不仅仅设置了三用户进行逻辑检测, 还加入了五用户逻辑检测, 一方面观察用户数量是否会对频谱判决检测的准确性产生影响, 另一方面, 也对逻辑检测本身的合理性进行了二次检验。

在设置仿真的输入信号上, 采用了正弦波信号作为信号源, 加入了浮动的置信参数以便使信号在一定的置信区间内进行波动, 使其符合高斯信道的输入信号在传输过程中的波动特征。这也为简化信道特征做了良好的铺垫。在本次仿真中, 无论多用户信道的信噪比特征是否一致, 独立信道的信噪比恒定, 但是输入信号的功率并不恒定, 这样方便了浮动的判决能量门限进行检测。

在硬判决检测过程中, 设置了三种逻辑检测方法:与逻辑检测方法、或逻辑检测方法和K秩准则。三种逻辑准则的设置, 有助于判断总用户数中多少独立信道检测用户判决频谱被占用的时候可以最终认定感知信道被占用。在仿真最后, 针对不同逻辑仿真结果给出了相应的实验结论, 并且针对不同的结果给出了理论范畴的分析。

在最后绘制仿真曲线时, 加入了根据数学理论推导的理论仿真曲线图。理论仿真曲线的作用, 一方面检测仿真曲线的置信区间是否合理, 是否符合理论的高斯信道特征浮动范围;另一方面可以直观喟体现出当虚警概率和检测概率在不同区间波动时相互影响, 可以为下一步提高频谱感知方法提供借鉴。

4.2 展望

虽然利用能量门限实现频谱状态认知的办法已经基本实现, 并且由此研究

了三种判决逻辑相对应的感知结果，探索不同逻辑准则对于虚警概率和检测概率曲线的影响。但是在本文仿真中仍然具有可以提高改进支持：

(1) 当信道属于非线性信道的时候，实际的信噪比并不能实时固定，这样会造成在这样的信道中，噪声值的估计范围会有较大范围的波动。如果继续利用固定的能量门限检测法，可能会使感知判决效果初显较大的误差。这时可以考虑滤波器检测法等方法进行综合判决；另一方面，高斯信道特征的模型非常单一，实际领域往往应用价值不高，尤其信道中有大尺度衰落出现时高斯信道特征基本上无法有效模拟实际的信道特征；
(2) 单一的浮动能量门限的设置本身难度偏大，随之而来的是虚警概率偏高，检测概率下降。如果此时仍然要维持相对较高的判决感知准确度，双能量门限检测法会更有效果。双门限能量检测不仅仅可以排除信号功率和噪声功率非常接近的问题，而且为接下来融合感知的数学分析提供了非常好的数学可导性和延展性；
(3) 逻辑电路的多用户判决方法在设计时可能会涉及自身电路报错的问题，即并非判决者出错而是逻辑电路的判决错误，这样的话依然会给虚警概率和检测概率虚线的绘制单子来不可预测的误差。

参考文献

[1] 陈雷.李永成.王英泓等.认知无线电的频谱感知算法研究[J]. 通信技术2013.9(1): 38-41.

[2] 刘鑫.何晨光.谭学治.认知无线电加权联合频谱感知优化算法[J]. 四川大学学报(工程科 学版).2013.45(1): 152-157.

[3] Akella A. Judd G. Seshan S. et al. Self-Management in Chaotic Wireless Deployments[C].
Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile computing and networking. Cologne. Germany. ACM, 2005: 185-199.

[4] 李含青.基于压缩感知的宽带频谱感知技术研究.[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学.2014.

[5]石磊.认知无线电中空闲频谱检测技术的研究[D]. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 2011:7-24

[6] 周志艳.面向认知无线电的频谱测量与信道占用模型研究[D]. 北京交通大学硕士学位
论文.2010:32-43.

[7] Haykin S. Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications[J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 2005, 23(2): 201-220.

[8] 谢显中.胡小峰.马彬.噪声功率不确定性区间估计和降低SNR WALL恶化的能量检测算法[J].电子与信息学报.2014(2):364-370.

[9] Elabsi M, Shaat M, Bader F, et al. Interference alignment with frequency-clustering for efficient resource allocation in cognitive radio networks[C].IEEE International Conference on Global Communications Conference,2014:979-985.

[10] Mitolaj J. Cognitive radio：making software radios more personal[J]. IEEE Pets Commun, 1999, 6(4)：13—18

[11] Tennyr, Sandell N R. Detection with distributed sensors[J]. IEEE Trans on AES, 1981, 17(4)：501-510.

[12] Urkowitz H. Energy detection of unknown detenninistic signals[J]. Proc IEEE, 1967,

55:523-531.

[13] Rhyu H, Harackiewicz F J, Lee B. Wide coverage area of UHF—band RFID system using a patternreconfigurable antenna [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2007 , 49(9):2154-2157.

[14] Pozar D M, Kaufman B. Design considerations for low side-lobe micro-strip arrays[J]. IEEE Trans Antennas and Propagat, 1990, 38(8):1176—1185.

[15] Sonnenschein A, Fishman P M. Radiometric detection of spread-spectrum signals in noise of uncertain power[J]. IEEE Trans on AES, 1992, 28(3):654-660.

[16] 钟顺时, 朱春辉, 刘俊, 等. 一种低旁瓣微带天线阵的分析与设计[J]. 上海大学学报:自然科学版, 1995, 1(6):680-688.

[17] 钟顺时. 微带天线理论与应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1991:134-135

[18] Meng, F., & Wang, Y. (2023). Transformers: Statistical interpretation, architectures and applications. *Authorea Preprints*.

[19] Fanfei Meng, Branden Ghena. (2023) Research on Text Recognition Methods Based on Artificial In-telligence and Machine Learning. Advances in Computer and Communication, 4(5), 340-344.

[20] Meng, F., & Demeter, D. (2023). Sentiment analysis with adaptive multi-head attention in Transformer. *arXiv preprint arXiv:2310.14505*.

[21] Manijeh Razeghi, Arash Dehzangi, Donghai Wu, Ryan McClintock, Yiyun Zhang, Quentin Durlin, Jiakai Li, and Fanfei Meng. Antimonite-based gap-engineered type-ii superlattice materials grown by mbe and mocvd for the third generation of infrared imagers. In Infrared Technology and Applications XLV, volume 11002, pages 108–125. SPIE, 2019.

[22] Meng, F., Zhang, L., Chen, Y., & Wang, Y. (2023). FedEmb: A Vertical and Hybrid Federated Learning Algorithm using Network And Feature Embedding Aggregation. *Authorea Preprints*..

[23] Meng, F., Zhang, L., Chen, Y., & Wang, Y. (2023). Sample-based Dynamic Hierarchical Transformer with Layer and Head Flexibility via Contextual Bandit. *Authorea Preprints*.

[24] Meng, F., & Wang, C. A. (2023). A Dynamic Interactive Learning Interface for Computer Science Education: Programming Decomposition Tool. *Authorea Preprints*.

[25] Chang Ling, Chonglei Zhang, Mingqun Wang, Fanfei Meng, Luping Du, and Xiaocong Yuan, "Fast structured illumination microscopy via deep learning," Photon. Res. 8, 1350-1359 (2020)

[26] Meng, F., Jagadeesan, L., & Thottan, M. (2021). Model-based reinforcement learning for service mesh fault resiliency in a web application-level. *arXiv preprint arXiv:2110.13621*.

[27] Wang, Y., Meng, F., Wang, X., & Xie, C. (2023). Optimizing the Passenger Flow for Airport Security Check. *arXiv preprint arXiv:2312.05259*.

[28] Chen, Jin-Jin, et al. "A dataset of diversity and distribution of rodents and shrews in China." *Scientific Data* 9.1 (2022): 304

[29] Meng, F., Zhang, L., Wang, Y., & Zhao, Y. (2023). Joint detection algorithm for multiple cognitive users in spectrum sensing. *Authorea Preprints*.

[30] Fanfei Meng, Branden Ghena. (2023) Research on Text Recognition Methods Based on Artificial In-telligence and Machine Learning. Advances in Computer and Communication, 4(5), 340-344.

[31] Meng, F., & Demeter, D. (2023). Sentiment analysis with adaptive multi-head attention in Transformer. *arXiv preprint arXiv:2310.14505*.

[32] Meng, F., Wang, C. A., & Brown, A. 神经结构搜索的演变与效率: 缩小专家设计与自动化优化之间的差距.

[33] Manijeh Razeghi, Arash Dehzangi, Donghai Wu, Ryan McClintock, Yiyun Zhang, Quentin Durlin, Jiakai Li, and Fanfei Meng. Antimonite-based gap-engineered type-ii superlattice materials grown by mbe and mocvd for the third generation of infrared imagers. In Infrared Technology and Applications XLV, volume 11002, pages 108–125. SPIE, 2019.
[34] Meng, F., Zhang, L., Chen, Y., & Wang, Y. (2023). FedEmb: A Vertical and Hybrid Federated Learning Algorithm using Network And Feature Embedding Aggregation. *Authorea Preprints*..
[35] Meng, F., Zhang, L., Chen, Y., & Wang, Y. (2023). Sample-based Dynamic Hierarchical Transformer with Layer and Head Flexibility via Contextual Bandit. *Authorea Preprints*.
[36] Meng, F., & Wang, C. A. (2023). A Dynamic Interactive Learning Interface for Computer Science Education: Programming Decomposition Tool. *Authorea Preprints*.
[37] Chang Ling, Chonglei Zhang, Mingqun Wang, Fanfei Meng, Luping Du, and Xiaocong Yuan, "Fast structured illumination microscopy via deep learning," Photon. Res. 8, 1350-1359 (2020)
[38] Meng, F., Jagadeesan, L., & Thottan, M. (2021). Model-based reinforcement learning for service mesh fault resiliency in a web application-level. *arXiv preprint arXiv:2110.13621*.
[39] Wang, Y., Meng, F., Wang, X., & Xie, C. (2023). Optimizing the Passenger Flow for Airport Security Check. *arXiv preprint arXiv:2312.05259*.
[40] Chen, Jin-Jin, et al. "A dataset of diversity and distribution of rodents and shrews in China." *Scientific Data* 9.1 (2022): 304
[41] Meng, F., Zhang, L., Wang, Y., & Zhao, Y. (2023). Joint detection algorithm for multiple cognitive users in spectrum sensing. *Authorea Preprints*.
[42] Meng, F., & Wang, Y. (2023). Transformers: Statistical interpretation, architectures and applications. *Authorea Preprints*.