

全盲频谱感知：噪声估计与能量检测联合迭代算法

劳子轩* 刘子扬 彭涛 王文博
(北京邮电大学信息与通信工程学院 北京 100876)

摘要：在目前能量检测的算法中，通常假设噪声水平是一个已知量，然而在实际应用中，环境噪声通常都是需要实际测量才能得到的。该文针对无法利用已知空闲频谱测量噪声功率的信号检测情况，提出了一种基于迭代的宽带频谱能量检测算法，能够针对先验信息全盲的宽带抽样信号进行有效检测。文中针对迭代算法进行了收敛性分析，当迭代初值选取合理时，算法可以稳定收敛。仿真结果表明，观测时长为20以上时，迭代算法就能有十分良好的性能。

关键词：无线通信；频谱感知；宽带信号；能量检测；迭代

中图分类号：TN92

文献标识码：A

文章编号：1009-5896(2013)08-1958-06

DOI：10.3724/SP.J.1146.2012.01617

Totally-blind Spectrum Sensing: A Joint Iterative Algorithm of Noise Estimation and Energy Detection

Lao Zi-xuan Liu Zi-yang Peng Tao Wang Wen-bo
(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: In current energy detection algorithms, the environmental noise level is often assumed as prior information. However, it is a parameter which needs to be measured in practical application. In the situation of using the known free spectrum to measure noise power is impracticably, this paper proposes a novel broadband spectrum energy detection algorithm based on iteration which can make effective detection to the broadband sampling signal which prior information is total blind. This paper also demonstrates that when the initial value of the iterative algorithm is reasonable, the algorithm can get stable convergence. The simulation results show that the algorithm can obtain a very good performance if the length of time observation is more than 20.

Key words: Wireless communication; Spectrum sensing; Broadband signal; Energy detection; Iteration

1 引言

随着无线通信技术的应用越来越广泛，无线频谱资源变得日益紧张。一方面，新的可使用的频谱越来越少，另一方面，授权系统频谱使用效率低下，频谱使用在时间和空间上分布不均衡。为了缓解这种情况，认知无线电技术应运而生。认知无线电^[1]是一种频谱共享技术，次级用户设备可以感知周围的无线电环境，检测出某一时间内没有被占用的频谱资源，在不影响授权用户使用的前提下，利用这些空白的频谱进行通信，提高了频谱的使用效率，缓解了目前频谱使用中遇到的矛盾状况。

频谱感知^[2]是认知无线电的关键技术，通过频谱

感知技术，能够判定周围区域内的无线电使用情况，找出适合次级用户使用的频谱空洞，同时不对授权用户产生有害影响。常用的频谱感知方法包括：匹配滤波检测、能量检测和循环平稳特征检测^[3-5]等多种方法。文献[6]提出了一种改进的基于匹配滤波的检测算法，用于空时键控系统信号识别；文献[7]讨论了匹配滤波检测方法跟能量检测方法协同工作来弥补能量检测方法固有的低精度问题。然而上述方法在大多数文献中都是针对单授权信号检测设计，基于多信道检测的算法往往复杂度较高，难以在实际系统中使用，并且上述算法本身往往依赖于假设已知待检测信号或者频谱的大量先验信息。在实际应用中，频谱感知带宽越宽，可重新利用的频谱资源越多，而宽带频谱中通常包含多个授权信号，并且往往很多有关信号的先验信息无法提前获知，因此如何在系统先验信息未知条件下以较低的复杂度对于宽带频谱上的信号和空洞进行检测是一

2012-12-14 收到，2013-04-19 改回

国家科技重大专项(2012ZX03003011, 2012ZX03003007)，国家重点基础研究发展计划(2012CB316005)和国家自然科学基金-广东联合基金(U1035001)资助课题

*通信作者：劳子轩 laozixuan@bupt.edu.cn

个亟待解决的问题。

能量检测算法^[8]通过对接收信号进行一段时间的能量累积与判决门限进行比较来判决授权用户是否存在, 因此具有较低的复杂度和良好的适用性, 从而在工程实现中得到广泛的使用。能量检测的门限计算往往与噪声功率有关, 在实际情况下, 噪声功率往往要通过估计得到。文献[9]讨论了利用 AR 模型估计噪声功率, 并采用自适应门限进行频谱感知的检测性能。文献[10]讨论了窄带信号能量检测的判决门限公式, 通过噪声功率和给出的虚警概率就可以得出窄带系统的最佳门限。

然而上述文献中设计的能量检测算法存在如下缺陷, 由于在系统先验信息未知的情况下无法预知频谱空洞的位置, 因此无法采用测量的办法获取噪声功率估计值; 并且当感知频段在一段时间内处于比较繁忙的状态时, 没有足够的空白频谱对于噪声功率进行测量。因此需要设计一种宽带信号能量检测算法能够在检测过程中自行估计噪声功率, 实现宽带信号的准确判决。

文献[11]讨论了基于宽带信号的能量检测, 提出了基于最小错判概率的最佳判决门限并给出了闭式解。本文以文献[11]为基础提出了一种噪声估计与能量检测的联合迭代算法, 通过迭代的方式完成对先验信息全盲的宽带抽样频谱信号进行有效检测, 并对噪声功率进行准确估计, 仿真结果表明这种算法具有低复杂度的优势并且性能优良。

2 宽带频谱感知系统模型

当对某一段较宽频段信号进行频谱感知时, 对于该信号进行符合奈奎斯特速率的采样, 则整个频段中既存在着授权用户信号, 也存在着频谱空洞。设该宽带信号带宽为 B , 整个带宽中存在 k 个授权用户信号, 信号之间互不干扰。图 1 中所示的频率标记 f_k 表示时域采样值在频域中对应的频点位置。采样认为是理想的, 当授权用户信号在频谱上存在时, 频域样值为信号值与高斯白噪声的叠加, 当信号不存在的时候, 采样值为高斯白噪声。在一次采样过程中认为整个采样频带内的授权用户信号功率近似相同, 设高斯白噪声功率水平为 σ_w^2 , 信号功率水平为 σ_s^2 , N_0 为高斯噪声单边功率谱密度。

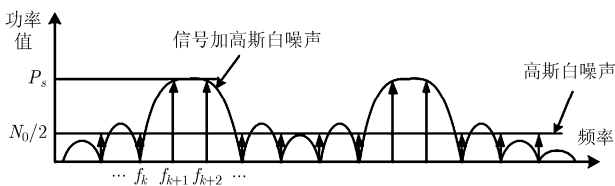


图1 宽带采样系统检测信号频域模型

设每次时域采样点数是 N 点, 对同一频谱在时域上进行连续 N_t 次采样, 在整个采样期间内认为信号出现的位置是不变的, 对时域的 N 点采样值进行 FFT 变换, 得到 N 点频域信号, 则每路信号可以表示为

$$\begin{cases} H_0: Y[n]=W[n], & \text{授权用户不存在} \\ H_1: Y[n]=X[n]+W[n], & \text{授权用户存在} \end{cases}$$

式中 $n = 1, 2, 3, \dots, N_t$, N_t 是时域上每路信号的采样次数。假设噪声为高斯白噪声, 均值为零, 方差为 1, 每一路抽样信号的检测统计量为

$$T_k = \sum_{N_t} (Y[n])^2 \quad (1)$$

在 H_0 假设下, 检测统计量 T_k 服从 $\chi^2(N_t)$ 分布, 在 H_1 假设下, 检测量服从非中心参数为 $N_t \text{SNR}$ 的非中心卡方分布, 其中 SNR 为窄带信噪比, 设授权用户存在时的频点功率为 σ_{s+w}^2 , 高斯白噪声功率为 σ_w^2 , 则可以得到窄带信噪比为: $\text{SNR} = (\sigma_{s+w}^2 - \sigma_w^2) / \sigma_w^2$ 。授权用户信号频点的个数与一次采样点数的比为频谱占用率: $\eta = \sum f_{k, \text{taken}} / N$, 从实际频谱占用角度考虑, 宽带频谱占用率不会达到 100%, 因此文中分析都是基于频谱占用率小于 100% 前提的。当整个频谱完全被占用的时候, 上述宽带信号能量检测退化成一个窄带信号能量检测问题。

如果时域上观测时间足够长, 即 N_t 足够大时, 根据中心极限定理, 每个抽样点上的卡方分布可以用高斯分布近似, 即高斯白噪声的方差为 σ_w^2 , 信号的平均功率为 σ_s^2 , 采样点数为 N , 则检测统计量可以近似符合高斯分布^[8]:

$$\left. \begin{aligned} H_0: & T - \text{Normal}(N_t \sigma_w^2, 2N_t \sigma_w^4) \\ H_1: & T - \text{Normal}(N_t (\sigma_w^2 + \sigma_s^2), 2N_t (\sigma_w^2 + \sigma_s^2)^2) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

3 全盲频谱条件下的噪声估计与能量检测联合迭代算法

3.1 算法描述

针对上一节建立的宽带信号模型, 在先验信息未知的情况下, 提出图 2 所示的迭代算法。

某待检测的宽带系统经过采样、FFT 后, 每个频点的检测统计量为式(1), 首先设置一个初始门限, 使判决反馈系统进入迭代过程。对于宽带信号, 本文的迭代算法首先要估算噪声功率, 通过这个噪声功率值设定一个迭代算法的初始门限。对于原始的采样信号, 我们没有任何先验信息, 根据大量仿真得到求取初值的经验公式为

$$V_{th,1} = \frac{C}{N_t} \text{mean}(y(n)) \quad (3)$$

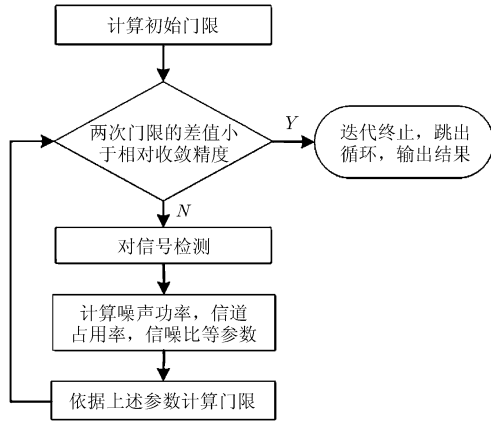


图2 判决反馈的迭代方法示意图

即初次判决门限等于 C 倍的采样信号的平均功率值, C 通常取 $[1, 2]$ 上的值, 例如 $1, 1.2, 1.5$ 等, N_t 为观测时长。然而面对宽带信号的复杂性需要提高经验初值计算公式的普适性, 因此我们将式(3)进一步改进为

$$V_{th,1} = \frac{C}{N_t} \text{mean}(y'(n)|_r) \quad (4)$$

$y'(n)|_r$ 表示待检测的带宽中功率值大小为后 $r\%$ 的信号, r 要根据实际情况灵活选取。

判决模块利用当前门限对信号的检测统计量进行判决, 将所有采样点上的判决结果输出给噪声估计模块, 噪声估计模块对小于判决门限被判决成噪声信号的抽样值求平均值, 作为本次噪声估计结果:

$$\hat{\sigma}_w^2 = \frac{1}{N_t} \text{mean}\{T_k | T_k < V_{th}, 1 \leq k \leq N\} \quad (5)$$

同理, 将判决为信号的抽样值求平均得到的是信号功率和噪声功率的和值的估计值:

$$\hat{\sigma}_{s+w}^2 = \frac{1}{N_t} \text{mean}\{T_k | T_k \geq V_{th}, 1 \leq k \leq N\} \quad (6)$$

利用式(5)和式(6)可以得到窄带信噪比估计值和频谱占用率的估计值: $\widehat{\text{SNR}} = \frac{\hat{\sigma}_{s+w}^2 - \hat{\sigma}_w^2}{\hat{\sigma}_w^2}$, $\hat{\eta} = \frac{\sum_{k=1}^N \text{bool}\{T_k > V_{th}\}}{N}$ 。

噪声估计模块将窄带信噪比和频谱占用率估计值发送给门限制定模块, 根据文献[11]的宽带信号最优门限计算公式更新判决的门限值:

$$\left. \begin{aligned} B &= \frac{2N_t\sigma_w^2(1+\text{SNR})}{(2+\text{SNR})} \\ C &= \frac{4N_t\sigma_w^4(1+\text{SNR})^2}{\text{SNR}(2+\text{SNR})} \ln\left(\frac{1-\eta}{\eta} \cdot (1+\text{SNR})\right) \\ V_{th,k+1} &= \frac{B + \sqrt{B^2 + 4C}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

设在第 $k-1$ 次迭代中得到的门限值是 $V_{th,k-1}$, 则

$$\hat{\eta}_{k-1} = \frac{\sum_N \text{bool}\{T_k > V_{th}\}}{N}$$

$$\hat{\sigma}_{\omega,k-1}^2 = \frac{1}{N_t} \text{mean}\{T_k | T_k < V_{th}, 1 \leq k \leq N\}$$

$$\hat{\sigma}_{s+\omega,k-1}^2 = \frac{1}{N_t} \text{mean}\{T_k | T_k \geq V_{th}, 1 \leq k \leq N\}$$

$$\widehat{\text{SNR}}_{k-1} = \frac{\hat{\sigma}_{s+\omega,k-1}^2 - \hat{\sigma}_{\omega,k-1}^2}{\hat{\sigma}_{\omega,k-1}^2}$$

因此第 k 次判决门限为 $V_{th,k} = F(\hat{\eta}_{k-1}, \widehat{\text{SNR}}_{k-1})$ 。其中 $F(\cdot, \cdot)$ 表示式(7)的门限计算公式。

判决模块根据新的门限值对原始判决变量进行判决, 利用判决结果计算出新的门限并和上一次判决的结果得出的门限值进行比较, 如果两次判决的结果计算出的门限相对差值小于一定值, 即 $\frac{|V_{th,k} - V_{th,k-1}|}{V_{th,k}} < C_a$ (C_a 为收敛精度), 则停止迭代认为算法收敛并输出最终判决结果。

由上节宽带系统模型可知, 对于宽带信号的认知无线电系统, 首先要确定判决门限的初值。经过 N_t 次时间上的连续观测, 对宽带采样数据进行处理, 通过统一的门限初值对信号的每个频点是否被占用进行判决, 得出噪声功率和信道占用率的估计值, 然后通过当次判决结果得到的输出重新计算门限, 如此反复, 直到两次计算的门限相对差值小于一定值, 则算法收敛, 得到宽带信号的检测结果。

从以上描述也可以看出, 信号信噪比越大, 则信号与噪声的差别越大, 检测的性能越好, 同时, 根据文献[11]中的分析可知观测时长 N_t 越长, 检测性能越好。所以当信噪比较低, 检测性能下降时, 可以通过增加观测时长 N_t 来提升检测性能。

3.2 噪声估计性能分析

当只有噪声存在时, 判决统计量的概率密度函数表示为 $f_0(x)$, 当有授权用户存在时, 判决统计量的概率密度函数表示为 $f_1(x)$, 信号的频带占用率为 η , 判决门限为 V_{th} , 授权用户不存在的信道判决为空闲信道的数目为 N_1 , 授权用户存在被误判为没有用户存在的信道数目为 N_2 , 则 N_1 和 N_2 的表达式为

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= (1-\eta)N \cdot \int_0^{V_{th}} f_0(x) dx \\ N_2 &= \eta N \cdot \int_0^{V_{th}} f_1(x) dx \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

则估计得到的噪声平均值 $\hat{\sigma}^2$ 满足:

$$\frac{1}{N_1 + N_2} \sum_{j=1}^{N_1+N_2} T_j = N_t \cdot \hat{\sigma}^2 \quad (9)$$

式中 T_j 为检测统计量, 根据上一小节的分析, 无论是 N_t 增大还是信噪比的提高都可以使错判概率趋

近于零。采用最小错判概率准则对宽带信号进行判决, 噪声的估计值随着错判概率趋于零趋近于噪声功率的真实值: $\lim_{P_e \rightarrow 0} \hat{\sigma}_w^2 = \sigma_w^2$ 。在实际算法设计中, 满足上述任意单个条件都可以达到良好的检测性能。通常情况下, 当 N_t 值较大 ($N_t > 70$) 或信噪比较高 ($\text{SNR} > 3 \text{ dB}$) 时就可以获得较低的错检概率 ($P_e < 0.01$)。

4 仿真分析

为了验证上述算法, 使用 Matlab 仿真的方法产生 40 MHz 的宽带信号, 频谱分辨率为 5 kHz, 迭代初始值采用式(3)计算, 观测时长, 信噪比和信道占用率可以配置, 使用蒙特卡罗方法对上述所提算法进行仿真, 仿真内容包括算法初值设定对收敛性的影响, 算法迭代次数分析。

4.1 初值选取

通常迭代算法有一个收敛区间, 所以迭代算法的初值选取至关重要, 初值选取是否合理决定了算法是否收敛。下面分别取 $C = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ 的情况下计算初值并进行比较。初值计算采用式(3), 观测时长设定为 80, 信噪比为 0 dB。

从图 3 中可以看出, 初始值的选取会影响收敛性, 但是只要初值选取使算法收敛, 就不会影响性能。当 $C=2.5$ 时, 迭代初值超出了收敛区间, 迭代无法收敛而趋于发散, 因此 C 值不能过大, 在迭代初期参量未知的情况下, C 应该小于文献[10]给出的单信道判决门限中的系数, 并且大于等于 1, 即

$$1 \leq C \leq \frac{(N_t + \sqrt{2N_t}Q^{-1}(P_f))}{N_t} \quad (10)$$

4.2 迭代次数分析

在实际应用中减少迭代次数意味着算法复杂度的降低, 而决定算法收敛速度主要有两个因素: 迭代初值的选取和迭代步长的设置。在上述迭代算法设计中, 迭代步长是程序自身调整的, 因此迭代初值的设置将在很大程度上影响迭代的次数。原始算法中采用固定方式计算初始门限进行迭代, 每次迭代开始的时候都要通过重新计算本次的初始判决门

限来进入迭代。为了探寻降低算法复杂度的方法, 我们对迭代次数进行了分析, 仿真中的门限初值采用式(3)计算, 观测时长为 80, 信噪比为 0 dB。

由式(3)可知, C 值越小, 初始门限越小, 而在噪声水平不变的情况下, 最优门限的变化不大。如图 4 所示, $C=1.0$ 情况说明如果初始门限定的比较低, 随着频谱占用率的升高, 信号平均功率值变大, 则式(3)计算出的初始门限随之升高, 所以初始门限与最优门限差距变小, 迭代次数逐渐降低。 $C=1.5, 2.0$ 的情况说明如果初始门限定的较高, 与最优门限差距较小, 迭代次数较低。随着频谱占用率的升高, 初始门限变大, 与最优门限的差距也不断加大, 迭代次数不断地升高。初始门限与最优门限差别越大, 则迭代次数越多。但是两者都不影响最终噪声估计和判决门限的一致收敛性。

在这种仿真情况下每次都需要当次抽样信号重新计算初始值, 迭代收敛次数较高。如果考虑利用信号在时域上的连续性, 由于高斯噪声在时域上是一个缓慢变化的过程, 可以将上次检测中迭代算法输出的噪声估计值作为先验信息传递给下一次检测, 利用这个先验信息来计算初始门限值, 加快算法收敛速度。初始门限的计算方式可以利用窄带检测恒定虚警概率条件下的计算方式来计算(即文献[10]提出的窄带能量检测算法的判决门限)。

进一步地, 如果频谱变化相对于两次抽样是一个慢变的过程, 即两次抽样得到的频谱存在一定程度的相关性, 则可以将上一次算法迭代终止时输出的最优门限值作为下一次检测的初始门限值, 从而进一步加快算法的收敛速度。

对于上述减持算法进行仿真性能对比如图 5 所示, 初值选取 $C = 1.2$, 相关参数如图中所示。图中检测类型 1 为利用式(3)计算初始门限的情况, 类型 2 为前一次检测得到的噪声功率作为下一次检测的先验信息并利用窄带恒虚警率计算公式^[10]计算的初始门限, 类型 3 为前一次检测的最优门限作为下一次检测的初始门限, 噪声功率固定不变。

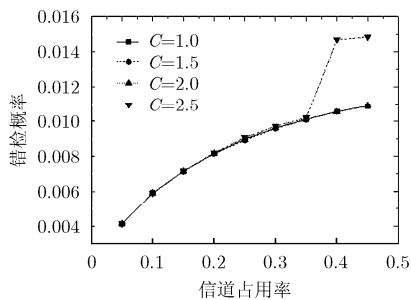


图 3 初始门限设定对于收敛性的影响

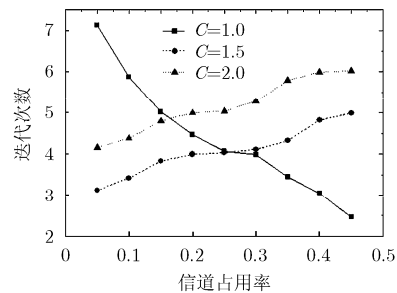


图 4 不同初始门限迭代次数随占用率变化情况

可以看出,不同信噪比条件下的迭代次数比较中,如果频谱变化缓慢,类型 3 的迭代次数最少,检测时间最短,其次是检测类型 2,检测类型 1 的检测时间最长。这说明了上述减持算法的有效性。迭代次数不同,主要是由迭代初值造成的。图中随着信噪比升高,3 种类型迭代次数都降低,是因为选定的初值在信噪比升高的同时向最优门限接近。当信噪比高到一定程度,类型 2 的优势已经不明显。

不同信道占用率条件下的迭代次数比较中,检测类型 2 和类型 3 由于使用了前一次检测的先验信息,在频谱变化缓慢的前提下波动较小。对于类型 1,当占用率很低时迭代初值距离最优门限较远,迭代次数较大,随着占用率升高,门限初值与最优门限差距变小,当占用率增加到 0.25 时,类型 1 的门限初值最接近最优门限,当占用率继续升高,门限初值又会远离最优门限,迭代次数又会升高,所以迭代次数会有一个最低点。

4.3 迭代算法性能

为了对比迭代算法性能与理论性能的差异,我们设计了如下仿真,初值计算采用式(3), $C = 1.2$ 。并给出了详细分析。

图 6 为不同观测时长条件下的检测性能,信道占用率为 0.15。图中可以看出当观测时长大于 20 时, -1 dB 信噪比下的错检概率就已经小于 0.1。随着观测时长 N_t 的增加,检测性能越来越好, N_t 很大时,错检概率趋近于零。通过 3 条曲线的对比可以看出,信噪比升高,检测性能逐渐升高。可以看出,在算法的实际应用中,可以通过增加观测时长和信噪比来提升检测算法的性能。

图 7 为不同占用率和信噪比条件下的检测性能。仿真中当占用率变化时,信噪比为 0 dB;当信噪比变化时,占用率为 0.15。图中可以看出,随着信道占用率的升高,错判率升高了,因为占用率越

高频谱越密集,所以正确检测的难度就加大了,从图中还可以知道,宽带信号的频谱越空,即占用率越小,算法性能越好。不同信噪比条件下的仿真性能可以看出,随着信噪比的升高,错判率会整体降低,在高信噪比的情况错判概率接近于零。图中的理论曲线为文献 [11] 所提算法在观测时长 $N_t = 120$ 时理论上的错判概率,可以看出,理论曲线和仿真曲线贴合得很好。

4.4 算法有效性验证

为了进一步验证算法的有效性,本小节将对该算法与文献[8]提出的基于对空白频谱进行噪声测量的检测算法进行对比。对于仿真信源我们增加了一个只有高斯白噪声的频带,在检测的过程中,基于测量噪声的能量检测算法首先对这个只有高斯白噪声的频带进行处理,测量出具体的噪声的功率值,然后依据此功率值使用文献[8]中的 CFAR 准则计算判决门限,设定虚警率为 0.01。仿真参数设定同上。本文算法的初值计算采用式(3),初值选取 $C = 1.2$,信道占用率为 0.15。两种算法对相同的信号进行检测。

图 8 为本文所提算法与基于噪声估计的能量检测算法在不同信噪比条件下的性能对比。文献[8]所提的算法会收敛到一个接近 0.012 的值,这是由于它的算法门限是根据固定虚警概率设定的,而本文算法没有限制,在信噪比很高时,误判概率趋近于零。这是由于本文算法的门限计算公式是基于最小错判概率提出的^[11]。所以对于宽带信号,本文所提算法有明显的性能优势。这验证了算法对于未知信号判决的有效性和优良性能。

5 结束语

根据上述分析可知,基于全盲频谱感知的噪声估计与能量检测联合迭代算法在仿真中具有良好的鲁棒性,在合理设置迭代初始值的前提下能够通过

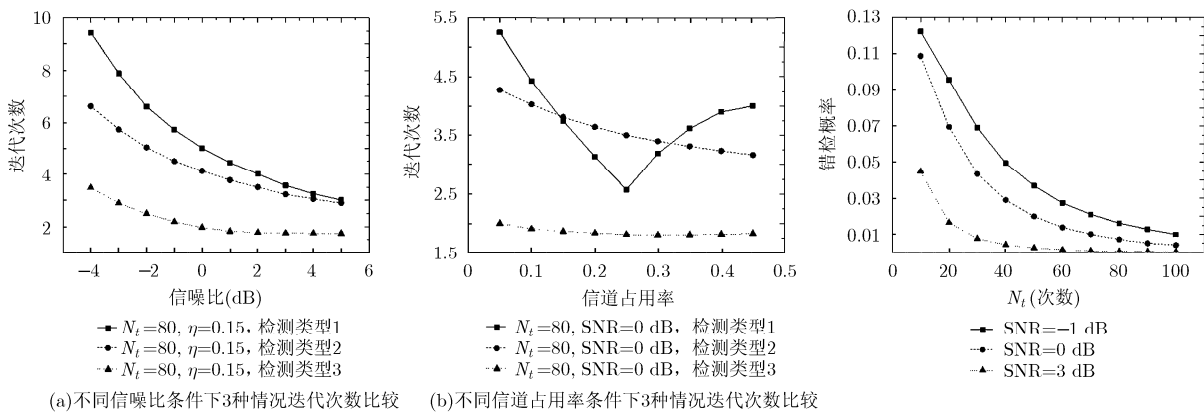


图 5 不同信噪比和不同信道占用率条件下 3 种情况迭代次数比较

图 6 不同观测时长 (N_t) 条件下的检测性能

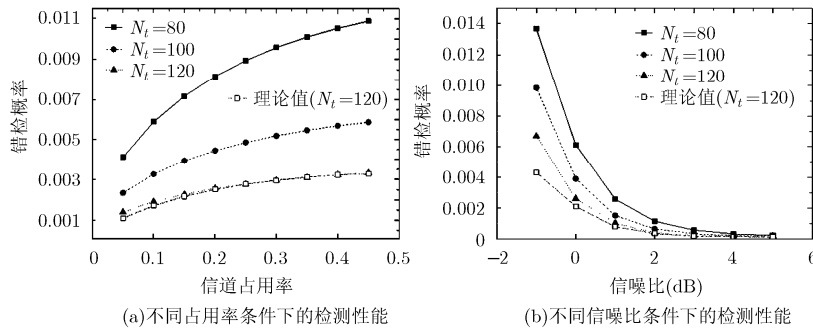


图 7 不同占用率和不同信噪比条件下的检测性能

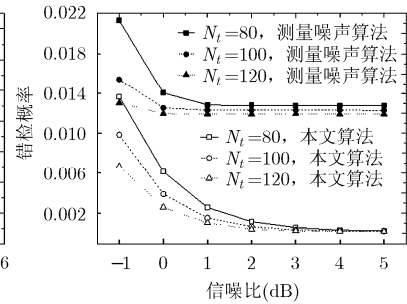


图 8 与基于噪声测量的能量检测算法性能对比

算法自身得出准确的环境噪声的功率值, 并且在频谱占用率和信噪比变化的环境中自主收敛到最优门限值附近, 达到良好的检测性能。在实际的应用场景中, 能量检测一般是连续进行的, 如果考虑多次检测频谱的相似性, 就能很好地降低算法的复杂度, 使算法较快收敛。通过仿真, 这种方法迭代收敛速度很快, 性能稳定, 其具有的低复杂度的优势适于工程实现和信号的前级处理, 在宽带信号感知的实现中具有巨大的优势。

参 考 文 献

- [1] Mitola J. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. *IEEE Personal Communications*, 1999, 6(4): 13-18.
- [2] Cabric D, Misha S M, and Brodersen R W. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios[C]. Proceedings of IEEE Asilomar Conference, Pacific Grove, CA, Nov. 2004: 772-776.
- [3] Wang Pu, Sahinoglu Z, Pun Man-on, et al. Persymmetric parametric adaptive matched filter for multichannel adaptive signal detection[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(6): 3322-3328.
- [4] Yu Gui-cai and Long Cheng-zhi. Research on energy detection algorithm in cognitive radio systems[C]. 2011 International Conference on Computer Science and Service System (CSSS), Nanjing, June 2011: 3460-3463.
- [5] Enserink S and Cochran D. A cyclostationary feature detector[C]. Proceedings of 28th Asilomar Conference, Signals, Systems, Computers, Pacific Grove, CA, Oct. 1994: 806-810.
- [6] Yang Ping, Xiao Yue, Li Lei, et al. An improved matched-filter based detection algorithm for space-time shift keying systems[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2012, 19(5): 271-274.
- [7] Francois-Xavier Socheleau P C, Houcke Sbastien, and Assa-El-Bey A. Cognitive OFDM system detection using pilot tones second and third-order cyclostationarity[J]. *Signal Processing*, 2010, 91(2): 252-268.
- [8] Zhuan Ye, Grosspietsch John, and Memik Gokhan. Energy detection using estimated noise variance for spectrum sensing in cognitive radio networks[C]. 2008 Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2008, IEEE, Las Vegas, March 31, 2008: 711-716.
- [9] Joshi D R, Popescu D C, and Dobre O A. Adaptive spectrum sensing with noise variance estimation for dynamic cognitive radio systems [C]. 44th Annual Conference on Information Sciences and Systems, Princeton, NJ, Mar. 17-19, 2010: 1-5.
- [10] López-Benítez M and Casadevall F. Improved energy detection spectrum sensing for cognitive radio[J]. *IET Communications*, 2012, 6(8): 785-796.
- [11] 刘子扬, 彭涛, 郭海波, 等. 干扰系统先验信息未知的宽带能量检测[J]. 北京邮电大学学报, 2012, 35(5): 31-35.
Liu Zi-yang, Peng Tao, Guo Hai-bo, et al. Energy detection about broadband signal without priori information of interference system[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2012, 35(5): 31-35.

劳子轩: 男, 1989年生, 硕士生, 研究方向为宽带认知无线电通信系统软硬件设计与算法实现。

刘子扬: 男, 1985年生, 博士生, 研究方向为宽带认知无线电通信系统设计、蜂窝与D2D混合网络研究。

彭涛: 男, 1977年生, 副教授, 研究方向为无线通信原理与技术研究、下一代无线通信网络技术研究、认知无线电通信技术研究。

王文博: 男, 1965年生, 教授, 研究方向为新一代移动通信体制的研究、信号处理在移动通信中的应用。