

基于循环谱对称性的频谱感知算法

高玉龙¹, 陈艳平², 管修挚¹, 张中兆¹, 沙学军¹

(1. 哈尔滨工业大学 通信技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨工程大学 计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对现有基于循环谱的频谱感知算法的不足, 利用改进 SSCA 算法计算接收信号的循环谱, 减少算法的计算量; 利用循环谱的对称性, 选择非零循环频率处的循环谱抵抗干扰和噪声, 结合对称性搜索策略进行频谱感知。分析并仿真了循环谱的参数对频谱感知算法的影响, 仿真结果证明了所提出算法克服了传统算法的不足, 提高了低信噪比下的正确检测性能。

关键词: 循环谱; 频谱感知; 分段谱相关算法; 循环谱对称性

中图分类号: TN913

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2011)11-0021-06

Spectrum sensing algorithm based on symmetry of cyclic spectral correlation

GAO Yu-long¹, CHEN Yan-ping², GUAN Xiu-zhi¹, ZHANG Zhong-zhao¹, SHA Xue-jun¹

(1. Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

2. Department of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In response to the shortcoming of conventional algorithms, modified SSCA was exploited to calculate the cyclic spectral correlation of received signal for decreasing the computational complexity. Symmetry of cyclic spectral correlation (CSC) was used to detect the idle spectrum, criteria and method of selecting and judging symmetry were proposed. Conventional binary hypothesis condition was translated to concrete value according to symmetry. In order to eliminate the effect of interference and noise, non-zero cyclic frequencies were selected. Finally, the performance of the presented algorithm was compared with the conventional algorithms by virtue of simulation. Simulation results proved the correctness and the superiority of new algorithms. Using symmetry improves the successful detection probability for low SNR and reduces the computational complexity.

Key words: cyclic spectral correlation; spectrum sensing; strip spectral correlation algorithm; symmetry of CSC

1 引言

随着移动通信的快速发展和大规模普及, 为解决频谱资源贫乏和利用情况极不平衡的问题, Joseph Mitola 在软件无线电的基础上提出了认知无线电的

构想, 通过从时间和空间上充分利用空闲频谱资源, 从而有效解决上述难题^[1]。以软件无线电为扩展平台的认知无线电是一种新的智能无线通信技术, 它可以感知到周围的环境特征, 并通过无线电知识描述语言与通信网络进行智能交流, 实时调整传输参数, 使系

收稿日期: 2011-07-24; 修回日期: 2011-11-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 基金资助项目 (2007CB310601); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目 (HITNSRIF2012018)

Foundation Items: The National Basic Research Program of China (973 Program)(2007CB310601); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (HITNSRIF2012018)

统的无线规则与输入的无线电激励变化相适应,使用户自动选择最好的、最廉价的服务,使用最适合的无线资源完成无线传输^[2]。因此,认知无线电是从根本上提高无线通信的频谱效率、功率效率、系统容量的技术手段,能满足未来高速高质量信息服务对宽带无线通信的需求,是实现通信系统具有可扩展、可重构功能的技术之一。通常,认知无线电系统的通信环境是比较复杂和恶劣的,要求作为认知无线电核心和基础的频谱感知算法在低信噪比下也要有好的性能^[3,4], Gardner WA 等人对循环平稳基础理论和谱相关理论做了详细研究,并运用循环平稳理论建立了对弱信号检测的统一理论框架,循环平稳理论建立起了所谓的循环频率—谱频率的二维频谱平面^[5],开辟了更为丰富的信号分析领域,又因其更强的抗干扰、抗噪声能力以及反映信号更多参数的优点满足了频谱感知技术的研究需要。

HAYKIN S 提出 3 种频谱感知的算法即匹配滤波、能量检测以及周期特性检测^[2]。匹配滤波器法因为需要知道很多的先验信息而很少被采用^[6],而对于认知无线电,主要使用不需信号先验信息的能量检测法和循环平稳检测法。对于能量检测法,由于其理论较为清晰,算法步骤较为简单,因此只有不多的文献对其进行阐述^[7]。而基于循环谱的频谱感知算法由于其突出的抗干扰、抗噪声的优点,并且涉及的理论较为复杂,所以相关的研究文献较多^[8]。前期的文献大多是综述性质的,并没有给出具体的算法描述。后续的有些文献对其进一步研究,取得了较好的研究成果,文献[9]结合多天线的情况探讨了采用循环平稳的频谱检测方法,文献[10]采用多个循环频率,文献[11]采用循环自相关函数,文献[12]利用循环谱的变形统计量,文献[13]以 OFDM 为研究目标分别对频谱感知算法进行了研究。可以看出对于基于循环平稳过程的频谱感知算法,主要采用二阶循环平稳过程中的循环谱及其相关的统计量对其进行研究,算法的不足则是计算量大,大多文献没有详细分析循环谱算法的检测性能,并且大都是在理想的情况下,既不考虑数据有限长的实际情况,还假设知道信号的许多先验信息。本文根据实际的认知无线电通信环境,即采样处理的数据是有限数据,且不知道通信信号的先验信息,在这种情况下,以前文献提出的基于循环谱的频谱空洞识别算法就不能应用。

根据研究现状,拟采用改进 SSCA 算法计算接收信号的循环谱,以减少提出算法的运算量;采用循环

谱对称性为判断依据进行频谱感知以提高算法在低信噪比的检测性能。本文内容的安排如下:第 2 节为了减少基于循环谱的频谱感知算法的计算量,对现有的循环谱算法进行算法和改进;第 3 节介绍提出的基于循环谱对称性的频谱感知算法的思路;第 4 节分析和仿真提出算法的性能;第 5 节是结束语。

2 循环谱算法选择及改进

目前,采用循环谱进行频谱感知的不足就是计算量大,因此本节主要对循环谱算法进行选择以及利用以前的研究成果对算法进行改进以达到减少计算量的目的。根据循环谱的理论,有限长数据的循环周期图不能直接作为循环谱的估计值,因为它不是无偏估计,为了得到较好的估计值,需要进行平滑处理。现在一般有 2 种平滑处理方法,即时域平滑与频域平滑。时域平滑算法主要有 SSCA(strip spectral correlation algorithm)和 FAM (FFT accumulation method),频域平滑算法有 FSM (frequency smoothed method)。文献[14]对 3 种算法的计算量进行了比较。图 1 给出循环谱 3 种平滑算法的运算量。

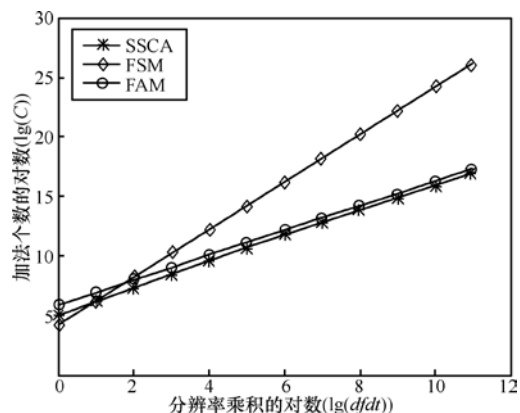


图 1 循环谱算法的计算复杂度

纵坐标表示算法复杂度, C 表示实数加法个数。横坐标中的 $df dt$ 为分辨率乘积。从图 1 可以明显看出 FSM 算法的运算量比其他 2 种算法的计算量大很多。而 FAM 算法和 SSCA 算法的运算量差别不大,但如果考虑到图中的运算量坐标采用的是运算量的对数,因此在图中不明显的差别,在实际的计算中差别也会很大。

从图 1 可以看出,SSCA 算法的计算量最小,因此本文选择它作为计算循环谱的算法,其表达式为^[5]

$$S_{xT}^{f_k+q\Delta\alpha}\left(n, \frac{f_k - q\Delta\alpha}{2}\right)\Delta t = \frac{1}{T\Delta t} \sum_r X_T(r, f_k) x^*(r) g(n-r) e^{-j2\pi q r / N} \quad (1)$$

其中,

$$X_T(n, f) = \sum_{-N'/2}^{N'/2-1} a(r) x(n-r) e^{-j2\pi f(n-r)T_s} \quad (2)$$

其中, $a(n)$ 和 $g(n)$ 分别为数据衰减窗和数据平滑窗。 $X_T(n, f)$ 是 $x(n)$ 的短时傅里叶变换, 被称为复解调, 一般通过平滑 FFT 计算。 N' 和 N 分别是傅里叶变换长度采集数据长度。

但与此同时必须看到 3 种循环谱估计算法的计算量都非常大, 不能对信号进行实时处理, 为此, 寻找它们的高效算法就显得尤为重要。文献[14]对其进行改进, 提出利用改进的滑动 FFT 算法和一位相关算法代替 SSCA 算法中 FFT 算法和相关算法, 滑动 FFT 如式(3)所示。

$$X_m^{k+1} = e^{j2\pi m / N'} [X_m^k + x(k + N') - x(k)] \quad (3)$$

式(3)表明: 第 $k+1$ 次采样的 FFT 等于先前的 FFT 和最新样值与最早样值之差的相移和, 因此, 如果知道 k 时刻输入序列的变换, 就可以推导出下一序列的变换 ($k+1$ 时刻), 而不需要对其数据进行 FFT 运算。算法改进之前的运算量为

$$C = \frac{(M+1)\Delta t \Delta f}{(\Delta f)^2} \text{lb}\left(\frac{\Delta t \Delta f}{\Delta f}\right) + \frac{(8M+12)\Delta t \Delta f}{(\Delta f)^2} \text{lb}(1/\Delta f) + \frac{(2M+1)\Delta t \Delta f}{(\Delta f)^2} + \frac{(12M+4)\Delta t \Delta f}{\Delta f} \quad (4)$$

其中, M 为实数乘法计算复杂度相对于实数加法计算复杂度的倍数。对于不同的硬件处理器, M 是不同的。改进后的计算量公式为

$$C = \frac{(M+1)\Delta t \Delta f}{(\Delta f)^2} \text{lb}\left(\frac{\Delta t \Delta f}{\Delta f}\right) + \frac{(8M+12)\Delta t \Delta f}{(\Delta f)^2} \text{lb}(1/\Delta f) + \frac{M \Delta t \Delta f}{(\Delta f)^2} + \frac{(12M+4)\Delta t \Delta f}{\Delta f} \quad (5)$$

而一位相关算法则根据随机过程的相关原理, 对其相关乘积进行简化, 使 2 个数相乘变为和一个固定数相乘, 计算量大大简化, 但对性能有所影响。

结合一位相关算法, 式(6)重新给出 SSCA 算法的表示式。

$$S_{xT}^{f_k+q\Delta\alpha}\left(n, \frac{f_k - q\Delta\alpha}{2}\right)\Delta t = \frac{m(f_k)}{\Delta t} \sum_r \phi[X_T(r, f_k)] \cdot x^*(r) e^{j\pi/4} g(n-r) e^{-j2\pi q r / N} \quad (6)$$

对改进算法的计算量和性能进行理论分析和仿真, 结果表明改进算法能有效地减少计算量。图 2 给出了采用改进滑动 FFT 前后的计算复杂度, 其处理器为 FPGA 中 NiosII 软核处理器, 其硬件处理器为 NiosII 软核, M 大概取 15, $df = 1/256$ 。图 2 中横坐标中的 $dfdt$ 是频率—循环频率分辨率乘积。纵坐标为计算复杂度对数。虽然图中改进算法和原算法的计算复杂度曲线区别不大, 但由于纵坐标取的是计算复杂度的对数, 因此改进后的滑动 FFT 算法大大节约了运算量, 且改进算法的运算量随着 $dfdt$ 增加减少的越来越多, 也就是 2 条曲线的差别越来越大。

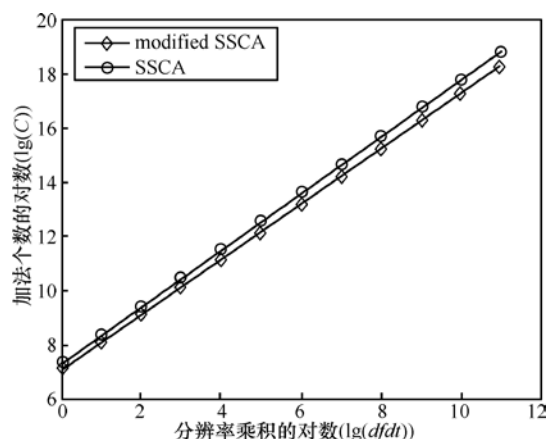


图 2 SSCA 算法改进前后的运算量

另外, 改进的滑动 FFT 算法并没有对循环谱的计算进行近似, 因此改进不影响循环谱估计的性能。由于一位相关算法是对原算法的一种近似, 因此需对上述改进算法性能进行验证。根据对一位相关算法的仿真结果可以看出改进算法只是对幅度有所影响, 并且对所有的循环谱幅度的影响是一致的, 在本文的对称性判断中不会影响算法性能。在 FPGA 平台验证结果表明: 未利用上面 2 种改进前需要的计算时间为 3s, 改进后大概需要 0.1s, 实时性提高大概 30 倍。

3 循环谱对称性搜索和判断策略

3.1 频谱感知算法思路

经过调制的通信信号的循环谱与噪声的循环谱

是完全不同的, 以 BPSK 信号为例, 图 3 为采用改进 SSCA 算法计算的循环谱, 图 4 为噪声的循环谱。

通过图 3 和图 4 可以看出, 在某个频带内只有噪声和既有信号又有噪声, 二者的循环谱有很大区别, 因此可以采用二元假设的方式描述这种情况进行频谱空洞检测, 如式(7)所示。

$$\begin{cases} H_0 : x(t) = n(t) \\ H_1 : x(t) = s(t) + n(t) \end{cases} \quad (7)$$

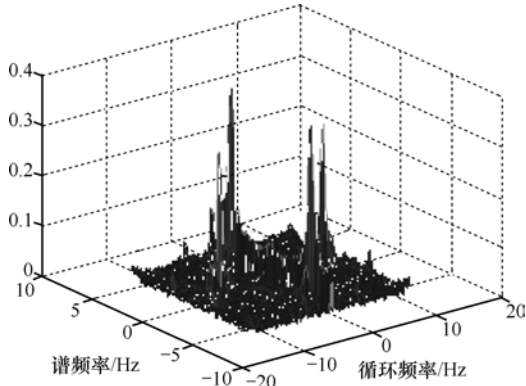


图 3 BPSK 信号的循环谱

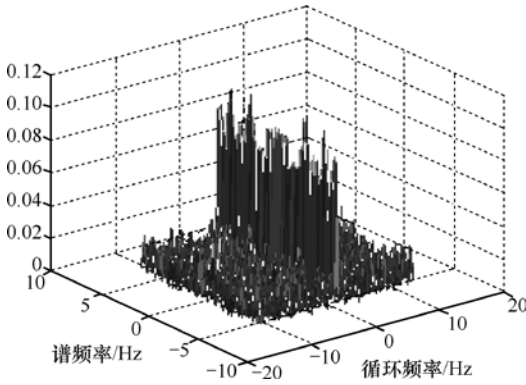


图 4 噪声的循环谱

根据循环谱的有关理论, 可知其具有对称性^[5], 如式(8)所示。

$$S_x^\alpha(f) = S_x^\alpha(-f), \quad S_x^\alpha(f) = S_x^{-\alpha}(f) \quad (8)$$

这也可以通过图 3 和图 4 采用 SSCA 算法计算 BPSK 信号的循环谱证明。因此可以通过判断接收信号循环谱的对称性判断某个频段内是否有调制信号进而判断频谱空洞是否存在。

根据循环谱理论, 循环谱把信号的频谱扩展到二维频率平面(循环频率和谱频率), 如图 5 所示。

把由循环频率和频率组成的整个二维频率平面的循环谱的值, 用一个 $N'/L_2 \times N/L_1$ 的矩阵 \mathbf{H} 表示, 行表示循环谱的谱频率, 列表示循环谱的循环

频率。 L_1 和 L_2 为抽取因子, 抽取是为了减少判决时的运算量。根据循环谱对称性的性质和特点, 从以下 2 个方面进行对称性的判断。

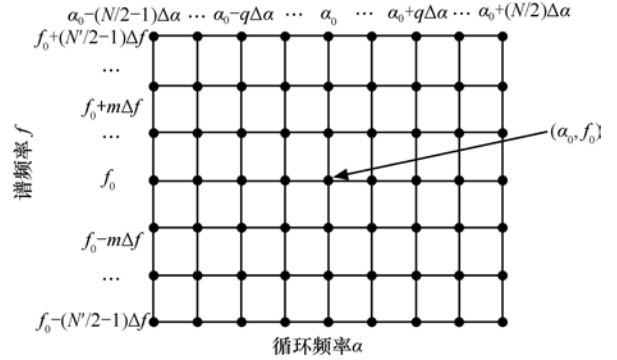


图 5 循环谱的二维频率平面

3.2 对称位置的选取

根据式(8)可知, 循环谱关于谱频率和循环频率都是对称的。因此就有多种选择方式, 即关于谱频率对称而循环频率不对称, 关于循环频率对称而谱频率不对称, 关于谱频率和循环频率都对称 3 种方式。为了减少计算量, 选择关于循环频率对称而谱频率不对称这种情况。对称位置选取的原则: 所选对称位置循环谱的值较大且不受噪声影响; 另外一点就是为了减少计算量, 不能选取太多的对称位置, 但采取单个位置又不能消除数字处理的影响。因此, 必须选择合适位置和合适的对称位置个数。通过观察和分析调制信号的循环谱, 可以发现在谱频率为 $f = -f_s/4$, $f = 0$, $f = f_s/4$ 等处的值相比其他位置的值要大, 满足上述的选取原则, 选用这些点处循环谱的值进行比较和判断, 这样可以减少数字信号有限长引起的计算误差。因此, 对应 $N'/L_2 = 3$, 此时为不等间距抽取。

在选择谱频率基础上再选取循环频率, 由于相同的原因, 选择循环频率 $\alpha = -f_s/2$ 和 $\alpha = f_s/2$, 及其附近的位置 $\alpha = -f_s(1/2 + 4/N')$ 和 $\alpha = f_s(1/2 + 4/N')$, $\alpha = -f_s(1/2 - 4/N')$ 和 $\alpha = f_s(1/2 - 4/N')$; 循环频率为 0 的附近位置 $\alpha = -f_s(4/N)$ 和 $\alpha = f_s(4/N)$, $\alpha = -f_s(8/N)$ 和 $\alpha = f_s(8/N)$ 。之所以没有选择循环频率为零处的是因为对于循环频率为零的循环谱对应通常意义上的功率谱, 容易受到噪声的影响。上述选取的这些对称位置的个数对应 $N/L_1 = 10$ 。

通过上述处理, 得到一个(3,10)矩阵, 如图 6 所示。图中的 3 行分别为 $f = -f_s/4$, $f = 0$,

$f = f_s/4$ (从上到下), 10 列分别为 $\alpha = -f_s(1/2 + 4/N')$, $\alpha = -f_s/2$, $\alpha = -f_s(1/2 - 4/N')$, $\alpha = -f_s(8/N')$, $\alpha = -f_s(4/N')$ 及其对应的对称位置 $\alpha = f_s(1/2 + 4/N')$, $\alpha = f_s/2$, $\alpha = f_s(1/2 - 4/N')$, $\alpha = f_s(8/N')$, $\alpha = f_s(4/N')$ 。

图 6 中曲线连接的点就是循环频率的对称位置。根据上述的阐述, 共有 $3 \times 5 = 15$ 个对称位置需要判断, 也就是对应 $f = -f_s/4$, $f = 0$, $f = f_s/4$ 各有 5 对的对称位置。相比判断全部对称位置, 本文提出算法的计算量就大大减少。

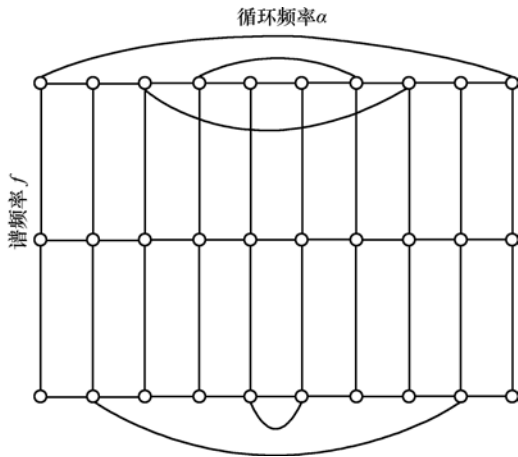


图 6 选取的对称性判断矩阵

3.3 循环谱对称性判断

得到位置对称的矩阵之后, 要对对称位置的值是否相等进行判断。此时, 循环谱对称性的判断转化为循环谱矩阵在对称位置的值是否相等。按照理论计算, 对于循环谱对称位置的循环谱的值应该是相等的, 但由于进行计算循环谱时数据的长度和表示数据的位数都是有限的, 因此对称位置上的数据不一定完全相等, 在判断 2 个对称位置的循环谱的值是否相等时, 采取计算二者差值的方法。判断原则为只要二者的差值小于某个门限 \lim_value 即可认为二者相等, 如式(9)所示。

$$S \mathcal{M} = \frac{2L_2L_1}{N'N} \sum_{L=1}^{N'/L_2} \sum_{P=1}^{N/2L_1} [H(L,P) - H(L, M+1-P)] \quad (9)$$

对于本文中, $N'/L_2 = 3, N/L_1 = 10$, 此时, 式(9)变为

$$S \mathcal{M} = \frac{1}{3 \times (10/2)} \sum_{L=1}^3 \sum_{P=1}^{10/2} [H(L,P) - H(L, 10+1-P)] \quad (10)$$

如接收信号中没有信号, 则对称位置的循环谱的估计值差别很大, 如果有信号, 则对称位置的循环谱的差值应该是小于门限的。此时, 二元假设判断变为

$$\begin{cases} H_0 : SUM \geq \lim_value \\ H_1 : SUM < \lim_value \end{cases} \quad (11)$$

4 算法仿真结果

利用 Matlab 软件搭建研究使用的仿真平台, 如图 7 所示。对于发射端, 通道信号产生模块在初始阶段随机在不同的频段上产生不同的信号, 模仿实际的认知无线电的无线电环境, 产生的信号通过无线信道传输模块加上噪声, 模仿实际环境中的噪声。对于接收端就是通信环境的感知与分析算法的验证。在验证算法之前, 首先采用改进 SSCA 算法计算信号的循环谱。然后, 对提出的基于循环谱对称性的频谱感知算法进行仿真验证, 以确定新算法的正确性。

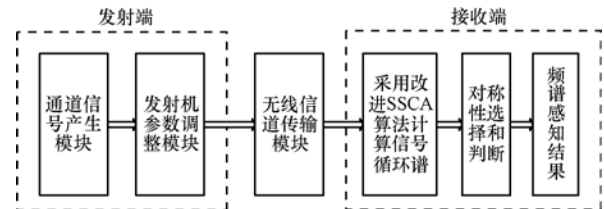


图 7 算法仿真平台

假设信道中存在的信号分别为 BPSK、QPSK 和 OQPSK 3 种常用的调制信号之一, 以它们为例对提出的算法进行仿真。通过分析用 SSCA 算法计算循环谱的幅度值, 发现对称位置循环谱的幅度值基本是相等的, 因此选取 $\lim_value = 0.05$ 对其提出的算法性能进行仿真, 结果如图 8 所示。

图 8 中给出的是信号的检测概率, 如果信道内没有信号就是频谱空洞的检测概率。仿真采用 SSCA 算法的数据长度 2048, FFT 点数为 256 点, 窗函数为 Hamming 窗。从图中可以看出在信噪比为 -14dB 左右时, 检测概率可以达到 90% 左右, 在信道比 4dB 左右时可以达到 100%, 证明了本文提出算法的可行性和准确性。由于受到选择的循环频率和谱频率的位置影响, 各种调制信号检测概率不完全相同, 但随着信噪比的增加差别越来越小, 信噪比达到 6dB 时三者几乎完全一致。

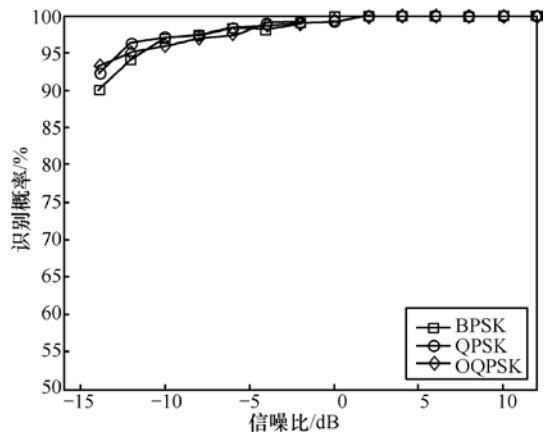


图 8 不同信噪比下的检测概率

图 9 给出了数据长度 N 分别为 256、512、1 024、2 048、4 096、8 192、16 384，信噪比为 5dB 的算法的正确识别概率。

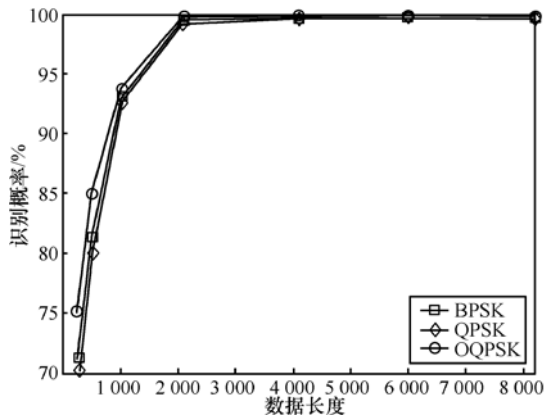


图 9 不同数据长度下的检测概率

计算信号循环谱复解调的傅里叶变换长度为 128，抽取因子是 4。数据个数都是 2 的整数次幂，这样便于计算循环谱时利用 FFT 算法。从图中可以看出随着数据长度的增加正确识别概率增加，这和理论是吻合的。

5 结束语

本文以循环谱的改进 SSCA 算法为基础，研究认知无线电接收端中的频谱感知算法。在研究上述问题之前根据 SSCA 改进算法计算接收信号循环谱。然后，根据循环谱的对称性，结合对称性搜索策略，提出频谱感知算法，解决现有基于循环谱的频谱感知算法的计算量大和不符合实际认知无线电环境的不足的问题。改进 SSCA 算法的应用大大减少了提出算法的计算量，提高了低信噪比情况下频谱感知的准确性。本文研究成果将完善基于循环谱的频

谱感知算法，为认知无线电关键技术的解决和应用提供有效的算法支撑。

参考文献:

- [1] JOSEPH MITOLA, MAGUIRE G Q J. Cognitive radio:making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications. 1999, 6(4): 13-18
- [2] HAYKIN S. Cognitive radio brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220
- [3] MA J, LI G Y. Signal processing in cognitive radio [J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(5): 805-823
- [4] HAYKIN S, THOMSON D J, JEFFREY H. Spectrum sensing for cognitive radio[A]. Proceedings of the IEEE[C]. 2009, 97(5): 849-877
- [5] GARDNER W A, NAPOLITANO A, PAURA L. Cyclostationarity: half a century of research[J]. Signal Processing. 2006, 86: 639-697
- [6] SAHAI A, CABRIC D. Spectrum sensing: fundamental limits and practical challenges[A]. IEEE Symposium on New Frontiers in Dyn Spectrum Access Network[C]. Baltimore, USA, 2005
- [7] KAY S M. Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection Theory[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1998.
- [8] ENSERINK S, COCHRAN D. A cyclostationary feature detector[A]. Proc 28th Asilomar Conf. Signals, Syst, Comput[C]. CA, USA, 1994. 2: 806-810.
- [9] 陈星,贺志强,吴伟陵. 基于循环平稳的多天线感知无线电频谱检测[J].北京邮电大学学报. 2008, 31(2): 85-89.
CHEN X, HE Z Q, WU W L. Cyclostationarity-based spectrum sensing technique in multi-antenna cognitive radio[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008, 31(2): 85-89.
- [10] LUNDEN J, KOIVUNEN V, HUTTUNEN A. Spectrum sensing in cognitive radios based on multiple cyclic frequencies[A]. 2nd International Conference on CrownCom[C]. Orlando,USA, 2007. 37-43
- [11] 刘航, 于丹, 孔祥维. 低信噪比条件下提高认知无线电的频谱感知能力的方法[J]. 电子与信息学报. 2009, 31(4): 993-996.
LIU H, YU D, KONG X W. A new approach to improve the spectrum sensing in cognitive radio in low SNR environment[J]. Journal of Electronics & Information Technology. 2009, 31(4): 993-996.
- [12] ELVINO A G. Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs[J]. IEEE Communications Magazine. 2008, 4: 32-39.
- [13] 虞贵财, 罗涛, 黄振. 感知无线电系统中改进的循环频谱检测算法[J]. 北京邮电大学学报. 2009, 32(2): 89-92.
YU G C, LUO T, HUANG Z. An improved cyclic spectrum detection algorithm in CR systems[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications. 2009, 32(2): 89-92.

- [2] URKOWITZ H. Energy detection of unknown deterministic signals[J]. Proceedings of the IEEE, 1967, 55(4): 523-531.
- [3] KIM S, LEE J, WANG H, *et al.* Sensing performance of energy detector with correlated multiple antennas[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2009, 16(8): 671-674.
- [4] DIGHAM F, ALOUNINI M, SIMON M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels[J]. IEEE Trans Commun, 2007, 55(1): 21-24.
- [5] DU K L, MOW W H. Affordable cyclostationarity-based spectrum sensing for cognitive radio with smart antennas[J]. IEEE Transactions on, Vehicular Technology, 2010, 59(4): 1877-1886.
- [6] LUNDEN J, KASSAM S A, KOIVUNEN V. Robust nonparametric cyclic correlation-based spectrum sensing for cognitive radio[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(5): 38-52.
- [7] WANG H Q, YANG E H, ZHAO Z J, *et al.* Spectrum sensing in cognitive radio using goodness of fit testing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(11): 5427- 5430.
- [8] SHEN L, WANG H Q, ZHANG W, *et al.* Blind spectrum sensing for cognitive radio channels with noise uncertainty[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(6): 1721-1724.
- [9] SONNENSCHNEIN A, FISHMAN P M. Radiometric detection of spread-spectrum signals in noise of uncertain power[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1992, 28(3): 645-660.
- [10] TANDRA R, SAHAI A. Fundamental limits on detection in low SNR under noise uncertainty[A]. Proc IEEE Int Conf Wireless Networks, Commun And Mobile Computing[C]. Maui, Hi, 2005. 464-469.
- [11] GOSSET W S. The probability of a mean[J]. Biometrika, 1908.1-25.
- [12] ANDERSON T W, DARLING D A. Asymptotic theory of certain "Goodness of Fit", criteria based on stochastic processes[A]. The Annals of Mathematical Statistics[C]. 1952, 23(2): 193-212.
- [13] STEPHENS T W. EDF statistics for goodness of fit and some comparisons[J]. Journal of the American Statistical Association, 1974, 69(347): 730-737.
- [14] EPPS T W, PULLEY L B. A test for normality based on the empirical characteristic function[J]. Biometrika, 1983, 70(3): 723-726.

作者简介:



沈雷 (1979-), 男, 浙江舟山人, 博士, 杭州电子科技大学副教授, 主要研究方向为认知无线电和信号盲分离。

王海泉 (1964-), 男, 浙江金华人, 杭州电子科技大学教授, 主要研究方向为信号检测和 MIMO 通信。

赵知劲 (1960-), 女, 浙江宁波人, 杭州电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为通信中的信号处理。

孙闰红 (1974-), 男, 江西吉安人, 博士, 杭州电子科技大学讲师, 主要研究方向为信号处理和电子对抗。

(上接第 26 页)

- [14] 高玉龙, 张中兆. SSCA 算法改进与实现[J]. 哈尔滨工业大学学报. 2008, 40(9): 1374-1377.
- GAO Y L, ZHANG Z Z. Modification and implementation of SSCA algorithm [J]. Journal of Harbin Institute of Technology. 2008, 40(9): 1374-1377.

作者简介:



高玉龙 (1978-), 男, 河南淮阳人, 博士, 哈尔滨工业大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为认知无线电、通信信号处理、卫星导航定位等。

陈艳平 (1980-), 女, 黑龙江肇东人, 哈尔滨工程大学博士生, 主要研究方向为认知网络、网络性能评价和网络演算。

管修攀 (1984-), 男, 辽宁丹东人, 哈尔滨工业大学硕士生, 主要研究方向为认知无线电、LTE 接收机算法等。

张中兆 (1951-), 男, 北京人, 哈尔滨工业大学电信学院院长、教授、博士生导师, 主要研究方向为软件无线电、数字信号处理、卫星导航定位等。

沙学军 (1966-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士, 哈尔滨工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带接入、自组网协议和变换域通信等。