

## 低信噪比条件下提高认知无线电的频谱感知能力的方法

刘 航 于 丹 孔祥维

(大连理工大学电子信息工程系 大连 116023)

**摘 要:** 为了提高认知无线电在强噪声环境下的频谱感知能力, 该文提出了一种频谱感知方法。该方法利用循环谱相关函数, 采用二次模式识别, 可以显著提高在低信噪比条件下的信号调制方式识别准确率。试验结果表明, 在 AWGN 信道, 信噪比不低于-10dB 条件下, 对常用 5 种数字调制信号的识别准确率高于 99.9%, 能够满足认知无线电中对频谱感知的性能要求。

**关键词:** 无线通信; 认知无线电; 频谱感知; 调制方式识别

中图分类号: TN914.42

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)04-0993-04

## A New Approach to Improve the Spectrum Sensing in Cognitive Radio in Low SNR Environment

Liu Hang Yu Dan Kong Xiang-wei

(The Department of Electronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

**Abstract:** A spectrum sensing approach is proposed to improve the spectrum sensing of Cognitive Radio (CR) in the strong noise environment. The proposed method can increase the accuracy of signals classification in the low SNR environment using spectral correlation function and two-stage classification. The results show that above 99.9% received signals that are composed of five kinds of modulation signals are correctly classified in AWGN channel at SNR=-10dB and above. The performance can satisfy the requirement of spectrum sensing in Cognitive Radio.

**Key words:** Wireless communications; Cognitive Radio (CR); Spectrum sensing; Signal classification

### 1 引言

为了提高通信系统的频谱使用效率, 以应对“频谱资源日益紧张”的局面。认知无线电(Cognitive Radio, CR)一经 Mitola<sup>[1]</sup>提出便引起了广泛的关注。CR 的吸引力在于当授权用户的频带未被使用时, CR 将利用该频带进行无线通信, 这样可以大大提高频带资源的使用率, 缓解日益匮乏的频谱资源。CR 为了避免对授权用户产生干扰, 必须能够对外界频谱使用进行非常稳定和高准确度的探测和识别。因此, 频谱感知技术是 CR 的前提。频谱感知技术不仅要探测到授权用户的存在, 还要提供尽可能多的环境和用户信息, 如探测信号调制方式等。CR 要求频谱感知能够准确地检测出信噪比(SNR)大于某一门限值的授权用户信号, 通常这个 SNR 的门限值是很低的。因此, 本文的目标是提高单节点在低信噪比条件下的感知能力, 从而降低 CR 网络的 SNR 门限。

目前, 信号识别的研究主要集中在利用信号循环平稳特征进行识别。自从 Gardner<sup>[2,3]</sup>提出循环平稳信号理论, 基于此理论的自动信号探测识别的性能有了很大提高。国内外的研究机构已经发表了多种针对 CR 频谱感知的信号调制方式识别方法(表 1)。从表中可以看出, 与其它特征相比, 信号循环谱的  $\alpha$  域包络可以在更低的信噪比条件下使用。本文提出的方法基于了信号谱相关特性, 利用二次识别, 在低

信噪比的条件下, 可以得到比现有方法更高的信号分类准确率。本文在第 2 节介绍信号的循环谱特征, 并分析噪声对其的影响; 第 3 节介绍识别方法; 第 4 节从仿真试验方面对识别性能作分析; 最后对全文进行了小结。文中部分符号如下:  $F_c$  为载波频率,  $F_d$  为符号率,  $F_s$  为信号采样频率。

### 2 循环谱特征

循环平稳信号理论是由 Gardner 创立的, 他指出循环平稳信号  $x(t)$  的特定阶统计特性(均值和自相关函数)呈现周期性。循环谱相关函数就是根据此特性得到信号的循环谱特征, 其最主要优点是能够把噪声能量和已调信号的能量区分开来。因此, 循环平稳探测法具有很强的抗噪声干扰的能力。

信号  $x(t)$  循环谱相关函数的定义是

$$S_x^a(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_{-\Delta t/2}^{\Delta t/2} \frac{1}{\sqrt{T}} X_T \left( t, f + \frac{a}{2} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{T}} X_T^* \left( t, f - \frac{a}{2} \right) dt \quad (1)$$

其中  $f$  是频率,  $a$  是循环频率,  $\Delta t$  是矩形窗的大小,

$X_T(t, f) = \int_{t-T/2}^{t+T/2} x(u) e^{-j2\pi fu} du$ , 是  $x(t)$  在时间间隔  $[t-T/2, t+T/2]$  的傅里叶变换。由循环谱相关函数可以得到信号  $x(t)$  在  $(f+a/2)$  和  $(f-a/2)$  处的谱分量之间的相关程度, 即谱自相干系数, 其定义为

$$C_x^a(f) = S_x^a(f) / \left[ S_x^0 \left( f + \frac{a}{2} \right) S_x^0 \left( f - \frac{a}{2} \right) \right]^{1/2} \quad (2)$$

表 1 已有算法比较

算法	提取的特征	分类器	SNR(dB)	识别准确率(%)							
				AM	BPSK	FSK	4FSK	MSK	QPSK	4ASK	QAM16
算法 1 <sup>[4]</sup>	循环谱的 $\alpha$ 域包络	隐马尔可夫模型	-9	98	99.6	100	无	100	99.8	无	无
算法 2 <sup>[5]</sup>	循环谱的 $\alpha$ 域包络	神经网络	-9~15	96.7	98.5	99.1	无	99.6	98.3	无	无
算法 3 <sup>[6]</sup>	多分形特征	神经网络	5	无	95.5	92.0	无	无	无	98.9	96.3
算法 4 <sup>[7]</sup>	小波特征	支持向量机	2	无	97.5	94.5	99.0	无	98.5	98	100

$C_x^a(f)$  是关于  $f$  和  $a$  的函数(图 1)。 $a$  域的包络特征<sup>[4]</sup>为给定  $\alpha$  时  $C_x^a(f)$  的最大值,即

$$\text{profile}(a) = \max_f [C_x^a(f)] \quad (3)$$

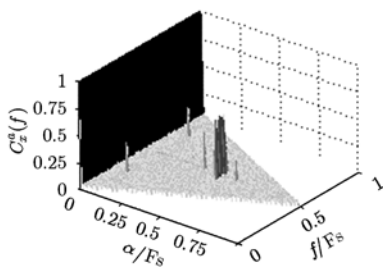


图 1 BPSK 信号的循环谱自相干系数三维图

图 2-图 6 为 5 种调制方式的信号在不同信噪比条件下的  $a$  域包络。可以看出当信噪比大范围波动时,同一种信号的  $a$  域包络会发生一定的变化。然而,有个别位置的变化并不明显,本文将这些位置的特征视为稳定特征。如 AM 和 BPSK 在  $a/Fs = 0.5$  处有一个稳定特征;FSK 会保留四个稳定特征,且其中一个在  $a/Fs = 0.5$  处;MSK 有两个稳定特征,以  $a/Fs = 0.5$  为中心对称;QPSK 仅当  $SNR > -8\text{dB}$  时,  $a/Fs < 0.5$  处有一个极大值;否则,无明显特征。利用这些稳定特征,可以在低信噪比的情况下提升识别准确率。

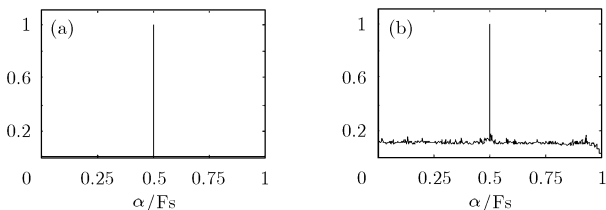


图 2 AM 的  $a$  域包络, SNR=15dB(a)和-12dB(b),  $F_c/F_s=0.25$

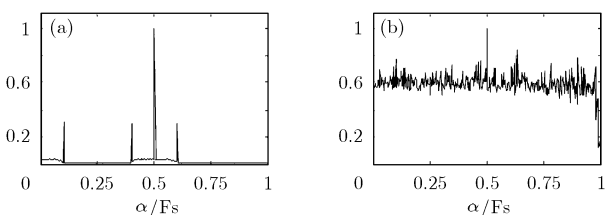


图 3 BPSK 的  $a$  域包络, SNR=15dB(a)和-12dB(b),  $F_c/F_s=0.25$ ,  $F_d/F_s=0.1$

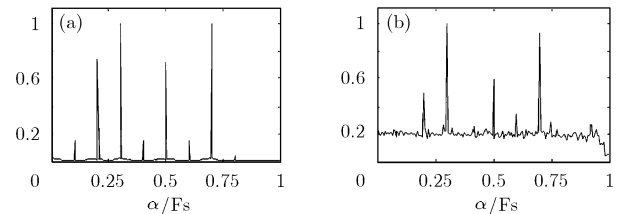


图 4 FSK 的  $a$  域包络, SNR=15dB(a)和-12dB(b),  $F_c/F_s=0.25$ ,  $F_d/F_s=0.1$

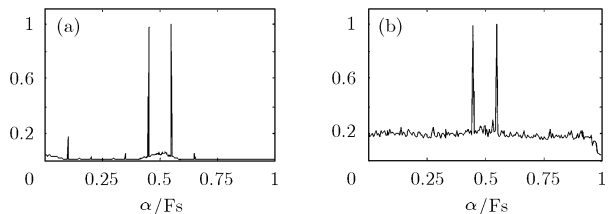


图 5 MSK 的  $a$  域包络, SNR=15dB(a)和-12dB(b),  $F_c/F_s=0.25$ ,  $F_d/F_s=0.1$

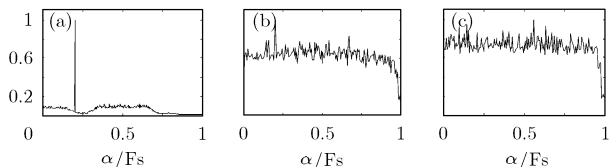


图 6 QPSK 的  $a$  域包络, SNR=15dB(a)和-8dB(b)和-12dB(c),  $F_c/F_s=0.25$ ,  $F_d/F_s=0.1$

### 3 分类器设计

本文首先利用支持向量机(Support Vector Machine, SVM)分类方法对信号的  $a$  域包络特征进行分类。通过对分类结果的分析,针对影响识别准确率的主要因素,提出了提高分类准确率的方法。

#### 3.1 分类器选择

SVM 是 Vapnik 等人根据统计学习理论提出的一种机器学习方法<sup>[8]</sup>,其最大特点是根据 Vapnik 的结构风险最小化原则,尽量提高学习的泛化能力,即由有限的训练集样本得到的小误差仍能够保证对独立的测试集小的误差。本文利用 SVM 对上述 5 种信号在 SNR=-9~15dB 范围内的  $a$  域包络特征进行分类,并根据文献[9]得到分类结果的置信度  $P$ 。结果表明,在  $SNR \geq 0\text{dB}$  时,对各种调制方式信号的识别准

准确率均达到 99.9%, 而当  $SNR < 0\text{dB}$  时, 由于受到噪声影响较大, 分类准确率随之降低(表 2)。与表 1 中的算法相比, 在利用相同信号特征, 即循环谱的  $a$  域包络特征条件下, 使用隐马尔可夫模型、神经网络和 SVM 3 种模式识别方法的识别准确率大致相当。可见, 单独使用一种分类算法不能达到满足使用要求的识别准确率, 需要利用其它方法使其完善。

表 2  $SNR = -9 \sim -1\text{dB}$ , SVM 的分类结果

	AM	BPSK	FSK	MSK	QPSK	准确率(%)
AM	213	0	0	3	0	98.6
BPSK	0	208	0	1	7	96.3
FSK	0	0	208	1	7	96.3
MSK	0	12	0	201	3	93.1
QPSK	0	11	0	0	205	94.9

### 3.2 提高准确率的方法

目前, 信号的调制方式识别中, 将信号循环谱特征作为分类特征已经被普遍采用。但在低信噪比条件下, 识别准确率尚不能满足要求。究其原因, 是因为在提取特征后, 普遍采用了单一分类方法。任何一种分类方法都必须综合考虑所有的样本特征, 从而得到最优解。虽然循环谱的  $a$  域包络特征在低信噪比条件下, 依然能够保留几个稳定特征, 但是, 稳定特征数量有限, 占主导地位的还是非稳定特征, 在低信噪比条件下这些特征值有明显变化(图 2~图 6), 这种变化会降低分类器的分类性能。因此, 在低信噪比条件下不能使用所有  $a$  域包络特征作为分类特征, 只能使用其稳定特征。

在高信噪比条件下, 待测样本的非稳定特征受噪声影响较小, 与训练样本的特征相似程度高。因此, SVM 的判决结果准确率高, 而且置信度  $P$  较大。当  $P$  大于某一门限 ( $TH_{\text{mod}}$ ) 时, 判决结果 100% 正确。为了得到每种信号的的门限, 本文利用 SVM, 在不同信噪比条件下, 对上述 5 种信号的循环谱的  $a$  域包络特征进行分类, 并得到每个判决结果的置信度  $P$ 。然后, 针对每类结果分别统计当置信度大于  $x$  时的准确率,  $x \in (0, 1)$ 。如图 7 所示判决结果为 BPSK 的准确率与  $x$  曲线。最后, 将准确率为 100% 时的最小  $x$  设为该类结果的门限值。判决结果不同, 对应的门限值也不同, 如  $TH_{\text{BPSK}} = 0.69$ ,  $TH_{\text{MSK}} = 0.54$ ,  $TH_{\text{QPSK}} = 0.73$ 。这说明, 当结果为 BPSK, MSK 和 QPSK 的判决的置信度大于上述门限值时, 该判决结果基本正确; 否则, 存在误判可能。而判决结果为 AM, FSK 的判决均为正确结果(表 2), 因此  $TH_{\text{AM}}$

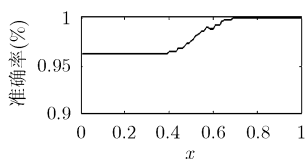


图 7 判决结果为 BPSK 的准确率与置信度曲线

和  $TH_{\text{FSK}}$  均为 0。综合上述分析, 本文先利用 SVM 对待测信号进行一次识别, 然后再对判决结果为 BPSK, MSK 和 QPSK, 且置信度小于  $TH_{\text{mod}}$  的信号, 利用特征匹配进行二次识别。这样做可以减小再次误判可能性, 而且可以减少对结果进行二次识别时间, 从而减少频谱感知时间。

通过上述分析, 本文设计了在高、低信噪比条件下, 都能得到好高分类准确率的分类器。该分类器分为一次识别(SVM)和二次识别(特征匹配)两部分, 本文称之为 SVM and Feature Matching 分类器, 简称 SVMFM。SVMFM 首先通过计算信号的谱自相干系数, 得到其  $a$  域包络特征; 然后, 利用 SVM 对信号进行一次识别, 并得到置信度  $P$ 。如果  $P > TH_{\text{mod}}$ , 则判决结果为最终结果, 否则利用二次识别进行结果验证。

二次识别利用了各信号的  $a$  域包络特征中的稳定特征, 将信号的该特征与可能的调制方式的稳定特征进行特征匹配。二次识别只针对一次识别的结果为 BPSK, MSK 和 QPSK 的信号, 原因是由表 2 可知, 当且仅当一次识别结果为这几种调制方式时会有误判的可能。

下面举例说明二次识别的具体过程。若一次识别的结果为 BPSK, 且  $P < TH_{\text{BPSK}}$  时, 根据表 2 所示, 其正确结果可能为 BPSK, MSK 或 QPSK。因此, 如果稳定特征仅在  $a/F_s = 0.5$  处出现, 则为 BPSK; 若  $a/F_s = 0.5$  处无稳定特征, 且其两侧对称位置各有一个稳定特征, 则为 MSK; 若仅在  $a/F_s < 0.5$  处出现一个极大值或无明显特征则为 QPSK。

## 4 仿真结果

本文利用仿真试验, 比较了 SVM 和 SVMFM 对信号调制方式识别的性能。在实验 1 中, 选取 AM, BPSK, FSK, MSK 和 QPSK 5 种信号各 300 个,  $F_c/F_s = 0.25$ , 作为训练样本对 SVM 分类器进行训练。每种信号的信噪比范围在  $SNR = -9 \sim -15\text{dB}$ , 在同一信噪比条件下有 12 个信号。然后, 每种信号选择 720 个样本,  $SNR = -14 \sim -15\text{dB}$ , 分别利用 SVM 和 SVMFM 进行分类, 分类结果如图 8 所示。图中显示了在不同信噪比条件下, 对每种信号的识别准确率。结果表明, 在信噪比较高时, 两种方法的识别准确率均接近 100%。然而, 当  $SNR < -5\text{dB}$  时, SVMFM 分类结果优于 SVM。而且, 与表 1 中的算法相比, 本文的算法可以应用在更低的 SNR 条件下, 而且信号识别准确率更高。因此, 本文提出的基于信号循环谱特征的 SVMFM 识别方法能够在更低的信噪比环境准确识别。

为了检验本文方法对其它调制信号的识别效果, 我们进行了实验 2。实验中选取的信号包括上述 5 种调制信号以及 4FSK, 8FSK, GMSK 和 QAM16。在实验 2 中, 对 SVM 分类器进行了重新训练, 并重新选取了每类结果的门限值  $TH_{\text{mod}}$ , 其它参数保持不变。实验结果表明, 当  $SNR > -5\text{dB}$  时, 两种方法对各种信号的识别准确率均可达到 99.9%; 当  $SNR = -10 \sim -5\text{dB}$  时, 如表 3, 表 4 所示, SVMFM 的准确率明显高于 SVM。因此, 本文提出的方法可以推广于其它调制方式信号的识别。

表3 SNR=-10~-5dB, SVM对9种信号的分类结果

	AM	BPSK	FSK	4FSK	8FSK	MSK	GMSK	QPSK	QAM16	准确率(%)
AM	246	38	0	0	0	4	0	0	0	85.4
BPSK	0	224	0	0	3	0	0	61	0	77.8
FSK	0	0	252	0	8	0	0	28	0	87.5
4FSK	0	2	0	214	64	0	0	8	0	74.3
8FSK	0	18	0	0	232	0	0	38	0	80.6
MSK	2	49	0	0	0	232	0	3	0	80.6
GMSK	0	34	0	0	0	0	246	8	0	85.4
QPSK	0	18	0	0	2	0	0	268	0	93.1
QAM16	0	0	0	0	0	0	36	0	252	87.5

表4 SNR=-10~-5dB, SVMFM对9种信号的分类结果

	AM	BPSK	FSK	4FSK	8FSK	MSK	GMSK	QPSK	QAM16	准确率(%)
AM	288	0	0	0	0	0	0	0	0	100
BPSK	0	288	0	0	0	0	0	0	0	100
FSK	0	0	284	0	4	0	0	0	0	98.6
4FSK	0	0	0	288	0	0	0	0	0	100
8FSK	0	2	2	0	282	0	0	2	0	97.9
MSK	0	0	0	0	0	288	0	0	0	100
GMSK	0	0	0	0	0	0	288	0	0	100
QPSK	0	2	0	0	2	0	0	284	0	98.6
QAM16	0	0	0	0	0	0	0	0	288	100

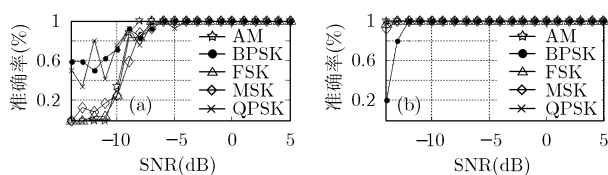


图8 利用SVM(a)和SVMFM(b)在不同SNR条件下对5种调制信号的识别准确率

实验中,有些参数可以影响识别的准确率。本文为了更好地比较不同方法在低噪比条件下的识别准确率,在试验中将这些参数保持不变。这些参数是,信号的观测时间定为5ms,各种信号的 $F_c$ ,  $F_d$ 和 $F_s$ 的关系如图2~图6所示。

## 5 结束语

本文根据循环平稳信号的循环谱特性,提出了SVMFM识别方法。该方法利用二次模式识别,可以在低信噪比条件下准确识别信号调制方式。实验证明,在信噪比不低于-10dB条件下,对AM, BPSK, FSK, MSK和QPSK 5种信号可以得到99.9%以上的识别率。当然,该方法不仅可以应用在上述5种信号,利用其它信号的稳定特征也可以对其进行有效识别。另外,为了保证认知无线电在各种复杂通信环境下的频谱感知能力,还需要深入研究不同信道噪声对各种信号的 $\alpha$ 域包络的影响,以及将无线电信号的循环谱特征和其它特征综合考虑。

## 参考文献

[1] Mitola III J. Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio. [Ph.D. dissertation], KTH Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden,

- 2000.
- [2] Gardner W A and Spooner C M. Cyclic spectral analysis for signal detection and modulation recognition. MILCOM'88, San Diego, CA, 1988: 419-424.
- [3] Gardner W A. Exploitation of spectral redundancy in cyclostationary signals. *IEEE Signal Process Magazine*, 1991, 8(2): 14-36.
- [4] Kim K, Akbar I A, Bae K K, Um J S, Spooner C M, and Reed J H. Cyclostationary approaches to signal detection and classification in cognitive radio. *IEEE DySPAN*, Dublin, Ireland, 2007: 212-215.
- [5] Fehske A and Gaedert J A. A new approach to signal classification using spectral correlation and neural networks. *IEEE DySPAN*, Baltimore, Maryland, USA, 2005: 144-150.
- [6] He Tao and Zhou Zheng-ou. Modulation classification based on multifractal features. 6th International Conference on ITS Telecommunications Proceedings, Chengdu, China, 2006: 152-155.
- [7] Wu Dan, Gu Xuemai, and Guo Qing. A New Scheme of Automatic Modulation Classification Using Wavelet and WSVM. 2nd International Conference on Mobile Technology, Applications and Systems, Guangzhou, China, 2005, 5pp.
- [8] Vapnik V N. The nature of statistical learning theory. New York: Springer-Verlag, 1995: 85-90.
- [9] Wu T F, Lin C J, and Weng R C. Probability estimates for multi-class classification by pairwise coupling. *Journal of Machine Learning Research*, 2004, 5(8): 975-1005.

刘航: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为认知无线电。  
于丹: 女, 1984年生, 硕士生, 研究方向为认知无线电。  
孔祥维: 女, 1963年生, 教授, 研究方向为认知无线电、多媒体信息安全、电子商务安全管理、信息融合和处理。