

DOI: 10.7652/xjtuxb201802008

认知无线电 Underlay 模式下 MQAM 信号的调制识别

刘明骞^{1,2,3}, 李建英¹, 李兵兵¹, 陈钱²

(1. 西安电子科技大学信息感知技术协同创新中心, 710071, 西安; 2. 南京理工大学电子工程与
光电技术学院, 210094, 南京; 3. 徐州雷奥医疗设备有限公司, 221116, 江苏徐州)

摘要: 针对传统的认知无线电 Underlay 中时频重叠 MQAM 信号调制识别方法性能低的问题, 提出了一种采用时频分析图像纹理特征的时频重叠信号调制识别方法。首先对接收到的时频重叠 MQAM 信号做频率切片小波变换得到时频分析图像, 并选取纹理差异明显的切片部分进行灰度化处理, 然后通过提取时频分析图像的灰度-梯度共生矩阵特征, 最后利用径向基函数神经网络分类器有效地实现了时频重叠 MQAM 信号调制方式的识别。仿真结果表明: 在信噪比为 4 dB 下, 所提出的方法的平均识别率可达到 95% 以上; 在信噪比大于 0 dB 时, 所提方法的识别性能优于基于高阶累积量的识别方法。

关键词: 认知无线电; 时频重叠; 调制识别; 时频分析

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)02-0052-06

Modulation Identification of MQAM Signals in Underlay Cognitive Radios

LIU Mingqian^{1,2,3}, LI Jianying¹, LI Bingbing¹, CHEN Qian²

(1. Collaborative Innovation Center of Information Sensing and Understanding, Xidian University, Xi'an 710071, China;
2. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
3. Xuzhou LEO Medical Equipments Co., Ltd., Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: A novel method of modulation identification based on texture features of time-frequency analysis images is proposed to address the poor performance problem of traditional methods of modulation identification of time-frequency overlapped MQAM signals in underlay cognitive radios. A time-frequency analysis image is obtained by using a frequency slice wavelet transform to the time-frequency overlapped MQAM signals, and slices with obvious texture difference are selected for grayscale processing. And then, the features of the grayscale-gradient co-occurrence matrix of the time-frequency analysis image and the RBF neural network classifier are used to achieve the modulation recognition of the time-frequency overlapped MQAM signals. Simulation results show that the average recognition rate of the proposed method reaches more than 95% when the SNR is 4 dB, and its recognition performance is better than that of the method based on high-order cumulants when the SNR is more than 0 dB.

Keywords: cognitive radio; time-frequency overlapped; modulation recognition; time-frequency analysis

认知无线电技术是通过频谱共享的方式合理高效的分配使用有限的频谱资源技术^[1]。认知无线电频谱共享模式分为 overlay 频谱共享模式和 underlay 频谱共享模式。在 underlay 频谱共享模式下的频谱共享是指次用户在不超过干扰温度的前提下,可与主用户共用频谱资源,从而提高频谱的利用率^[2]。在 underlay 频谱共享模式下,主用户信号和次用户信号为时频域重叠的信号。由于不同的调制方式所对应的干扰温度不同,因此研究 underlay 频谱共享模式下时频重叠信号调制方式的识别是很有必要的。

目前,对时频重叠信号的调制识别主要集中于直接提取非平稳信号的循环频率特性上。文献[3]提出基于四阶循环累积量的时频重叠 PSK 调制信号的特征提取方法,该方法在数据足够长、信噪比为 10 dB 时,可以达到 90% 以上的识别率,但该方法受载频和码速率等先验信息的估计精度的影响较大。文献[4]针对时频重叠 QPSK 调制信号和 16QAM 调制信号,提出了一种利用接收信号高阶循环累积量构建分类特征,用支撑向量机分类实现信号的调制识别,但该方法需要较大的采样数据和一定的训练信号来达到较高的识别率。文献[5]提出一种基于高阶累积量的时频重叠信号的调制识别方法,但该方法在低信噪比下 MQAM 信号的性能较差。文献[6]结合二阶和四阶循环累积量的循环频率特性和结构特征,提出一种基于循环频率特征的单信道混合通信信号调制识别的方法和实现算法,但是该方法限定不同分量信号的符号率、载频是不同的。文献[7]提出了一种基于循环累积量及其频率特性分析的时频重叠信号的识别方法,但是该方法中 16QAM 调制信号和 64QAM 调制信号的识别效果不佳。文献[8]提出一种基于广义自回归建模的同信道多信号的调制识别方法,但该方法仅适用于信号频域可分或部分重叠的情况。

针对上述问题,本文提出一种基于时频图像纹理特征的时频重叠 MQAM 调制信号的识别方法。该方法首先对接收到的时频重叠信号做关于频率切片小波变换 (frequency slice wavelet Transform, FSWT) 得到该信号的时频分析图像,并依据 FSWT 的频率切片性质截取时频分析图像等高图中纹理差异较明显的部分,然后对所截取的图像进行灰度化处理得到所需的二维灰度图像,并提取基于灰度-梯度共生矩阵的图像纹理特征向量,最后利用径向基 (radial basis function, RBF) 神经网络分类器实现

了时频重叠 MQAM 信号的调制方式的识别。仿真结果表明,本文方法在信噪比为 2 dB 时,时频重叠 MQAM 信号的平均识别率可达到 94% 以上,是一种有效可行的方法。

1 信号模型

在 underlay 频谱共享模式下,主用户和次用户共享频谱,此时信号为时频重叠信号 $p(t)$, 可以表示为^[2]

$$p(t) = \sum_{i=1}^N s_i(t) + n(t) \quad (1)$$

式中: N 为用户信号个数; $n(t)$ 为高斯白噪声; $s_i(t)$ 表示第 i 个用户的数字调制信号; $s_i(t)$ 和 $n(t)$ 之间相互独立。当 $s_i(t)$ 为 MQAM 调制时,可表示为

$$s_i(t) = \left[\sum_{n=1}^P (a_i + jb_i) g(t - nT_i) \right] \exp[j(2\pi f_{ci}t + \varphi_{0i})] \quad (2)$$

式中: p 为采样长度; $g(t)$ 为成型脉冲函数; f_{ci} 为载波频率; φ_{0i} 为初始相位; T_i 为符号周期; a_i 和 b_i 分别为信号 $s_i(t)$ 的同相分量和正交分量,当 $M=16$ 时, $a_i, b_i \in \{\pm 3, \pm 1\}$, 当 $M=32$ 时, $a_i, b_i \in \{\pm 5, \pm 3, \pm 1\}$ 且不包含 $(5, 5)$ 、 $(-5, 5)$ 、 $(5, -5)$ 和 $(-5, -5)$, 当 $M=64$ 时, $a_i, b_i \in \{\pm 7, \pm 5, \pm 3, \pm 1\}$ 。本文待识别的时频重叠信号为时频重叠 MQAM 信号。

2 调制识别方法

2.1 频率切片小波变换

频率切片小波变换定义为^[9]

$$F_i(t, \omega, \sigma) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{p}(v) \hat{h}^* ((v - \omega)/\sigma) \exp(jv t) dv \quad (3)$$

式中: $\hat{p}(v)$ 为 $p(t)$ 的傅里叶变换; σ 为时频分析的尺度因子且 $\sigma \neq 0$; $\hat{h}(\omega)$ 为频率片函数 $h(t)$ 的傅里叶变换,称为频率切片函数 (frequency slice function, FSF)。

依据帕塞维尔方程,如果 σ 不是估计频率 v 的函数,则式(4)可表示为

$$F_i(t, \omega, \sigma) = \frac{1}{2\pi} \exp(j\omega t) \int_{-\infty}^{\infty} \hat{p}(v + \omega) \hat{h}^* \left(\frac{v}{\sigma} \right) \exp(jv t) dv \quad (4)$$

2.1.1 尺度因子的确定 频率切片小波变换的时频分析特性取决于尺度因子 σ 的大小。尺度因子 σ 是时间分辨率和频率分辨率的平衡参数,其选择基

于以下的原理^[10]:根据 Morlet 小波变换原理有 $\sigma \propto \omega$, 可设 $\sigma = \omega/k, k > 0$, 则式(4)转化为

$$F_f(t, \omega, k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{p}(v) \hat{h}^* \left(k \frac{v - \omega}{\omega} \right) \exp(jvt) dv \quad (5)$$

将 $k \frac{v - \omega}{\omega}$ 带入频率切片函数 $\hat{h}(\omega)$, k 为时频分辨率参数用于调节时域分辨率和频域分辨率。此时, 式(3)可表示为

$$F_f(t, \omega, k) = \frac{1}{k} \omega \exp(j\omega t) \int_{-\infty}^{\infty} p(\tau) \exp(j\omega \tau) h^* \left[\frac{\omega(\tau - t)}{k} \right] d\tau \quad (6)$$

由于 Heisenberg 的不确定原理的限制, 不可能使时域分辨率和频域分辨率同时达到最高, 只能折中估计 σ 或 k , 因此引入 2 个评价参数来分析时频分辨率: 频率分辨率比 $\eta = \Delta\omega/\omega$ 和幅值期望响应比 $\xi (0 < \xi \leq 1)$, 其中 ξ 通常取值为 $2^{1/2}/2, 0.5, 0.25$ 等^[11]。下面用狄克拉函数建立不等式, 并对尺度因子进行分析。

(1) 当 $p(t) = \delta(t - t_0)$ 且频率小波变换满足

$$\frac{|F_f(t, \omega_0 + \Delta\omega, \sigma)|}{|F_f(t, \omega_0, \sigma)|} \leq \xi \quad (7)$$

和式(6)时, 可得到

$$\left| \hat{h} \left(\frac{\Delta\omega}{\sigma} \right) \right| \leq \xi \| \hat{h}(0) \| \quad (8)$$

即

$$| \hat{h}(k\eta) | \leq \xi \| \hat{h}(0) \| \quad (9)$$

(2) 当 $p(t) = \exp(j\omega_0 t)$ 且频率小波变换满足

$$\frac{|F_f(t_0 + \Delta t, \omega, \sigma)|}{|F_f(t_0, \omega, \sigma)|} \leq \xi \quad (10)$$

和式(5)时, 可得到

$$| h(\sigma\Delta t) | \leq \xi | h(0) | \quad (11)$$

即

$$\left| h \left(\frac{\mu}{k\eta} \right) \right| \leq \xi | h(0) | \quad (12)$$

式中: μ 是频率变化量与时间变化量的积, 即

$$\mu = \Delta\omega\Delta t \quad (13)$$

当 FSF 为 $\hat{h}(\omega) = \exp(-0.5\omega^2)$, $\mu = 0.5$ 时^[12], 结合式(9)和式(12)可得到衡量参数解为

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \exp(-0.5\mu) \\ k &= 0.707/\eta \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

从而建立了变换因子 k 与时频分辨率比 η 之间的关系。由于 $\sigma = \omega/k$ 反映了尺度因子 σ 与 k 之间的关系, 因此可以通过调节 k 的大小来实现所需的时频分辨率。

2.1.2 频率切片函数的设计 FSFT 时频分析的主要特性由频率切片函数决定, FSF 是可自由选择的, 但需满足 4 项要求: ① $\hat{h}(0) \neq 0$ 或 $\hat{h}(0) = 1$; ② $\int_{-\infty}^{\infty} |\hat{h}(\omega)|^2 d\omega < \infty$; ③ $\hat{h}(\pm\infty) = 0$; ④ $|\hat{h}(\omega)| \leq \hat{h}(0)$ 或 $|h(t)| \leq h(0)$ 。同时, FSF 在信号的 FSFT 时频分析中具有滤波的作用, 因此为了对时频分析图进行降噪, 本文选取高斯类型的 FSF, 其表达式为 $\hat{h}(\omega) = \exp(-0.5\omega^2)$ 。

2.1.3 频率切片时频区域选取 由于 FSFT 具有频率切片的性质, 因此所得到的时频分析图像可依据图像的特点自由地截取所需的频率切片, 以便于纹理特征的分析。下面以频谱重叠率为 20% 的双 16QAM 信号为例, 说明频率切片时频区域的选取步骤: ①利用式(3)对接收时频重叠信号进行时频分析得到时频分析图像, 如图 1 所示; ②对时频分析图像取等高图得到二维图像, 如图 2 所示。由于不同调制类型的时频重叠信号等高图中能量聚集集中的部分存在明显的纹理差异, 因而选取图 2 中能量聚集的频率切片作为提取时频图像纹理特征的对象。在图 2 中, 空白部分表示无信号信息, 位置①部分表示信号信息较弱, 位置②部分表示信号信息较强, 该部分为信号能量聚集的部分。

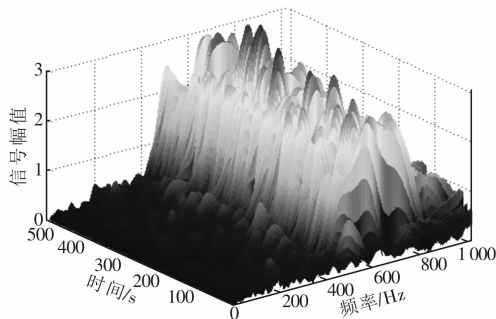


图1 时频重叠信号的 FSFT 时频分析图

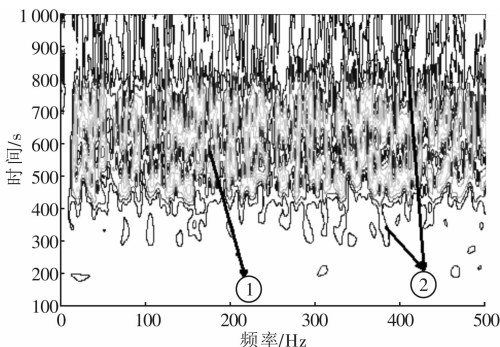


图2 时频重叠信号 FSFT 时频分析图的等高图

2.2 图像纹理特征的提取

2.2.1 图像灰度化 彩色图像是由红(R)、绿(G)、

蓝(B)三原色组成的,为了便于图像处理,通常将彩色图像转化为灰度图像,即图像的灰度化。在彩色图像中, R 、 G 、 B 这3个分量值的范围是 $0\sim 255$,可以理解为一个三维的空间直角坐标系,则彩色图像中每个像素的颜色都可以用该空间的一个点来表示;在灰度图像中, $R=G=B$,则灰度图像的每个像素的颜色值在 $R=G=B$ 直线上,此时 $R=G=B$ 的值叫灰度值。彩色图像灰度化一般的方法有分量法、最大值法、平均值法和加权平均法。本文根据人眼对不同颜色的敏感程度的差异,采用加权平均的方法,将3个分量进行加权平均处理,从而得到灰度化图像。灰度值 Gray 的加权公式为^[13]

$$G_{\text{gray}} = 0.290\ 0R + 0.587\ 00G + 0.114\ 00B \quad (15)$$

2.2.2 灰度梯度共生矩阵 纹理是图像的一个重要的却很难描述的特性。对于外形相似但由于方向和角度的多样性的呈现的图像实为一类,因此对于提取的同一种特征值应比较接近,图像的旋转不变性的研究对于图像的纹理特性的特征提取就显得尤为重要。本文采用灰度-梯度共生矩阵提取时频图像的纹理特征,在图像纹理特征的提取过程中对于不同旋转角度和方向的变换不敏感,具有较好的纹理特性分析效果。

灰度-梯度共生矩阵的基本原理^[14]:灰度-梯度共生矩阵的元素 $H(x, y)$ ($x=0, 1, 2, \dots, L_f; y=0, 1, 2, \dots, L_g-1$)定义为在归一化的灰度图像 $F(i, j)$ 及归一化的梯度图像 $G(i, j)$ 中具有灰度值 x 和梯度值 y 的像素数,可表示为

$$G(i, j) = \frac{g(i, j) - g_{\min}}{g_{\max} - g_{\min}} (L_g - 1) \quad (16)$$

$$F(i, j) = \frac{f(i, j) - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} (L_f - 1) \quad (17)$$

式中: $g_{\max}$ 和 $g_{\min}$ 分别表示为梯度图像像素的最大值和最小值; $f_{\max}$ 和 $f_{\min}$ 分别表示为灰度图像像素的最大值和最小值; L_f 为图像灰度级; L_g 为图像梯度级; x 和 y 由集合 $\{(i, j) | f(i, j) = x, g(i, j) = y; i, j = 0, 1, 2, \dots, N-1\}$ (N 表示灰度值和梯度值的长度)可得;灰度值 $x=0, 1, 2, \dots, L_f-1$ 和梯度值 $y=0, 1, 2, \dots, L_g-1$ 。

归一化 $H(x, y)$ 可表示为 $\hat{H}(x, y)$,其表达式如下

$$\hat{H}(x, y) = \frac{H(x, y)}{\sum_{x=0}^{L_f-1} \sum_{y=0}^{L_g-1} H(x, y)} \quad (18)$$

由式(18)可知,灰度-梯度共生矩阵是将图像灰度信息和梯度信息进行融合,共同表征图像的纹理特性,并且具有较好的旋转不变性,适用于时频图像特征的提取。15个特征从不同角度分析提取时频图像的纹理特性^[15]。文献[15]从不同角度提取了15个凸显时频图像纹理特性的特征,在这15个特征中,小梯度优势和大梯度优势反映了灰度图像的灰度信息变化的剧烈程度,即当图像灰度变化平缓时,小梯度像素数多,小梯度优势大,相反当图像的灰度变化剧烈时,大梯度像素多,大梯度优势大;能量反映了图像的灰度分布均匀程度和纹理粗细度;惯性表示凹槽的深度;相关运算反映了图像纹理特征的一致性;混合熵表示非均匀纹理图像的复杂性以及纹理的水平方向和垂直方向的相似性;逆差矩反映图像纹理的同质性,度量图像纹理的局部变化等。本文通过这15个特征计算出灰度图像的特征向量作为识别特征。

2.3 所提方法步骤

综上所述,本文所提出的 underlay 认知无线电中时频重叠 MQAM 信号的调制识别方法的具体步骤如下:

(1)利用式(3)对接收到的时频重叠 MQAM 信号做关于 FSWT 的时频分析得到时频分析图像;

(2)对时频图像取等高图得到二维图像,并依据 FSWT 的频率切片性质截取纹理差异较明显的部分;

(3)将截取的部分时频分析图像根据式(15)进行灰度化处理得到所需的二维灰度图像;

(4)对灰度化图像利用15个灰度-梯度相关特征计算其灰度-梯度共生矩阵特征向量;

(5)利用 RBF 神经网络分类器^[16]实现时频重叠信号的调制方式的识别,其分类器的径向基函数表示为 $\phi(\kappa) = \exp\left(-\frac{\kappa^2}{2r^2}\right)$,其中 r 为径向基函数的扩展常数。

3 仿真及分析

针对本文的时频重叠信号的调制识别方法进行 MATLAB 仿真实验,时频重叠 MQAM 信号调制类型为 16QAM、32QAM 和 64QAM,2个时频重叠信号参数设置为:采样频率分别为 30 MHz 和 60 MHz;载频分别为 5 MHz 和 7.6 MHz;码元速率分别为 1 MHz 和 2 MHz。3个时频重叠信号参数设置为:采样频率分别为 30 MHz、60 MHz 和 30

MHz;载频分别为 5 MHz、7.6 MHz 和 10.2 MHz;码元速率分别为 1 MHz、2 MHz 和 1 MHz。采样点数为 4 096,采用的观测噪声为高斯白噪声,升余弦脉冲成型函数的滚降系数设为 0.35。

实验 1 测试在不同信噪比和不同信号个数条件下,本文所提方法的识别性能。实验采用分量信号功率相等且频谱重叠率为 20% 的时频重叠 MQAM 信号,实验仿真结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,随着信噪比的增加,信号的识别率增大,在信噪比大于 4 dB 时,识别率可以达到 90% 以上。由此说明,本文所提的识别方法与时频重叠信号的调制类型无关,但是与时频重叠信号的个数有关,时频重叠信号个数越少,识别正确率越高。

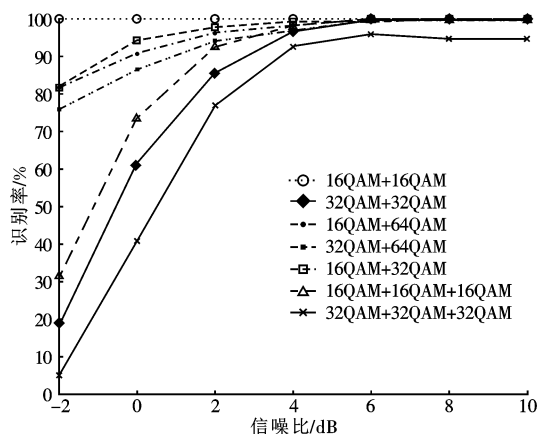


图 3 不同信号个数下本文方法的调制识别性能

实验 2 测试不同的频谱重叠率下,本文所提方法的识别性能。以 16QAM 双信号时频重叠为例,分量信号功率比为 1:1,频谱重叠率分别为 40%、60%、80% 和 100%,实验仿真结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,在不同的频谱重叠率下,信噪比大于 2 dB 时,信号的识别率均可达到 95% 以上。因此说明,本文方法对频谱重叠率是稳健的。

实验 3 测试不同功率比下,本文所提方法的识别性能。以 16QAM 双信号时频重叠为例,频谱重叠率分别为 20%,实验仿真结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,在不同的功率比下,信噪比大于 4 dB 时,信号的识别率均可达到 95% 以上。由此说明,本文方法对分量信号的功率比也是稳健的。

实验 4 在相同的实验环境和信号参数设置下,以 16QAM 双信号时频重叠为例,将本文方法与文献[5]和文献[7]的方法进行对比实验,实验仿真结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出,在信噪比大于 0 dB 时,本文的调制识别方法的识别率高于文献[5]和文献[7]方法的识别率,由此说明本文所提方法优

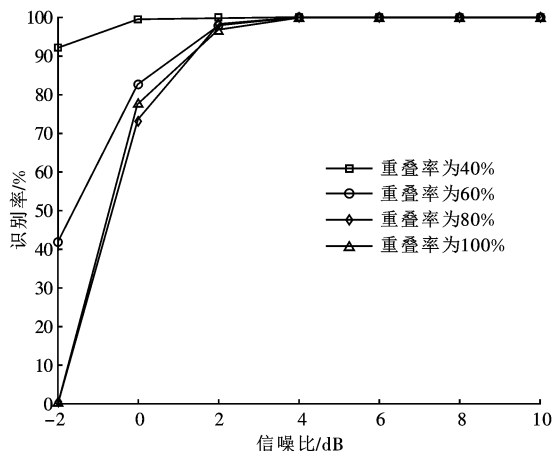


图 4 不同重叠率下本文方法的调制识别性能

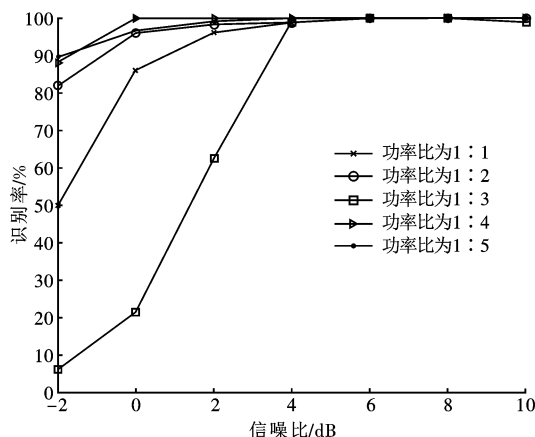


图 5 不同功率比下本文方法的调制识别性能

于现有的时频重叠信号调制识别方法。此外,本文所提的识别方法的计算复杂度为 $O(n^2)$ 。

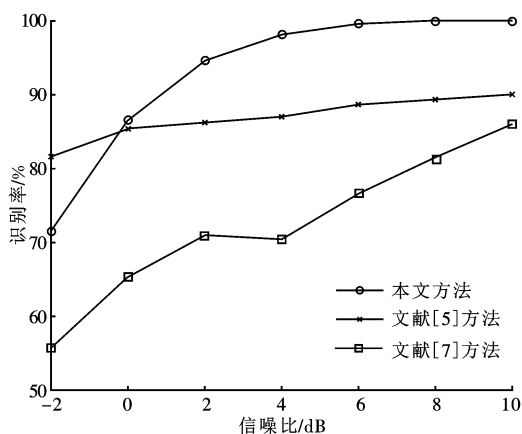


图 6 不同调制识别方法的性能对比

4 结 语

本文针对 underlay 认知无线电中时频重叠的 MQAM 信号的识别问题,提出了一种基于时频图像纹理特性分析的调制识别方法。首先分析了时频

重叠 MQAM 信号的时频特性,然后通过提取时频图像的纹理特征并使用 RBF 分类器实现了时频重叠 MQAM 信号调制类型的识别。仿真结果表明,在低信噪比下,本文方法优于现有的时频重叠信号调制识别方法,并且本文方法对分量信号的功率比和频谱重叠率具有稳健性。

参考文献:

- [1] SHI Yaohua, LIU Mingqian, ZHOU Fan. User numbers estimation for underlay cognitive radio [C]//Proceedings of 6th International Conference on Wireless, Mobile and Multi-Media. London, UK: IET, 2015: 120-123.
- [2] WANG Jianghong, LI Bingbing, LIU Mingqian, et al. SNR estimation of time-frequency overlapped signals for underlay cognitive radio [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(11): 1925-1928.
- [3] LI Kuangdai, GUO Lili, SHI Rong, et al. Modulation recognition method based on high order cyclic cumulants for time-frequency overlapped two-signal in the single-channel [C] // Proceedings of 1st International Congress on Image and Signal Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE Computer Society, 2008: 474-478.
- [4] 付海涛, 石荣, 万群, 等. 基于 HOCCs 和 SVM 的单通道时频重叠信号调制识别 [J]. 电子信息对抗技术, 2009, 24(6): 14-18.
FU Haitao, SHI Rong, WAN Qun, et al. Modulation recognition based on HOCCs and SVM for co-channel time-frequency overlapped signal [J]. Electronic Information Confrontation Technology, 2009, 24(6): 14-18.
- [5] 徐闻, 王斌. 采用高阶累计量的时频混叠信号调制识别研究 [J]. 信息工程大学学报, 2013, 14(3): 299-305.
XU Wen, WANG Bin. Method of modulation recognition of time-frequency overlapped signals based on high-order cumulants [J]. Journal of Information Engineering University, 2013, 14(3): 299-305.
- [6] 赵宇峰, 曹玉健, 纪勇, 等. 基于循环频率特征的单信道混合通信信号的调制识别 [J]. 电子与信息学报, 2014, 36(5): 1202-1208.
ZHAO Yufeng, CAO Yujian, JI Yong, et al. Modulation identification for single-channel mixed communication signals based on cyclic frequency features [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(5): 1202-1208.
- [7] 张洋, 彭华. 单通道混合信号调制识别 [J]. 信息工程大学学报, 2016, 17(6): 662-668.
- [8] ZHANG Yang, PENG Hua. Modulation recognition for mixed signals in single channel [J]. Journal of Information Engineering University, 2016, 17(6): 662-668.
- [8] 陆明泉, 肖先赐. 基于 GAR 的同信道多信号的调制识别 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(10): 1676-1680.
LU Mingquan, XIAO Xianci. Modulation recognition of multiple co-channel signals based on GAR [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(10): 1676-1680.
- [9] VENKATA SUBBARAO M. Time-frequency analysis of non-stationary signals using frequency slice wavelet transform [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Intelligent Systems and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 7726999.
- [10] YAN Zhonghong, MIYAMOTO A, JIANG Zhongwei, et al. An overall theoretical description of frequency slice wavelet transform [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2010, 24(2): 491-507.
- [11] 李建伟. 基于频率切片小波变换的轨道交通轮轨振动信号分析 [D]. 南京: 南京理工大学, 2014: 34-37.
- [12] WANG Fuge, XING Zongyi, QIN Yong, et al. The analysis of axle box vibration signal based on frequency slice wavelet transform [C]//2015 International Conference on Computer and Computational Sciences. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 64-69.
- [13] 贺姣. 基于色差模型的彩色图像灰度化算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014: 9-10.
- [14] CHEN Shuo, WU Chengdong, CHEN Dongyue, et al. Scene classification based on gray level-gradient co-occurrence matrix in the neighborhood of interest points [C]//IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 482-485.
- [15] UBUL K, YADIKAR N, AMAT A, et al. Uyghur document image retrieval based on gray gradient co-occurrence matrix [C]//Proceedings of 2015 Chinese Automation Congress. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 762-766.
- [16] DEY A, SING J K. Face recognition by fuzzy generalized 2DFLD method and RBF neural network classifier [C]//2015 IEEE Workshop on Computational Intelligence: Theories, Applications and Future Directions. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 7495536.

(编辑 刘杨)