

突发 QAM 信号盲识别算法

刘聪杰*, 彭 华, 吴 迪

(信息工程大学 信息工程学院, 郑州 450002)

(* 通信作者电子邮箱 liucongjie2004@sohu.com)

摘 要: 针对非协作通信中的 7 种正交幅度调制(QAM)方式识别问题, 提出一种新的基于联合特征的盲识别算法。该算法在对信号的循环平稳性以及 QAM 瞬时幅度分布特点讨论和分析基础上, 采用基于循环平稳检测、四阶零次共轭循环累积量以及瞬时包络的联合特征, 并选择二叉树支持向量机作为识别分类器, 完成了对 7 种中频 QAM 信号的识别。仿真实验表明, 该算法在码元数目为 1000, 信噪比大于 6 dB 时, 正确识别率可达到 90% 以上。

关键词: 调制识别; 正交幅度调制信号; 循环平稳检测; 四阶循环累积量; 瞬时包络; 二叉树; 支持向量机

中图分类号: TN911.6 **文献标志码:** A

Blind modulation recognition algorithm of burst QAM signal

LIU Cong-jie*, PENG Hua, WU Di

(Institute of Information Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: For the modulation recognition of seven kinds of Quadrature Amplitude Modulation (QAM) in non-cooperative communication, a new blind identification algorithm was proposed based on combined features. Based on the discussion and analysis of the cyclostationarity and the instantaneous amplitude distribution of the QAM signals, the algorithm used the combined features which were cyclostationary detection feature, fourth-order zero-conjugate cyclic accumulation feature and instantaneous envelope feature. The algorithm used the binary tree support vector machine as classifier to classify the seven Intermediate Frequency (IF) QAM signals. The simulation results show that the correct recognition rate of the algorithm reaches over 90% when the number of symbols is 1000 and the Signal-to-Noise Ratio (SNR) is more than 6 dB.

Key words: modulation recognition; Quadrature Amplitude Modulation (QAM) signal; cyclostationary detection; fourth-order cyclic cumulation; instantaneous envelope; binary tree; Support Vector Machine (SVM)

0 引言

随着数据业务的迅速发展,特别是多媒体技术广泛使用,这就要求新一代通信系统具有更高传输有效性和更大通信的容量,因此越来越多高阶的调制方式将得到人们的青睐。多进制正交幅度调制(Multiple Quadrature Amplitude Modulation, MQAM)是一种灵活的、具有较高频带利用率的高效调制技术,并且随着调制阶数的增加频带利用率随之增加。由于 MQAM 信号具有较高的频带利用率,在卫星和微波通信中已得到了广泛的应用。而在未来的智能通信系统中,要求系统能够根据信道环境自动调节其传输参数,以达到更高的频带利用率, MQAM 也将成为其最重要的调制方式之一。因此,对 MQAM 的调制方式的识别也逐渐成为研究的热点之一。

目前,现有的 MQAM 调制识别方法大多局限于低阶 QAM 识别,对于高阶 QAM 特别是 64 阶以上的 QAM 识别问题的研究相对较少。Spooner^[1]利用四阶六阶循环累积量作为分类特征对 PSK (Phase Shift Keying) 和 QAM 信号进行识别;Dobre 等^[2]则研究了阶数高至八阶的循环累积量,实现了对方形 QAM 信号的识别,这些特征虽然对频偏鲁棒性较好但是需要精确地知道码元周期且要求信号为基带信号。Dobre 等对循环累积量做了进一步的研究^[3],利用四阶六阶循环累积量零频处的幅度值作为统计量,完成了四种信号的识别,对频偏和定时误差都有较好的鲁棒性。文献[4]采用

四阶二次循环累积量作为识别统计量,对载波频偏和相偏具有较好的鲁棒性,但识别的种类过少。文献[5]提出了基于高阶累积量特征的识别算法,能够对多种 QAM 信号进行识别,但是对同步算法要求较高。文献[6]采用小波变换提取信号幅度信息,并给出在高信噪比和低信噪比下不同的识别特征。文献[7]提出了基于 Hilbert 变换的 QAM 信号识别算法,文中采用粗定时算法,对定时同步后的星座图进行了幅度聚类,并利用各阶 QAM 星座图矢量的幅度差异来识别 QAM 信号的阶数,但对于高阶 QAM 的情况未作讨论。文献[8]提出了一种基于瞬时幅度的算法,可在中频下完成多种 QAM 识别,但需要的码元数目较多。文献[9]提出了一种基于 QAM 信号矢量图中最小环带方差的算法,对载波残余不敏感,但需要进行定时同步。文献[10]采用支持向量机结合遗传算法作为识别分类器,实现了 16QAM 和 64QAM 的识别,达到了较好的识别性能,但复杂度较高,不利于实时处理。

针对以上问题,本文算法首先对 MQAM 信号的循环平稳特性进行了讨论,在文献[11-12]启发下,利用循环平稳检测算法实现了 8QAM 与其他 QAM 信号的识别分类。通过比较各阶 QAM 信号在四阶循环累积量域上的幅值差异,利用四阶零次共轭循环累积特征实现了方形 QAM (4QAM、16QAM、64QAM、256QAM)与十字形 QAM (32QAM、128QAM)的区分。再对 QAM 信号的幅度分布情况进行了研究,提出了一种基于瞬时包络平方方差的特征,并采用最大功率定时算

收稿日期: 2012-02-06; 修回日期: 2012-03-30。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61072046)。

作者简介: 刘聪杰(1984-),男,河北任丘人,硕士研究生,主要研究方向:突发信号解调; 彭华(1973-),男,江西萍乡人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:数字信号均衡与解调、软件无线电; 吴迪(1984-),男,福建建阳人,博士研究生,主要研究方向:短波信号检测与解调。

法^[13]选取了最佳采样点,减少了码元间的串扰,提高了信噪比,完成了对 4QAM、16QAM、64QAM、256QAM 以及 32QAM、128QAM 两两间的识别。该算法采用二叉树支持向量机(Support Vector Machine, SVM)作为识别分类器对信号进行识别分类,在一定的码元数目条件下实现了 MQAM 信号的识别分类。

1 信号模型及算法分析

1.1 信号模型

接收端 QAM 调制信号模型可表示为:

$$\begin{cases} r(t) = \exp(j2\pi f_c t) \exp(j\theta_c) \cdot \\ \sum_{i=1}^N a_i g(t - iT_0 - \varepsilon T_0) + w(t) \\ a_i = \sqrt{S_i} \exp(j\varphi_i) \\ S_i = \sqrt{a_{i,I}^2 + a_{i,Q}^2} \\ \varphi_i = \tan^{-1}(a_{i,Q}/a_{i,I}) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $r(t)$ 为接收信号; $g(t)$ 为成形滤波器的冲激响应(本文采用升余弦成型滤波器); T_0 为码元周期; f_c 为载波频率; θ_c 为载波相位; ε 为定时偏差; N 为观测符号数目; a_i 为零均值的平稳复随机序列,即发送码元序列; \sqrt{S} 和 φ_i 分别为 a_i 的幅度和相位; $w(t)$ 为零均值、单边功率谱密度为 N_0 的平稳加性高斯噪声。

信号功率影响了信号星座图的尺度大小,进而导致识别性能的恶化,因此需要对待识别的信号进行功率归一化,对于 QAM 信号来说一般选择最大值归一化:

$$r'(t) = r(t) / \max(\text{abs}(r(t))) \quad (2)$$

1.2 信号的循环累积量

数字调制信号一般都具有循环平稳特征,利用循环累积量可以充分体现出信号的循环平稳特征,而不同调制方式的信号在累积量域上的信息(取值)是不同的,因此可以利用信号的循环累积量域上特征完成信号调制方式的识别。而高斯随机变量阶数 $n > 2$ 的高阶累积量恒等于零,即高阶累积量可以很好地抑制高斯噪声,循环累积量作为累积量的一种时变分析的延伸,不仅具有高阶累积量的噪声抑制特性并且能够很好地反映出信号的周期特性,因此利用循环累积量作为识别特征,具有抗噪性能好、对信号预处理要求低等优势。

信号的相位信息在循环累积量域上表现为相位特征,并不影响其幅度,因此采用循环累积量的幅度特征可以消除信号的未知相位带来的影响,即特征不受相位的影响。

单载波信号的循环累积量表达式如下^[14]:

$$\begin{cases} c_r(\gamma; \tau)_{n,q} = \alpha^n \frac{c_{s,n,q}}{\rho} \exp(-j2\pi k \varepsilon) \exp(j\theta(n-2q)) \\ \exp\left(j \frac{2\pi}{\rho} f_c T_p^{-1} \sum_{u=1}^{n-1} \tau_u\right) \times \\ \sum_m g^{(*)n}(m) \prod_{u=1}^{n-1} g^{(*)u}[m + \tau_u] \exp(-j2\pi \beta m) \\ k_{n,q} = \{\gamma: \gamma = \beta + (n-2q)f_c, \beta = k/T, \\ k \text{ 为整数}, c_{\gamma}(\gamma)_{n,q} \neq 0\} \end{cases} \quad (3)$$

其中: $k_{n,q}$ 表示接收信号的循环频率集, γ 为信号的循环频率, τ 为信号的延迟向量, $c_{s,n,q}$ 为接收信号的高阶累积量, ρ 为信号的过采样率, $(*)_u$ 表示第 u 个因子是否取该符号。式(3)

表示了信号在高阶循环累积量域上只在循环频率 γ 上有取值,且循环频率 γ 与信号码元速率、载波频率以及累积量的阶数有关,而在其余频率上累积量的值都为零,这反映了信号的高阶循环特性,这是高阶累积量所不具备的性质。

对式(3)求其模值,得到信号循环累积量的幅度表达式:

$$\begin{aligned} |c_r(\gamma; \tau)_{n,q}| &= \alpha^n \frac{|c_{s,n,q}|}{\rho} \times \\ &\left| \sum_m g^{(*)n}(m) \prod_{u=1}^{n-1} g^{(*)u}[m + \tau_u] \exp(-j2\pi \beta m) \right| \end{aligned} \quad (4)$$

从上述计算表达式可得知,循环累积量循环频率处的幅度值与累积量 $c_{s,n,q}$ 成比例关系。信号的各阶累积量又取决于信号的调制方式,因此可利用信号的循环累积量循环频率处的幅度值来建立识别参数,就可以识别其调制方式。表 1 给出了待识别信号的各阶累积量的理论值^[15]。

表 1 待识别信号累积量理论值

信号类型	C40	C41
4QAM	1	0
8QAM	1	0.8889
16QAM	0.68	0
32QAM	0.19	0
64QAM	0.6190	0
128QAM	0.1814	0
256QAM	0.6047	0

从表 1 中可以看出,当 $n = 4, q = 1$ 时, $c_{8QAM,4,1} \neq 0$, $c_{4QAM,4,1} = 0$,也就是说在四阶一次循环累积量上只有 8QAM 在循环频率处具有明显的谱峰值,即 8QAM 在四阶一次循环累积量域上具有循环平稳性,而其他 QAM 信号则不具有循环平稳特性,因此可以利用循环平稳检测特征完成 8QAM 与其他 QAM 的区分。

从表 1 中得知,4QAM、16QAM、64QAM、256QAM 与 32QAM、128QAM 的四阶零次累积量的取值有明显的差异,由前面的分析知道循环频率处的幅值与累积量的值具有比例关系,即可利用四阶零次循环累积量循环频率对应的谱峰的幅度值完成 4QAM、16QAM、64QAM、256QAM 与 32QAM、128QAM 的区分。但在实际中,预先并不知道信号的码元周期和载波频率,即 γ 是未知的,因此需要对循环累积量的幅度序列进行搜索,找到非零取值点,其对应的频率即为信号的循环频率,其数值就是循环频率处的累积量值。但由于数据量有限,在非循环频率处的值不可能为零,需要在一定频率范围内进行峰值搜索,找出其最大值,即为对应的循环频率。为了提高搜索精度,本文采用 FFT+FT 谱连续细化分析傅里叶变换法,即用 FFT 作全景谱,对指定的一个频率区间进行细化运算,先确定频率分辨率,再确定计算频率的序列,最后用 DFT 连续谱分析进行实部和虚部的计算,合成幅度谱。这样可以在不增加采样长度的前提下大大增加频率分辨率,提高谱幅度值的计算精度。

综上所述,利用信号在循环累积量域上的特性可以实现 MQAM 信号的类内识别,因此本文构造如下分类特征:

1) 循环平稳检测特征。

循环平稳检测能够验证信号循环平稳域的循环频率处是否具有循环平稳性,利用循环平稳检测算法构造如下特征:

$$F1 = C_{r,4,1}^{(K)} = K c_{r,4,1} \Sigma_{r,4,1}^{-1} [c_{r,4,1}]^T \quad (5)$$

其中: K 为样本长度, $(\cdot)^{-1}$ 和 $(\cdot)^T$ 分别表示矩阵的逆和转置, $\Sigma_{r,4,1}^{-1}$ 表示系数矩阵, $\mathbf{c}_{r,4,1}$ 表示循环频率处的循环累积量向量, $\Sigma_{r,4,1}^{-1}$ 和 $\mathbf{c}_{r,4,1}$ 的计算表达式如下:

$$\begin{cases} \Sigma_{r,4,1}^{-1} = \begin{bmatrix} R\{Q_{2,0} + Q_{2,1}\}/2 & L\{Q_{2,0} - Q_{2,1}\}/2 \\ L\{Q_{2,0} + Q_{2,1}\}/2 & R\{Q_{2,0} - Q_{2,1}\}/2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{c}_{r,4,1} = [\text{real}(\mathbf{c}_{r,4,1}) \quad \text{imag}(\mathbf{c}_{r,4,1})] \end{cases} \quad (6)$$

$R\{\cdot\}$ 和 $L\{\cdot\}$ 表示取实部和取虚部操作, $Q_{2,0}$ 和 $Q_{2,1}$ 的表达式如下:

$$\begin{cases} Q_{2,0} = \frac{1}{KL} \sum_{i=-(L-1)/2}^{(L-1)/2} W_L(t) F_r^*(\gamma - t)_{4,1} F_r(\gamma + t)_{4,1} \\ Q_{2,1} = \frac{1}{KL} \sum_{i=-(L-1)/2}^{(L-1)/2} W_L(t) F_r^*(\gamma + t)_{4,1} F_r(\gamma + t)_{4,1} \end{cases} \quad (7)$$

其中: $F_r = \sum_{i=1}^K r^{(*)1}(t) r^{(*)2}(t + \tau_1) \cdots r^{(*)n}(t + \tau_{n-1}) \exp(-j2\pi ft)$, $W_L(t)$ 为以 t 为中心长度为 L 的平滑窗。

则统计量满足自由度为 2 的 χ^2 分布^[16], 在给定的虚警概率条件下, 可设定门限 Γ , 再将统计量与门限进行比较判定该频率是否是循环频率, 即可判定信号在此变换域中是否具有循环平稳性。因此, 利用此特征可以完成对 8QAM 与其他 QAM 的区分。

2) 四阶零次循环累积量特征。

$$F2 = \max(|C_{r,40}(0)|) \quad (8)$$

由前面的分析可知, 4QAM、16QAM、64QAM、256QAM 的四阶零次循环累积量最高谱峰值要高于 32QAM 和 128QAM 的四阶零次循环累积量最高谱峰值, 因此利用特征 $F2$ 可以有效地进行区分, 且对载波相位具有很好的鲁棒性。

1.3 瞬时包络的特征

虽然利用循环累积量特征进行调制识别具有良好的抗噪性能, 但不能有效区分所有的 QAM 信号, 针对 4QAM、16QAM、64QAM 与 256QAM 以及 32QAM 与 128QAM 之间的区分, 本文提出了一种利用瞬时包络平方的特征进行识别。

在理想条件下, 各阶 QAM 信号幅度取值分布情况如下: 4QAM 幅度取值个数为 1, 16QAM 幅度取值个数为 3, 幅度值分别为 0.3333、0.7454、1.0, 相应的幅度概率分布 0.25、0.5、0.25; 32QAM 幅度取值个数为 5, 幅度值分别为 0.2425、0.5423、0.7276、0.8745、1.0, 相应的幅度概率分布 0.125、0.25、0.125、0.25、0.25。同理, 64QAM 幅度取值个数为 9, 128QAM 幅度取值个数为 16, 256QAM 幅度取值个数 32。也就是说, 各阶 QAM 信号的幅度分布存在差异性, 利用此差异性可以完成对 MQAM 信号的识别。

为了提取信号的幅度特征, 对信号进行 Hilbert 变换, 可求得信号的瞬时包络:

$$A(n) = (r(n)^2 + r'(n)^2)^{1/2} \quad (9)$$

其中 $r'(n)$ 为接收信号的希尔伯特变换。显然, 上式与接收信号的相位频率无关, 这样就消除了载波频率和相位的影响。对其包络平方进行归一化:

$$M(n) = \frac{A^2(n)}{\sum_{n=1}^N A^2(n)/N}; \quad 0 < n \leq N \quad (10)$$

综合上述分析本文选择归一化包络平方的方差作为分类特征:

$$F3 = \text{var}(M(n)); \quad 0 < n \leq N \quad (11)$$

当信号采用升余弦成形滤波器时, 会对识别性能产生一

定影响, 因此本文利用最大平均功率粗定时算法, 取出信号每个码元中信号比最大的采样点, 可以有效地降低升余弦成形滤波器的影响特别是码元间串扰的影响, 同时在相同码元数量条件下减少了计算的数据量, 提高了运算性能。

2 分类设计及实现流程

本文采用二叉树结构的支持向量机作为识别分类器。二叉树结构的支持向量机作为一种处理多类分类问题的高效方法, 其基本思想是: 首先将所有的类别划分为两个子类, 再将两个子类划分为两个次级子类, 如此循环下去, 直到所有的节点都只包含一个单独的类别为止, 这样就得到了一个倒立的二叉分类树。该方法将多类分类问题转换为两类分类问题, 其中每两子类之间采用支持向量作为识别分类器。支持向量机可以通过训练数据自适应选择最优门限, 因此本文选择支持向量机作为识别分类器。本文定义平均识别概率 $P_{cc} = N_{\text{mod}}^{-1} \sum_i P_c^i$, 作为每一节点的正确识别概率。其中, P_c^i 为各节点中每一类的识别概率, N_{mod} 为各节点中类别的数量。

综合上面的分析, 很难利用一个特征完成信号的分类识别, 因此, 本文提出了基于联合特征的自动识别算法, 并采用分层实现分类, 具体流程如图 1 所示。

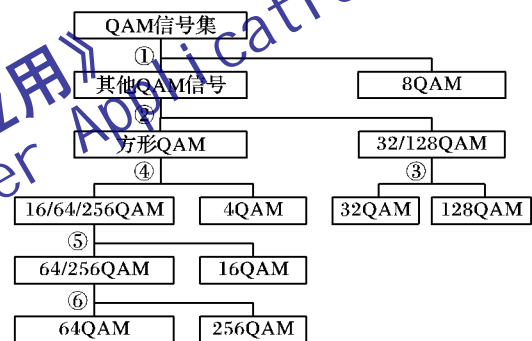


图1 本文算法的识别流程

本文算法总共分为 6 个节点 (对应图 1 中的 ① ~ ⑥) 实现, 具体实现步骤如下:

步骤 1 计算信号的 $|C_{r,41}(0)|$, 并利用 FFT + FT 谱细化算法进行谱峰最值的搜索求得其相应的频点, 再利用式 (5) 求得检测统计量 $F1$ 。设定恒虚警概率, 通过查表求得检测门限 Γ , 依据门限进行判定, 完成对节点 ① 的识别, 即 8QAM 与其他 QAM 信号的识别。

步骤 2 计算信号的 $|C_{r,40}(0)|$, 同时利用 FFT + FT 谱细化算法对谱线进行细化校正, 并提取其谱峰最大值, 利用式 (8) 得到统计量 $F2$ 。将统计量送入二叉树支持向量机进行分类处理, 完成节点 ②, 即方形 QAM (4QAM、16QAM、64QAM、256QAM) 与十字形 QAM (32QAM、128QAM) 信号的识别。

步骤 3 对信号进行 Hilbert 变换, 取出信号中每个码元中最佳采样点, 并计算信号的瞬时包络, 进而按照式 (11) 求得统计量 $F3$, 同样利用二叉树支持向量机完成节点 ③ (32QAM 与 128QAM 的识别)、节点 ④ (4QAM 与 16QAM、64QAM、256QAM 的识别)、节点 ⑤ (16QAM 与 64QAM、256QAM 的识别) 以及节点 ⑥ (64QAM 与 256QAM 的识别)。

3 仿真实验与性能分析

本文所研究的待分类调制识别信号为 4QAM、8QAM、16QAM、32QAM、64QAM、128QAM 以及 256QAM, 通过仿真实

验对所提出的算法进行性能评估。实验条件如下:采样率为 4 MHz,码元速率为 250 kD,载波中频为 500 kHz,采用升余弦成形滤波器,滚降系数为 0.35,所加噪声为高斯白噪声。实验仿真产生了各类信号,每个样本数为 500,其中 200 个样本作为 SVM 的训练样本,300 个作为测试样本。实验对 7 种信号在不同信噪比和不同码元长度的条件下,分别做了 100 次蒙特卡罗实验。具体实验结果如下。

图 2~7 分别依次表示每个节点的识别仿真结果。其中,图 2 表示节点①处的仿真结果图。它利用了特征 $F1$ 对 8QAM 和其他 QAM 进行识别。此时设置恒虚警概率为 10^{-6} ,则门限 $\Gamma = 27.63$,图 2 给出了利用循环平稳检测特征在三种码元长度、不同信噪比条件下的识别性能的曲线图。从图 2 中可以看出利用循环平稳检测算法进行调制识别,在码元长度为 100,信噪比大于 -3 dB 时,正确识别率就可以达到 100%,随着码元数目的增加性能会进一步提高。与文献[8~9]相比,本文算法对 8QAM 的识别需要的码元数目和信噪比更低,识别性能优于文献[8~9]中的算法,更适合于突发信号的识别。

图 3 表示节点②处的仿真结果。节点②利用特征 $F2$ 对十字形 QAM(32QAM、128QAM)与方形 QAM(4QAM、16QAM、64QAM、256QAM)进行识别。从图中看出,随着码元长度的增加,识别性能改善十分显著。在码元长度为 500 的条件下,利用特征 $F2$ 进行调制识别的性能很差,这表明利用循环累积量特征进行识别的性能对数据量有一定要求,只有在一定的码元数目下,循环累积量特征才能体现出其良好的抗噪性能。当码元数目增加到 1000 以上,信噪比大于 4 dB 时,正确识别率就大于 90%。

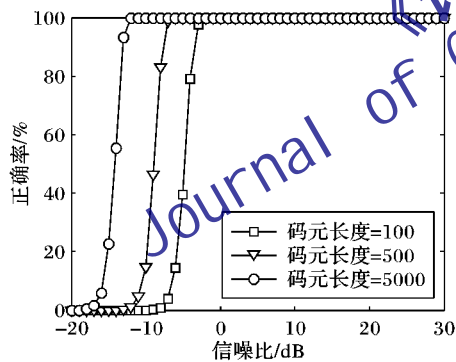


图 2 8QAM 和其他 QAM 识别结果

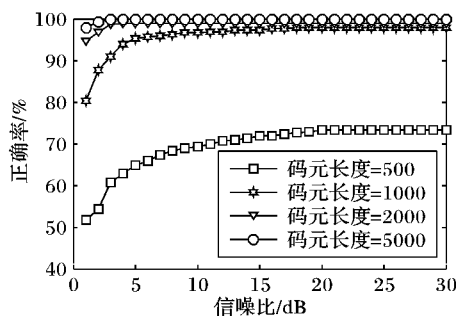


图 3 方形 QAM 和十字形 QAM 识别结果

图 4~图 7 分别对应节点③~⑥的仿真结果。这 4 个节点都是利用特征 $F3$ 完成分类识别的。从几幅图的结果上看, QAM 信号阶数越高对信噪比和码元数目的要求也越高,因为高阶 QAM 信号星座点数多,码元间的差异小,需要较多的码元数量来反映其各自特性。同时可以看出,对于瞬时特征来说,因为提取的是时域上的特征,其识别性能受信噪比影响相

对较大,即使码元数目较多,当信噪比在 5 dB 以下时,性能会变差,也就是说信号的时域特征抗噪性能比变换域特征要差一些。而在实际的高阶 QAM 通信系统中,信噪比一般都要求大于 10 dB,因此本文算法具有一定的实用性。

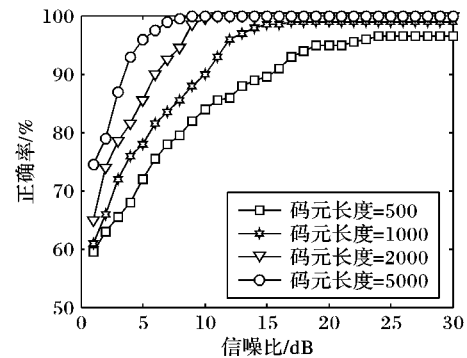


图 4 32QAM 与 128QAM 识别结果

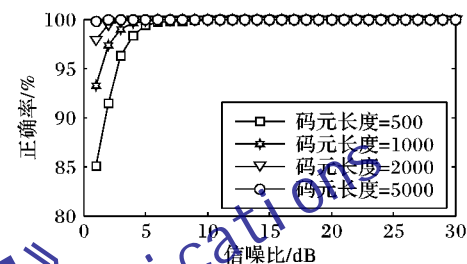


图 5 4QAM 与 16QAM、64QAM、256QAM 识别结果

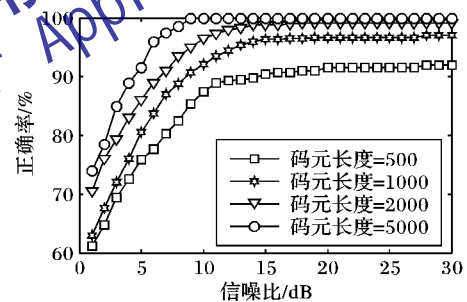


图 6 16QAM 与 64QAM、256QAM 识别结果

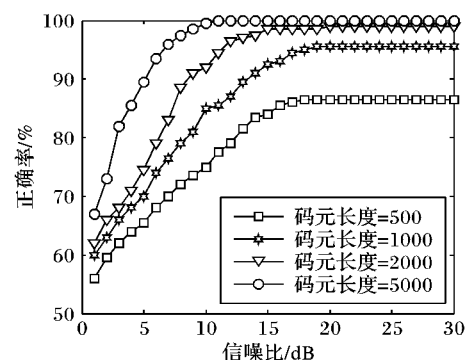


图 7 64QAM 与 256QAM 识别结果

图 8 给出了所有待识别信号的平均识别率的结果。当码元数目为 1000,信噪比大于 6 dB 时,平均识别率可以达到 90% 以上;当码元数目为 5000,信噪比大于 2 dB 时,识别率可以达到 90% 以上,说明本算法在低信噪比下具有较好的性能。与文献[8]算法相比,本文算法在达到相同的信噪比条件下,需要的码元数目要少得多,比文献[8]的算法更适合于突发 QAM 信号的调制识别;而在相同码元数目条件下,文献[9]算法在较高信噪比 ($\text{SNR} > 10 \text{ dB}$) 时与本文算法性能相近,但在较低信噪比时,本文算法明显优于文献[9]算法,且本文算法识别种类多于该算法。

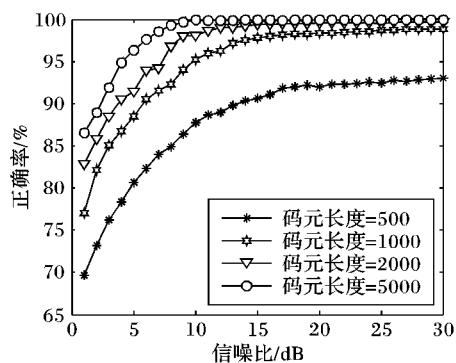


图8 待识别信号的平均识别结果

4 结语

本文针对 MQAM 调制方式识别算法进行研究,采用基于循环平稳检测、四阶零次共轭循环累积量以及瞬时包络的联合特征,完成了 7 种 QAM 信号类内的识别。本文算法不需要同步,可对中频信号进行识别,在较低信噪比下也能达到较好的识别性能,且对数据量要求不高,适用于突发 QAM 的识别。本文是在高斯白噪声信道条件下进行仿真,未对衰落信道进行讨论,在这方面需要进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] SPOONER C M. On the utility of sixth-order cyclic cumulants for RF signal classification [C]// Conference Record of the Thirty-Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Piscataway: IEEE, 2001, 1: 890-897.
- [2] DOBRE O A, BAR-NESS Y, SU W. Robust QAM modulation classification algorithm using cyclic cumulants [C]// WCNC'04: Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE, 2004, 2: 745-748.
- [3] DOBRE O A, ONER M, RAJAN S, *et al.* Cyclostationarity-based robust algorithms for QAM signal identification [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(1): 12-15.
- [4] 冯祥, 李建东. 基于高阶循环累积量的 SQAM 信号调制识别算法 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(1): 125-128.
- [5] 宋娇. 基带调制识别算法研究与设计实现 [D]. 郑州: 信息工程大学, 2008.
- [6] LIU MINGQIAN, LI BINGBING, TANG WEIDONG. A new method for mqam signals identification [C]// WiCOM'10: Proceedings of the 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing. Piscataway: IEEE, 2010: 1-4.
- [7] 奚家熹, 王宗欣. 基于 Hilbert 变换的 MQAM 信号调制体制识别 [J]. 通信学报, 2007, 28(6): 1-6.
- [8] 褚衍杰, 胡年福, 巢凯今, 等. 通带 MQAM 信号调制方式识别方法 [J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2008, 35(5): 932-937.
- [9] 张路平, 王建新. MQAM 信号调制方式盲识别 [J]. 电子与信息学报, 2011, 33(2): 332-336.
- [10] ZHU Z, ASLAM M W, NANDI A K. Support vector machine assisted genetic programming for MQAM classification [C]// ISSCS'11: Proceedings of the 10th International Symposium on Signals, Circuits and Systems. Piscataway: IEEE, 2011: 1-6.
- [11] DOBRE O A, RAJAN S, INKOL R. Joint signal detection and classification based on first order cyclostationarity for cognitive radios [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2009, 2009: No. 7.
- [12] 崔伟亮, 李剑强, 江桦, 等. 衰落信道盲接收条件下的调制分类 [J]. 电子与信息学报, 2011, 33(8): 1895-1901.
- [13] 郑大春, 项海格. 一种全数字 QAM 接收机符号定时和载波相位恢复方案 [J]. 通信学报, 1998, 19(7): 83-88.
- [14] DOBRE O A, ABDI A, BAR-NESS Y, *et al.* Selection combining for modulation recognition in fading channels [C]// MILCOM'05: Proceedings of IEEE Military Communications Conference. Piscataway: IEEE, 2005, 4: 2499-2505.
- [15] DOBRE O A, ABDI A, BAR-NESS Y, *et al.* Cyclostationarity-based modulation classification of linear digital modulations in flat fading channels [J]. Wireless Personal Communications, 2010, 54(4): 699-717.
- [16] DANDAWATE A V, GIANNAKIS G B. Statistical tests for presence of cyclostationarity [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(9): 2355-2369.
- [7] SUN ZENGYOU, ZHANG LIJIE, TIAN YONG. SF-MAX-LOG-MAP parallel decoding algorithm and its application study in LTE [C]// CSQRWC 2011: Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference. Piscataway: IEEE, 2011, 2: 885-888.
- [8] 朱光喜, 辛毓, 冯敏, 等. 一种基于数据分布的 Turbo 码改进译码算法 [J]. 计算机应用, 2005, 25(6): 1422-1423.
- [9] 王坤, 张青春, 冯加建, 等. Turbo 码高速译码器设计 [J]. 现代电子技术, 2008(18): 171-173.
- [10] 李林燕, 谭晓衡, 张建慧. 适用于 Turbo 码并行译码的无冲突交织器 [J]. 计算机应用, 2010, 30(11): 3118-3120.
- [11] 曾可卫, 林涛. 一种新型的 Turbo 码 LOG-MAP 译码算法 [J]. 信息技术, 2005(1): 27-30.
- [12] 刘东华, 唐朝京. 用于 Turbo 迭代译码的 log-MAP 算法的简化 [J]. 电子与信息学报, 2001, 23(12): 1340-1347.
- [13] 任德锋, 葛建华, 宫丰奎, 等. 新颖的低延迟并行 Turbo 译码方案 [J]. 通信学报, 2011, 32(6): 37-44.
- [14] 张维, 周淑华, 任勇, 等. Turbo 译码算法的分岔与控制 [J]. 物理学报, 2006, 55(2): 622-626.
- [15] 张罗成. LTE 系统中信道编码的研究及其实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2010.

(上接第 2115 页)

参考文献:

- [1] BERROU C, GLAVIEUX A, THITIMAJSHIMA P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo codes [C]// ICC 93: IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE, 1993, 2: 1064-1070.
- [2] ROBERTSON P, HORHER P, VILLEBRUN E. Optimal and sub-optimum maximum a posteriori algorithms suitable for Turbo decoding [J]. European Transactions on Telecommunications, 1997, 8(2): 119-125.
- [3] LIN C-C, SHIH Y-H, CHANG H-C, *et al.* A low power turbo/Viterbi decoder for 3GPP2 applications [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2006, 14(4): 426-430.
- [4] TALAKOUB S, SABETI L, SHAHRRAVA B, *et al.* An improved Max-Log-MAP algorithm for Turbo decoding and Turbo equalization [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(3): 1058-1063.
- [5] SADJADPOUR H R. Maximum a posteriori decoding algorithms for turbo codes [C]// Proceedings of Digital Wireless Communication II, SPIE 4045. [S.l.]: SPIE, 2000: 73-83.
- [6] SYBIS M. Log-MAP equivalent Chebyshev inequality based algorithm for turbo TCM decoding [J]. Electronics Letters, 2011, 47(18): 1049-1050.