

一种星座模板匹配的 MQAM 调制盲识别方法^{*}

韩 勋 郑 佳 冯 鑫 匡 银 文 伟

(中国空间技术研究院西安分院 西安 710100)

摘 要: 针对现有聚类识别算法对先验参数敏感的问题,该文提出了一种基于模板匹配的 MQAM 调制盲识别方法。首先对载频、带宽及码速率进行估计,根据估计结果完成下变频、抽取等预处理;然后定义星座分布熵特征描述星座图分布的收敛度,并通过最优化星座分布熵的方式实现最佳判决时刻序列获取及剩余载波补偿,进而恢复出最优星座图分布;最后计算最优星座图分布与不同调制类型预设模板之间的匹配度,完成调制样式的识别,可识别样式包括 16QAM、32QAM、64QAM、128QAM 及 256QAM。该方法对初始参数选择不敏感,且利用了星座图整体分布这一本质差异进行识别,稳定性高,适用于工程实现。仿真结果表明,当信噪比 15 dB 时各信号识别率高于 93%,同时抗噪声能力较现有算法亦有明显提升,证明了所提方法的有效性。

关键词: QAM 信号;调制样式识别;星座分布熵;模板匹配

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4020

A blind recognition method for MQAM modulation using constellation diagram template matching

Han Xun Zheng Jia Feng Xin Kuang Yin Wen Wei

(China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China)

Abstract: This paper presents a template matching-based blind recognition method for MQAM modulation. The method begins with estimating the carrier frequency, bandwidth, and code rate, followed by completing preprocess. Subsequently, it defines the constellation distribution entropy to describe the convergence degree of the constellation diagram distribution and achieves optimal sequence acquisition and residual carrier compensation through optimizing constellation distribution entropy. This process leads to the restoration of the optimal constellation diagram distribution. Finally, it calculates the matching degree between the optimal constellation diagram distribution and pre-set templates for different modulation types in order to accomplish modulation style recognition, including 16QAM, 32QAM, 64QAM, 128QAM, and 256QAM. This method is insensitive to initial parameter selection and leverages essential differences in constellation diagram distributions for robust recognition. Simulation results indicate that at a signal-to-noise ratio (SNR) of 15 dB, the recognition rate surpass 93%. Additionally, the proposed method exhibits significantly improved noise resistance compared to existing algorithms-thus validating its effectiveness.

Keywords: QAM signal; modulation recognition; constellation distribution entropy; template matching

0 引 言

正交振幅调制信号(quadrature amplitude modulation, QAM)通过变化两路正交载波的幅相关系来完成符号信息的调制,该类信号由于在频谱利用率和抗干扰性能方面的优势,近年来被广泛应用于各类有线及无线通信场合中。因此,对其调制方式进行盲识别具有重要意义,可以应用在电子侦察与对抗、频谱监测等多种场合^[1-3]。目前针对这一

问题已经提出了多种算法,其中基于星座图聚类的方法由于利用了幅相分布特征这一本质区别,成为了当前研究工作的重点^[4-6]。

聚类是将待处理数据分类到不同的类或者簇的过程,事先不需要训练样本进行学习和训练,适用于非合作场景中。文献[7]利用拟合聚类的方法,对相移键控信号(phase shift keying, PSK)信号和 QAM 信号进行调制样式自动识别;文献[8]对传统模糊-C 均值聚类算法进行改

进,提出了自适应模糊-C 聚类算法,提升了抗噪声性能和适应性;文献[9]考虑定时误差,使用聚类方法同步出星座点的变换模式,完成定时同步的同时可以实现星座模式和调制样式的识别。这些方法在取得一定效果的同时也对初始聚类点个数和位置设置较为敏感,为此一些改进的算法被提出:文献[10]使用一维幅度半径特征代替二维星座图分布特征,降低了对聚类性能的需求,但是也限制了信号识别类型;文献[11]将四阶矩特征与减法聚类算法相结合,实现了对 4 种 QAM 信号的识别,文献[12]在文献[11]基础上,通过进一步设置不同的聚类半径和引入更多辅助特征,实现了对 16QAM、32QAM、64QAM、128QAM、256QAM 信号的识别,但是聚类半径的设定仍然存在着依赖先验信息的问题。这些方法的核心思想可归纳为:通过减少待识别信号类型或引入更多辅助特征,降低聚类在整体识别流程中所占比重,从而约束初始聚类参数选取空间,本质上未解决聚类算法在对先验信息敏感的问题,限制了工程实用性。

针对上述问题,本文提出了一种星座图模板匹配的 MQAM 调制盲识别方法,通过优化所设计星座分布熵特征实现不同调制类型信号星座图分布的最优聚类,在此基础上将理论星座分布作为模板,通过最优匹配的方式实现调制类型盲识别。该方法有效避免了传统聚类方法初始参数的选取问题,同时还可实现信号的频偏估计和最优定时同步,简化了整体识别流程。仿真对比实验验证了所提算法的有效性。

1 QAM 信号模型与星座图模式

QAM 信号的调制模型可以表示如下:

$$r(t) = e^{j2\pi f_c t} e^{j\theta_c} \sum_{i=1}^N \alpha_i g(t - iT_0 - \epsilon T_0) + \omega(t) \quad (1)$$

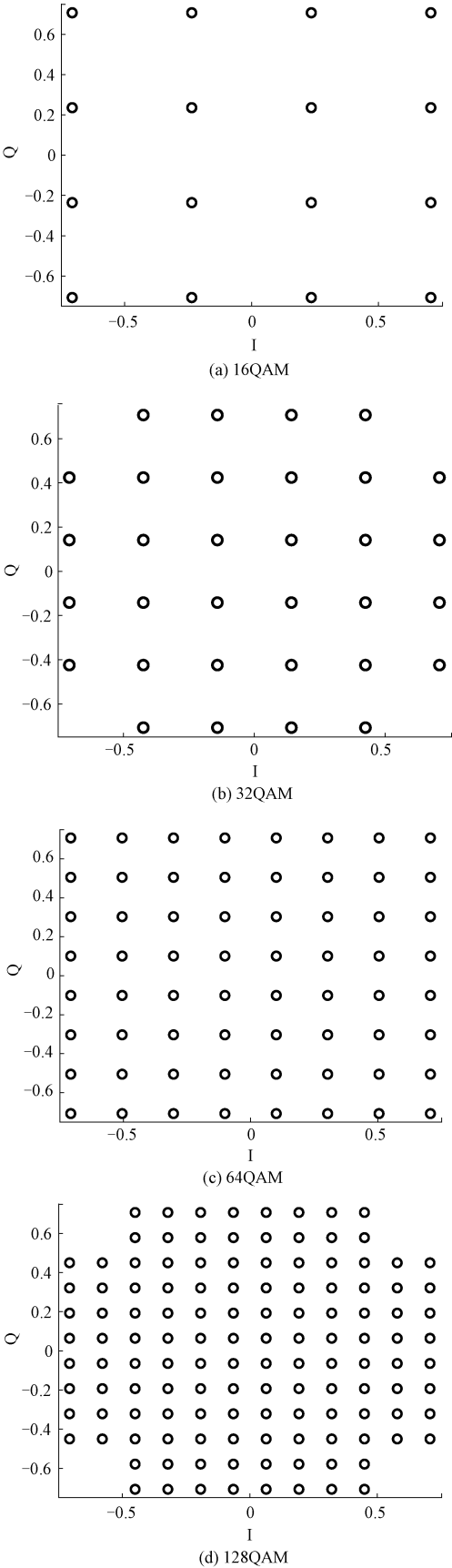
$$\alpha_i = \sqrt{S_i} e^{j\varphi_i} \quad (2)$$

$$S_i = \sqrt{\alpha_{i,I}^2 + \alpha_{i,Q}^2} \quad (3)$$

$$\varphi_i = \arctan \frac{\alpha_{i,Q}}{\alpha_{i,I}} \quad (4)$$

式中: $f_c, \theta_c, T_0, \epsilon$ 分别代表载波频率,初始相位,符号周期和定时误差; $g(t)$ 代表成形滤波器的冲激响应; $\omega(t)$ 代表均值为 0,方差为 σ^2 的高斯白噪声, α_i 表示第 i 个符号周期的发送符号,其正交和同相分量分别由 $\alpha_{i,Q}$ 和 $\alpha_{i,I}$ 表示,对应幅度及相位分别为 S_i 及 φ_i ; N 为一次处理或传输的总的码元个数。

根据发送比特流与符号正交同相分量 $\alpha_{i,Q}$ 和 $\alpha_{i,I}$ 的映射规则不同,可将现阶段主要应用的 QAM 信号类型分为 16QAM、32QAM、64QAM、128QAM 及 256QAM^[13],对应理论星座图分布如图 1 所示,可以看出不同类型 QAM 信号的星座图具备明显差异,是用作调制样式识别的基础。



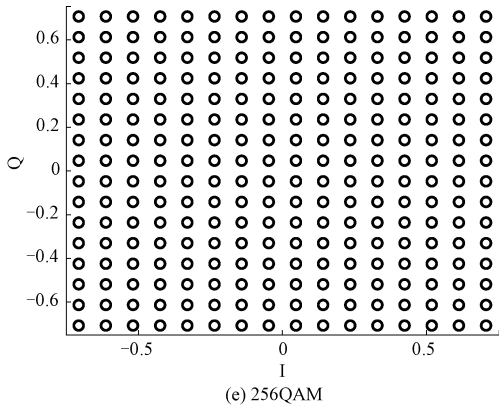


图 1 不同类型 QAM 信号理论星座图分布

Fig. 1 Theoretical constellation diagram distribution of different types of QAM signals

2 QAM 信号盲识别方法

2.1 信号预处理

本文的研究对象为已经经过正交(in-phase quadrature, IQ)变换的复采样信号,首先对其进行如图 2 所示的预处理,流程主要包括载频带宽估计、下变频和码速率估计。

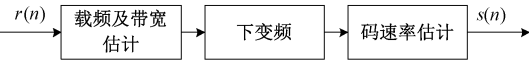


图 2 信号预处理流程

Fig. 2 Signal pre-processing flowchart

1) 载频带宽估计

载频带宽估计的主要目的是将采样信号的频谱搬移到零频,以及对于过采样倍数较高的数据,根据带宽进行抽取以降低后续运算量。由于后续处理会对剩余频偏进行精确估计,此处只需进行粗略估计即可满足要求。对采样信号进行傅立叶变换到频域,取对数并选取前 10 个最大的谱线值,求均值记为 T_f ,如图 3 所示,记录比 T_f 低 3 dB 的最低谱线位置为 f_1 ,最高谱线位置为 f_2 ,则载频估计值 $\hat{f}_c$ 及带宽估计值 $\hat{B}_w$ 分别为:

$$\hat{f}_c = (f_1 + f_2)/2 \quad (5)$$

$$B_w = f_2 - f_1 \quad (6)$$

2) 下变频

完成载频带宽估计后,根据估计结果将信号搬移至零频,并以带宽估计值的 1.6 倍为门限进行低通滤波和数据抽取,达到抑制带外噪声,降低数据量的目的,记录抽取后的数据采样率为 F_s 。

3) 码速率估计

码速率估计采用经典包络平方谱算法^[14],算法精度可以满足要求。估计流程为首先对低通滤波后的信号进行共轭相乘,然后进行傅立叶变换得到信号包络平方的频谱,可获得包括直流分量、波特率分量、镜像分量等多根谱线,如

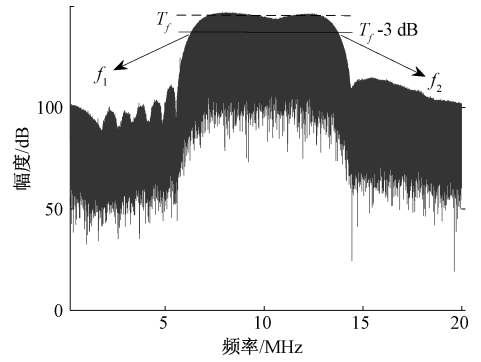


图 3 载频带宽估计

Fig. 3 Carrier frequency and bandwidth estimation

图 4 所示。利用带宽估计值 $\hat{B}_w$ 对谱线位置选择范围进行约束,即可得到码速率初估计值 $\hat{B}_{simp}$ 。

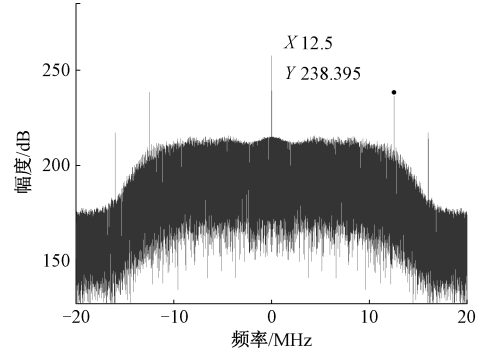


图 4 码速率估计结果

Fig. 4 Result of symbol rate estimation

2.2 星座图分布最优聚类

预处理后的采样序列为 $s(n), n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。从 $s(n)$ 中恢复出星座图是后续识别的基础,该过程主要包括最佳判决时刻序列获取及剩余载波补偿,如式(7)、(8)所示,其中 a_k 代表最佳判决时刻序列, ϵ_f 代表初始定时误差, B_s 代表理论码速率, f_c 代表剩余载波, $r(k)$ 为最优星座图分布, $\langle \cdot \rangle$ 表示插值。以 64QAM 信号为例,暂不考虑导致星座图旋转的初相误差,整个过程中的变化如图 5 所示。

$$r(k) = \langle s(a_k) \rangle \times \exp(-j2\pi f_c / F_s \times a_k) \quad (7)$$

$$a_k = \epsilon_f + k \times F_s / B_s, k = 0, 1, 2, \dots, K-1 \quad (8)$$

完成剩余载波补偿及最佳判决时刻选取的过程即是星座图由离散转向收敛的过程,而最优的聚类结果即代表着最收敛的星座图分布。根据信息论相关概念,熵是一种用于评价测量样本集合分布混乱程度的度量,当随机变量分布更广泛或趋向于平均时,信息熵值越大,经典信息熵的定义如式(9)所示。

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log(p(x_i)) \quad (9)$$

其中, $p(x_i)$ 表示随机变量取值为 x_i 的概率。将这一

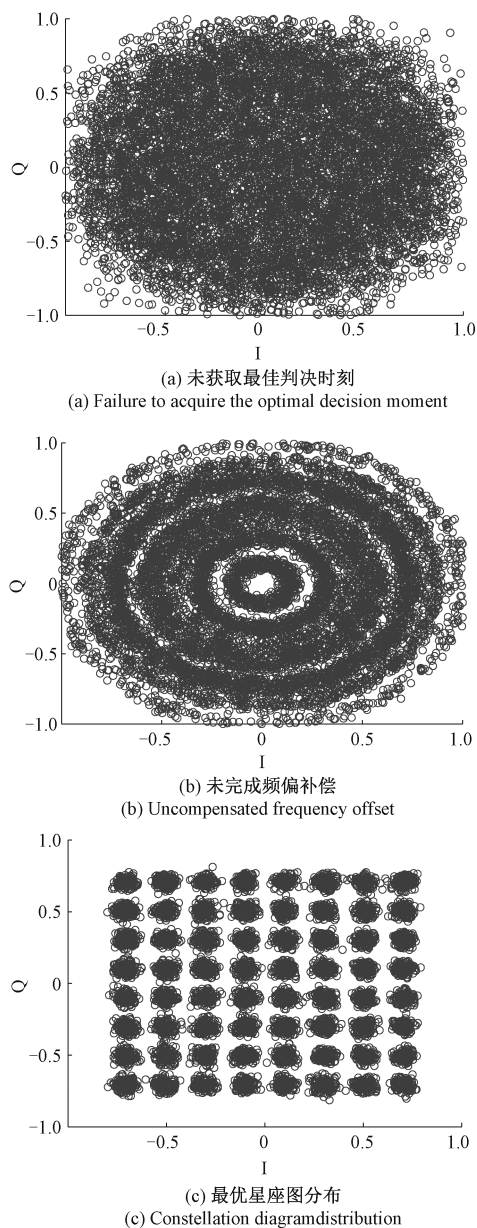


图 5 星座图变化过程

Fig. 5 Changing process of constellation diagram

概念推广到对星座图分布的描述,对于星座图分布,随机变量是指在 IQ 平面上出现的星座点位置。而星座图分布熵是不同位置分布的星座点所包含的信息量,为此本文建立星座分布熵 CEn 的概念来描述星座图的收敛度。

首先将星座图所在的二维平面分为 P 个网格,将星座点进行投影并统计每个网格内星座点个数,记为 $E(p)$,则 CEn 计算方式如下,对于 $E(p) = 0$ 的网格点,不参与计算。

$$CEn = - \sum_{p=1}^P \frac{E(p)}{\sum_{p=1}^P E(p)} \log \frac{E(p)}{\sum_{p=1}^P E(p)} \quad (10)$$

星座分布熵的大小反映的是星座分布的收敛度,分布

越集中则熵值越小,极端情况如所有点分布于一个网格内时的熵为 0。图 5 所对应网格分布图及熵值如图 6 所示,可见随着星座图的收敛,熵值逐渐降低。

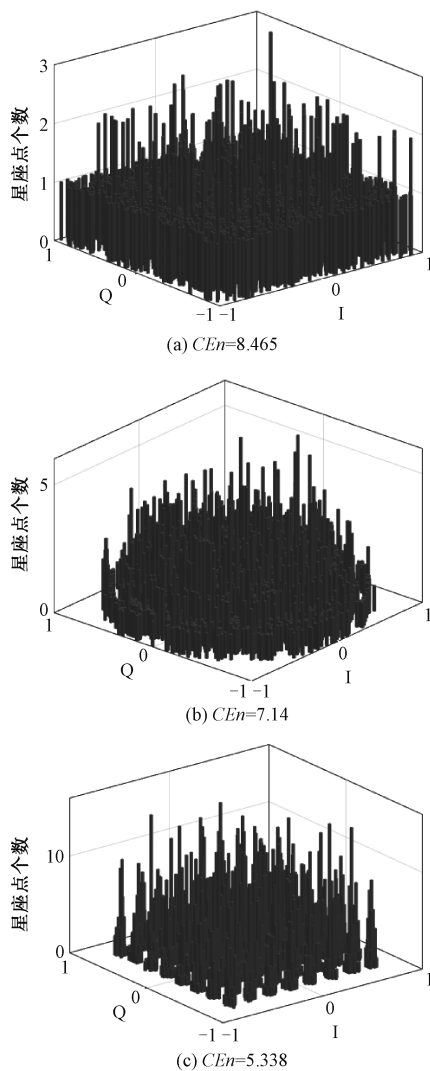


图 6 星座分布熵变化

Fig. 6 Changes of constellation distribution entropy

在对网格划分时,需考虑最高阶调制的星座分布区分性。由于 256QAM 信号的理论星座点在 IQ 维均为 16 行列分布,因此为了避免生成模板时两簇星座点被分到一个网格内,行或列的最小网格数应为 $1/(0.707/32) = 45.2$ 个,取整为 45 个。

影响星座收敛程序的参数包括式(7)、(8)中所列的初始定时误差 ϵ_f , 理论码速率 B_s 及剩余载波 f_c 。在经过 2.1 节预处理后, f_c 已经接近为 0; B_s 与 $\hat{B}_{stmp}$ 之间的差异根据参考文献[14],不高于 0.01%; ϵ_f 的取值范围为一个码元周期;各待估误差取值范围均较小,可采用基于遍历搜索的方式获取各项误差最优估计值。且由于各项误差对熵值的影响相互独立,故本文采用分级+遍历的搜索架构进

行一步降低运算量,在实现 CEn 的最小化同时完成剩余载波估计和最优定时同步,流程如下:

1) 将二维星座图分布区域均匀划分为 $M \times M$ 个网格,由于后续对提取星座点进行了最大值归一,此处 1 维和 Q 维的划分空间均为 $[-1, 1]$;

2) 设定 ϵ_f 的搜索范围 $[0 \quad F_s / \hat{B}_{stmp}]$,并从中均匀选取 N_1 个取值点;

3) 设定 B_s 的搜索范围为 $[\hat{B}_{stmp} - B_{range} \quad \hat{B}_{stmp} + B_{range}]$,并从中均匀选取 N_2 个点;

4) 设定 f_c 的搜索为 $[-f_{range} \quad f_{range}]$,并从中均匀选取 N_3 个点;

5) 固定 B_s 为 $\hat{B}_s$, f_c 为 0,遍历 N_1 个 ϵ_f 的取值点,根据式(7)、(8)共可获得 N_1 组星座图分布,将星座图投影到网格,根据式(10)计算各星座图熵值,选取其中最小熵值对应的定时误差值,记作 $\hat{\epsilon}_f$;

6) 固定 ϵ_f 为 $\hat{\epsilon}_f$, f_c 为 0,遍历 N_2 个 B_s 的取值点,根据式(7)、(8)共可获得 N_2 组星座图分布,将星座图投影到网格,根据式(10)计算各星座图熵值,选取其中最小熵值对应的码速率值,记作 $\hat{B}_s$;

7) 固定 ϵ_f 为 $\hat{\epsilon}_f$, B_s 为 $\hat{B}_s$,遍历 N_3 个 f_c 的取值点,根据式(7)、(8)共可获得 N_3 组星座图分布,将星座图投影到网格,根据式(10)计算各星座图熵值,选取其中最小熵值对应的载波估计值,记作 $\hat{f}_c$;将最小熵值对应的星座图分布序列记为 $\hat{r}(k)$ 。

上述流程结束后,即获得了可用于后续模式匹配的最优聚类星座分布。

2.3 模板匹配盲识别

作为识别中的常用算法,模板匹配的基本思路是将待匹配图像与预设模板进行比较,通过计算相关系数选择最为相似模板,作为识别结果输出,具备抗噪声能力强,易于工程实现的优点,尤其适合具备固定模式特征的识别场景^[15-16]。

将 2.2 节所输出的 $\hat{r}(k)$ 往预设网格进行投影,形成一幅待识别的 $M \times M$ 的灰度图,记为 $S(m_1, m_2)$,灰度值代表该网格内的星座点个数,记录总星座点个数为 Q ;按图 1 中的理论结果,生成 16QAM、32QAM、64QAM、128QAM 及 256QAM 共 5 组星座分布,每组均包含 Q 个星座点,各星座点位置按信号类型均匀分布,进行预设网格投影后得到 5 幅预定义模板,分为记为 $MB_i(m_1, m_2)$, $i = 1, 2, 3, 4, 5$ 。图 7 给出了包含 4 096 个星座点的待识别灰度图(64QAM)及对应的 5 幅模板。

为衡量定义模板与待识别灰度图的相似程度,引入归

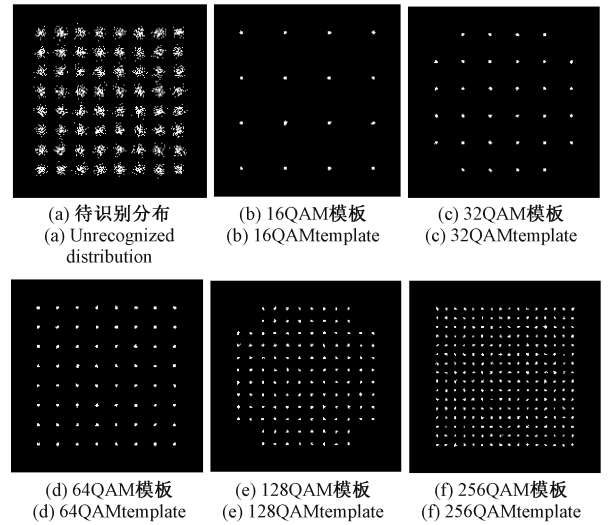


图 7 待识别星座图及模板分布

Fig. 7 Constellation diagram and template distribution

一化相关度 R_{smb} 来进行描述,其定义如式(11)所示,相似程度越高则 R_{smb} 值越大。

$$R_{smb} = \sum_{m_1=1}^M \sum_{m_2=1}^M \frac{S(m_1, m_2) \times MB(m_1, m_2)}{\sqrt{S(m_1, m_2)^2 + MB(m_1, m_2)^2}} \quad (11)$$

影响将待识别灰度图与 5 幅模板分别进行相似度计算,选取其中 R_{smb} 最大的对应模板,即完成了调制样式识别。图 8 给出了 5 幅模板的相似度计算结果,可以看出与 64QAM 模板的相似度远大于其他模板,因此识别结果为 64QAM 信号。

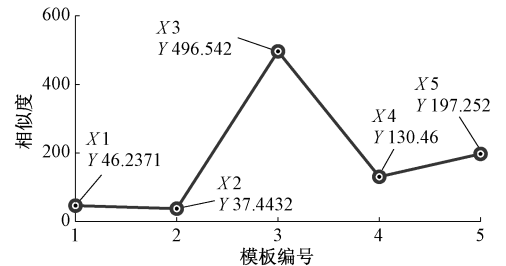


图 8 模板相似度计算结果

Fig. 8 Calculation results of template similarity

需要注意的是,前述最优聚类过程中未考虑初相差,实际得到的星座聚类结果将会围绕中心点随机旋转一个角度,该过程虽不影响熵值的计算结果,但会导致星座分布与预设模板之间出现较大差异,故需要对相位进行补偿。而由于 QAM 信号整体均为方形,因此只需在 $0 \sim \pi/2$ 之间对相位进行搜索,即可在某个相位值时使星座图与模板分布一致。

综上所述,盲识别流程如图 9 所示。

从整个识别流程可以看出,本文所提方法仅需对网格划分进行初始设定,且整个过程中不涉及与预设门限的比较,仅需判定最大最小值即可完成识别,因此受初始参数选择影响很小。

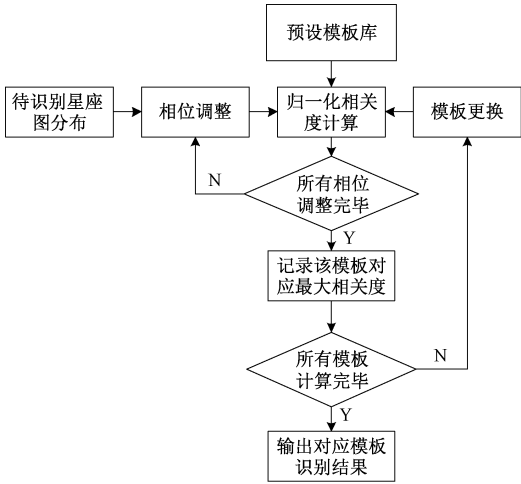


图 9 模板匹配盲识别流程

Fig. 9 Template matching blind recognition process

3 仿真实验

本节的仿真实验将从以下几个方面对算法性能进行全面评估：识别率受信噪比变化的影响，识别率受初始参数选取的影响，识别率受参与识别的码元个数的影响，最后与现有算法进行对比。

采用 MATLAB 软件仿真得到 16QAM、32QAM、64QAM、128QAM 及 256QAM 五种类型的调制信号，其中码速率 B_s 均为 1 Msps，成形选用根升余弦滤波器，滚降因子 α 设置为 0.35，信号载频为 19.2 MHz，原始采样率 25 MHz，信噪比定义为信号带宽内信号与噪声功率之比， P_s 为信号带内功率， N_0 为噪声功率谱密度。

$$SNR = 10 \times \lg \left(\frac{P_s}{N_0 \times B_s \times (1 + \alpha)} \right) \quad (12)$$

仿真信号时长为 100 ms，设定信噪比为 5 dB，根据预处理所述方法对载频、带宽及码速率进行估计，估计结果如表 1 所示。

表 1 预处理参数估计结果

Table 1 Pre-processing parameter estimation results			
信号类型	载频估计值 /MHz	带宽估计值 /MHz	码速率估计 值/sps
16QAM	19.158	1.425	999.95×10^3
32QAM	19.365	1.498	999.95×10^3
64QAM	19.238	1.478	999.95×10^3
128QAM	19.112	1.462	999.94×10^3
256QAM	19.036	1.433	999.95×10^3

可以看出码速率的估计精度可达到 10^{-5} 量级，与文献[14]中结果相符；载频的估计误差为百 KHz，该部分误差反应在下变频后的剩余频偏项中；带宽估计误差也约为百 KHz，但该估计值仅用于低通滤波和数据抽取，故不

影响后续处理。将带宽估计结果按 2.1 节方法乘 1.6，抽取 IQ 数据采样率为 2.5 MHz。

通过仿真加入噪声，并将信噪比从 5 dB 变化到 25 dB，每种信噪比条件下各类调制方式依据前述流程均进行 1 000 次实验，同时为了模拟非合作场景中接收信号受多径或时变信道的影响，每次实验均加入随机相位。实验过程中各项参数设置如下：用于识别的码元个数均为 10 000 个，随机相位分布为 $0 \sim 2\pi$ ，星座图分布区域均匀划分为 100×100 个网格， ϵ_f 的取值点个数 N_1 为 20， f_c 的取值范围为 ± 200 KHz，取值点个数设置为 4 000 个， B_s 的取值范围为 ± 100 sps，取值点个数为 201 个（取区间内整数），得到识别率随信噪比变化如图 10 所示。

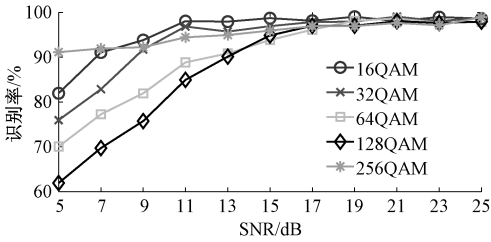


图 10 识别率随信噪比变化

Fig. 10 The recognition rate varies with the SNR

图 10 的结果显示出各类信号的识别率随着信噪比的上升而提高，在 15 dB 的情况下均超过 93%，在相同信噪比条件下信号识别率随 QAM 调制阶数的升高而降低，这是因为高阶调制的理论星座分布对噪声更为敏感，导致模板失配，而 256QAM 的识别率即使在低信噪比条件下依然超过了 90%，这是由于在理论星座分布发散的条件，更容易匹配上自身分布更为发散的模板，也即 256QAM 的模板，其他类型的 QAM 信号在低信噪比条件下也多被识别为了 256QAM 信号也佐证了这一点。实验中所加入的随机相位对识别率无影响，这是由于盲识别流程设计过程中已经考虑了随机相位的引入，通过旋转匹配的方式实现随机相位消除，提升了算法鲁棒性。

接下来分析识别率受网格划分的影响，2.2 节已对最低网格划分进行了分析，此处将网格数从最低的 45×45 变化到 300×300 ，固定信噪比为 20 dB，其他参数不变，识别率变化如图 11 所示。

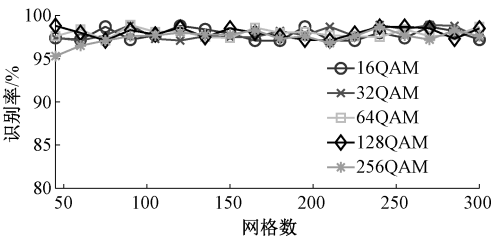


图 11 识别率随网格数变化

Fig. 11 The recognition rate varies with the number of grids

可以看出识别率与网格数划分基本不相关,这主要是熵值的大小关系在网格划分数少时受影响较大,极限情况如只划分一个网格,则所有情况熵值计算均为 0,而在满足最小网格数的基础上,熵值的大小关系并不随网格数的增加有明显的变化。这项实验也说明了本文方法对初始参数选择不敏感的特性。

接下来分析识别率受参与识别的码元个数的影响,固定信噪比为 20 dB,各信号用于识别的码元个数设置为 2 000、4 000、6 000、8 000 及 10 000,其余参数不变,识别率变化如表 2 所示。

表 2 识别率随码元数变化

Table 2 Recognition rate varies with the number of symbols

调制类型	识别率				
	码元数 2 000	码元数 4 000	码元数 6 000	码元数 8 000	码元数 10 000
16QAM	98.0	97.3	99.2	98.6	99.1
32QAM	95.8	96.1	96.8	97.4	98.1
64QAM	93.4	95.9	98.1	99.1	98.7
128QAM	90.6	92.8	94.3	97.7	98.1
256QAM	84.5	89.8	95.6	97.8	97.7

可以看出识别正确率与码元个数呈现正相关,尤其是对于高阶调制该趋势更为明显,这是由于只有在达到一定的码元个数时,QAM 信号的所有幅相分布才能实现概率上的相同分布,否则部分幅相分布的缺失将影响识别,从本文的分析结果来看,用于识别的码元个数应不少于 6 000 个。

最后选取与本文研究对象较为类似的文献[12]进行识别性能及运行时间对比,两算法软件运行平台为 MATLAB R2021a,硬件运行平台 CPU 配置为 I7-4790K,32 G 内存,不同调制类型码元个数均设置为 4 096,随机进行 100 组实验,最后结果取平均。识别性能对比结果如图 12 所示,其中实线为本文方法,虚线为文献[12]方法。

可以看出本文的识别率在中低信噪比条件下有明显提升,15 dB 条件以下时平均识别率提高为 4.8%,其中 64 阶以上的复杂 QAM 调制平均提高超过 7%。这主要是本文采用星座图的整体分布作为模板匹配的输入,相比于文献[12]中先聚类,再提取间接特征的方式更能反映出不同调制之间的本质差异,且文献[12]识别过程中载频及波特率均设定为理论值,实际中若将该部分误差考虑在内,性能提升将更加明显。

运行时间对比结果如表 3 所示,可以看出本文方法对不同类型调制识别的时间消耗均小于文献[12]中方法,这主要是不同于文献[12]的序贯识别流程,本文采用模板匹配的方法对所有调制类型进行统一识别,简化了处理流程,且模板的生成不依赖于训练数据,可预先存储于内存中,提高了运算效率。

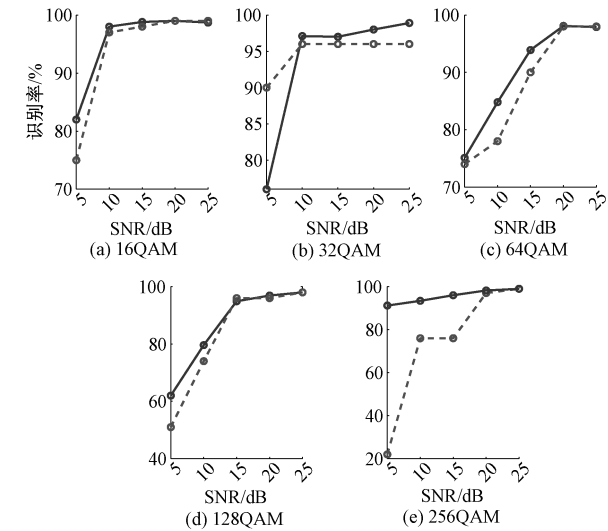


图 12 识别率对比结果

Fig. 12 Comparison results of recognition rates

表 3 运行时间对比结果

Table 3 Comparison results of running time ms

信号类型	本算法运行时间	文献[12]算法运行时间
16QAM	1.34	4.15
32QAM	1.28	6.54
64QAM	1.46	7.89
128QAM	1.54	6.77
256QAM	1.64	7.92

4 结 论

本文提出了一种基于星座模式匹配的 QAM 信号调制盲识别算法,核心思想是建立和优化星座分布熵以实现星座图的最优聚类,在此基础上通过与预设模板的匹配完成调制样式识别,适应调制类型包括 16QAM、32QAM、64QAM、128QAM 及 256QAM。本文在识别过程中不需要预先知道信号的波特率、载波频率等参数,同时通过星座分布熵对不同 QAM 信号的本质特征进行描述,且模板的生成不依赖于训练数据,鲁棒性好,抗噪能力强;实验结果表明该方法识别性能和运行时间较现有方法均有明显提升,且最优聚类的过程受初始参数选择影响很小,有效避免了传统聚类方法中心点个数选取敏感、结构复杂的问题,易于工程实现。后续工作将研究 PSK 等数字调制信号的识别,进一步扩大本文所提方法的应用范围。

参考文献

[1] DROZD J, RAK L, ZAHRADNÍČEK P, et al. Effectiveness evaluation of aerial reconnaissance in battalion force protection operation using the constructive simulation[J]. The Journal of Defense Modeling and Simulation, 2023, 20(2): 181-196.

- [2] 钱磊, 吴昊, 乔晓强, 等. 基于特征融合的调制识别增强与迁移演化[J]. 电子测量技术, 2022, 45(18): 153-160.
QIAN L, WU H, QIAO X Q, et al. Modulation recognition enhancement and migration evolution based on feature fusion[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(18): 153-160.
- [3] YAN L Y, SHI Y, WEI M H, et al. Multi-feature fusing local directional ternary pattern for facial expressions signal recognition based on video communication system[J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 63(3): 307-320.
- [4] 贾鑫, 蒋磊, 郭京京, 等. 基于深度聚类的通信辐射源个体识别方法[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(1): 115-122.
JIA X, JIANG L, GUO J J, et al. A communication emitter identification method based on deep clustering[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(1): 115-122.
- [5] LEE S S. Satellite constellation method for ground targeting optimized with K-means clustering and genetic algorithm[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 129(2): 107-119.
- [6] XIAO H, HUA Y, CHEN Q, et al. Constellation mapping design using K-means clustering for analog joint source-channel coding based on Shannon-Kotel'nikov mappings[C]. IET Radar Sonar&Navigation, 2023(4): 116-124.
- [7] 陈丹, 王晨昊, 姚伯羽. 基于模糊聚类与 BP 神经网络的无线光副载波调制识别[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 61-66.
CHEN D, WANG CH H, YAO B Y. Modulation recognition of wireless optical subcarrier based on fuzzy clustering and back propagation neural net[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 61-66.
- [8] 崔旭, 熊刚. 一种基于星座图模糊分析的数字调制识别方法[J]. 通信技术, 2016, 49(9): 1155-1158.
CUI X, XIONG G. Digital modulation recognition based on constellation diagram fuzzy analysis[J]. Communications Technology, 2016, 49(9): 1155-1158.
- [9] 刘一非, 吴亮, 张在琛, 等. 基于星座点聚类和变换模式匹配的定时同步算法[J]. 无线电通信技术, 2022, 48(2): 284-290.
LIU Y F, WU L, ZHANG Z CH, et al. Timing synchronization algorithm based on constellation clustering and transform pattern matching[J]. Radio Communications Technology, 2022, 48(2): 284-290.
- [10] IYAD K, KHALEGHI H B. The discrimination algorithms for overlapped MPSK and MQAM modulations using higher-order cumulates[J]. Physical Communication, 2022, 55(3): 75-83.
- [11] LI Z R, WANG Q L, ZHU Y F, et al. Automatic modulation classification for MASK, MPSK, and MQAM signals based on hierarchical self-organizing map[J]. Sensors, 2022, 22(17): 6449-6449.
- [12] 张华娣, 楼华勋. MQAM 信号调制方式自动识别方法[J]. 通信学报, 2019, 40(8): 200-211.
ZHANG H D, LOU H X. Automatic modulation recognition algorithm for MQAM signal[J]. Journal on Communications, 2019, 40(8): 200-211.
- [13] TERMOS H, MANSOUR A. Concurrent M-QAM transmission performance assessment in a combined four SOA-MZIs arrangement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 176(7): 108-110.
- [14] 刘莹, 单洪, 胡以华, 等. 基于谱分析的卫星通信调制识别算法[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(1): 45-48, 53.
LIU Y, SHAN H, HU Y H, et al. Automatic recognition based on spectral feature in satellite communication[J]. Fire Control & Command Control, 2017, 42(1): 45-48, 53.
- [15] 孙备, 孙晓永, 钱翰翔, 等. 动态大视角场景融合帧间信息与模板匹配的低慢小无人机目标检测[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(7): 64-74.
SUN B, SUN X Y, QIAN H X, et al. Low slow small UAV targets detection by fused using inter-frame information and template matching in dynamic large-view scene[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(7): 64-74.
- [16] 严成宸, 金施群, 闫真真, 等. 结合加权模板差图与双边滤波的 TFT-LCD 检测算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(9): 1434-1440.
YAN CH CH, JIN SH Q, YAN ZH ZH, et al. TFT LCD detection algorithm combining weighted template difference image and bilateral filtering[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(9): 1434-1440.

作者简介

韩勋(通信作者), 博士, 高级工程师, 主要研究方向为辐射源目标识别与定位、雷达信号处理等。

E-mail: andyhanxun@126.com

郑佳, 硕士, 工程师, 主要研究方向为非合作信号处理、硬件系统设计等。

E-mail: jiazheng_163@126.com

冯鑫, 硕士, 工程师, 主要研究方向为非合作信号处理、硬件系统设计等。

E-mail: fengxin56@126.com

匡银, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为辐射源目标识别与定位、雷达信号检测与测量、高速数据传输等。

E-mail: kuang_5312@163.com

文伟, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为辐射源目标识别与定位、雷达信号处理等。

E-mail: wenwei_8114@126.com