

MQAM 信号调制方式自动识别方法

张华娣¹, 楼华勋^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第三十六研究所, 浙江 嘉兴 314033; 2. 通信信息控制和安全技术重点实验室, 浙江 嘉兴 314033)

摘要: 提出了一种实现 MQAM 信号调制方式自动识别的方法。首先通过四阶累积量构造特征参数 F , 实现方形 QAM 和十字形 QAM 的识别, 通过计算零中心归一化瞬时幅度紧致性, 把 16QAM 从方形 QAM 中识别出来。然后, 通过信号包络平方的频谱估算出波特率, 结合定时同步, 消除 ISI 码间干扰, 恢复出较理想的星座图。接着, 针对 32QAM 和 128QAM 设置不同的聚类半径, 用减法聚类算法求出聚类点及其密度值, 通过计算不同半径下的聚类点密度值的差异进行类型判断, 同理, 进行 64QAM 和 256QAM 信号的分类。所提方法不需要载频和波特率等先验信息, 能完成 16QAM、32QAM、64QAM、128QAM、256QAM 信号的自动识别, 并且没有复杂的迭代过程, 可以应用于实际信号的调制识别。

关键词: 四阶累积量; 零中心归一化瞬时幅度紧致性; 减法聚类; MQAM; 自动识别

中图分类号: TN911

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019168

Automatic modulation recognition algorithm for MQAM signal

ZHANG Huadi¹, LOU Huaxun^{1,2}

1. No.36 Research Institute of CETC, Jiaxing 314033, China

2. Science and Technology on Communication Information Security Control Laboratory, Jiaxing 314033, China

Abstract: An automatic modulation recognition algorithm for MQAM signal was proposed. Firstly, the feature parameter F based on the fourth order cumulants was constructed to classify the square QAM and the cross QAM. Secondly, the compactness of zero center normalized instantaneous amplitude was calculated to identify the 16QAM from the square QAM. Thirdly, the baud rate was estimated by frequency spectrum of amplitude square, and timing was synchronized to delete the ISI and resume the relatively ideal constellations. And aiming at the 32QAM and the 128QAM, two different clustering radii were set, and clustering point density was got respectively by the subtractive clustering algorithm, and then the 32QAM and the 128QAM was classified depending on the difference of density value. In the same way, the 64QAM and the 256QAM were classified. The proposed algorithm can recognize five kinds of QAM signals, including 16QAM signals, 32QAM signals, 64QAM signals, 128QAM signal and 256QAM signal without prior knowledge of frequency and baud rate. Furthermore, the proposed algorithm does not need complex iterative process, which can be applied in practical signal recognition.

Key words: fourth-order cumulant, compactness of zero center normalized instantaneous amplitude, subtractive clustering, MQAM, automatic recognition

1 引言

QAM (quadrature amplitude modulation) 主要是通过两路正交载波的多种幅度来携带符号信息, 因正交幅度调制具有多元的特性, 又可记为 MQAM。在正交幅度调制技术中, 2 个支路的幅度

具有多种取值, 合成信号的相位以及幅度具有多种组合, 星座图映射时以信号星座点之间的最小距离最大化为原则^[1]。QAM 是一种高性能数字调制技术, 近几十年来一直在发展创新, 并因频谱利用率高和抗干扰能力强等优点广泛应用于各种有线通信、无线通信场合^[2], 因此对其各阶调制的自动识

收稿日期: 2018-09-13; 修回日期: 2019-06-28

别具有很高的实用意义,但是通过阅读大量文献,发现专门针对 QAM 信号特别是高阶 QAM 信号调制方式识别的研究比较少。文献[3]提出了一种基于通带 QAM 信号的调制方式识别方法,该方法在通带内利用 Hilbert 变换提取瞬时包络,然后统计瞬时能量分布向量作为特征向量来实现调制方式分类,该方法需要用到遗传算法对划分向量进行优化,并且需要用参考样本进行训练,计算量较大。文献[4]将特征参数和信号降阶算法相结合,该方法对恢复信号的幅度和相位要求很高,但是在盲识别的情况下,预处理得到的星座图很难和原星座图完全匹配,出现相偏的情况是很普遍的。文献[5]使用各阶 QAM 信号包络平方的方差的理论值作为特征参数进行 MQAM 信号类内识别,该算法需要对信噪比进行精确估计,不利于工程实现。文献[6]利用 QAM 信号矢量图中最小环带的方差,完成 5 种 QAM 信号调制方式的识别,没有对高阶 128QAM 和 256QAM 信号进行讨论。文献[7]提出了利用信号星座点平均幅度半径的统计,实现 QAM 类内识别,但是只针对 16QAM 和 64QAM 信号。文献[8]使用四阶矩和减法聚类算法对 8QAM、16QAM、64QAM 和 128QAM 信号进行识别,但是没有对 32QAM 和 256QAM 进行识别。

文献[9]用减法聚类的方法恢复星座图及确定星座图的点数,从而完成 QAM 信号的识别,但该方法只适用于进制数低于 64 的 QAM 信号。本文受到了文献[9]减法聚类方法的启发,提出通过对 32QAM 和 128QAM,以及 64QAM 和 256QAM 信号设置不同的聚类半径,计算聚类点的密度值之和的差异来进行类型的判别。同时结合文献[10]对方形 QAM 和十字形 QAM 分类的方法以及利用零中心归一化瞬时幅度紧致性对 16QAM 识别的方法,完成了 16QAM、32QAM、64QAM、128QAM、256QAM 信号的自动识别。

2 QAM 信号模型

接收端幅相调制信号模型表示为

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

$$\alpha_i = \sqrt{S_i} e^{j\varphi_i}$$

$$S_i = \sqrt{\alpha_{i,I}^2 + \alpha_{i,Q}^2}$$

$$\varphi_i = \arctan \frac{\alpha_{i,Q}}{\alpha_{i,I}} \quad (1)$$

其中, $r(t)$ 为接收信号; $g(t)$ 为成形滤波器的冲击响应; 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; α_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 α_i 的幅度和相位; $\omega(t)$ 为均值为零且单边功率谱密度为 N_0 的平稳加性高斯噪声。

3 QAM 信号分类

QAM 信号根据星座图的形状可以分为方形 QAM 和十字形 QAM。图 1 为 16QAM、32QAM、64QAM、128QAM、256QAM 的星座图。

从图 1 可以看出,16QAM、64QAM 和 256QAM 的星座图是方形的,属于方形 QAM 信号;32QAM 和 128QAM 的星座图是十字形的,属于十字形 QAM 信号。

4 QAM 信号识别方法

4.1 四阶累积量

信号的瞬时特征统计量反映的是信号的二阶统计特性,而信号的调制特点还反映在信号的高阶统计特性上,因此,在信号调制识别中还经常用到信号的高阶统计量作为特征参数^[11]。又由于高斯噪声大于二阶的累积量恒为零,把接收到的含有高斯噪声的非高斯信号变换到累积量域处理,就可以剔除噪声的影响,而信号的各阶累积量又取决于信号的调制方式,因此可以利用接收到的带有高斯白噪声的信号的高阶累积量来建立识别参数,不但可以很好地抑制高斯噪声,而且可以识别其调制方式,具体要使用什么阶数的统计量依赖于具体问题。

假设 $s^*(k)$ 表示信号的复共轭, M_{pq} 表示信号各阶矩,定义^[12]

$$M_{pq} = E[x(k)^{p-q} (x^*(k))^q] \quad (2)$$

其中, $E(\cdot)$ 表示取平均值,则有

$$C_{20} = \text{Cum}[s(k), s(k)] = M_{20} \quad (3)$$

$$C_{40} = \text{Cum}[s(k), s(k), s(k), s(k)] = M_{40} - 3M_{20}^2 \quad (4)$$

$$C_{42} = \text{Cum}[s(k), s(k), s(k)^*, s(k)^*] = M_{42} - M_{20}^2 - 2M_{21}^2 \quad (5)$$

$$C_{63} = \text{Cum}[s(k), s(k), s(k), s(k)^*, s(k)^*, s(k)^*] = M_{63} - 6M_{41}M_{20} - 9M_{21}M_{42} + 18M_{21}M_{20}^2 + 12M_{21}^3 \quad (6)$$

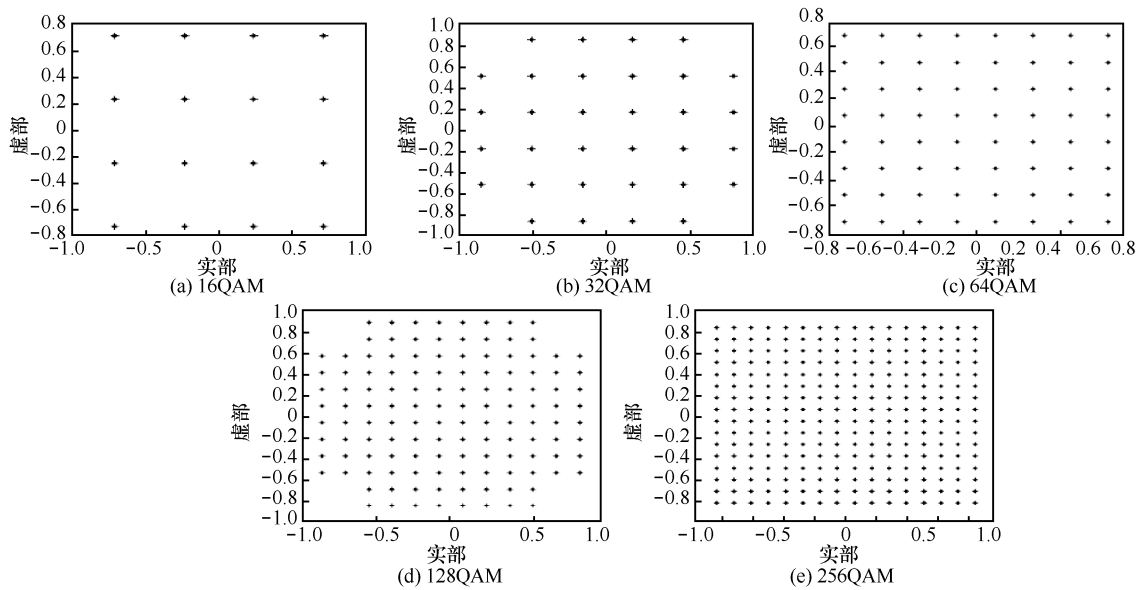


图 1 QAM 信号星座图

表 1 列出了 16QAM、32QAM、64QAM、128QAM、256QAM 信号对应的各阶累积量的理论值。

信号类型	$ C_{20} $	$ C_{40} $	$ C_{42} $	$ C_{63} $
16QAM	0.000 0	0.680 0	0.680 0	2.080 0
32QAM	0.000 0	0.190 0	0.690 0	2.110 0
64QAM	0.000 0	0.619 0	0.619 0	1.797 2
128QAM	0.000 0	0.181 4	0.657 4	1.959 4
256QAM	0.000 0	0.604 7	0.604 7	1.734 5

从表 1 可以看出,16QAM 和 32QAM 信号的四阶累积量 $|C_{40}|$ 理论值相差较大,而 64QAM 和 256QAM 的四阶累积量 $|C_{40}|$ 的理论值与 16QAM 的四阶累积量 $|C_{40}|$ 接近,并且 128QAM 的四阶累积量 $|C_{40}|$ 的理论值与 32QAM 的四阶累积量 $|C_{40}|$ 接近,因此理论上用这个参数直接就可以对方形 QAM 信号(包括 16QAM、64QAM 和 256QAM 信号)和十字形 QAM 信号(包括 32QAM 和 128QAM 信号)进行区分,而在实际应用中考虑到使用的特征参数的顽健性和通用性,也就是说,使用的参数对信号星座图伸缩具有不变性,并且与接收信号功率无关,考虑多使用一个参数 $|C_{42}|$,与 $|C_{40}|$ 进行比值处理,从而构造了特征参数 F ,其定义如式(7)所示。

$$F = \left| \frac{C_{40}}{C_{42}} \right| \quad (7)$$

用 Matlab 软件在 5 dB、10 dB、15 dB、20 dB、

25 dB 和 30 dB 信噪比下各随机产生 100 组根升余弦成形 ($\alpha = 0.3$) 处理后的 16QAM、32QAM、64QAM、128QAM、256QAM 信号,分别进行特征参数 F 统计估计,得到的 F 随信噪比变化曲线如图 2 所示。其中,每组信号 4 096 个码元,每个码元 10 个采样点。从图 2 可以看出,16QAM、64QAM 和 256QAM 信号的特征参数 F 值趋近于 1,而 32QAM 和 128QAM 信号的特征参数 F 值小于 1,用此特征参数很容易对方形 QAM 信号和十字形 QAM 信号进行分类。

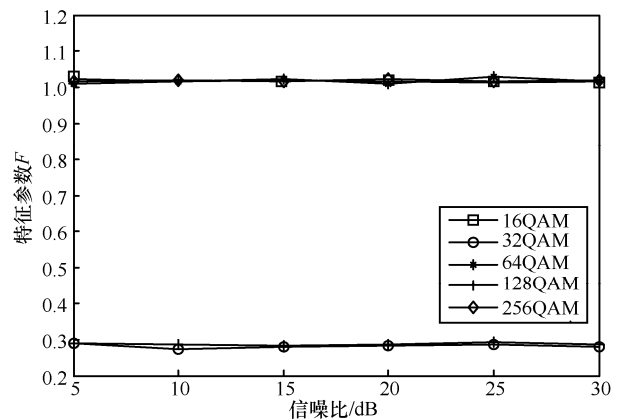


图 2 特征参数 F 随信噪比的变化曲线

4.2 零中心归一化瞬时幅度紧致性

QAM 信号调制信息不仅体现在相位变化上,同时也体现在信号幅度变化上。由于 QAM 信号相位变化种类较多,不宜用来进行 QAM 信号类内识别。下面从方形 QAM 信号的幅度分布入手,对其

分布规律进行研究。

在理想条件下, 16QAM信号幅度取值个数为3, 64QAM信号幅度取值个数为9, 256QAM信号幅度取值个数为32, 对各阶方形QAM信号幅度进行最大值归一化, 得到各方形QAM信号幅度及各幅度概率分布对应关系如表2~表4所示。从表2~表4可知, 各阶方形QAM信号的幅度分布存在差异性。

表 2 16QAM 信号幅度及各幅度概率分布对应关系

幅度	概率分布
0.333 3	0.25
0.745 4	0.5
1.000 0	0.25

表 3 64QAM 信号幅度及各幅度概率分布对应关系

幅度	概率分布
0.142 8	0.064 7
0.319 4	0.124 3
0.428 6	0.061 3
0.515 1	0.119 6
0.589 0	0.124 5
0.714 3	0.186 0
0.769 4	0.121 8
0.869 0	0.131 3
1.000 0	0.066 4

文献[13]提到零中心归一化瞬时幅度紧致性特征参数反映了瞬时幅度分布的密集性, 可以用该参数来反映各阶方形 QAM 信号的幅度分布的差异性。零中心归一化瞬时幅度紧致性定义如式(8)所示。

$$\mu_{42}^{\alpha} = \frac{E[\alpha_{cn}^4(n)]}{\{E[\alpha_{cn}^2(n)]\}^2} \quad (8)$$

其中, $\alpha_{cn}(n)$ 为零中心归一化瞬时幅度。

用 Matlab 软件在 5 dB、10 dB、15 dB、20 dB、25 dB 和 30 dB 信噪比下各随机产生 100 组根升余弦成形处理 ($\alpha = 0.3$) 后的各阶 QAM 信号, 分别进行特征参数 μ_{42}^{α} 统计估计, 得到的 μ_{42}^{α} 随信噪比变化曲线, 如图 3 所示。其中, 每组信号 4 096 个码元, 每个码元 10 个采样点。

从图 3 可以看出, 64QAM 和 256QAM 的零中心归一化瞬时幅度紧致性的统计值比较接近, 不宜用该特征参数进行两者的区分, 但是, 16QAM 信号的零中心归一化瞬时幅度紧致性的统计值明显

比 64QAM 和 256QAM 的小, 因此, 可以通过此参数将 16QAM 从方形 QAM 中分离出来。

表 4 256QAM 信号幅度及各幅度概率分布对应关系

幅度	概率分布
0.066 7	0.015 6
0.149 1	0.031 3
0.200 0	0.015 6
0.240 4	0.031 3
0.274 9	0.031 3
0.333 0	0.046 9
0.359 0	0.031 3
0.405 5	0.031 3
0.426 9	0.031 3
0.447 2	0.031 3
0.466 7	0.015 6
0.485 3	0.031 3
0.520 7	0.031 3
0.537 5	0.062 5
0.569 6	0.031 3
0.600 0	0.015 6
0.614 6	0.062 5
0.628 9	0.031 3
0.656 6	0.031 3
0.670 0	0.031 3
0.696 0	0.031 3
0.708 7	0.031 3
0.721 1	0.031 3
0.733 3	0.015 6
0.745 4	0.062 5
0.780 3	0.031 3
0.802 8	0.031 3
0.824 6	0.031 3
0.866 7	0.015 6
0.876 9	0.031 3
0.935 7	0.031 3
1.000 0	0.015 6

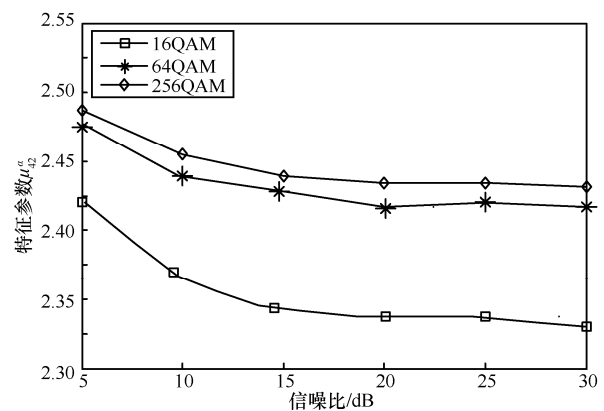


图 3 特征参数 μ_{42}^{α} 随信噪比的变化曲线

4.3 聚类点密度值差异判别法

4.3.1 减法聚类算法

假设有 N 个数据 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, 将每一个数据点作为一个潜在的聚类中心, 计算每个点的密度, 密度定义为

$$D_i = \sum_{j=1}^N \exp \left[-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{k_1 \left(\frac{r_a}{2}\right)^2} \right] \quad (9)$$

其中, $\|\cdot\|$ 为欧氏距离; r_a 为正常数, 表示数据间的邻域半径; k_1 表示不同类型调制信号的调整权值。取具有最大密度值的点为第一个聚类中心, 用 x_{c_1} 代表第一个聚类中心点, D_{c_1} 为其密度。为了避免所选出的中心过于集中, 需要剔除在其周围密度大的点, 因此找出第一个中心之后将所有点 x_i 的密度指标重新更新, 其更新式为

$$D_i = D_i - D_{c_1} \exp \left[-\frac{\|x_i - x_{c_1}\|^2}{k_2 \left(\frac{r_b}{2}\right)^2} \right], i=1, 2, \dots, N \quad (10)$$

其中, 正常数 r_b 定义了一个使密度指标显著减小的邻域, 这样使靠近第一个聚类中心 x_{c_1} 的数据点的密度指标明显下降, 减小其作为下一个聚类中心的可能性, k_2 表示不同类型调制信号的调整权值。选取更新后具有最大密度值的点作为第二个聚类中心 x_{c_2} , D_{c_2} 为其密度值。依次类推, 可以得到第 k 阶聚类中心 x_{c_k} 和密度值 D_{c_k} 。

4.3.2 邻域半径设置

减法聚类算法中, 有 2 个常数 (r_a 和 r_b) 是未知的, 这 2 个常数的大小如何设定是该算法的难题。在调制样本已知的情况下, 可以通过计算机仿真方法选取, 但在调制阶数值未知的情况下, 无法找到一个合适的常数 r_a , 满足高阶和低阶调制信号都可使用减法聚类算法。当以低阶调制为准选择 r_a 值时, 减法聚类对高阶调制分离性比较差; 当以高阶调制为准选择 r_a 值时, 减法聚类对低阶调制的聚合性比较差。由此可见, 选用单一的聚类半径并不能很好地解决 2 种信号的分类型识别。由此, 针对不同的调制方式对应的理论最大聚类半径对 r_a 和 r_b 进行设置, 假设 MQAM 信号的水平方向的星座点对应的最大距离为 L , 由图 1 可知, 32QAM 信号相邻 2

个星座点的距离为 $\frac{L}{5}$, 64QAM 信号相邻 2 个星座点的距离为 $\frac{L}{7}$, 128QAM 信号相邻 2 个星座点的距离为 $\frac{L}{11}$, 256QAM 信号相邻 2 个星座点的距离为 $\frac{L}{15}$, 由 2 个星座点之间的距离来确定最大聚类半径, 则 32QAM、64QAM、128QAM 和 256QAM 对应的 r_a 和 r_b 可以分别设置为 $\frac{L}{5}$ 、 $\frac{L}{7}$ 、 $\frac{L}{11}$ 和 $\frac{L}{15}$ 。

4.3.3 密度差异判别法

文献[14]提出, 假设当前聚类星座图为待识别信号中最简单的星座结构, 以相应的邻域半径进行减法聚类。如果聚类正确, 聚类点数必定不大于星座点数; 反之, 说明当前假设不正确, 继续假设当前聚类星座图为较复杂的星座图结构, 进行下一轮减法聚类, 依次类推, 直到聚类点数小于或等于当前假设的星座图中的点数。

但是, 对于不同信噪比情况下, 用文献[14]提到的判断聚类点数小于当前假定的星座图中的点数的方法时, 需要根据信噪比来调整 r_a 和 r_b 的大小, 这显然增加了算法的难度, 不利于工程实现。由此, 本文使用普适性更强的密度差异判别法来进行信号类型的判断。假设要识别的信号属于十字形 QAM 信号 (32QAM 或 128QAM), 分别设置聚类半径为 $\frac{L}{5}$ 和 $\frac{L}{11}$, 用减法聚类算法进行聚类, 分别得到 2 种聚类中心点, 根据式(9)每个聚类中心点对应一个密度值, 在假设正确的情况下, 得到的聚类点的密度值之和必然是最大的, 由此, 根据算出的 2 个聚类点的密度值之和的差异就可以对 32QAM 或 128QAM 信号进行判断。同理, 对于 64QAM 或 256QAM 信号, 分别设置聚类半径为 $\frac{L}{7}$ 和 $\frac{L}{15}$, 用同样的方法可以进行类型判别。

5 自动识别流程

识别步骤如下。

- 1) 对采样信号进行频率粗估计, 然后根据估计的频率进行正交下变频。
- 2) 对正交下变频后的信号进行频率的精确估计, 可用四次方谱和三点法得到精确估计的载频值, 具体见文献[15], 用估计到的载频值来消除载

波的影响。

3) 估计信号带宽, 并进行低通滤波, 以减小噪声引起的相位抖动, 具体见文献[9]。

4) 计算特征参数 F , 设置门限参数 0.635, 计算出的特征参数 F 的值大于该门限的信号判断为方形 QAM 信号, 否则为十字形 QAM 信号。

5) 若判断为方形 QAM 则执行步骤 6), 否则直接执行步骤 8)。

6) 对信号的信噪比进行粗略估计, 当信噪比小于 8 dB 时, 设置零中心归一化瞬时幅度紧致性特征参数门限为 2.43; 当信噪比为 8~12 dB 时, 设置门限为 2.40; 当信噪比大于 12 dB 时, 设置门限为 2.38。

7) 计算零中心归一化瞬时幅度紧致性特征参数, 计算出来的 μ_{42}^{α} 与门限进行对比, 小于门限的信号判断为 16QAM 信号, 识别结束; 否则, 执行步骤 8)。

8) 通过包络的平方来求取波特率, 估计定时误差, 在最佳采样点进行定时取样得到较为理想的星座图, 具体插值滤波和解卷方法可见文献[16]。

9) 若为十字形 QAM, 则分别设置邻域半径为 $\frac{L}{5}$ 和 $\frac{L}{11}$, 并计算 2 种邻域半径下的聚类中心及其密度值之和。如果邻域半径为 $\frac{L}{5}$ 对应的密度值之和较大, 则判断为 32QAM; 否则, 判断为 128QAM。

10) 若为方形 QAM, 则分别设置邻域半径为 $\frac{L}{7}$ 和 $\frac{L}{15}$, 并计算 2 种邻域半径下的聚类中心及其密度值之和。如果邻域半径为 $\frac{L}{7}$ 对应的密度值之和较大, 则判断为 64QAM; 否则, 判断为 256QAM。

6 仿真实验

实验 1 用 Matlab 软件分别产生信噪比 20 dB 的 16QAM、32QAM、64QAM、128QAM、256QAM 信号各一组, 根升余弦成形滤波器 $\alpha = 0.3$, 信号实际载频为 1 MHz, 采样率为 10 MHz, 码元速率为 250 kHz。通过 Matlab 软件对这 5 种信号的自动识别流程进行仿真, 仿真内容和结果如下。

图 4 为 5 种信号的调制波形图。通过对仿真信号求 FFT, 取幅度最大值的方法进行频率估计。

图 5 为 5 种信号根据粗估计的频率进行正交下变频后的波形图。通过三点法对正交下变频之后的信号做频谱精确估计。通过对正交下变频之后的信号做功率谱, 以低于最大功率 3 dB 为准则进行带宽估计。

图 6 为 5 种信号正交下变频后并进行低通滤波后的波形图。根据式(7)对正交下变频并低通滤波之后的信号进行特征参数 F 的计算。表 5 为 5 种信号的频率粗估计值、频率精确估计值、带宽估计值和特征参数 F 。

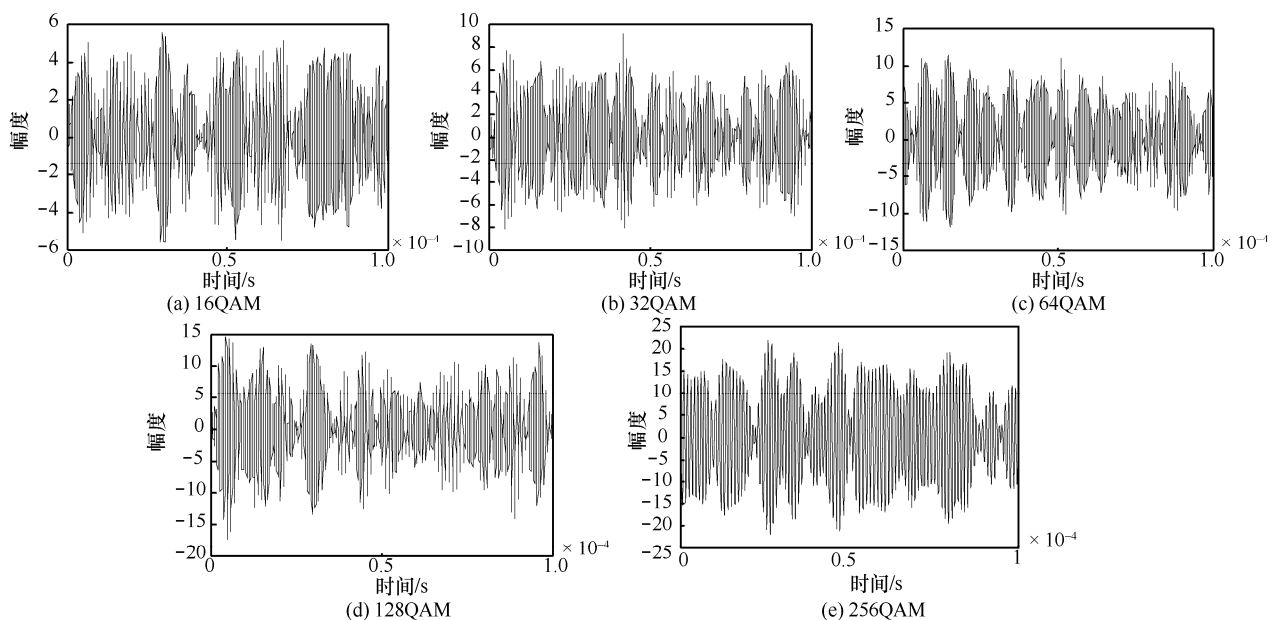


图 4 5 种信号调制波形

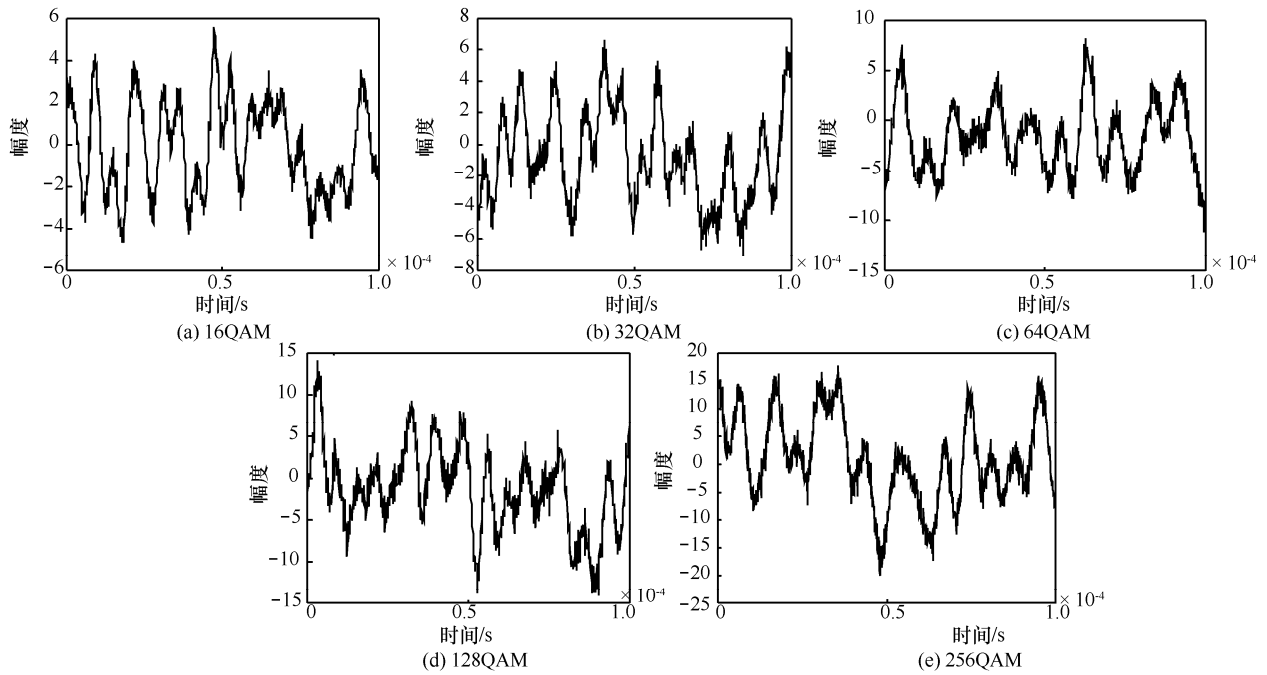


图 5 5 种信号正交下变频后波形

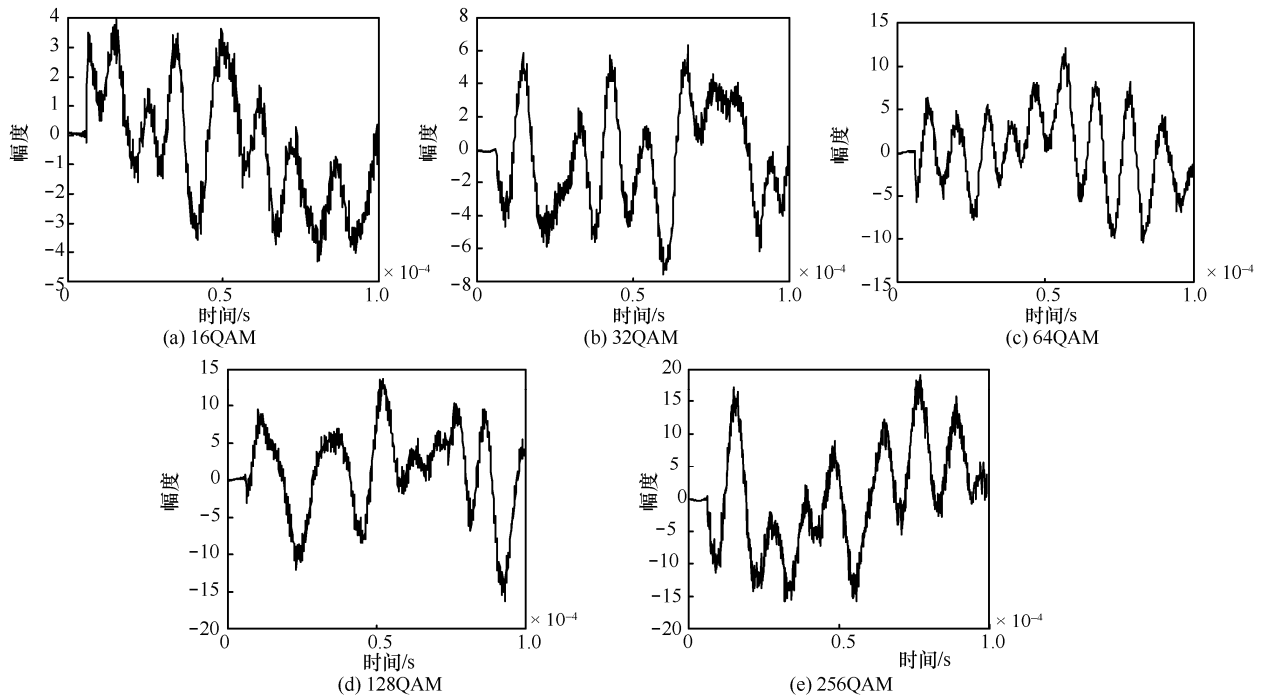


图 6 5 种信号低通滤波后波形

表 5 频率粗估计值、频率精确估计值、带宽估计值和特征参数 F

信号类型	频率粗估计值/MHz	频率精确估计值/MHz	带宽估计值/MHz	特征参数 F
16QAM	0.951 8	0.999 995	0.284 73	0.983 5
32QAM	1.009 5	1.000 002	0.288 15	0.287 3
64QAM	1.030 0	1.000 000	0.293 58	1.018 7
128QAM	1.046 0	0.999 996	0.291 75	0.215 7
256QAM	1.077 6	0.999 999	0.286 93	0.983 0

结合表 5 和自动识别流程步骤 4), 16QAM、64QAM 和 256QAM 的特征参数 F 的值大于该门限, 判断为方形 QAM 信号, 32QAM 和 128QAM 被判断为十字形 QAM 信号。

根据式(8)对正交下变频并低通滤波之后的信号进行中心归一化瞬时幅度紧致性特征参数的计算, 表 6 为 16QAM、64QAM 和 256QAM 信号的零中心归一化瞬时幅度紧致性特征参数。

表 6 零中心归一化瞬时幅度紧致性特征参数

信号类型	零中心归一化瞬时幅度紧致性特征参数
16QAM	2.359 0
64QAM	2.502 5
256QAM	2.452 9

结合表 6 和步骤 7), 16QAM 信号被正确区分出来, 同时, 64QAM 和 256QAM 信号进入步骤 8) 继续识别。

通过求取正交下变频并低通滤波之后的信号的包络的平方的功率谱, 取相应的最大值对应频率点的方法求取信号的波特率, 表 7 为 32QAM、64QAM、128QAM 以及 256QAM 信号的波特率。

由表 7 估计的波特率结合实际信号采样率, 可以得到每个符号的实际采样点数, 再结合基于过零检测的定时误差算法, 可得到每个符号的定时误差估计值, 通过定时误差估计值来控制内插滤波器对采样得到的信号样本值进行插值运算, 从而得到信号在最佳采样时刻的近似值。

表 7 波特率

信号类型	波特率/Hz
32QAM	250 000
64QAM	250 000
128QAM	250 000
256QAM	250 000

图 7 为 32QAM、64QAM、128QAM 以及 256QAM 信号在最佳采样点进行定时取样得到的较为理想的星座图仿真结果。

根据 4.3.2 节邻域半径计算方法, 首先要得到 MQAM 信号的水平方向的星座点对应的最大距离 L , 表 8 为 32QAM、64QAM、128QAM 以及 256QAM 信号的水平方向的星座点对应的最大距离 L 的估计值。

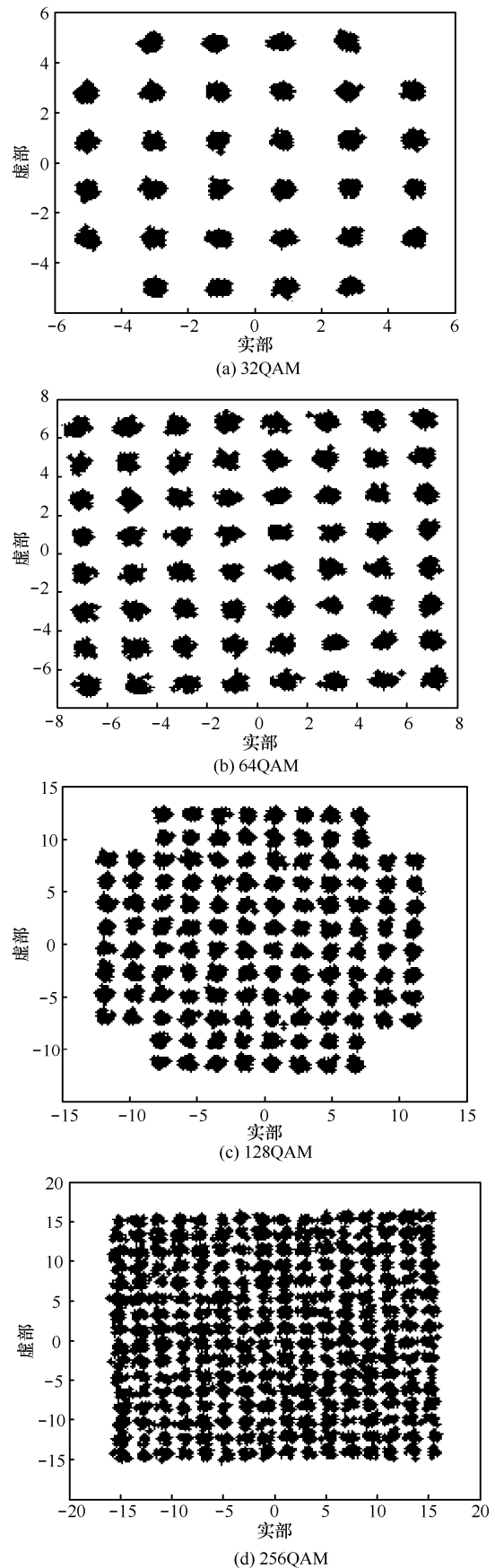


图 7 4 种信号恢复星座图

表 8 最大距离 L

信号类型	最大距离 L
32QAM	5.296 8
64QAM	7.535 1
128QAM	11.656 9
256QAM	15.841 1

根据 4.3.1 节所提的减法聚类算法, 计算得到 32QAM 信号在 $\frac{L}{5}$ 和 $\frac{L}{11}$ 邻域半径下的聚类中心及相应的密度值。

图 8 为 32QAM 信号在 $\frac{L}{5}$ 邻域半径下得到的聚类中心和密度值, 其中, 实部和虚部表示相应的聚类中心, 密度表示密度值。

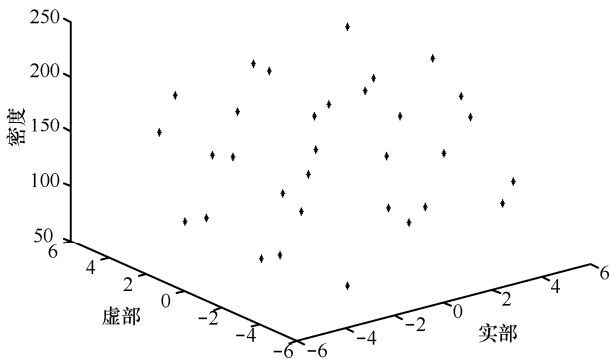


图 8 32QAM 信号在 $\frac{L}{5}$ 邻域半径下得到的聚类中心和密度值

图 9 为 32QAM 信号在 $\frac{L}{11}$ 邻域半径下得到的聚类中心和密度值。其中, 实部和虚部表示相应的聚类中心, 密度表示密度值。

通过将图 8 和图 9 的聚类中心对应的密度值进行相加, 可以得到 32QAM 信号在 2 种邻域半径下聚类点数以及密度值之和。表 9 为 32QAM 信号在 2 种邻域半径下的聚类点数以及密度值之和。

结合表 9 和自动识别流程步骤 9), 32QAM 信号可以被正确区分。

根据 4.3.1 节所提的减法聚类算法, 计算得到 64QAM 信号在 $\frac{L}{7}$ 和 $\frac{L}{15}$ 邻域半径下的聚类中心及相应的密度值。

图 10 为 64QAM 信号在 $\frac{L}{7}$ 邻域半径下得到的聚类中心和密度值, 其中, 实部和虚部表示相应的聚类中心, 密度表示密度值。

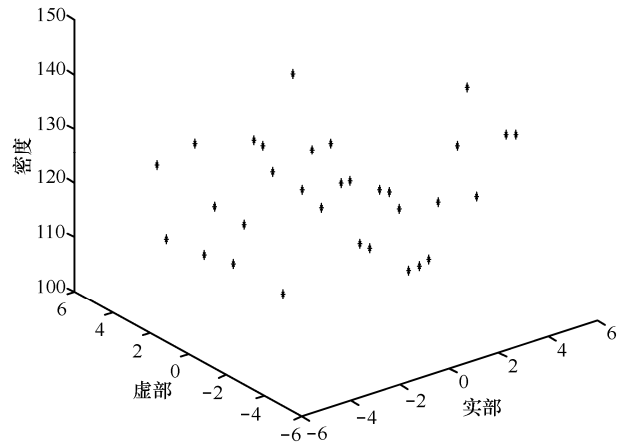


图 9 32QAM 信号在 $\frac{L}{11}$ 邻域半径下得到的聚类中心和密度值

表 9 32QAM 信号在 2 种邻域半径下的聚类点数以及密度值之和

邻域半径	聚类点数	密度值之和
$\frac{L}{5}$	32	4 540.3
$\frac{L}{11}$	32	3 875.5

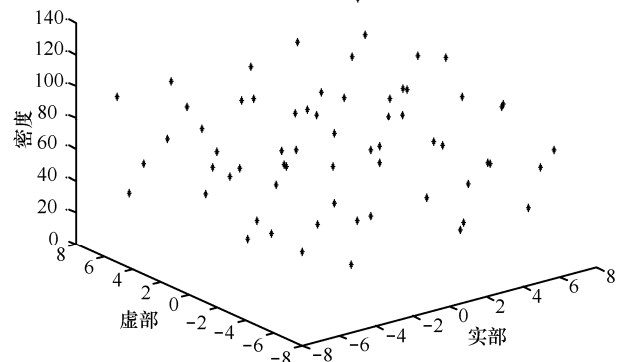


图 10 64QAM 信号在 $\frac{L}{7}$ 邻域半径下得到的聚类中心和密度值

图 11 为 64QAM 信号在 $\frac{L}{15}$ 邻域半径下得到的聚类中心和密度值, 其中, 实部和虚部表示相应的聚类中心, 密度表示密度值。

通过将图 10 和图 11 的聚类中心对应的密度值进行相加, 可以得到 64QAM 信号在 2 种邻域半径下聚类点数以及密度值之和。表 10 为 64QAM 信号在 2 种邻域半径下的聚类点数以及密度值之和。

结合表 10 和自动识别流程步骤 10), 64QAM 信号可以被正确区分。

根据 4.3.1 节所提的减法聚类算法, 计算得到

128QAM 信号在 $\frac{L}{5}$ 和 $\frac{L}{11}$ 邻域半径下的聚类中心及相应的密度值。

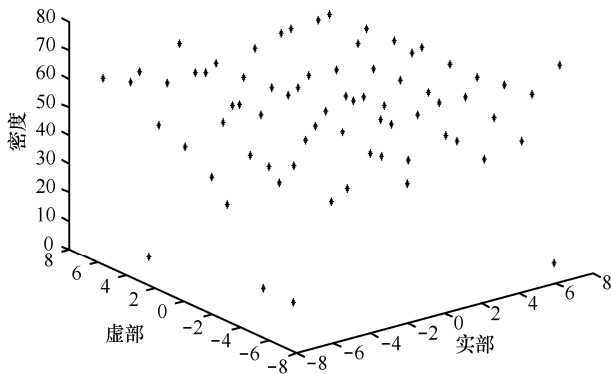


图 11 64QAM 信号在 $\frac{L}{15}$ 邻域半径下得到的聚类中心和密度值

表 10 64QAM 信号在 2 种邻域半径下的聚类点数以及密度值之和

邻域半径	聚类点数	密度值之和
$\frac{L}{7}$	64	4 529.6
$\frac{L}{15}$	65	3 702.8

图 12 为 128QAM 信号在 $\frac{L}{5}$ 邻域半径下得到的聚类中心和密度值, 其中, 实部和虚部表示相应的聚类中心, 密度表示密度值。

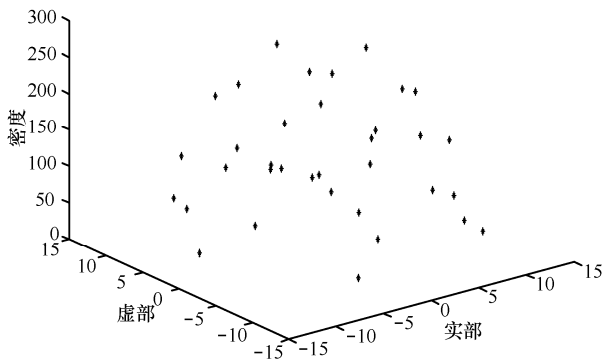


图 12 128QAM 信号在 $\frac{L}{5}$ 邻域半径下得到的聚类中心和密度值

图 13 为 128QAM 信号在 $\frac{L}{11}$ 邻域半径下得到的聚类中心和密度值, 其中, 实部和虚部表示相应的聚类中心, 密度表示密度值。

通过将图 12 和图 13 的聚类中心对应的密度值

进行相加, 就得到了 128QAM 信号在 2 种邻域半径下聚类点数以及密度值之和。表 11 为 128QAM 信号在 2 种邻域半径下的聚类点数以及密度值之和。

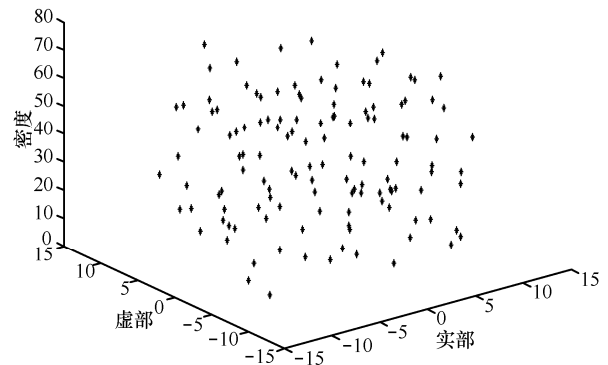


图 13 128QAM 信号在 $\frac{L}{11}$ 邻域半径下得到的聚类中心和密度值

表 11 128QAM 信号在 2 种邻域半径下的聚类点数以及密度值之和

邻域半径	聚类点数	密度值之和
$\frac{L}{5}$	38	4.3055e+003
$\frac{L}{11}$	128	4.5390e+003

结合表 11 和自动识别流程步骤 9), 128QAM 信号可以被正确区分。

根据 4.3.1 节所提的减法聚类算法, 计算得到 256QAM 信号在 $\frac{L}{7}$ 和 $\frac{L}{15}$ 邻域半径下的聚类中心及相应的密度值。

图 14 为 256QAM 信号在 $\frac{L}{7}$ 邻域半径下得到的聚类中心和密度值, 其中, 实部和虚部表示相应的聚类中心, 密度表示密度值。

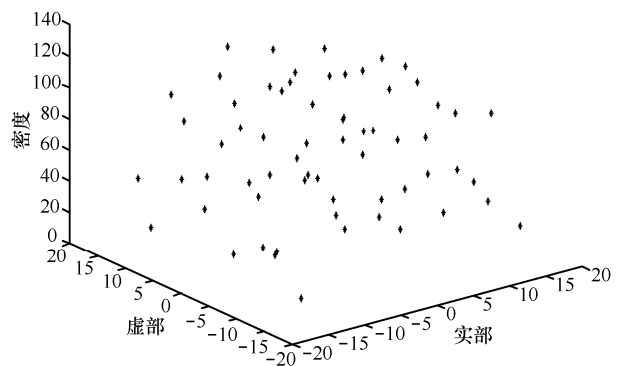


图 14 256QAM 信号在 $\frac{L}{7}$ 邻域半径下得到的聚类中心和密度值

图 15 为 256QAM 信号在 $\frac{L}{15}$ 邻域半径下得到的聚类中心和密度值, 其中, 实部和虚部表示相应的聚类中心, 密度表示密度值。

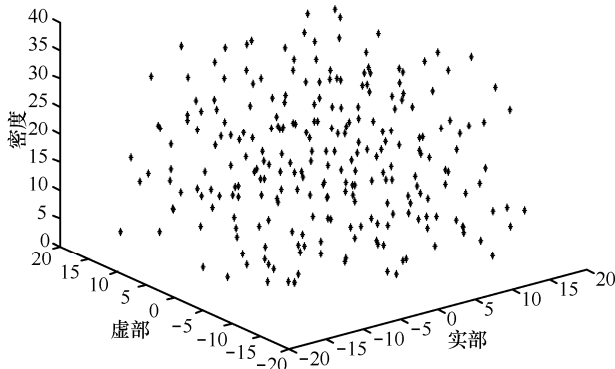


图 15 256QAM 信号在 $\frac{L}{15}$ 邻域半径下得到的聚类中心和密度值

通过将图 14 和图 15 的聚类中心对应的密度值进行相加, 可以得到 256QAM 信号在 2 种邻域半径下聚类点数以及密度值之和。表 12 为 256QAM 信号在 2 种邻域半径下的聚类点数以及密度值之和。

表 12 256QAM 信号在 2 种邻域半径下的聚类点数以及密度值之和

邻域半径	聚类点数	密度值之和
$\frac{L}{7}$	64	4332.6
$\frac{L}{15}$	256	4484.5

结合表 12 和自动识别流程步骤 10), 256QAM 信号可以被正确区分。

实验 2 用 Matlab 软件在 5 dB、10 dB、15 dB、20 dB、25 dB 和 30 dB 信噪比下各随机产生 100 组 16QAM、32QAM、64QAM、128QAM、256QAM 信号, 根升余弦成形滤波器 $\alpha = 0.3$, 每个码元采样点数 10, 码元个数为 4 096, 得到识别正确率如表 13 所示。

表 13 识别正确率

SNR/dB	16QAM	32QAM	64QAM	128QAM	256QAM
5	75%	90%	74%	51%	22%
10	97%	96%	78%	74%	76%
15	98%	96%	90%	96%	76%
20	99%	96%	98%	96%	97%
25	99%	96%	98%	98%	99%
30	99%	97%	98%	98%	100%

由实验 2 可知, 除了 256QAM, 其他信号在信噪比为 15 dB 时信号类型识别正确率都能达到 90% 以上, 说明本文所提的联合识别方法是可行的。

实验 3 用 Matlab 软件在信噪比为 15 dB 情况下, 分别随机产生 100 组 16QAM、32QAM、64QAM、128QAM、256QAM 信号, 根升余弦成形滤波器 $\alpha = 0.3$, 每个码元对应采样点数 10, 在码元个数分别为 256 个、1024 个、4 096 个时, 得到的识别正确率如表 14 所示。

表 14 识别正确率

码元个数	16QAM	32QAM	64QAM	128QAM	256QAM
256	38%	66%	68%	27%	12%
1 024	67%	85%	90%	82%	21%
4 096	98%	96%	90%	99%	76%

由实验 3 可知, 识别正确率与码元个数有关。这是由于 QAM 信号本身幅相种类比较多, 只有达到一定的码元个数, 才能反映各 QAM 信号的幅相概率分布情况。当码元个数达到 4 096 个时, 能得到比较好的识别正确率。

7 结束语

本文针对 MQAM 调制方式识别算法进行研究, 提出了一种联合四阶累积量、零中心归一化幅度紧致性和减法聚类计算聚类中心密度值的自动识别方法。本文算法不需要预先知道信号的波特率、载波频率, 而是通过非线性变换和频谱分析, 从接收信号中估计出这些参数, 然后逐级进行信号调制类型的识别, 该方法运算量适中, 易于工程实现。

参考文献:

- [1] 曹桂芹, 赵宪臣, 姜士强, 等. 全数字 128QAM 调制解调器的实现与分析[J]. 数字通信技术, 2016(1): 329-331.
CAO G Q, ZHAO X C, JIANG S Q, et al. Implementation and analysis of the 128 QAM digital modulator and demodulator [J]. Digital Communications Technology, 2016(1): 329-331.
- [2] 李杰. 无线通信中的高阶 QAM 实现技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016: 15.
LI J. Communication & information system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016: 15.
- [3] 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.
CHU Y J, HU N F, CHAO K J, et al. Modulation recognition of MQAM signals in the passband[J]. Journal of Xi'dian University, 2008, 35(5): 932-937.
- [4] 张弛, 吴瑛. 方形 QAM 信号的识别算法[J]. 计算机工程与设计,

- 2009, 30(18): 4155-4157.
ZHANG C, WU Y. Method of square QAM signals recognition[J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(18): 4155-4157.
- [5] 刘聪杰, 彭华, 吴迪, 等. 突发自适应调制信号的调制识别算法研究[J]. 信号处理, 2012, 28(3): 417-424.
LIU C J, PENG H, WU D, et al. Modulation recognition algorithm of burst adaptive modulation signal[J]. Signal Processing, 2012, 28(3): 417-424.
- [6] 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.
ZHANG L P, WANG J X. Blind modulation recognition algorithm for MQAM signals[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(2): 332-336.
- [7] 李东波, 欧阳喜. 一种抗频偏的常见幅相调制信号识别算法[J]. 信息工程大学学报, 2018, 19(1): 42-46.
LI D B, OUYANG X. Anti-frequency-offset algorithm for modulation recognition of common amplitude-phase modulated signals[J]. Journal of Information Engineering University, 2018, 19(1): 42-46.
- [8] XIAO D M, XU Z, ZHAO X Y, et al. Modulation classification of MQAM signals based on higher-order cumulant and subtractive clustering[C]//2016 International Conference on Computer Engineering, Information Science and Internet Technology (CII 2016). 2016 :66-73.
- [9] 曹颖, 周丽丽, 王晓亚. 高阶 QAM 信号调制样式识别算法研究[J]. 火控雷达技术, 2013, 42(2): 23-26.
CAO Y, ZHOU L L, WANG X Y. Blind modulation recognition algorithm for MQAM signals [J]. Fire Control Radar Technology, 2013, 42(2): 23-26.
- [10] MU X D, ZENG X, YI Z X, et al. Modulation classification of MQAM signals based on higher-order cumulant and subtractive clustering[C]//2016 International Conference on Computer Engineering, Information Science and Internet Technology(CII 2016). ISBN: 978-1-60595-348-9: 66-73.
- [11] 张华娣, 楼华勋. 一种 QAM 信号类内识别新方法[C]// 2017 全国电子战学术交流大会论文集. 2017: 427-432.
ZHANG H D, LOU H X. A new modulation classification method of the QAM signal[C]// Proceedings of China Academic Exchange on Electronic Warfare. 2017: 427-432.
- [12] 杨杰, 刘珩, 卜祥元, 等. 通信信号调制识别原理与算法[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 85-86.
YANG J, LIU H, PO X Y, et al. Modulation recognition for communication signals[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2014: 85-86.
- [13] 赵雄文, 郭春霞, 李景春. 基于高阶累积量和循环谱的信号调制方式混合识别算法 [J]. 电子与信息学报, 2016, 38(3): 674-680.
ZHAO X W, GUO C X, LI J C. Mixed recognition algorithm for signal modulation schemes by high-order cumulants and cyclic spectrum[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(3): 674-680.
- [14] 范海波, 杨志俊, 曹志刚. 卫星通信用调制方式的自动识别[J]. 通信学报, 2004, 25(1): 140-149.
FAN H B, YANG Z J, CAO Z G. Automatic recognition for common used modulations in satellite communication[J]. Journal on Communications, 2004, 25(1): 140-149.
- [15] 王彬, 葛临东, 徐立清. 一种多径信道中的调制识别算法[J]. 数据采集与处理, 2007, 22(4): 440-446.
WANG B, GE L D, XU L Q. Algorithm for modulation classification in multi-path channels[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2007, 22(4): 440-446.
- [16] 张东坡, 陈允锋, 李新付, 等. 基于星座图的 QAM 信号调制方式识别[J]. 通信对抗, 2006(1): 8-11.
ZHANG D P, CHEN Y F, LI X F, et al. The recognition of QAM signal based on constellation diagram[J]. Communication Countermeasures, 2006(1): 8-11.
- [17] 詹亚锋, 曹志刚, 马正新. M-QAM 信号的调制制式识别[J]. 通信学报, 2004, 25(2): 68-74.
ZHAN Y F, CAO Z G, MA Z X. Modulation classification of M-QAM signals[J]. Journal on Communications, 2004, 25(2): 68-74.

[作者简介]



张华娣 (1978-), 女, 广东湛江人, 中国电子科技集团公司第三十六研究所高级工程师, 主要研究方向为信号处理。

楼华勋 (1981-), 男, 浙江永康人, 中国电子科技集团公司第三十六研究所高级工程师, 主要研究方向为信号处理原型产品开发。