

## MQAM 信号调制方式盲识别

张路平\* 王建新

(南京理工大学电子工程与光电技术学院 南京 210094)

**摘要:** 该文提出了一种 MQAM 信号调制方式的盲识别算法。算法首先通过信号频谱粗略估计信号载频和带宽, 从而进行下变频和低通滤波。然后通过信号包络平方的频谱估算出波特率, 结合符号定时完成信号的波特率采样。最终计算 MQAM 信号矢量图中最小环带的方差, 完成调制方式的识别。该 MQAM 信号调制识别算法无需载频和波特率等先验信息, 对载波残余不敏感, 没有复杂的迭代过程, 可以应用于实际信号的调制识别。仿真表明信噪比在 16 dB, 码元数目为 2400 时, 对 5 种 QAM 信号的识别率达到 99% 以上, 证明了其有效性。

**关键词:** 信号处理; 调制识别; MQAM; 矢量图; 方差

中图分类号: TN 911.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)02-0332-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00472

## Blind Modulation Recognition Algorithm for MQAM Signals

Zhang Lu-ping Wang Jian-xin

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** A blind modulation recognition algorithm for MQAM signals is proposed. The method firstly estimates the signal carrier frequency and bandwidth from its spectrum to complete the frequency conversion and the low-pass filtering. Then the baud rate is estimated by calculating the frequency spectrum of the square envelope, and the baud rate sampling is done according the symbol timing. Finally the modulation type is identified by comparing the variance of sequences in the minimum ring of vectogram. It does not require prior information about carrier frequency and baud rate, and is not sensitive to the carrier offset. Moreover, there is no complex iterative process. So it is suitable for signal recognition of practical applications. Computer simulations show that the correct recognition probability is larger than 99% if SNR is greater than 16dB and using 2400 symbols. It verifies the validity of the algorithm.

**Key words:** Signal processing; Modulation recognition; MQAM; Vectogram; Variance

### 1 引言

信号调制方式的识别对信号自适应接收和智能通信等具有重要意义, 可以应用在电子侦察、电子对抗、频谱监测等多种军用和民用场合, 已经引起了人们的广泛关注。

MQAM 信号由于其较高的频谱效率, 在卫星和微波通信中得到了广泛应用。对于 MQAM 信号的识别, 在不同的情况下有各种不同的识别算法, 其中基于似然函数的识别方法性能最佳, 但它基于所有参数已知, 而且计算复杂度高<sup>[1]</sup>。如果信号模型完全实现了载波消除, 可以使用星座图聚类的方法加以识别<sup>[2-4]</sup>。文献[2]采用拟合聚类的方法对 PSK 信号和 QAM 信号分别加以识别。文献[3]在识别过程中将

减法聚类和 C 均值聚类结合起来, 加快了聚类过程的收敛速度。文献[4]在有定时误差的情况下对信号做减法聚类, 根据中心点的个数判断 QAM 信号的阶数。文献[5-7]使用计算复杂度低的高阶累积量作为特征值, 详细分析了基带上各种数字信号的调制识别, 文献[8]更是把高阶累积量应用到了共信道信号的调制识别。

实际电子侦察中, 下变频后的基带信号往往有一定的载波残余, 给调制识别带来了一定的难度。以现有的公开文献看, 考虑了载频残余的 QAM 信号调制识别算法较少。文献[9]对信号进行差分运算后把残余载波转化成固定相位, 然后用特征函数和高阶矩结合的方法实现调制识别。这种算法引入了非线性运算无疑加大了噪声的影响。文献[10]采用特定阶数的循环累积量作为特征值, 虽然其不受载波残余影响, 但仅限于识别 3 种简单的 QAM 信号。

2010-05-14 收到, 2010-09-16 改回

\*通信作者: 张路平 1999zlpzy1999@163.com

文献[11]通过提取信号的瞬时包络来统计信号的瞬时能量分布实现调制方式的识别。文献[12,13]对有载波残余的星座图的模值做减法聚类,通过聚类中心的个数实现 QAM 信号的识别。本文受文献[12]启发,提出一种 MQAM 信号调制识别算法,它不需要任何先验知识,通过估计相关参数重构出有载波残余的矢量图,并通过计算矢量图最小环带模值的方差识别 MQAM 信号,计算复杂度远低于聚类算法,适合实际工程应用。

## 2 信号模型

MQAM信号的解析形式可表示如下

$$r(k) \triangleq r(kT_s) = \exp(j2\pi f_c kT_s + j\theta) \cdot \sum_n s_n g(kT_s - nT - \varepsilon T) + w(kT_s) \quad (1)$$

式中  $\{s_n = s_{nI} + j \cdot s_{nQ}\}$  表示第  $n$  个符号周期内的发送符号,服从独立同分布。 $g(t)$  表示均方根升余弦滤波器的冲激响应。 $f_c$ ,  $\theta$ ,  $T$  和  $\varepsilon$  分别表示载波频率、初始相位、符号周期和定时误差,  $T_s$  是采样周期。 $w(t)$  是均值为零,方差为  $\sigma^2$  的复高斯白噪声。

## 3 信号预处理

对于接收信号,一般要先对其进行预处理<sup>[1]</sup>,然后提取特征值进行识别。本文的信号预处理流程如图1所示,对下变频后的信号波特率取样后,会得到一个受残余载波影响的信号矢量图。

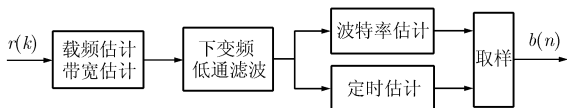


图1 信号预处理流程

### 3.1 估计载频和带宽

本文的识别算法对载波残余不敏感,因此只需粗略估计信号的载频。带宽估计有两个目的,一是为了设置下变频后的低通滤波器带宽,二是给后面波特率估计限定一个范围,这两个处理过程也只需粗略的信号带宽。基于以上分析,此处采用比较简单的算法,首先对解析信号做FFT运算求频谱,然后取一个适当的门限,如图2所示,搜索第1个超过门限的谱线  $f_1$  和最后一个超过门限的谱线  $f_2$ 。本文根据多次仿真,发现取最高谱线的1/4作为门限可以满足算法要求。最终估计的载频  $\hat{f}_c$  和带宽  $B_w$  分别为

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

$$B_w = f_2 - f_1 \quad (3)$$

根据载频  $\hat{f}_c$  对信号进行下变频,并用1.5倍  $B_w$

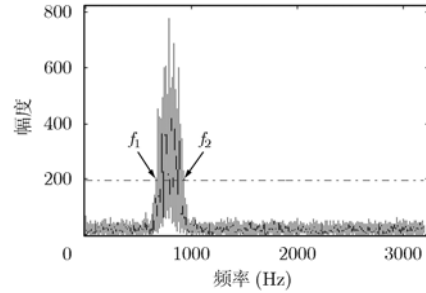


图2 载频和带宽估计

做低通滤波,提高信噪比,为下面的波特率估计和符号定时做准备。

### 3.2 估计波特率

调制信号包络平方的频谱中含有3根离散谱线<sup>[12]</sup>,分别是直流分量谱线、波特率谱线及其镜像。本文通过搜索该谱线估算波特率,主要步骤如下:

(1)对低通滤波后的信号进行共轭相乘,然后做FFT运算,得到信号包络平方的频谱。

(2)为避开直流分量和一些低频谱线的干扰,仅搜索  $(0.5B_w, 2B_w)$  范围内的最高谱线,该谱线的频率就是估算的波特率,并记为  $f_d$ 。

### 3.3 符号定时

接收到的过采样信号对每个符号存在一个最佳采样点,恢复这些符号需要进行定时估计并按波特率抽取。本文采用一种非数据辅助的平方估计算法计算定时误差<sup>[4]</sup>。

设某段接收序列时间长度为  $l$ ,在这段时间内定时误差  $\varepsilon$  为常数,则可以用图3的步骤估算定时误差。

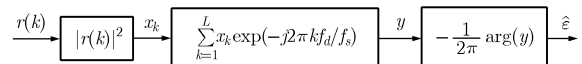


图3 定时误差估计算法

图中  $L = \lfloor l f_s \rfloor$ , 其中  $\lfloor \bullet \rfloor$  表示下取整。由于参数估计存在误差,因此对过采样序列抽取的过程中要每隔一定的符号重新做定时估计,避免定时误差累积超过  $T_s$ 。

## 4 调制方式识别

### 4.1 矢量图分析

由于残余载波的影响,定时抽取后的信号在星座图上表现为一个或多个环带。图4为32QAM在信噪比为12 dB时经过定时抽取后的矢量图。从图上可以看出,矢量图中最小环带最为明显,而几个外环基本上混为一体。造成环带混淆的原因有3个方面:(1)星座图本身的原因,距中心点越远的点其模值分

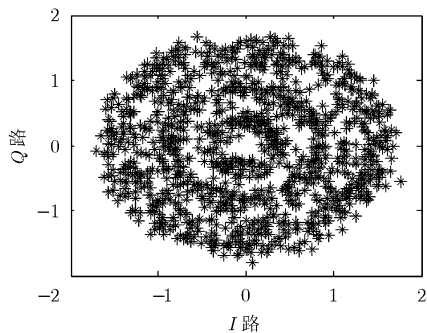


图4 32QAM信号的矢量图

布越紧凑；(2)噪声的影响；(3)在信号盲识别的条件下无法对发送端的成形脉冲进行匹配，符号定时过程存在码间干扰。因此本文采用最小环带的相关信息识别，这首先要提取出位于最小环带的矢量。

假设接收信号为 $M$ 阶QAM，符号长度为 $N$ ，根据第2节中信号模型的定义，调制信号的符号服从独立同分布，可以判断矢量图中约有 $\lfloor 4N/M \rfloor$ 个符号来自最小环带。因此只要把所有矢量的模值从小到大排序并根据相应的比例截取，即可完成最小环带符号的粗略提取。

#### 4.2 识别算法

由于信号幅度未知，识别前需要将复信号序列 $b(n)$ 归一化

$$B(n) = \frac{|b(n)|}{m_a} \quad (4)$$

$$m_a = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |b(n)| \quad (5)$$

把 $B(n)$ 从小到大重新排列，排列后记为 $z(1) < z(2) < \dots < z(N)$ 。

识别过程首先假设接收信号为4QAM调制，则所有 $z(n)$ 应该来自同一个环带，若是更高阶的QAM信号则应来自不同的环带。显然同一个环带内的 $z(n)$ 其方差比来自不同环带的 $z(n)$ 的方差要小，因此4QAM信号 $N$ 个 $z(n)$ 的方差必然比其他QAM小。若方差小于某门限则识别为4QAM信号，否则假设接收信号是8QAM。理论上8QAM信号的 $z(n)$ 中约有 $\lfloor N/2 \rfloor$ 的数据来自最小环带，而对于更高阶的QAM信号， $z(n)$ 的前 $\lfloor N/2 \rfloor$ 个数据来自多个环带，其方差必然偏大。若 $z(n)$ 前一半数据的方差小于某门限则识别为8QAM信号，否则假设信号为16QAM，计算 $z(n)$ 前 $\lfloor N/4 \rfloor$ 数据的方差，若小于某门限则识别为16QAM，否则依次类推，计算 $z(n)$ 前 $\lfloor N/8 \rfloor$ 数据的方差识别出32QAM信号，否则直接判为64QAM。

对各种QAM信号星座图上的点按上述比例截

取时，其模值方差的理论值如表1所示。从表中可以看出，当截取的符号刚好为最小环带时，其方差理论值为0。随着截取长度的减少，更高阶QAM信号的理论值越来越接近。实际中计算出的方差比表1中的理论值大，主要有3个方面的原因：(1)预处理后的信号存在码间干扰；(2)噪声的影响；(3)有限长度的符号不可能完全服从其理论分布，即使假设了正确的调制方式，截取的符号也有可能来自其他环带。因此实际判决的门限比表1中相应理论值的中间值要大。

表1 各种信号在不同截取长度时的理论方差

|       | $N$    | $N/2$  | $N/4$  | $N/8$  |
|-------|--------|--------|--------|--------|
| 4QAM  | 0      |        |        |        |
| 8QAM  | 0.1273 | 0      |        |        |
| 16QAM | 0.1028 | 0.0764 | 0      |        |
| 32QAM | 0.1053 | 0.0514 | 0.0382 | 0      |
| 64QAM | 0.1179 | 0.0501 | 0.0245 | 0.0182 |

## 5 仿真结果

笔者采用本文提出的方法，对4QAM，8QAM，16QAM，32QAM和64QAM 5种信号在matlab平台上进行了仿真。仿真中4次判决的门限分别取{0.07, 0.0495, 0.0242, 0.014}。

仿真中假设波特率 $f_d = 200$  Baud，载频 $f_c = 800$  Hz，采样率 $f_s = 3200$  Hz，成形函数采用均方根升余弦脉冲，其滚降因子在[0.25, 0.5]上随机变化，并在一次观测数据中保持不变。本文中信噪比定义如下：

$$\text{SNR} = 10 \lg \frac{\sum_{k=1}^K [r(kT_s) - w(kT_s)]^2}{\sum_{k=1}^K [w(kT_s)]^2} \quad (6)$$

首先在1200个符号长度的条件下，测试信噪比对不同调制信号识别率的影响。仿真中信噪比设置在4-20 dB的范围内，对每一种调制信号进行300次仿真后信噪比步进2 dB。仿真结果如图5所示，4QAM和8QAM信号的识别率( $P$ )在4 dB时就达到100%，16QAM和32QAM在10 dB时也达到95%以上。64QAM信号在14 dB以后的识别率超过90%，但是随着信噪比的增大其识别率没有进一步提高，这一方面是由于64QAM信号的矢量图环带较多，在有限符号长度下不容易满足其理论上的分布概率，另一方面在截取数据长度较大的情况下，64QAM信

号相应的理论值偏小, 容易被误判成其它信号。

为了测试符号长度对识别率的影响, 本文在16 dB信噪比下对上述信号再次进行仿真, 符号长度从300开始, 每种信号做300次识别后, 符号长度步进300。仿真结果如图6所示, 4QAM和8QAM信号在300个符号时就达到99%以上, 随着QAM阶数的提高, 达到相同识别率所需要的符号数也越来越多, 最终在2400个符号的情况下, 64QAM的识别率达到了99%。

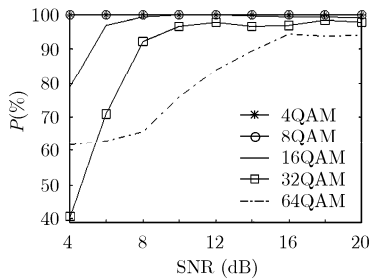


图5 不同信噪比下的识别率

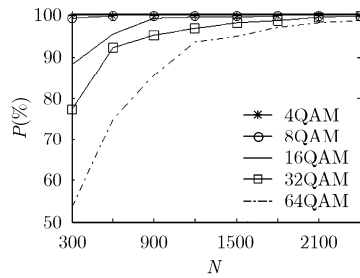


图6 不同符号长度下的识别率

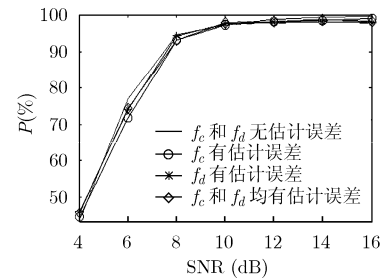


图7 参数估计对识别率的影响

另外, 本文还测试了符号定时误差对识别率的影响。定时误差除采用3.3节中的估计值外, 还设计了3种情况, 分别是定时误差  $\varepsilon = 0$ ,  $\varepsilon \in [-1/16, 1/16]$  以及  $\varepsilon \in [-1/8, 1/8]$ , 其中后两种情况下  $\varepsilon$  服从均匀分布。仿真中其它参数不变, 5种信号的平均识别率如图8所示, 可以看出上述4种情况下的平均识别率无明显区别。这一方面说明本算法对一定范围的定时误差不敏感, 另一方面也说明了本文采用的定时估计算法的有效性。

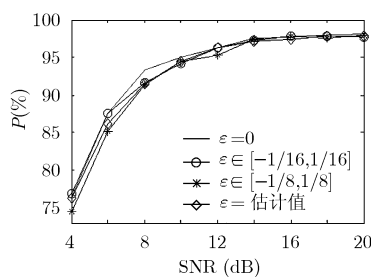


图8 不同定时误差下的平均识别率

## 6 结论

本文研究了通信信号的调制识别问题, 提出一种适合实际应用的 MQAM 信号盲识别算法。该算法无需知道信号的先验信息, 通过估计载频和带宽实现下变频和低通滤波, 用估算的波特率结合符号定时进行波特率采样, 得到存在载频残余的 MQAM 信号矢量图。在矢量图中根据最小环带的方差完成

为了验证载频和波特率估计误差对识别性能的影响, 仿真中对32QAM信号做了4种情况下的识别率测试。这4种情况分别是载频和波特率均已知, 波特率已知而载频采用3.1节估计值, 载频已知而波特率采用3.2节估计值, 载频和波特率均采用上述估计值。仿真中符号长度为1200个, 每进行300次仿真后信噪比步进2 dB。从图7可以看出, 本文提出的载频和波特率估计算法, 对信号最终的识别性能影响不大, 证明了本文算法的有效性和实用性。

调制方式的识别, 计算复杂度低, 对载频残余和一定范围的定时误差不敏感。仿真表明该算法对一定范围内的定时误差不敏感, 但是随着 MQAM 信号阶数的提高, 需要较多的码元长度, 当使用 2400 个码元时, 5 种信号的识别率在 16 dB 的信噪比下均达到 99% 以上。

## 参考文献

- [1] Dobre O A, Abdi A, and Bar-Ness Y, *et al.* Survey of automatic modulation classification techniques: classical approaches and new trends. *IET Commun.*, 2007, 1(2): 137-156.
- [2] Kam-Tim W and Chi-Wah K. Clustering based distribution fitting algorithm for Automatic Modulation Recognition. *IEEE Symposium on Computers and Communications*, Aveiro, Portugal, 2007: 13-18.
- [3] 叶健, 吴月娟, 葛临东. 基于高效自适应聚类算法的调制识别研究. *计算机工程与设计*, 2007, 28(3): 506-508.  
Ye J, Wu Y X, and Ge L D. Study on efficient adaptive clustering algorithm based modulation identification. *Computer Engineering and Design*, 2007, 28(3): 506-508.
- [4] 田玉双, 王曰海, 李式巨等. 存在定时误差的MQAM信号调制方式识别. *江南大学学报(自然科学版)*, 2008, 7(2): 179-182.  
Tian Y S, Wang Y H, and Li S J, *et al.* Modulation classification for timing-error MQAM signal. *Journal of Jiangnan University(Natural Science Edition)*, 2008, 7(2): 179-182.

- [5] 程汉文, 朱雷, 吴乐南. 基于累计量的干扰信号调制识别算法. 电子与信息学报, 2009, 31(7): 1741-1745.  
Chen H W, Zhu L, and Wu L N. Modulation classification algorithm for jamming signal based on cumulant. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(7): 1741-1745.
- [6] Liu L K and Xu J D. A novel Modulation classification method based on high order cumulants. International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Wuhan, China, 2006: 1-5.
- [7] Liu Y and Zhang Z P. High order QAM signals recognition based on layered modulation. International Conference on Communications, Circuits and Systems, Milpitas, USA, 2009: 73-76.
- [8] 黄英, 雷菁. 卫星通信中调制识别算法研究. 系统工程与电子技术, 2009, 31(6): 1303-1306.  
Huang Y and Lei J. Research on recognition of modulation signals in satellite communication. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(6): 1303-1306.
- [9] Shi Q H, Gong Y, and Guan Y L. Asynchronous classification of high-order QAMs. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Las Vegas, USA, 2008: 1188-1193.
- [10] 冯祥, 李建东. 基于高阶循环累积量的SQAM信号调制识别算法. 电子与信息学报, 2007, 29(1): 125-128.  
Feng X and Li J D. Robust modulation classification algorithm based on higher-order cyclic cumulants for SQAM signals with frequency offset. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(1): 125-128.
- [11] 褚衍杰, 胡年福, 巢凯今等. 通带MQAM信号调制方式识别方法. 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, and Chao K J, *et al.* Modulation recognition of MQAM signals in the passband. *Journal of Xidian University*, 2008, 35(5): 932-937.
- [12] 奚家熹, 王宗欣. 基于 Hilbert 变换的 MQAM 信号调制体制识别. 通信学报, 2007, 28(6): 1-6.  
Xi J X and Wang Z X. MQAM modulation scheme recognition using Hilbert transform. *Journal on Communications*, 2007, 28(6): 1-6.
- [13] Xu Z N and Bai W L. A novel blind recognition algorithm for modulated M-QAM signals. International conference on communications and mobile computing, Kunming, China, 2009: 461-465.
- 张路平: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为通信信号处理.  
王建新: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为数字信号处理、软件无线电.