

文章编号: 2095-4980(2014)02-0218-05

基于 SNR 估计的 MQAM 信号调制识别算法

张 启^a, 王 军^a, 陈 旭^a, 陈超群^b

(电子科技大学 a.电子工程学院; b.通信与信息工程学院, 四川 成都 611731)

摘 要:针对现有多进制正交幅度调制(MQAM)信号调制方式的不足,提出了一种改进的 MQAM 信号调制识别算法。该算法对通信系统中信号的信噪比(SNR)进行估计,通过计算 MQAM 信号矢量图的最小环带的方差,得到不同调制类型的 QAM 最小环带的方差,最后根据估计的 SNR 与信号求出合适的参考门限,与之前求出的最小环带的方差进行比较,完成调制方式的识别。该算法运算量小,识别率高,且适用于实际工程应用。仿真结果表明在 $\text{SNR} \geq -1$ dB 时,5 种不同阶数的 QAM 信号的识别概率 $\geq 96\%$ 。

关键词: 调制识别; SNR 估计; 多进制正交幅度调制; 最小环带; 矢量图

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201402.0218

MQAM signals modulation recognition algorithm based on SNR estimation

ZHANG Qi^a, WANG Jun^a, CHEN Xu^a, CHEN Chao-qun^b

(a.School of Electronic Engineering; b.School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: Aiming at the problem of existing modulation recognition algorithm for Multiple Quadrature Amplitude Modulation(MQAM) signals, an improved MQAM signal modulation recognition algorithm is developed. The Signal to Noise Ratio(SNR) in the communication system is estimated primarily, and then different types of QAM modulation minimum ring variance are obtained by calculating the minimum ring variance of MQAM signal vector diagram. The modulation mode recognition is completed by comparing an appropriate reference threshold calculated by the estimated SNR and signal with above calculated variance. The algorithm is of small computational complexity and high recognition probability. Moreover, the algorithm can be applied to modulation recognition of practical engineering. The simulation results illustrate that the recognition probabilities of QAM signals with 5 different orders are equal or greater than 96% under $\text{SNR} \geq -1$ dB.

Key words: modulation recognition; SNR estimation; Multiple Quadrature Amplitude Modulation; minimum ring; vector diagram

通信信号调制方式识别是非协作通信领域非常重要的一部分,已经在电子侦察、电子对抗、通信情报等领域得到了广泛应用。MQAM 信号因其具有较高的频谱效率,已经广泛应用于微波通信和卫星通信。

目前,已有一些学者对 MQAM 信号调制方式进行了研究。文献[1-2]中提出了基于似然函数对 MQAM 信号进行分类,该方法虽然识别性能极佳,但是由于计算复杂度高,在实际应用中很难实现。文献[3-4]采用星座图类聚的方法对 MQAM 信号进行识别,但在实际应用中成型滤波器会对 MQAM 信号产生影响,因此该方法实现起来比较复杂。文献[5-6]采用高阶累积量作为特征参数对 MQAM 进行识别,高阶累积量运算量大,虽能实现,但难以满足系统实时性;且在信噪比低于 10 dB 时,识别率很低,难以达到要求。文献[7-8]基于循环平稳和循环累积量对 MQAM 信号进行调制识别,虽然算法具有普适性,但运算量大,难以实时实现。文献[9]先通过插值、解卷处理,然后运用类聚算法对 MQAM 信号进行调制识别,此方法虽然能够取得较好的性能,但是复杂度较高,实现较难。以上算法计算量大,难以实时实现。张继平等在文献[10]中提出了一种通过计算 MQAM 矢量图最小环带方差识别 MQAM 信号调制类型的方法,实现简单,运算量低,适合于实际工程应用。该方法在 SNR 大于 16 dB 时, MQAM 信号的识别率能达到 95%,但是当 SNR 低于 10 dB 时,32QAM 识别率低于 90%,64QAM 识

收稿日期: 2013-03-20; 修回日期: 2013-05-05

别率低于 80%，因此在 SNR 较低时，难以达到较好的效果。本文在此基础上进行改进，首先通过对 MQAM 信号进行 SNR 估计，得到分段可变判决门限；然后通过计算 MQAM 信号矢量图的最小环带的方差，得到不同调制类型的 QAM 最小环带的方差；最后通过对最小环带方差和判决门限进行比较，完成 MQAM 信号的调制类型识别。其实现框图如图 1 所示。

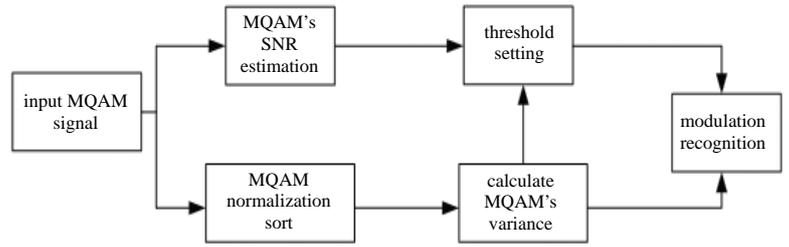


Fig.1 Block diagram of MQAM modulation identification
图 1 MQAM 调制识别框图

1 MQAM 信号 SNR 估计

在调制类型识别中，能准确地估计出 SNR，得出更为有效的判决门限，从而得到更为理想的识别概率。

在 SNR 估计方面的研究中，学者们根据不同的应用背景，提出了不同的研究算法。针对扩频信号，林文长等在文献[11]中提出了一种扩频信号 SNR 估计算法；针对 QAM 信号，许华等在文献[12]中提出了一种 QAM 信号的盲 SNR 估计算法。本文考虑到更好的硬件实现，采用文献[11]中的算法进行 SNR 估计。中频 MQAM 信号表达式为：

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

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； $g(t)$ 表示根升余弦滤波器的冲击响应； T_s 为采样周期； T 为符号周期； ε 为定时误差； f_c 和 θ 分别为载波频率和初始相位； $N(t)$ 为均值为零，方差为 δ^2 的复高斯白噪声。当 $x(n)$ 是广义平稳随机信号时，其平均功率可以用 $\tau=0$ 时的自相关函数表示：

$$\hat{P} = r(0) = \frac{1}{N} \sum_0^{N-1} \{|x(n)|^2\} \quad (2)$$

式中： N 为 $x(n)$ 的长度； $r(0)$ 为 $x(n)$ 的平均功率。又因为 $x(n)$ 包含 QAM 信号和噪声，因此 $r(0)$ 为接收的信号加噪声的平均功率。因此，要估计信噪比，则还需估计出信号平均功率或噪声平均功率。

由 Parseval 定理知，时域总能量等于频域总能量。因此对于在时域求平均功率较难实现时，可以转为频域求取。对于中心频率为 f_c ，带宽为 B 的 MQAM 信号，其频域能量主要集中在 $[f_c - 0.5B, f_c + 0.5B]$ 内。因此通过 $[f_c - 0.5B, f_c + 0.5B]$ 之外的一段频域估计出平均噪声，平均噪声估计表达式为：

$$\hat{P}_n = \frac{\sum_{N_1}^{N_2} |X(n)|^2}{(N_2 - N_1 + 1)L} \quad (3)$$

式中： N_1 和 N_2 为频域对应下限和上限点； $X(n)$ 为 $x(n)$ 的 FFT 频谱； L 为 FFT 变换点数。SNR 估计 $S\hat{N}R$ 表达式如下：

$$S\hat{N}R = \frac{\hat{P}_s}{\hat{P}_n} = \frac{\hat{P} - \hat{P}_n}{\hat{P}_n} \quad (4)$$

用对数表示为：

$$S\hat{N}R = 10 \lg \left(\frac{(N_2 - N_1 + 1) \sum_{n=0}^{L-1} |x(n)|^2 - \sum_{n=N_1}^{N_2} |X(n)|^2}{\sum_{n=N_1}^{N_2} |X(n)|^2} \right) \quad (5)$$

2 MQAM 信号调制类型识别

由 QAM 信号的星座图可知，不同的 QAM 调制类型具有不一样的幅度及相位信息，如表 1 所示。

由表 1 可知, 通过幅度信号或相位信息可以对 MQAM 信号的调制类型进行识别。但是由于远离中心点的幅度和相位比较模糊, 且受噪声等因素的影响, 很难准确地估计出信号的幅度和相位信息, 因此, 本文采用在估计信噪比的条件下针对最小环带的信息进行识别。

最小环带信息的提取: 假设接收到的信号为 M 阶的 QAM 信号, 符号长度为 N 。假设 M 阶的 QAM 信号的各符号为随机独立同分布, 则最小环带上的符号数大概为 $\text{floor}(4N/M)$ 个 ($\text{floor}(\bullet)$ 为向下取整)。因此, 先将 N 个符号归一化并按照其模值从小到大排列, 再接着截取前面 $\text{floor}(4N/M)$ 个符号。算法步骤如下:

第 1 步: 对 M 阶 QAM 信号进行归一化:

$$X(n) = \frac{|x(n)|}{m_x} \quad (6)$$

式中 $m_x = (1/N) \sum_1^N |x(n)|$ 。并完成从小到大排序, 排序后为 $Y(1) \leq Y(2) \leq \dots \leq Y(N)$ 。

第 2 步: 假设接收信号为 4QAM 信号, 则所有符号 $Y(n)$ 都来自同一个环带, 相对高阶的 QAM 有更小的方差。通过估计的信噪比, 确定参考门限, 若信号方差小于参考门限, 则将接收信号判为 4QAM, 转入第 5 步; 否则取 $i=2, M=4i$, 转入第 3 步。

第 3 步: 假设接收信号为 MQAM, 则 $Y(n)$ 中有大概 $\text{floor}(4N/M)$ 个符号来自最小环带。计算 $Y(n)$ 前 $\text{floor}(4N/M)$ 个符号数据的方差, 并与参考门限比较, 若方差小于参考门限, 则判为 MQAM, 转入第 5 步; 否则转入第 4 步。

第 4 步: $i=i+1, M=4i$ 。若 $M \leq 64$, 则转入第 3 步; 否则为 64QAM, 转入第 5 步。

第 5 步: MQAM 信号调制类型识别结束。

3 算法仿真及性能分析

3.1 SNR 估计仿真

仿真条件: 采样率 f_s 为 140 MHz, 载波频率 f_c 为 14 MHz, 码速率 r_c 为 7 MHz, 信噪比为 0 dB。中频 16QAM 信号幅频响应如图 2 所示。由图可知, 在区间 $[800, 1200]$ 内主要是噪声的频谱。因此, 取 $N_1=800, N_2=1200$, 可由公式(5)得到 SNR 的估计值。

仿真条件: 信噪比在 -10 dB 到 20 dB 之间, 蒙特卡罗实验次数为 100 次。SNR 的估计值如图 3(a)所示, 其估计值的误差如图 3(b)所示。SNR 估计值与真实值的误差小于 2 dB, 因此能为后面 MQAM 信号调制类型的识别提供非常可靠的参照。

3.2 调制识别仿真

本文主要针对的是 4QAM, 8QAM, 16QAM, 32QAM 和 64QAM 五种 QAM 信号进行识别, 并

表 1 MQAM 幅度相位信息表
Table 1 MQAM amplitude phase information table

	4QAM	8QAM	16QAM	32QAM	64QAM
amplitude	1	2	3	5	10
phase	4	8	12	28	52

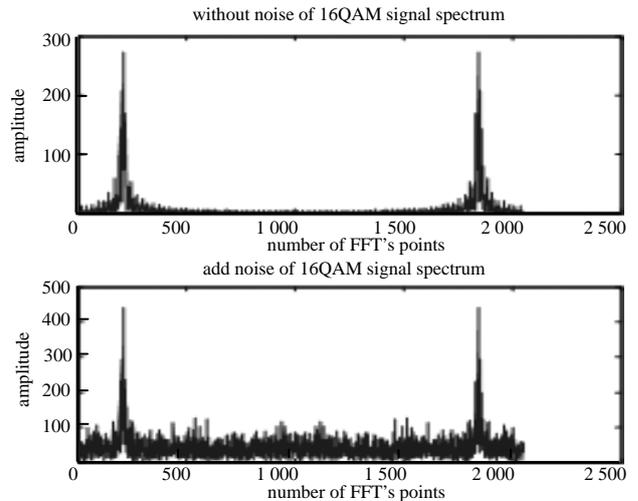
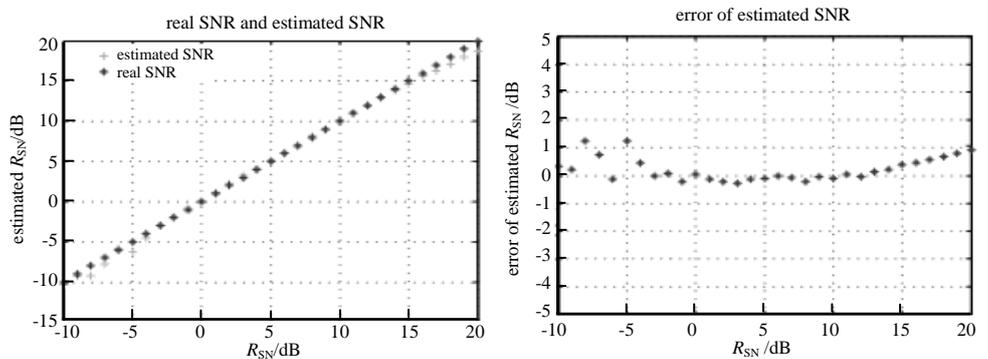


Fig.2 16QAM signal spectrum
图 2 16QAM 信号频谱图



(a) actual SNR and estimated SNR (b) SNR estimation error curve

Fig.3 Curves of estimated and true SNR values
图 3 SNR 估计值与真实值比较曲线

在 Matlab 上进行了仿真。仿真中的参考门限是通过 SNR 估计, 将 SNR 的范围分成 4 段, 然后在各 SNR 段内, 对门限进行多次测量, 取其平均值。其判决门限如表 2 所示。

仿真条件: MQAM 信号的采样率 $f_s = 30$ MHz, 载波频率 $f_c = 3$ MHz, 码速率 $r_c = 1.5$ MHz, 信号频偏 $f_{off} = 35$ kHz。SNR 变化范围: $R_{SN} = -4:15$, 步进为 1 dB。符号长度为 2 100 个。经过 100 次蒙特卡洛实验得到如图 4 所示仿真结果。其中图 4(a)为 SNR 准确估计时的识别概率随 SNR 变化的曲线, 图 4(b)为 SNR 估计误差在 1 dB 左右时的识别概率随 SNR 变化的曲线。图 5 为没有对 SNR 进行估计的识别概率随 SNR 变化的曲线。

由图 4 可知, MQAM 信号在 $R_{SN} \geq -1$ dB 时识别率已经达到了 97% 以上。通过图 4(a)和图 4(b)对比可知, 在 SNR 估计存在误差, $R_{SN} \geq -1$ dB 时, MQAM 识别率仍在 96% 以上。因此, 在本文的 SNR 估计算法下, SNR 估计误差对最终的识别性能基本上没有影响。再对比图 4 和图 5 可知, 在没有对 SNR 进行估计时, SNR 大于 9 dB, 识别率只达到 80% 以上。

因此, 本算法有效地提高了 MQAM 信号在低 SNR 下的识别率, 且运算量小, 易于实现。

4 结论

由于在非协作通信和通信电子对抗中, 信号的 SNR 较低, 因此低 SNR 环境下的调制识别算法在非协作通信和通信电子对抗中起着至关重要的作用。本文研究的基于 SNR 估计的 MQAM 信号调制识别算法是在文献[10]基础上进行的改进。通过对 SNR 进行估计, 根据估计的 SNR, 采用最小环带方差分段对 MQAM 信号进行识别。该算法在 $R_{SN} \geq -1$ dB 时, 识别概率能达到 96% 以上, 且运算复杂度低, 比较容易实现。因此, 本算法在 SNR 较低环境中具有较好的性能。

参考文献:

[1] Yang Y,Liu C,Song T. A log-likelihood function-based algorithm for QAM signals classification[J]. Signal Processing, 1998,70(1):61-71.

[2] Long C,Chung K,Polydoros A. Further Results in Likelihood Classification of QAM Signals[C]// IEEE Military Communications Conference. Fort Monmouth:[s.n.], 1994:57-61.

[3] 张东坡,陈允峰,李新付,等. 基于星座图的 QAM 信号调制方式识别[J]. 通信对抗, 2006,18(1):8-11. (ZHANG Dong-po, CHEN Yun-feng,LI Xin-fu,et al. QAM signal modulation mode recognition based on the constellation diagram[J]. Communication Countermeasures, 2006,18(1):8-11.)

[4] 叶健,吴月娴,葛临东,等. 基于高效自适应聚类算法的调制识别研究[J]. 计算机工程与设计, 2007,28(3):506-508. (YE Jian,WU Yue-xian,GE Lin-dong,et al. Study on efficient adaptive clustering algorithm based on modulation identification.

表 2 判决门限

Table2 Decision threshold					
SNR	length	-4:2	-1:1	2:7	8:15
4QAM	N	0.131	0.120	0.100	0.100
8QAM	$N/2$	0.030	0.030	0.025	0.020
16QAM	$N/4$	0.021	0.020	0.020	0.015
32QAM	$N/8$	0.012	0.012	0.010	0.009
64QAM					

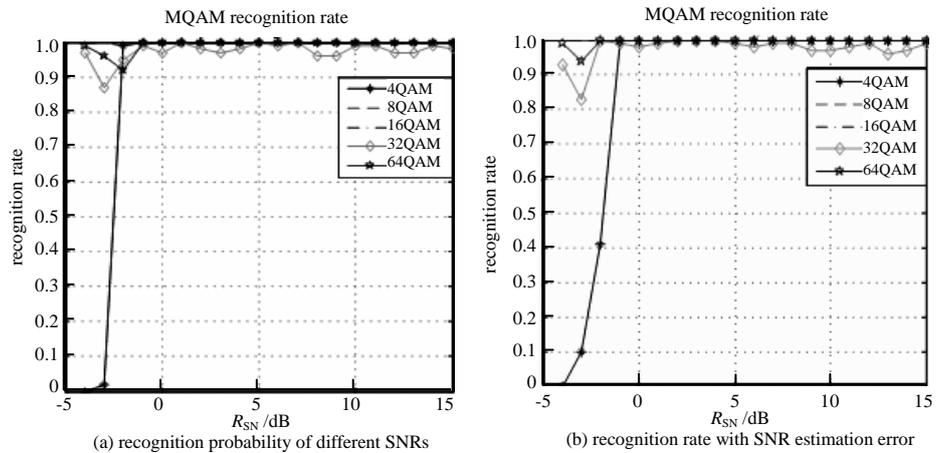


Fig.4 Average recognition rate of MQAM under different SNRs
图 4 MQAM 在不同 SNR 下的平均识别率

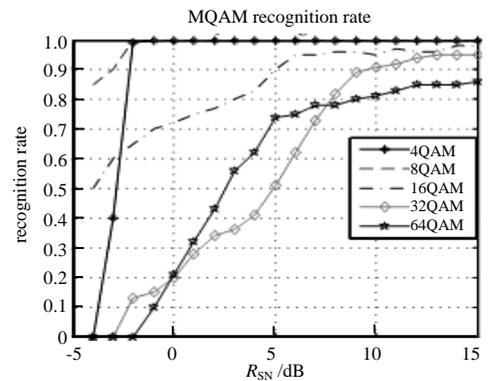


Fig.5 MQAM average recognition rate without estimating SNR
图 5 MQAM 在没有估计 SNR 下的平均识别率

- Computer Engineering and Design[J]. 2007,28(3):506-508.)
- [5] Swami A,Sadler B M. Hierarchical digital modulation classification using cumulants[J]. IEEE Transactions on Communications, 2000,48(3):416-429.
- [6] 胡登鹏,王世练,张尔扬. 高阶 QAM 调制制式识别及其系统实现[J]. 飞行器测控学报,2009,28(2):56-60. (HU Den-ghui,WANG Shi-lian,ZHANG Er-yang. High Order QAM Modulation Classification and System Realization[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2009,28(2):56-60.)
- [7] 刘聪杰,彭华,吴迪. 突发 QAM 信号盲识别算法[J]. 计算机应用, 2012,32(8):2128-2132. (LIU Cong-jie,PENG Hua,WU Di. A blind identification algorithm for burst QAM signal[J]. Journal of Computer Applications, 2012,32(8):2128-2132.)
- [8] 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 Ya-feng,CAO Zhi-gang,MA Zheng-xin. Modulation classification of M-QAM signals[J]. Journal on Communications, 2004,25(2):68-74.)
- [9] Octavia A. Dobre,Yeheskel Bar-Ness,Wei Su. Robust QAM Modulation Classification Algorithm using Cyclic Cumulants[C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Atlanta:[s.n.], 2004:745-748.
- [10] 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 Lu-ping,WANG Jian-xin. Blind Modulation Recognition Algorithm for MQAM Signals[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2011,33(2):332-336.)
- [11] 林文长,赵维维. 一种新的扩频信号信噪比估计算法[J]. 无线电工程, 2012,42(1):21-23. (LIN Wen-chang,ZHAO Wei-wei. A new SNR estimation algorithm for direct spread spectrum signals[J]. Radio Engineering, 2012,42(1):21-23.)
- [12] 许华,樊龙飞,郑辉,等. 一种 QAM 信号的盲信噪比估计算法[J]. 电子学报, 2005,33(4):758-761. (XU Hua,FAN Long-fei,ZHENG Hui,et al. A blind SNR estimation algorithm for QAM signal[J]. Chinese Journal of Electronics, 2005,33(4):758-761.)

作者简介:



张 启(1987-),男,湖南省醴陵市人,在读硕士研究生,主要研究方向为通信信号调制识别,email:zhangqiestc@sina.cn.

王 军(1971-),男,兰州市人,高级工程师,主要研究方向为高速实时信号处理技术.

陈 旭(1987-),男,四川省攀枝花市人,在读硕士研究生,主要研究方向为宽带信号处理.

陈超群(1987-),女,湖南省衡阳市人,在读硕士研究生,主要研究方向为现代通信中的信号处理.