

## 基于高阶循环累积量的 SQAM 信号调制识别算法

冯 祥 李建东

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 该文利用通信信号的循环平稳特性, 在循环累积量域内构造信号分类特征, 提出了一种基于高阶循环累积量的调制识别算法, 实现对 SQAM 信号分类。算法对载波频率偏差、时延和相位旋转具有稳健性, 并可在多信号环境且存在载波频偏的情况下实现对感兴趣信号的识别。理论分析和仿真结果均证明了算法的正确性和有效性。

**关键词:** 调制识别; 高阶循环累积量; 循环平稳性; SQAM

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)01-0125-04

## Robust Modulation Classification Algorithm Based on Higher-Order Cyclic Cumulants for SQAM Signals with Frequency Offset

Feng Xiang Li Jian-dong

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** An algorithm based on higher-order cyclic cumulants for the automatic classification of SQAM signals is proposed. The algorithm utilizes the cyclostationary property of communication signals and presents classification feature in cyclic cumulants domain. It is robust to the presence of carrier frequency offsets, time delay and phase offsets. Interesting signals can also be classified under the presence of interference signals and carrier frequency offsets. The efficiency of the proposed classification algorithm is verified via theoretical analysis and extensive simulations.

**Key words:** Modulation classification; Higher-order cyclic cumulants; Cyclostationary; SQAM

### 1 引言

信号调制制式自动识别技术近年来引起人们的极大兴趣, 它在军事、民用、宽带通信和自适应传输等方面都具有很高的实用价值。为了提高识别性能, 在过去的 20 多年内, 众多学者对这一问题作了深入的研究。最近几年, 一些文献将累积量和循环累积量(CCs)作为识别特征研究了这一问题; Swami 等<sup>[1]</sup>提出一种分层分类器, 利用基带信号的四阶累积量识别 ASK, PSK 和 QAM 信号; Marchand 等<sup>[2]</sup>采用四阶、二阶循环累积量幅度的组合识别 QPSK, QAM 信号; Spooner<sup>[3,4]</sup>利用高阶循环累积量作为分类特征识别 PSK, QAM 信号; Dobre<sup>[5,6]</sup>等研究了方形 QAM 信号的识别, 将阶数高至八阶的循环累积量作为识别特征以识别更多的信号类型, 但阶数太高导致识别性能变差。从仿真结果来看, 文献[6]中的算法在载波频率偏差较大时, 性能严重下降, 并且它没有研究多信号(干扰)这个非常实际的通信环境下算法的性能。文献[7]研究了利用循环累积量对 MPSK 的识别, 没有考虑载波频率偏差和时延的影响。

载波恢复是数字信号解调中重要的问题, 在恢复载波的过程中, 会出现残余频偏和相位模糊的问题, 在这种情况下, 调制识别算法的性能会急剧下降。针对这一问题, 文献[8]采用一种改进的高阶累积量的分类算法, 但该算法仅对 MDPSK 信号有效。从现有可以获得的文献来看, 只有很少的文献在研究调制识别时考虑残余频偏的问题。本文受文献[3,6]的启发, 提出一种基于四阶循环累积量的分类算法。该算法较好地解决了存在载波频偏、相位旋转和时延的调制识别问题, 并且能够在多信号(干扰)环境以及存在载波频偏的情况下识别感兴趣的信号类型。

### 2 信号模型及其循环累积量特征

在完成载波同步后, 接收的星形 QAM 信号的基带表示为

$$x(t) = e^{j(2\pi\Delta f_c t + \theta)} \sum_k s_k p(t - kT - t_0) + w(t) \quad (1)$$

其中  $\{s_k = s_{kI} + j \cdot s_{kQ}\}$  表示第  $k$  个符号周期内的发送符号, 它是零均值独立同分布的复符号序列。  $T, \Delta f_c, \theta, t_0$  分别表示符号周期、载波频率偏差、相位旋转和时延。  $w(t)$  是功率未知的宽平稳复加性噪声,  $p(t)$  表示脉冲成形函数, 本文采用最常用的升余弦脉冲函数。

循环平稳信号  $x(t)$  的  $n$  阶时变矩函数(TMf) 定义为  $n$  阶滞后积的期望值<sup>[9,10]</sup>:

2005-05-30 收到, 2005-10-15 改回

国家自然科学基金和微软亚洲研究院联合资助项目(60372048), 国家自然科学基金重大项目(60496316), 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划, 教育部科学技术研究重点项目(104171)和国家 863 计划重大课题(2005AA123910)资助课题

$$\tilde{m}_{x, nm}(t, \boldsymbol{\tau}) = \hat{E}^{(\alpha)} \left\{ \prod_{j=1}^n x^{(*)j}(t + \tau_j) \right\} = \sum_{\boldsymbol{\tau}} M_{x, nm}^{\alpha}(\boldsymbol{\tau}) e^{j2\pi\alpha t} \quad (2)$$

其中  $\boldsymbol{\tau}$  是一个滞后向量:  $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]$ ,  $\tau_j$  表示延迟。 $\alpha$  称为循环频率。 $m(m = 0, 1, \dots, n/2)$  表示  $n$  阶滞后积中取共轭的因子总数,  $(*)_j$  是根据取共轭的因子总数  $m$  选择  $x(t)$  的第  $j$  个因子  $x(t + \tau_j)$  是否取共轭。 $M_{x, nm}^{\alpha}(\boldsymbol{\tau})$  表示信号  $x(t)$  的  $n$  阶循环矩。 $\hat{E}^{(\alpha)}\{\cdot\}$  表示正弦波抽取运算:

$$\hat{E}^{(\alpha)}\{g(t)\} = \sum_{\alpha} \langle g(t) e^{-j2\pi\alpha t} \rangle_t e^{j2\pi\alpha t} \quad (3)$$

式中, 时间平均算子  $\langle g(t) e^{-j2\pi\alpha t} \rangle_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) e^{-j2\pi\alpha t} \cdot dt$ 。与  $n$  阶时变矩函数(TMF)相应的  $n$  阶时变累积量函数(TCF)可以由 M-C(Moment to Cumulants)转换得到<sup>[9]</sup>:

$$c_{x, nm}(t, \boldsymbol{\tau}) = \sum_{U_{j=1}^p I_j = I} (-1)^{p-1} (p-1)! \prod_{j=1}^p \tilde{m}_{x, n_j m_j}(t, \boldsymbol{\tau}') \quad (4)$$

集合  $I = \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $I_j$  表示集合  $I$  的无交连的非空分割, 分割数为  $p$ 。 $x(t)$  在循环频率  $\beta$  处的  $n$  阶循环累积量可表示为

$$C_{x, nm}^{\beta}(\boldsymbol{\tau}) = \langle c_{x, nm}(t, \boldsymbol{\tau}) e^{-j2\pi\beta t} \rangle_t \quad (5)$$

对于式(1)所对应的 SQAM 信号, 在循环频率  $\alpha$  处的  $n$  阶循环累积量为<sup>[5]</sup>

$$C_{x, nm}^{\alpha}(\boldsymbol{\tau}) = \frac{C_{s, nm}}{T} e^{j2\pi\beta t_0} e^{j(n-2m)\theta} \prod_{k=1}^n [e^{j2\pi\Delta f_c \tau_k}]^{(*)k} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{j=1}^n p^{(*)j}(t + \tau_j) e^{-j2\pi\beta t} dt \quad (6)$$

循环频率  $\alpha$  为

$$\alpha = \beta + (n-2m)\Delta f_c, \quad \beta = k/T, \quad k \in \mathbb{Z} \quad (7)$$

式(6)中,  $C_{s, nm}$  表示序列符号  $s_k$  的  $n$  阶累积量, 由式(8)定义<sup>[1]</sup>:

$$C_{s, nm} = \text{cum}(\underbrace{s, \dots, s}_{n-m}, \underbrace{s^*, \dots, s^*}_m) \quad (8)$$

循环累积量除了继承了累积量的性质之外, 还具有其本身重要的性质, 其中循环累积量对感兴趣信号的选择性性质是累积量所没有的。在多信号(干扰)环境下, 不同符号周期  $T_k$  的信号模型可表示为

$$z(t) = x_0(t, T_0) + \dots + x_{k-1}(t, T_{k-1}) + w(t) \quad (9)$$

不失一般性, 假定感兴趣的信号为  $x_0(t, T_0)$ , 并且  $T_0 \neq mT_j$ ,  $j \neq 0$ ,  $m$  是正整数。由于  $k$  个信号只有  $x_0(t, T_0)$  在循环频率  $1/T_0$  处有非零的循环累积量, 可以得到<sup>[3,4]</sup>

$$C_{z, nm}^{1/T_0}(\boldsymbol{\tau}) = C_{x_0, nm}^{1/T_0}(\boldsymbol{\tau}) \quad (10)$$

利用循环累积量的这个性质, 可以将感兴趣的信号类型从多个信号(干扰)中识别出来。

### 3 分类特征选择

利用循环累积量作为识别特征时, 循环频率是个重要的

参数。由于信号中存在未知的载波频率偏差, 导致循环频率偏离了原来的位置  $k/T$ , 如果取  $m = n/2$ , 可消除载波频率偏差对循环频率的影响。另外, 滞后向量  $\boldsymbol{\tau} = [0, 0, \dots, 0]$ , 式(6)中载波频率偏差的影响也可消除。此外, 对于符号长度为  $T$  的循环平稳信号, 它在循环频率  $1/T$  处的能量远远大于  $1/T$  的高次谐波处的能量<sup>[9,10]</sup>, 且可以消除平稳噪声的影响, 因此本文选择的循环频率为  $1/T$ 。综合以上分析本文选择如下分类特征:

$$\left| C_{x, 42}^{1/T}(0, 0, 0) \right|^{1/4} = \left[ \frac{|C_{s, 42}|}{T} \cdot \left| \int_{-\infty}^{\infty} |p(t)|^4 e^{-j2\pi t/T} dt \right| \right]^{1/4} \quad (11)$$

分类特征对循环累积量取模, 是为了消除时延  $t_0$ 、相位旋转  $\theta$  以及载波频率偏差  $\Delta f_c$  的影响。序列符号  $s_k$  的四阶累积量  $C_{s, 42}$  可在能量归一化的条件下由式(8)获得, 具体为

$$C_{s, 42} = M_{42} - |M_{20}|^2 - 2M_{21}^2 \quad (12)$$

式中  $M_{nm} = E[s^{n-m}(k)(s^*(k))^m]$ 。通过运算可得到各择集中 3 种信号的累积量  $C_{s, 42}$  的理论值:

$$C_{s, 42} = \begin{cases} -2, & 2\text{QAM} \\ -1, & 4\text{QAM} \\ -0.72, & 16\text{SQAM} \end{cases} \quad (13)$$

通过以上分析可以看出, 本文所定义的分类特征消除了载波频率偏差、时延和相位旋转的影响。分类特征需要利用码元速率和成形脉冲的先验信息。利用所构造的分类特征  $|C_{x, 42}^{1/T}(0, 0, 0)|^{1/4}$  和模式识别中用于度量模式相似性的欧氏距离分类方法对各择集合的信号进行分类, 分类准则为

$$\hat{m} = \arg \min_{\Omega} \left( \left| \hat{C}_{x, 42}^{1/T}(0, 0, 0) \right|^{1/4} - \left| C_{x, 42}^{1/T}(0, 0, 0) \right|^{1/4} \right)^2 \quad (14)$$

$|\hat{C}_{x, 42}^{1/T}(0, 0, 0)|^{1/4}$  是从观测样本中对信号分类特征值的估计值<sup>[11]</sup>,  $\hat{m}$  是调制方式的识别结果,  $\Omega$  表示各择集合。

### 4 性能仿真和分析

为了从不同的侧面评估所提出算法的性能, 本文对算法进行了 3 组仿真试验。各择集合为  $\Omega = \{2\text{QAM}, 4\text{QAM}, 16\text{SQAM}\}$ , 星座如文献[8]。成形脉冲采用滚降系数为 0.35 的升余弦脉冲, 假定感兴趣信号的码元速率已知。分类特征的估计值根据观测样本获得<sup>[11,12]</sup>。

**仿真试验 1** 本试验为了考察信噪比和样本长度对算法性能的影响, 并且比较存在载波频率偏差时算法的性能损失。试验中码元宽度  $T=8$ , 观测码元数  $N$  分别为 800, 1500 个, 信噪比的变化范围是 0dB 到 20dB, 变化步长为 1dB。在每个信噪比上进行 500 次仿真实验, 每次独立等概率地从各择集合中选取一种调制方式。仿真结果如图 1 所示, 可以看出, 当符号信噪比大于 3dB 时, 算法具有较好的性能, 并且随着信噪比和观测符号的增加, 性能逐渐变好。图中还给出了在归一化载波频率偏差  $\Delta f_c T = 5 \times 10^{-4}$ , 观测符号长度为 800 时分类器的性能, 可以看出, 在正确识别率达到 0.9

时,由于频偏的存在,算法有约2.9dB的性能损失。

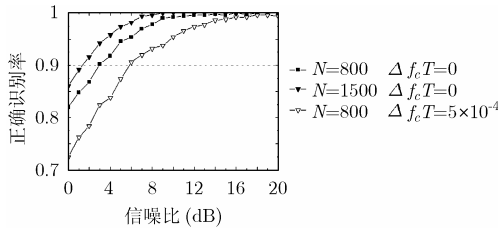


图1 调制识别算法性能随符号信噪比的变化

**仿真试验 2** 本试验为了考察载波频率偏差对算法的性能的影响,仿真结果如图2。试验中观测码元数  $N$  分别为800, 1500个,符号信噪比为10dB,归一化载波频率偏差的变化范围是  $1 \times 10^{-4}$  到0.2。可以看出,在归一化载波频率偏差小于0.1时,算法对载波频率偏差表现出较强的稳健性,调制方式正确识别率均在0.90以上。文献[6]仅给出了归一化载波频率偏差小于  $1 \times 10^{-3}$  的仿真结果,为了与文献[6]进行对比,本文在归一化载波频率偏差从  $1 \times 10^{-4}$  变化到0.2的范围内,对文献[6]的算法进行了仿真。可以看出,在归一化载波频率偏差小于  $1 \times 10^{-3}$  时,本文与文献[6]算法基本有相同的性能;而在归一化载波频率偏差大于  $1 \times 10^{-3}$  时,文献[6]算法性能严重下降,而本文算法在归一化载波频率偏差小于0.1均表现出较好的性能。

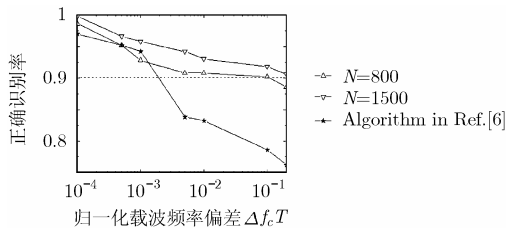


图2 载波频率偏差对算法性能的影响

**仿真试验 3** 本试验为了观察多信号(干扰)情况下算法的性能随信干比的变化情况。归一化载波频率偏差为  $1 \times 10^{-4}$ ,符号信噪比为10dB,观测码元数  $N$  分别为800, 1500个,信干比变化范围是0dB到20dB,变化步长2dB。仿真中考虑最不利的情况,假定干扰信号和感兴趣信号的调制方式相同,成形脉冲均采用滚降系数为0.35的升余弦脉冲。感兴趣信号的符号宽度为  $T_{s1} = 8$ ,干扰信号的符号宽度为  $T_{s2} = 5$ 。归一化频偏  $\Delta f_c T = 1 \times 10^{-4}$ 。仿真结果如图3,在观测符号长度为800,信干比大于8dB时,算法对感兴趣信号调制方式的正确识别率在0.9以上,并且随着观测样本的增加,算法抗干扰的能力也随着提高。当信干比逐渐增大时,干扰信号对感兴趣信号的影响逐渐变弱,因此识别性能逐渐变好。为了对比,图3还给出了没有载波频率偏差、观测码元为800时算法在两信号环境下的识别性能。可以看出,在两信号(干扰)环境下,算法对载波频率偏差也具有较好的稳健性。

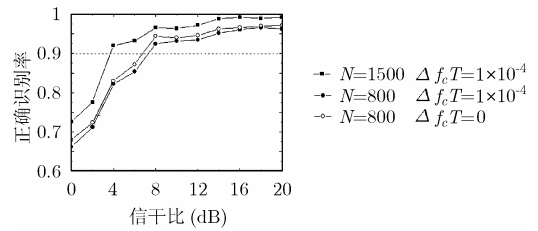


图3 存在干扰信号环境下算法的性能

## 5 结束语

本文研究了非理想环境下的SQAM信号调制识别问题,在循环累积量域内利用通信信号具有的循环平稳特性构造分类特征,提出了一种对载波频率偏差、时延和相位旋转具有稳健性的调制识别算法。本文首先在理论上证明了算法的正确性,并从不同的侧面对算法进行了仿真,以评估算法的性能。仿真结果表明,在存在载波频率偏差的情况下,分类算法性能仅有较小的信噪比损失,当归一化载波频率偏差小于0.1时,载波频率偏差对算法性能的影响较小,调制方式正确识别率在0.9以上。在两信号(干扰)环境并且存在载波频率偏差情况下,当观测符号长度为800,信干比大于8dB时,算法具有较强的抗干扰能力,对感兴趣信号调制方式的正确识别率可达到0.9,验证了算法在多信号(干扰)环境下对感兴趣信号的识别能力和对载波频率偏差的稳健性。

## 参考文献

- [1] Swami A and Sadler B M. Hierarchical digital modulation classification using cumulants [J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2000, 48(3): 416-429.
- [2] Marchard P, Lacoume J L, and Martret C. Classification of linear modulations by a combination of different orders cyclic cumulants [C]. in Proc. Workshop on HOS, Banff, Canada, 1997: 47-51.
- [3] Spooner C M. On the utility of sixth-order cyclic cumulants for RF signal classification [C]. in Proc. of the 34<sup>th</sup> Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, USA, 2001: 890-897.
- [4] Spooner C M. Classification of cochannel communication signal using cyclic cumulants [C]. in Proc. of the 29<sup>th</sup> Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, USA, 1995: 531-536.
- [5] Dobre O A, Bar-Ness Y, and Su W. Higher-order cyclic cumulants for high order modulation classification [C]. in Proc. IEEE MILCOM, Boston, USA, 2003: 112-117.
- [6] Dobre O A, Bar-Ness Y, and Su W. Robust QAM modulation classification algorithm using cyclic cumulants [C]. in Proc. IEEE WCNC, Atlanta, USA, 2004: 745-748.
- [7] 陈卫东. 基于循环累积量不变量的MPSK信号调制识别算法[J].

- 电子与信息学报, 2003, 25(3): 320-325.
- Chen Wei-dong. Algorithm for modulation classification of MPSK signals based on cyclic cumulant invariants. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2003, 25(3): 320-325.
- [8] 韩钢. 自适应单载波、多载波调制中信号盲检测技术研究 [D]. [博士学位论文], 西安: 西安电子科技大学, 2003.
- Han Gang. Research on blind signal detection techniques in adaptive single- and multi-carrier modulation [D]. [Ph.D. Dissertation], Xidian University, 2003.
- [9] Gardner W A and Spooner C M. The cumulant theory of cyclostationary time-series, Part I: Foundation [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1994, 42(12): 3387-3408.
- [10] Spooner C M and Gardner W A. The cumulant theory of cyclostationary time-series, Part II: Development and Applications [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1994, 42(12): 3409-3429.
- [11] Dandawate V and Giannakis G B. Asymptotic theory of mixed time averages and  $l$ th-order cyclic-moment and cumulant statistics [J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1995, 41(1): 216-232.
- [12] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 355-358.
- 冯 祥: 男, 1968 年生, 博士生, 研究方向为无线个人通信、自适应传输、软件无线电等.
- 李建东: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 中国通信学会会士, IEEE高级会员, 中国电子学会高级会员, 第一届和第四届 863高技术个人通信技术专业专家组成员, 总装备部通信导航测控专业专家组成员, 主要从事宽带无线IP技术、移动通信、软件无线电、Ad hoc自组织网络、战术互联网等方面的研究.