

# 一种改进的基于累积量的 MDPSK 信号分类算法

韩 钢<sup>1</sup>, 李建东<sup>2</sup>, 李长乐<sup>2</sup>, 蔡雪莲<sup>2</sup>

(11 中兴通讯股份有限公司, 广东深圳 518057; 21 西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室信息科学研究所, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 本文研究了收发双方存在载波频差时利用累积量实现调制分类这一实际问题, 提出一种改进的基于累积量的信号分类算法. 新算法利用信号相位星座图和各阶累积量的对应关系, 提取累积量特征. 该特征对于星座图的平移、尺度和相位旋转以及收发载频存在的频差具有不变性. 本文从理论上证明了新特征的不变性, 并利用计算机仿真评估了该算法的分类性能. 仿真结果表明这种算法具有良好的分类性能.

**关键词:** 累积量; 调制分类; 频偏

中图分类号: TN914.13 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2004) 10-1613-04

## An Improved Classification Algorithm of MDPSK Signals Based on Cumulants

HAN Gang<sup>1</sup>, LI Jian2dong<sup>2</sup>, LI Chang2le<sup>2</sup>, CAI Xue2lian<sup>2</sup>

(11 ZTE Corporation, Shenzhen, Guangdong 518057, China; 21 National Key Laboratory on ISN, Xidian University, Xi. an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** An improved algorithm for classification of MDPSK signals based on cumulants is presented in this paper, which is robust to the error of the carrier synchronization. The new algorithm uses the corresponding relationship between signal difference phase constellation and higher order cumulants. From the relationship a new feature is derived. The feature is invariant with respect to constellation scale, rotation, the shift and the carrier frequency offset between transmitter and receiver. The invariant property of the feature is proved in theory. The simulation results show that the new classification algorithm is high in performance.

**Key words:** cumulants; modulation classification; frequency offset

## 1 引言

调制识别问题长久以来一直应用在如电子对抗、通信情报截获等非合作通信领域中<sup>[1]</sup>. 随着通信理论和通信技术的发展, 调制识别作为智能接收机参数自动识别的一个方面也用于合作通信领域. 软件无线电台作为“网桥”, 要实现不同调制体制通信设备间的互连互通, 解决方案之一就是先识别出发射方的调制制式和调制参数, 解调后得到信息, 再按照接收方采用的调制方式, 把有用的信息调制转发至接收方.

调制识别一般分为<sup>[1]</sup>: 相干分类、非相干分类、同步分类、异步分类等. 其中相干分类指在载波同步的条件下实现的分类, 即已知载波频率和载波的初始相位, 而非相干分类指未知载波初始相位时信号的分类; 同步分类指已知码元速率和码元定时信息时实现的分类, 而异步分类指符号定时信息未知时的信号分类. 多年来, 国内外提出了很多自动调制识别的方法. 这些方法中不同的假设条件下的分类的方式不同; 如文献[2, 3]属于非相干分类, 文献[4, 5]则属于在相干、同步分类. 需要指出的是在软件接收机等通信接收机中, 同步的实现是一个比较棘手的问题, 特别是当信号调制制式未知时. 那么这

些调制识别算法应用时同步、相干的假设条件在实际中如何实现, 即如何实现载波同步以及定时同步, 当存在的一定同步误差时对识别算法性能的影响如何? 这些是值得研究的问题.

本文就上述问题进行了讨论, 根据相干分类存在的问题, 提出一种基于频偏稳健的 MDPSK 信号分类算法, 根据信号星座图和各阶累积量的对应关系, 提出新的信号分类特征向量. 该特征不仅对于信号星座图的平移、尺度和相位旋转具有不变性, 而且对于收发载频存在的频差具有不变性, 最后利用计算机仿真评估了算法的分类性能.

## 2 问题模型

现代通信的发展要求通信接收机应具有越来越高的智能性, 通信信号的调制识别以及参数估计作为通信智能化的一个方面显得越来越重要.

利用高阶累计量识别通信信号是调制识别研究的一个热点. 由于高斯噪声大于 2 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, 因此高阶累计量具有良好的抗噪声性能.

收稿日期: 20020906; 修回日期: 200408212

基金项目: 国家 863 计划重大项目 (No. 2001AA123031); 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和高校骨干教师资助计划; 国家自然科学基金 (No. 69872028)

信号的高阶累积量包含着信号星座图的信息<sup>[4]</sup>, 信号星座图不同则具有不同的累积量, 因此高阶累积量可以看作是信号星座图的一个签名, 验证签名即可识别信号调制类型. 文献[4, 5]研究了利用高阶累积量实现调制识别问题, 这两种算法对于 MPSK 信号分类具有很高的识别概率. 然而它们研究的前提都是在相干、同步情况下实现信号的分类, 即实现了载波同步和码元定时同步下的信号分类. 在数字通信中, 通常有两种调整同步的方法, 一种是采用反馈的方法, 利用一个反馈环路调整本地时钟和相位, 如利用锁相环等; 另一种是不用反馈直接从信号中估计频偏并提取同步定时信息, 找到接收信号的最佳样点. 当接收信号中包含了多个信道信号时, 由于每个信道的信号频偏和同步定时不同, 因此通信接收机通常采用第二种同步方法. 在第一种同步方法中, 可以得到准确的载波同步, 这时可利用文献[4, 5]的算法进行调制识别. 而在第二种同步方法中, 需要在离散采样点中估计频偏然后纠正偏移, 然而无论频偏估计算法性能如何良好, 都不可能做到完全的载波同步, 会存在微小的偏差, 而这个偏差会导致原有算法的失效, 这是因为由于频偏的存在引起星座图的旋转, 导致信号失去星座图原有的信息, 此时即使在理想定时情况下也无法得到原始星座图的正确信息. 下面证明在存在频偏条件下原算法的性能.

相位调制信号是应用最广的调制方式, 调相信号分为绝对调相(PSK)和相对调相(DPSK)两种方式, 两种调制方式的星座图完全相同, 如 2PSK 与 2DPSK 信号相同, 4PSK 与 4DPSK 信号相同. 绝对调相信号常常会出现“倒 0”现象, 因此在实际通信中通常采用差分调相信号. 因此本文以差分调相信号 DPSK 为例讨论分类算法.

接收到的 MDPSK 理想波特率采样信号为

$$r(i) = s(i) + n(i) = \sqrt{E} \cos(X_d iT + H_i + U_i) + n(i) \quad (1)$$

其中  $E$  是信号的平均功率,  $s(i)$  为第  $i$  个码元的信息,  $X_c$  是载波频率,  $H_c$  是初相角,  $U_i$  是第  $n$  个码元相位,  $U_i = \exp \sum_{j=1}^i \Delta U_j$ ,  $\Delta U_j$  为对应的第  $j$  个码元的差分相位,  $T$  为码元周期;  $n(i)$  是第  $i$  个码元的噪声, 噪声功率大小未知.

文献[5]中的原始算法是基于 4 阶累积量不变量的识别算法, 信号调制制式的判决是通过计算信号累积量的分类特征向量  $F_s$  进行.

首先  $F_s$  定义为

$$F_s = [f_{s1}, f_{s2}] = \left[ \left| \frac{C_{s,40}}{C_{s,42}} \right|, \left| \frac{C_{s,41}}{C_{s,42}} \right| \right] \quad (2)$$

其中:  $\{C_{s,4n}, n=0, 1, 2\}$  是平稳复信号  $s(k)$  的四阶累积量, 分别定义为

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

$$C_{s,41} = \text{Cum}[s^*(k), s(k), s(k), s(k)] = M_{41} - 3M_{21}M_{20} \quad (4)$$

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

公式中  $s^*(k)$  表示信号的复共轭;  $M_{pq}$  代表信号的第  $p$  阶矩, 定义为

$$M_{pq} = E[x(k)^p x^*(k)^q] \quad (6)$$

假设发射的信号序列是独立同分布的, 经过计算, 可以得到 MDPSK 信号的累积量. 以 2DPSK, 4DPSK 和 8DPSK 为例, 信号的累积量分别如表 1 所示.

表 1 列出的是理想情况下, 信号各阶累积量的理论值. 下面我们讨论存在频偏情况下, 各累积量将如何变化.

表 1 DPSK 信号的累积量

累积量 信号	$C_{s,21}$	$C_{s,42}$	$C_{s,41}$	$C_{s,40}$	$F_s, \text{MDPSK}$
2DPSK	E	$-2E^2$	$-2E^2 e^{2H}$	$-2E^2 e^{4H}$	[1, 1]
4DPSK	E	$-E^2$	0	$E^2 e^{4H}$	[1, 0]
8DQPSK	E	$-E^2$	0	0	[0, 0]

设接收端与发送端载波频差为  $\Delta X_c$ , 先不考虑噪声的影响, 第  $i$  个码元的绝对相位表示为

$$H_i = X_c iT + H_c + U_i \quad (7)$$

第  $i+1$  个码元的绝对相位表示为

$$H_{i+1} = X_c (i+1)T + H_c + U_{i+1} \quad (8)$$

从公式(7)、(8)可以看到在存在载波频偏时, 除了信息码元本身携带的差分相位外, 当前码元的绝对相位比前一个码元的绝对相位多  $\Delta X_c T$ , 由于频偏引起的绝对相位的增长随着观察码元的增加而增加. 这部分相位增长会使信号的标准星座图发生变化. 这一点可以从图 1 中进一步观察, 以 4DPSK 为例, 信号绝对相位标准星座图如图 1(a) 所示. 设在初始相位为零的情况下, 如果接收的差分码元序列为  $\{0, \pi/2, 0, \pi/2, \dots\}$  时, 则存在载波频偏时信号的绝对相位星座图如图 1(b) 所示. 可以看到, 随着观察时间的增加, 由于频偏而引起的相位旋转将使信号星座点充满整个单位圆.

信号星座图决定着累积量的值, 星座图不同则具有不同的累积量, 因此高阶累积量可以看作是信号星座图的一个签名, 验证签名即可区分信号调制类型, 这是利用高阶累积量分类信号调制方式的基本思想. 因此, 由于频偏引起信号星座图结构发生变化, 信号累积量的值也就随着变化, 导致分类无法完成.

以 4DPSK 为例, 4DPSK 信号绝对相位标准星座图对应的四阶累积量( $C_{s,41}, C_{s,42}$ )为  $(0, E^2 e^{4H})$ . 由于存在频偏, 信号绝对相位点充满整个单位圆, 四阶累积量( $C_{s,41}, C_{s,40}$ )变为  $(0, 0)$ , 失去了 4DPSK 信号星座图应具有累积量信息. 同理在存在频偏的情况下 2DPSK、8DPSK 等信号绝对相位星座图均与图 1(b) 相同, 四阶累积量( $C_{s,41}, C_{s,40}$ )变为  $(0, 0)$ , 绝对相位星

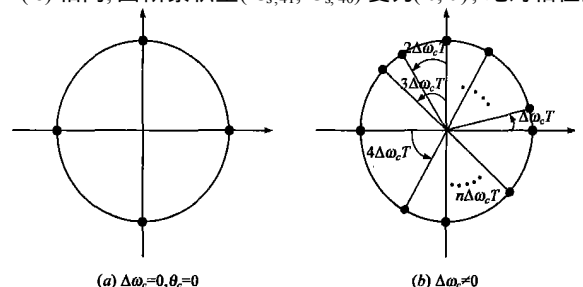


图 1 4DPSK 绝对相位标准星座图和存在载波频偏时星座图

座图失去原有特征, 导致失去累积量信息, 信号分类算法失效. 因此需要找到新的对于频偏稳健的特征.

### 3 改进的累积量的信号分类算法

这里提出一种基于差分相位星座图的改进的基于累积量的信号分类算法, 可以较好的解决上面的问题, 论述如下.

当载波频差为  $\$ X_c$  时, 第  $n$  个码元和第  $n-1$  个码元间差分相位表示为

$$\$ H_n = \$ U_n + \$ X_c T \quad (9)$$

第  $n+1$  个码元和第  $n$  个码元间差分相位表示为

$$\$ H_{n+1} = \$ U_{n+1} + \$ X_c T \quad (10)$$

从公式 (9)、(10) 可以看到, 除了信息码元本身携带的差分相位信息外, 任意两个码元之间由于频偏引入的差分相位相同, 并没有像绝对相位一样随着观察码元的增加而增加. 仍以 4DPSK 为例, 图 2 为存在载波频差时信号差分相位的星座图. 从图 2(b) 中可以看到频偏的存在相当于引入了一个  $\$ X_c T$  的相位旋转. 根据这个原理, 我们提出改进的基于累积量的信号识别算法.

定义由差分相位信息得到新的复数序列为差分复数序列

$$\mathbf{x}(n) = \exp(j\$ H(n)) = \exp(j\$ X_c T + j\$ U_n) \quad (11)$$

并定义改进的 MDPSK 信号分类算法的新特征向量  $F_{\mathbf{x}}$  为

$$F_{\mathbf{x}} = [f_{slc}, f_{\Delta}] = \left[ \left| \frac{C_{\mathbf{x}, 40}}{C_{\mathbf{x}, 42}} \right|, \left| \frac{C_{\mathbf{x}, 41}}{C_{\mathbf{x}, 42}} \right| \right] \quad (12)$$

公式中  $\{C_{\mathbf{x}, 4n}, n=0, 1, 2\}$  为利用各种信号差分复数序列计算的四阶累积量.

对应不同的信号, 差分相位  $\$ U_n$  有不同的取值, 假设发射的信号序列是独立同分布的, 即差分相位  $\$ U_n$  相互独立, 可以得到各种信号差分复数序列的累积量理论值如表 2 所示.

表 2 MDPSK 信号的差分复数序列的累积量

累积量 信号	$C_{\mathbf{x}, 21}$	$C_{\mathbf{x}, 42}$	$C_{\mathbf{x}, 41}$	$C_{\mathbf{x}, 40}$	$F_{\mathbf{x}, \text{MDPSK}}$
2DPSK	1	-2	$-2e^{j2\$ X_c T}$	$-2e^{j4\$ X_c T}$	[1, 1]
4DPSK	1	-1	0	$e^{j4\$ X_c T}$	[1, 0]
8DPSK	1	-1	0	0	[0, 0]

表中  $F_{\mathbf{x}, \text{MDPSK}}$  为 MDPSK 信号分类特征向量. 利用特征向量  $F_{\mathbf{x}, \text{MDPSK}}$  和模式识别中用于度量模式相似性的欧氏距离分类方法, 得到改进的基于累积量的 MDPSK 信号分类的判决准则为

$$M = \arg \min_M (\|F_r - F_{\mathbf{x}, \text{MDPSK}}\|^2) \quad (13)$$

式中  $\| \cdot \|$  表示向量求模运算,  $F_r$  是从接收序列中提取的新的信号特征向量.

新特征除了具有文献 [5] 中对于平移、尺度和相位旋转具有不变性的特性以外, 更重要的一点是: 对于收发载波频差, 新特征也具有不变性. 证明如下.

定义接收信号为<sup>[5]</sup>

$$y_k = H \exp(jH_0) r_k + M \exp(jB) \quad (14)$$

式中  $H$ ,  $H_0$  和  $M \exp(jB)$  分别表示对 MDPSK 星座图的尺度、

旋转和复平面上的二维平移. 通过去均值处理可以去除平移的影响, 所以下面只考虑尺度、相位旋转和频偏变换下的不变性.

通过正交混频滤波, 得到接收信号同相分量  $W$  和正交分量  $Z$

$$W(i) = H \cos(\$ X_c iT + H_0 + U_i + H_b(i)) \quad (15)$$

$$Z(i) = H \sin(\$ X_c iT + H_0 + U_i + H_b(i)) \quad (16)$$

式中,  $H_b(i)$  是噪声引入的干扰相位. 计算第  $i$  点相位

$$H(i) = \tan^{-1} \left( \frac{Z(i)}{W(i)} \right) = \$ X_c iT + H_0 + U_i + H_b(i) \quad (17)$$

于是, 可以得到差分相位

$$\$ H(i) = H(i) - H(i-1) = \$ X_c T + \$ U_i + \$ H_b(i) \quad (18)$$

由差分相位信息, 新的复数序列为

$$\mathbf{x}(i) = \exp(\$ H(i)) = \exp(\$ X_c T + \$ U_i + \$ H_b(i)) \quad (19)$$

从公式 (18) 可以看出, 新的复数序列已经和尺度、旋转  $H, H_0$  无关. 把差分相位复数序列的各阶累积量代入公式 (12), 得到新的特征向量. 其差分相位复数序列的各阶累积量取了绝对值, 消除了频偏项, 因此新的信号分类特征向量与频偏无关. 由此得证.

最后需要指出的是, 高阶累积量作为信号星座图的一个签名识别信号调制类型. 但是当存在噪声时, 噪声会对差分相位星座图带来干扰. 高斯白噪声通过三角函数运算后不再服从高斯分布, 这时累积量计算对算法抗噪声性能有所影响; 下一节, 我们将通过仿真实验评估新算法的性能.

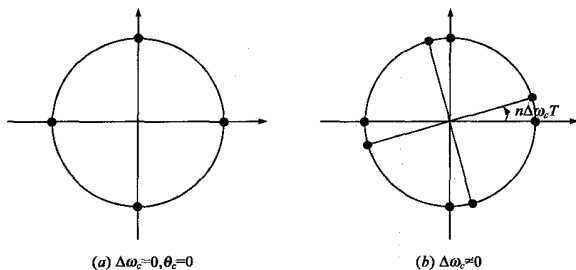


图 2 4DPSK 绝对相位标准星座图和存在载波频偏时星座图

### 4 性能仿真

在本节中, 利用计算机仿真实验来评估新算法的性能. 在仿真中, 对 8 阶以下的 MDPSK 信号, 独立进行 500 次 Monte Carlo 实验. 信号调制采用升余弦滚降滤波器, 滚降系数  $A=0.5$ , 并假设已知码元定时信息. 图 3 给出了在 2/4/8DPSK 信号分类时, 不同数据长度对分类概率的影响. 可以看到在 10dB 时, 三种数据长度的分类概率都达到了 95% 以上, 其中当观察数据长度为 1000 时, 分类概率达到了 100%. 而在信噪比低于 10dB 时, 算法的分类性能有所下降, 分析原因是在低信噪比下,

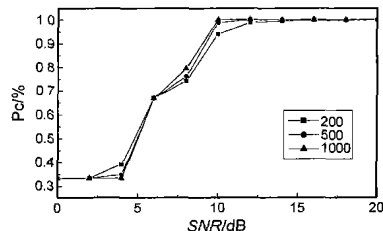


图 3 不同数据观察长度对分类性能的影响 (2/4/8DPSK 分类)

噪声的影响导致差分星座图的抖动增加,并且高斯白噪声通过三角函数运算后不再服从高斯分布,影响算法的抗噪声性能.图4给出了在收发频偏为零时,观察数据长度为200时本文的算法与文献[5]中原始算法的性能比较,可以看出在低信噪比时,本文的算法与文献[5]相比大约有5dB的性能损失.

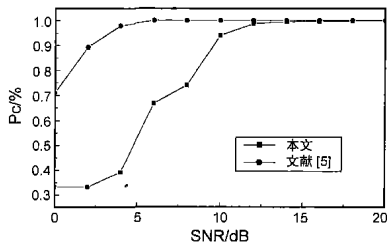


图4 本文算法与文献[5]原始算法的性能比较

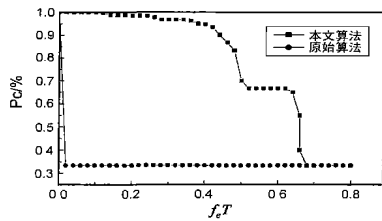


图5 频偏对分类算法的影响

图5给出当信噪比为10dB时,观察数据长度为500时,频偏对信号分类算法的影响,可以看到,原始算法在存在频偏条件下性能急剧下降,而本文算法对于频偏具有较强的稳健性.当频偏小于 $0.14r_s$ ,分类概率均大于95%,在通信接收机中,通过频偏纠正算法纠正频偏之后,完全可以满足算法的要求,成功完成存在频偏条件下信号的分类.

P/4-DQPSK和8DPSK信号由于抗干扰性较强,频谱利用率高,在通信中应用较多,这两种信号的绝对相位星座图相同,频谱形状也相同,对于这两种信号的分类,国内外还无此工作.这两种信号接收时,解调判决门限不同,如果信号调制方式识别错误,会引入很大的误码率.对于原始算法,由于两种信号绝对相位星座图相同,无法区分这两种信号.利用本文的算法可以很好的完成这两种信号的调制方式识别.

图6给出了这两种信号分类时,不同数据长度对分类概率的影响,从图中可以看出在信噪比为10dB时,观察长度为200码元时分类概率达到94%,观察数据长度为500码元时分类概率达到98%,而应用8DPSK调制传输信号时需要的信噪比通常是相对较高的,所以信号分类器可以很好的完成分类.

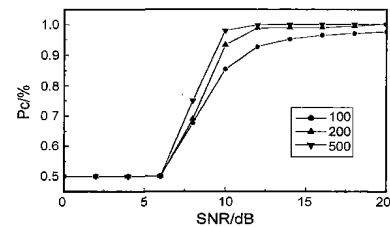


图6 P/4-DQPSK和8DPSK信号分类

## 5 结论

在信号调制制式识别问题中,在相干、同步条件下利用高阶累积量实现信号分类是一类比较典型的研究方法.我们针

对信号接收时存在收发载波频偏这个问题提出一种改进的基于累积量的MDPSK信号分类算法.该算法不仅对于信号星座图的平移、尺度和相位旋转具有不变性,而且对于存在的收发频差具有不变性.我们从理论上证明了该不变性,并利用计算机仿真评估了新算法的分类性能,与已有算法进行了性能比较,新算法对于频偏具有比较好的稳健性,解决了收发载波存在频差时,原始算法失效这一实际问题.

## 参考文献:

- [1] K Kim, A Polydoros. On the detection and classification of quadrature digital modulations in broadband noise[J]. IEEE Trans. on Commun., 1990, 38(8): 1199- 1211.
- [2] A K Nandi, E E Azzouz. Algorithms for automatic modulation recognition of communication signals[J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 46(1): 431- 436.
- [3] F Beidas, L Weber. Asynchronous classification of MFSK signals using the higher order correlation domain[J]. IEEE Trans. on Comm., 1998, 46(4): 480- 493.
- [4] A Swami, B M Sadler. Hierarchical digital modulation classification using cumulants[J]. IEEE Trans. on commun., 2000, 48(3): 416- 429.
- [5] Yang Shaoquan, Chen Weidong. Classification of MPSK signals using cumulant invariants, Journal of Electronics[J]. 2002, 19(1): 99- 103.
- [6] J Chuang, Nelson R. Sollenberger. Burst coherent demodulation with combined symbol timing frequency offset estimation, and diversity selection[J]. IEEE Trans. on Commun., 1991, 39(7): 1157- 1164.
- [7] N Sollenberger, J Chuang. Low overhead symbol timing and carrier recovery for TDMA portable radio system[J]. IEEE Trans. on Commun., 1990, 38(10): 1886- 1892.
- [8] 张睿. 软件无线电中的信号检测技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学博士研究生学位论文, 2001.

## 作者简介:



韩 钢 男,1975 年生于陕西铜川,博士,毕业于西安电子科技大学通信与信息系统专业,现工作于深圳中兴通讯股份有限公司,主要从事信号检测,软件无线电等方面的研究工作. Email: ghan@pcn.xidian.edu.cn.

李建东 (见本期第1604页)

李长乐 男,1976 年生于新疆博乐,IEEE 学生会会员,现为西安电子科技大学通信与信息系统专业博士研究生,主要从事移动通信、智能天线技术等方面的研究工作.

蔡雪莲 女,1978 年生于陕西西安,现为西安电子科技大学通信与信息系统专业博士研究生,主要从事移动通信、大规模 ad hoc 网络等方面的工作.