

引用格式: 刘鹏飞, 克兢, 王雪, 等. 一种基于高阶累积量和谱特征结合的卫星信号调制识别方法[J]. 时间频率学报, 2023, 46(1): 71-83.

# 一种基于高阶累积量和谱特征结合的 卫星信号调制识别方法

刘鹏飞<sup>1,2</sup>, 克兢<sup>1</sup>, 王雪<sup>3</sup>, 赵航<sup>1</sup>, 商鹏<sup>1</sup>, 褚梓樾<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 西安电子科技大学, 西安 710071)

**摘要:** 为了提升卫星通信系统的频带利用率, 卫星通信信号常采用升余弦、高斯等信号成形方法。由于信号高阶累积量的理论值以矩形成形为基础, 未考虑其他成形方式, 采用上述理论值作为特征参量将导致信号调制识别性能受限。针对这一问题, 仿真了升余弦成形后的 BPSK、QPSK、8PSK、OQPSK、 $\pi/4$ -QPSK、16QAM 和高斯成形后的 GMSK 等 7 种信号的高阶累积量并提取特征, 同时基于信号包络四次方谱提取 GMSK 信号的识别特征。在提取上述两类特征和信号四次方谱特征的基础上, 使用决策树分类器对上述 7 种常见卫星信号进行调制识别。仿真结果表明, 在信噪比为 3 dB 下, 所提算法对 7 种信号的调制识别概率可以达到 95%。

**关键词:** 卫星信号; 升余弦成形; 特征提取; 调制识别; GMSK 信号

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2023-01-0071-13

## A satellite signal modulation recognition method based on high-order cumulants and spectral characteristics

LIU Peng-fei<sup>1,2</sup>, KE Jing<sup>1</sup>, WANG Xue<sup>3</sup>, ZHAO Hang<sup>1</sup>,

SHANG Peng<sup>1</sup>, CHU Zi-Yue<sup>1,2</sup>

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In order to improve the frequency band utilization of satellite communication system, satellite communication signals often adopt signal shaping methods such as raised cosine and Gaussian. Since the theoretical value of the signal high-order cumulant was based on rectangular shaping, other shaping methods were not considered, and the use of the above-mentioned theoretical value as a characteristic parameter will result in limited signal modulation recognition performance. In response to this problem, this paper simulated the high-order cumulants of seven signals such as BPSK, QPSK, 8PSK, OQPSK,  $\pi/4$ -QPSK, 16QAM after raised

收稿日期: 2022-04-29; 接受日期: 2022-05-20

基金项目: 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部青年学者”资助项目(XAB2021YN20)

cosine shaping and GMSK after Gaussian shaping and extracting features. At the same time, the identification features of the GMSK signal were extracted based on the fourth power spectrum of the signal envelope. On the basis of extracting the above two types of features and the fourth power spectrum feature of the signal, a decision tree classifier was used to perform modulation recognition on the above seven common satellite signals. The simulation results shown that when the signal-to-noise ratio was 3 dB, the modulation recognition probability of the seven kinds of signals can reach 95%. In addition, the influence of signal-to-noise ratio, roll-off factor, the number of symbols and the number of sampling points per symbol on the performance of the algorithm were also analyzed.

**Key words:** satellite signal; raised cosine shaping; feature extraction; modulation recognition; GMSK signal

## 0 引言

卫星信号调制识别技术是空间信号分析的重要内容,其作为信号检测和信号解调的中间环节,要求接收方在缺少先验知识的情况下准确快速的得到信号的调制方式并获取信息,在频谱监测、电子对抗、情报收集等方面具有重要意义。

目前信号调制识别技术主要基于似然比检验和特征提取。似然比检验<sup>[1]</sup>是根据接收信号的似然函数来确定合适的门限,然后在贝叶斯最小代价准则下进行判决。当检测统计量模型与实际信道特性相匹配时,信号识别正确率高。由于似然比检验存在计算复杂和模型失配的问题,特征提取以其分析简单,先验信息要求少成为当下研究热点。较为成熟的特征包括信号高次方谱<sup>[2]</sup>、循环谱<sup>[3-4]</sup>、高阶累积量<sup>[5-8]</sup>、星座图聚类<sup>[9-10]</sup>、瞬时统计特征<sup>[11]</sup>、循环相关熵谱<sup>[12-13]</sup>等。文献[14]采用高阶累积量和高次方谱对卫星通信系统常用的几种 PSK 信号和 16APSK 信号进行分类识别,但未考虑升余弦脉冲成形,实际应用范围较为局限;文献[15]虽然考虑了升余弦脉冲成形,但所提出的两个高阶累积量特征仅能区分两种不同信号,识别类型少、特征不稳定且仅给出了固定滚降因子下信号高阶累积量值的变化;文献[16]利用信号包络平方谱中是否存在单频分量来区分模拟调制和数字调制,所提算法对升余弦滚降因子不敏感,但并未给出卫星通信系统中常用数字调制方式的识别方法。文献[17]在考虑信号升余弦成形和高斯成形的基础上,通过检测信号高次方谱和分数低阶循环自相关谱中的冲激谱线来识别调制方式,但该方法需要较为精确的载频和带宽估计,对信噪比要求较高。

针对以上问题,本文首先对升余弦成形后的 BPSK、QPSK、8PSK、OQPSK、pi/4-QPSK、16QAM 信号和高斯成形后的 GMSK 信号的高阶累积量进行仿真,提取六阶累积量 $|C_{63}|$ 和八阶累积量 $|C_{80}|$ 作为高阶累积量特征;其次,在文献[17]的基础上提出了一种 GMSK 信号识别特征;最后,提取上述两类特征和信号四次方谱特征,使用决策树分类器对上述 7 种成形信号做调制识别并分析算法性能的影响因素。

## 1 高阶累积量和谱特征

### 1.1 高阶累积量

理论上已证明,高斯过程二阶以上累积量的值为 0<sup>[6]</sup>。因此高阶累积量可以很好地抑制高斯白噪声,也可用于提取非高斯信号。假定一个平稳复随机信号  $X(t)$  的均值为 0,则  $X(t)$  的  $p$  阶混合矩<sup>[18]</sup>为

$$M_{pq} = E\{X(t)^{p-q} \bar{X}(t)^q\}。 \quad (1)$$

式(1)中, $\bar{X}(t)$ 表示 $X(t)$ 的共轭, $E(\cdot)$ 为取均值。

信号  $X(t)$  的高阶累积量<sup>[18]</sup> 定义为

$$C_{pq} = \text{cum}(\underbrace{X(t), \dots, X(t)}_{(p-q)\uparrow}, \underbrace{\bar{X}(t), \dots, \bar{X}(t)}_{q\uparrow})。 \quad (2)$$

式(2)中,  $C_{pq}$  代表信号的高阶累积量;  $p$  为所取累积量阶数, 即  $\text{cum}(\cdot)$  中随机变量的个数;  $q$  为  $\text{cum}(\cdot)$  中随机变量取共轭的个数, 且  $0 \leq q \leq p$ 。因此不同阶数  $p$  的累积量依据不同的  $q$  值可以衍生出多个不同的累积量。

根据信号混合矩推得高阶累积量<sup>[18]</sup>

$$\text{cum}(x_1, \dots, x_p) = \sum_{\phi} (\eta - 1)! (-1)^{\eta-1} \prod_{\varphi \in \phi} E[\prod_{i \in \varphi} x_i]。 \quad (3)$$

式(3)中,  $\phi$  遍历  $1 \sim p$  的所有值,  $\varphi$  遍历  $\phi$  中的值,  $\eta$  为  $\varphi$  中的元素个数。

根据公式(1)、(2)、(3)可推得:

二阶累积量:

$$\begin{aligned} C_{20} &= \text{cum}(X(t), X(t)) = M_{20}, \\ C_{21} &= \text{cum}(X(t), \bar{X}(t)) = M_{21}。 \end{aligned} \quad (4)$$

四阶累积量:

$$\begin{aligned} C_{40} &= \text{cum}(X(t), X(t), X(t), X(t)) = M_{40} - 3M_{20}^2, \\ C_{41} &= \text{cum}(X(t), X(t), X(t), \bar{X}(t)) = M_{41} - 3M_{20}M_{21}, \\ C_{42} &= \text{cum}(X(t), X(t), \bar{X}(t), \bar{X}(t)) = M_{42} - M_{20}^2 - 2M_{21}^2。 \end{aligned} \quad (5)$$

六阶累积量:

$$\begin{aligned} C_{60} &= \text{cum}(X(t), X(t), X(t), X(t), X(t), X(t)) = M_{60} - 15M_{40}M_{20} + 30M_{20}^3, \\ C_{63} &= \text{cum}(X(t), X(t), X(t), \bar{X}(t), \bar{X}(t), \bar{X}(t)) = M_{63} - 6M_{41}M_{20} - 9M_{21}M_{42} + 18M_{21}M_{20}^2 + 12M_{21}^3。 \end{aligned} \quad (6)$$

八阶累积量:

$$C_{80} = \text{cum}(X(t), X(t), X(t), X(t), X(t), X(t), X(t), X(t)) = M_{80} - 28M_{60}M_{20} - 35M_{40}^2 + 420M_{20}^2M_{40} - 630M_{20}^4。 \quad (7)$$

## 1.2 信号包络谱及包络高次方谱

实信号  $x(t)$  的解析信号形式为

$$f(t) = x(t) + j\hat{x}(t) = A(t)e^{j(2\pi f_c t + \varphi(t))} + n(t)。 \quad (8)$$

式(8)中,  $\hat{x}(t)$  为  $x(t)$  的希尔伯特变换,  $A(t)$  为信号瞬时幅度,  $f_c$  为载波频率,  $\varphi(t)$  为信号瞬时相位,  $n(t)$  为复高斯白噪声。

提取复信号  $f(t)$  的包络, 可用  $f(t)$  与其共轭形式相乘, 再取根号, 从而消除相位因子, 保留幅度信息。去除直流分量后, 对信号包络取一次或高次方, 通过傅里叶变换可得信号包络谱或信号包络的高次方谱。以 8PSK、pi/4-QPSK 和 GMSK 信号为例, 设置码元速率为 4 kb/s, 信噪比为 10 dB, 仿真结果见图 1。3 种信号的包络谱均存在冲激谱线, 8PSK 和 pi/4-QPSK 信号包络的平方谱和四次方谱含有冲激谱线, 而 GMSK 信号包络的平方谱和四次方谱不含冲激谱线。因此, 可以根据信号包络平方谱或四次方谱是否具有冲激谱线对上述 3 种信号中的 GMSK 信号进行区分。

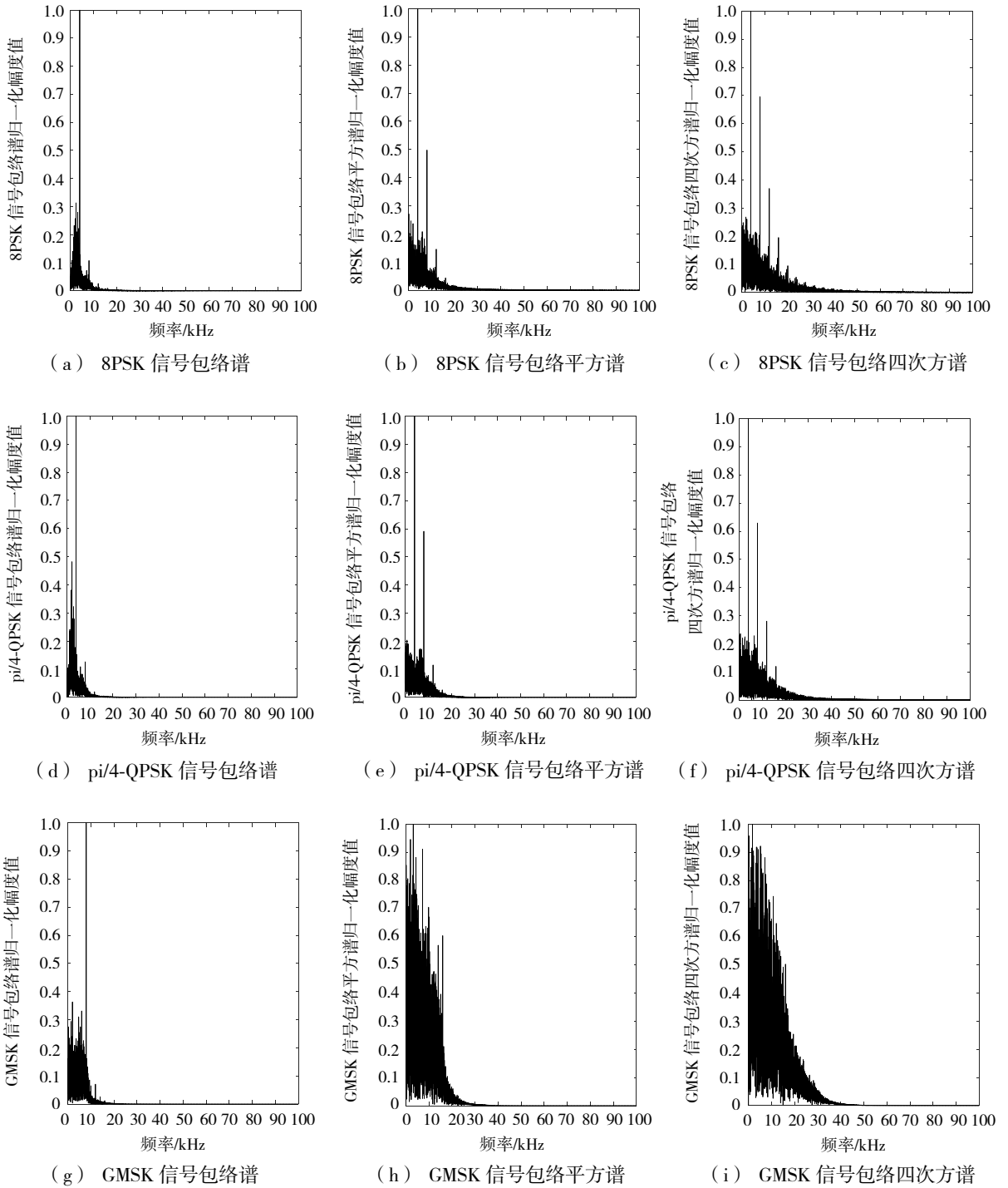


图 1 8PSK、pi/4-QPSK 和 GMSK 信号的包络谱、包络平方谱和包络四次方谱的仿真结果

### 1.3 信号四次方谱

假定接收信号不存在噪声、频偏、相偏和码片延时，则接收到的中频信号表达式为

$$s(t) = x(t)e^{j2\pi f_m t} \quad (9)$$

式(9)中： $x(t) = \sum_n c_n g(t - nT_b)$ ，为基带信号； $f_m$ 为信号中频； $c_n = a_n + jb_n$ ，为符号信息； $g(\cdot)$ 为

成形滤波函数； $T_b$  为符号周期。

基带信号  $x(t)$  的四次方的平均期望<sup>[19]</sup>为

$$E\{x^4(t)\} = E\left\{\left[\sum_n c_n g(t - T_b)\right]^4\right\} = E\left\{\left[\sum_n (a_n + jb_n)g(t - T_b)\right]^4\right\} = \sum_n E[(a_n^4 + b_n^4 - 6a_n^2 b_n^2)g^4(t - nT_b)]. \quad (10)$$

基带信号  $x(t)$  的四次方谱<sup>[19]</sup>为

$$P(f) = \sum_n E(a_n^4 + b_n^4 - 6a_n^2 b_n^2)[G(f) * G(f) * G(f) * G(f)]\delta(f - \frac{n}{T_b}). \quad (11)$$

式 (11) 中， $G(f)$  为成形滤波函数  $g(\cdot)$  的傅里叶变换， $*$  为卷积符号。

由此可知，基带信号四次方谱中是否存在冲激谱线取决于  $E(a_n^4 + b_n^4 - 6a_n^2 b_n^2)$  是否为 0。以 8PSK 和  $\pi/4$ -QPSK 基带信号为例：前者  $E(a_n^4 + b_n^4 - 6a_n^2 b_n^2) = 0$ ，其四次方谱中不含冲激谱线；后者  $E(a_n^4 + b_n^4 - 6a_n^2 b_n^2) \neq 0$ ，其四次方谱在  $f_b/2$  ( $f_b$  为码元速率) 处含有冲激谱线，仿真结果示于图 2。

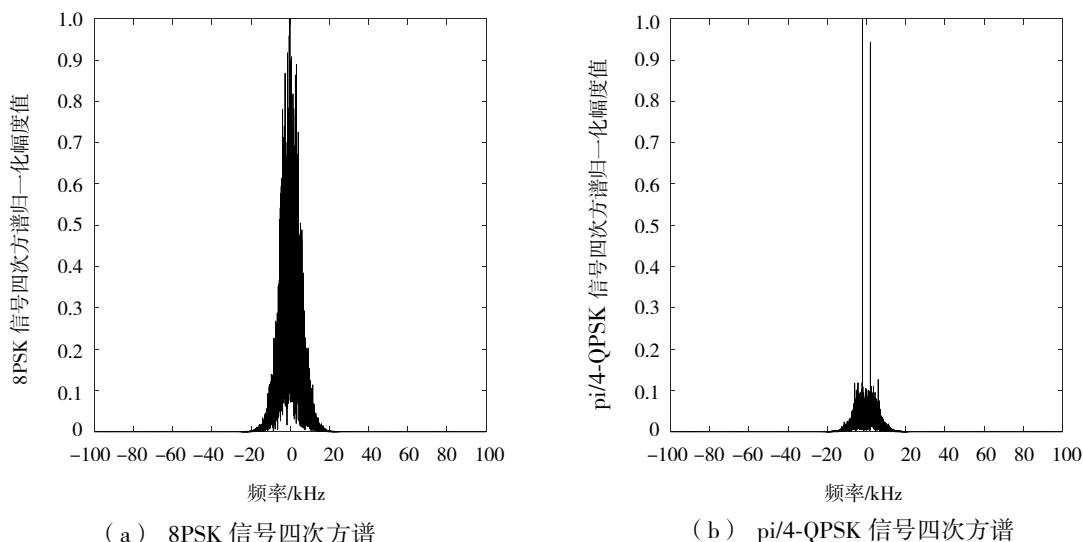


图 2 8PSK 信号与  $\pi/4$ -QPSK 信号四次方谱的仿真结果

## 2 特征提取与调制识别

### 2.1 高阶累积量特征提取

卫星通信信号在经过升余弦滚降成形后，其高阶累积量相较矩形成形后的数值会发生变化。目前高阶累积量的理论值均以信号矩形成形为前提，所以现有文献中的高阶累积量理论值无法作为其他成形方式取值的参考<sup>[15]</sup>。设置如下仿真参数：信号码元速率为 4 kb/s；采样率为 200 kHz；载波频率为 10 kHz；仿真时间 100 ms；升余弦滚降因子为 0.4（GMSK 信号事先经过高斯成形，不再做升余弦成形）；信噪比为 15 dB。对上述 7 种基带成形信号的高阶累积量进行仿真，如表 1 所示。由于累积量阶数越高，相应的计算复杂度也随之升高，所以不宜提取阶数太高的累积量，本文最高提取到八阶。

表 1 7 种基带成形信号的高阶累积量仿真值

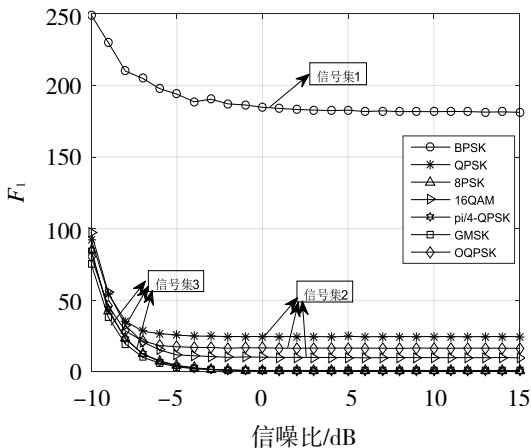
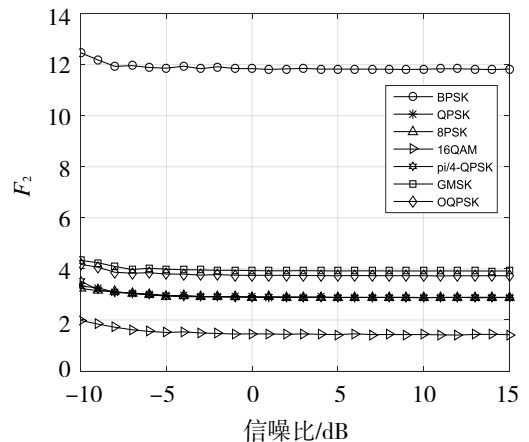
调制方式	$ C_{20} $	$ C_{21} $	$ C_{40} $	$ C_{41} $	$ C_{42} $	$ C_{60} $	$ C_{63} $	$ C_{80} $
BPSK	1.00	1.00	1.65	1.65	1.65	11.80	11.80	181.00
QPSK	0.04	1.00	0.87	0.12	0.80	0.50	2.88	24.70
8PSK	0.04	1.00	0.05	0.14	0.80	0.07	2.88	0.89
OQPSK	0.03	1.00	0.70	0.09	1.00	0.30	3.70	16.60
pi/4-QPSK	0.04	1.00	0.03	0.14	0.80	0.05	2.88	0.60
16QAM	0.05	1.00	0.60	0.17	0.50	0.50	1.40	9.80
GMSK	0.03	1.00	0.16	0.07	1.00	0.10	4.00	1.00

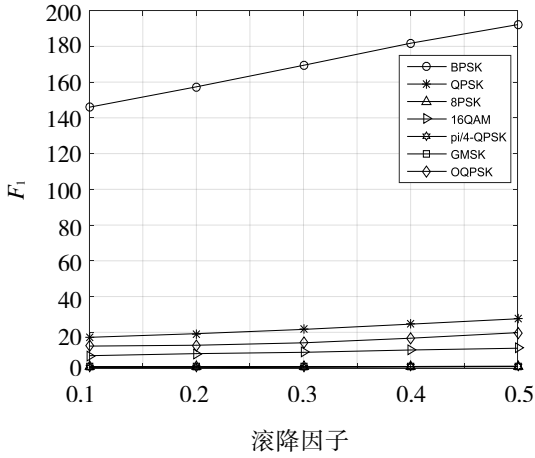
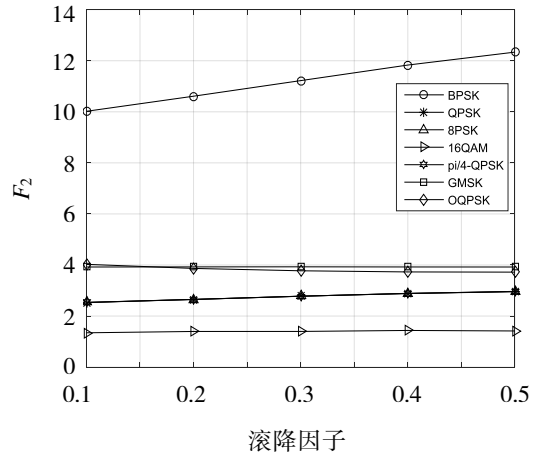
由表 1 中的数值结果可知,在考虑滚降成形的情况下,7 种信号的二阶及四阶累积量取值近似相等,对信号的区分度不大。除 BPSK 信号外,其余信号的六阶累积量  $|C_{60}|$  取值近似为 0,信号识别类型太少。为使信号区分明显且识别类型较多,我们选取  $|C_{63}|$  或  $|C_{80}|$  作为高阶累积量特征。为方便描述,将两个特征给予如下定义:

$$\begin{cases} F_1: |C_{80}| \\ F_2: |C_{63}| \end{cases} \quad (12)$$

设定信噪比变化范围为  $-10 \sim 15$  dB,其余仿真参数与表 1 相同,对 7 种信号在不同信噪比下的特征  $F_1$  和  $F_2$  进行仿真分析,结果分别见图 3 和图 4。可以看出,两类特征在  $-5$  dB 以上具有良好的稳定性且数值边界明显。特征  $F_1$  相较  $F_2$  区分信号种类更多,可将 7 种信号分类为 {BPSK}、{QPSK}、{OQPSK}、{16QAM} 和 {8PSK、pi/4-QPSK、GMSK} 5 个信号集。

卫星通信信号升余弦滚降因子的取值范围一般为  $0.1 \sim 0.5$ ,令滚降因子的初值和步长均为 0.1,终值为 0.5,信噪比为 10 dB,对 7 种信号的上述两个特征进行仿真,结果分别见图 5 和图 6。可以看出,BPSK、QPSK、OQPSK 和 16QAM 信号的特征  $F_1$  随着滚降因子的变化也发生变化;BPSK 信号的两个特征虽然变化较大,但与其他信号区分明显;相较于  $F_1$ ,上述 4 种信号的特征  $F_2$  更为稳定。因此为使高阶累积量特征区分信号种类较多且对滚降因子不敏感,我们选取  $F_1$  和  $F_2$  联合作为高阶累积量特征用于区分上述 4 种信号。其中特征  $F_1$  将 7 种信号粗分为 {BPSK}、{QPSK、OQPSK、16QAM} 和 {8PSK、pi/4-QPSK、GMSK} 3 个信号集,特征  $F_2$  用于细分 {QPSK、OQPSK、16QAM} 信号集。

图 3 7 种信号的特征  $F_1$  随信噪比的变化图 4 7 种信号的特征  $F_2$  随信噪比的变化

图 5 不同滚降因子下 7 种信号的特征  $F_1$ 图 6 不同滚降因子下 7 种信号的特征  $F_2$ 

## 2.2 谱特征提取

通过 2.1 节所述的两个高阶累积量特征可实现对 BPSK、QPSK、OQPSK 和 16QAM 4 种信号的识别，此处仅考虑 8PSK、pi/4-QPSK 和 GMSK 3 种信号的识别。8PSK 和 pi/4-QPSK 信号经过升余弦成形后包络起伏较大，可以称之为非恒包络信号<sup>[20]</sup>，而高斯成形后的 GMSK 信号属于恒包络信号。从图 1 (c)、(f) 和 (i) 中可以看出，8PSK 和 pi/4-QPSK 信号包络四次方谱存在冲激谱线，而 GMSK 信号包络四次方谱不存在冲激谱线，因此该特征可用于识别 GMSK 信号。

根据 1.3 节中 pi/4-QPSK 基带信号四次方谱在  $f_b/2$  处存在冲激谱线，而 8PSK 信号不存在可知：对于 8PSK 和 pi/4-QPSK 信号的类内识别，选用信号四次方谱是否存在冲激谱线作为谱特征即可。

文献[17]在最大谱值频率处做了线性调频 Z 变换 (CZT) 以消除 FFT 带来的“栅栏效应”，使得谱特征更加稳定，分类效果更好，对此使用该方法提取信号包络四次方谱和信号四次方谱特征。过程如下：

1) 利用 CZT 方法找出 8PSK、pi/4-QPSK 和 GMSK 信号包络四次方谱线实际最大值  $B(f_{\max})$  和对应频率  $f_{\max}$ 。步骤如下：

① 对上述 3 种信号的四次方包络  $b(n)$  做离散傅里叶变换，找到信号包络四次方谱谱线最大值  $B(f_{\max})$  及其对应的频率值  $f_{\max}$ 。

② 设定频率细化范围为  $[f_{\max} - i\Delta f, f_{\max} + i\Delta f]$ ，其中  $\Delta f$  为频率分辨率。为减少计算，取  $i=1$  即可。然后对该段频率做 CZT 细化，CZT 算法通过提高这段频率的分辨率细化对应的频谱，进而找到实际的  $B(f_{\max})$  和  $f_{\max}$ 。

对于 8PSK 和 pi/4-QPSK 信号，信噪比较高时， $f_{\max}$  即为码元速率。如下图 7 所示，信噪比为 0 dB 时，8PSK 和 pi/4-QPSK 信号包络四次方谱最大谱线对应的频率为 4 kHz，与设定的码元速率数值相同。因此，可直接将信号包络四次方谱最大谱线对应的频率作为码元速率  $f_b$  的估计值，用于检测 8PSK 和 pi/4-QPSK 信号四次方谱在  $f_b/2$  处是否存在冲激谱线，减少计算复杂度。

2) 设定窗口长度  $L$ ，将 GMSK 信号包络四次方谱最大谱线值与其两边  $2L$  长度的谱线均值的比值作为特征  $F_3$ ，即

$$F_3 = \frac{B_{\text{GMSK}}(f_{\max})}{\frac{1}{2L} \sum_{i=1}^L [B_{\text{GMSK}}(f_{\max} - i\Delta f) + B_{\text{GMSK}}(f_{\max} + i\Delta f)]} \quad (13)$$

式 (13) 中， $B(\cdot)$  代表信号包络四次方谱值， $f_{\max}$  为信号包络四次方谱线最大值对应的频率， $\Delta f$  为频率分辨率。

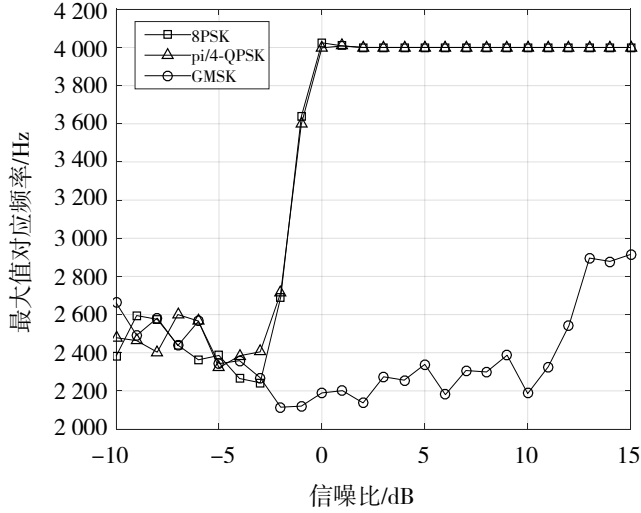


图 7 3 种信号包络四次方谱线最大值对应的频率

3) 对  $f_{\max} / 2$  位置处的频率进行 CZT 细化, 找到 8PSK 和 pi/4-QPSK 信号四次方谱实际最大值  $S(f'_{\max})$  和实际位置  $f'_{\max}$ 。

4) 设定窗口长度  $L'$ , 将 pi/4-QPSK 信号四次方谱的最大谱线值与其两边  $2L'$  长度的谱线均值的比值作为特征  $F_4$ , 即

$$F_4 = \frac{S_{\text{pi/4-QPSK}}(f'_{\max})}{\frac{1}{2L'} \sum_{i=1}^{L'} [S_{\text{pi/4-QPSK}}(f'_{\max} - i\Delta f) + S_{\text{pi/4-QPSK}}(f'_{\max} + i\Delta f)]} \quad (14)$$

式(14)中,  $S(\cdot)$  代表信号四次方谱值,  $L'$  为窗口长度;  $f'_{\max}$  为信号四次方谱线最大值对应的频率,  $\Delta f$  为频率分辨率。

## 2.3 调制识别算法流程

在完成上述特征提取后, 本文采用决策树分类器对上述 7 种常见卫星通信信号进行调制识别。预先设定:  $th1$ ,  $th2$  为特征  $F_1$  的分类门限;  $ch1$ ,  $ch2$  为特征  $F_2$  的分类门限;  $tch1$  为特征  $F_3$  的分类门限;  $tch2$  为特征  $F_4$  的分类门限;  $f_b$  为信号包络四次方谱实际最大谱线值对应的频率, 即估计的码元速率。信号调制识别流程如下:

① 对上述 7 种信号提取特征  $F_1$ 。若  $F_1 \geq th1$ , 则识别为 BPSK 信号; 若  $F_1 \leq th2$ , 则识别为 {QPSK、OQPSK、16QAM} 信号集; 若  $th2 < F_1 < th1$ , 则识别为 {8PSK、pi/4-QPSK、GMSK} 信号集。依据表 1 中得到的数值结果, 门限  $th1$  可取为 BPSK 信号和 QPSK 信号的高阶累积量  $|C_{80}|$  的中间值; 门限  $th2$  可取为 16QAM 信号和 GMSK 信号的高阶累积量  $|C_{80}|$  的中间值。

② 当信号识别为 {QPSK、OQPSK、16QAM} 信号集, 对信号提取特征  $F_2$ 。若  $F_2 \geq ch1$ , 则识别为 OQPSK 信号; 若  $ch2 < F_2 < ch1$ , 则识别为 QPSK 信号; 若  $F_2 \leq ch2$ , 则识别为 16QAM 信号。当信号识别为 {8PSK、pi/4-QPSK、GMSK} 信号集, 对信号提取特征  $F_3$  并估计码元速率  $f_b$ 。若  $F_3 \leq tch1$ , 则识别为 GMSK 信号, 否则识别为 {8PSK、pi/4-QPSK} 信号集。其中门限  $ch1$  取值为表 1 中 QPSK 信号和 OQPSK 信号的高阶累积量  $|C_{63}|$  的中间值; 门限  $ch2$  取值为 QPSK 信号和 16QAM 信号的高阶累积量  $|C_{63}|$  的中间值; 通过多次蒙特卡洛仿真得到 8PSK、pi/4-QPSK 和 GMSK 信号各自特征  $F_3$  的平均值, 取 8PSK 和 pi/4-QPSK 信号特征  $F_3$  平均值的最小值, 该值与 GMSK 信号特征  $F_3$  的平均值的中间值可作为分类门限  $tch1$ 。

③ 当信号识别为 {8PSK、pi/4-QPSK} 信号集时, 根据②中估计的  $f_b$  对信号提取特征  $F_4$ 。若  $F_4 \geq tch2$ , 则识别为 pi/4-QPSK 信号, 否则为 8PSK 信号。其中门限  $tch2$  取值为多次仿真后 8PSK 和 pi/4-QPSK 信号



特征  $F_4$  平均取值的中间值。

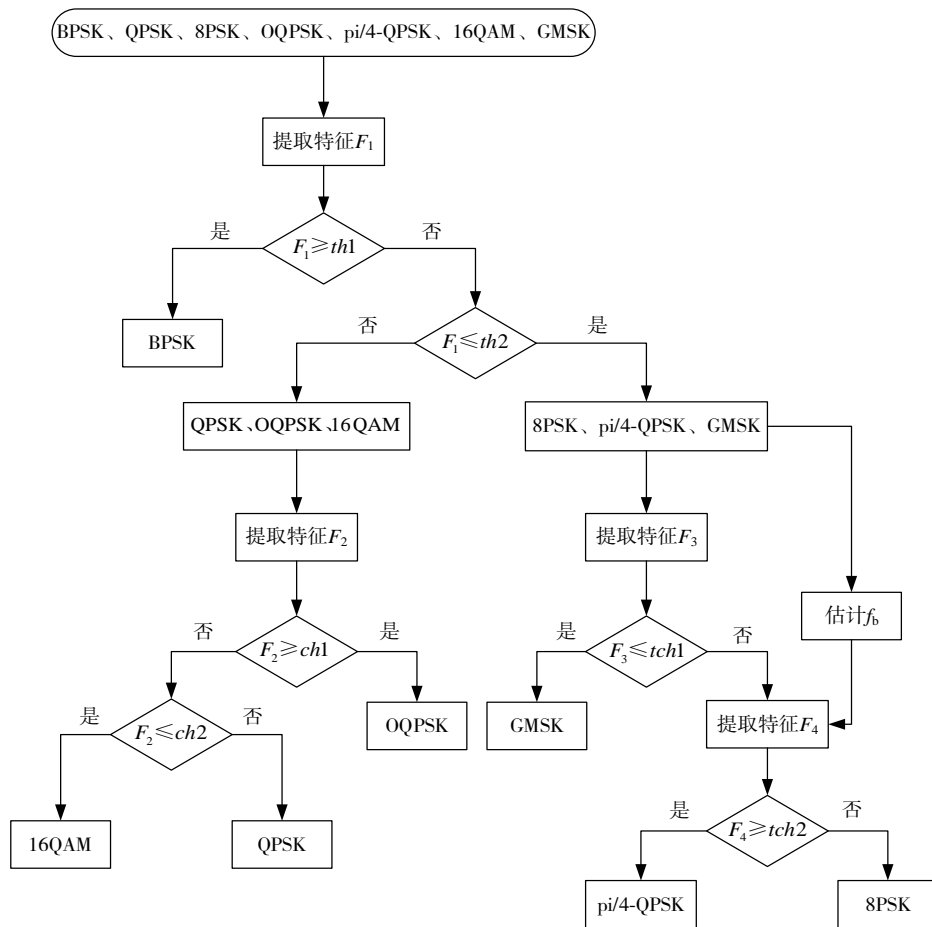


图 8 7 种卫星通信信号调制识别流程图

### 3 调制识别算法性能

#### 3.1 不同信噪比下 7 种信号的正确识别概率

为验证所提算法的识别性能，本文根据信号预处理流程得到基带信号并提取特征，然后根据算法进行调制识别。设置如下仿真参数：信号码元速率为 4 kb/s；采样率为 200 kHz；载波频率为 10 kHz；仿真时间为 100 ms；升余弦滚降因子为 0.4；信噪比范围为 -10~15 dB；窗口长度  $L$  和  $L'$  均为 10；信道噪声为高斯白噪声。每种信号的正确识别概率<sup>[21]</sup>定义为

$$P_i(R) = \frac{n_i(R)}{n} \times 100\%, i = 1, \dots, 7. \quad (15)$$

式 (15) 中： $P_i(R)$  代表每种信号在每个信噪比下的正确识别概率； $n$  为蒙特卡洛仿真次数； $n_i(R)$  为每种信号在每个信噪比下识别正确的次数。

由图 9 可以看出该算法对 BPSK 信号的识别性能最好，信噪比在 -6 dB 时能够达到 95%；信噪比在 -3 dB 时，OQPSK 信号的正确识别概率达到 95%，GMSK 信号达到 99%；信噪比为 0 dB 时，16QAM 信号和 QPSK 信号的正确识别概率达到 95%；8PSK 信号和 pi/4-QPSK 信号在信噪比为 3 dB 时能够达到 95%，两种信号的正确识别概率取决于码元速率  $f_b$  估计的准确度。总体来看，该算法在信噪比为 3 dB 时对 7 种信号的调制识别概率可以达到 95%。

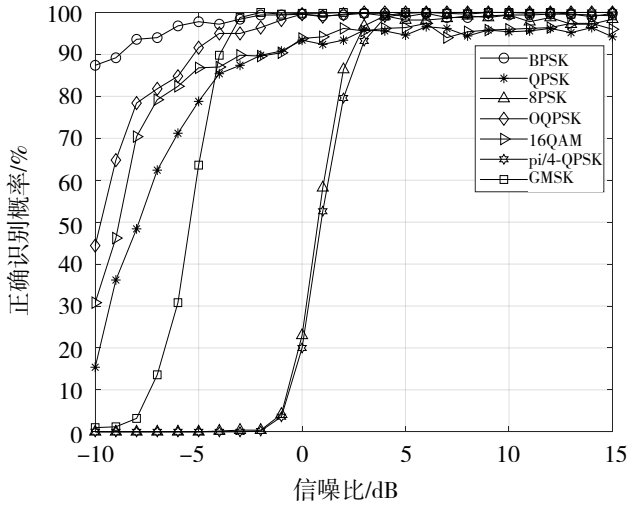


图 9 不同信噪比下 7 种信号的正确识别概率

### 3.2 本文所提算法性能分析

由于文献[14]未考虑升余弦成形后信号高阶累积量的变化,文献[15]采用固定滚降因子值且信号调制方式与本文有所不同,文献[16]未给出数字调制方式的分类方法,因此这里我们不予比较。文献[17]在考虑信号升余弦成形和高斯成形的基础上,提取信号高次方谱和分数低阶循环自相关谱两种特征对上述 7 种信号进行调制识别,与本文设定情形相似,在同等变量条件下将本文所提算法与其比较更具说服力,下面比较两种算法的性能。信噪比设置为 0~15 dB,信号平均识别概率<sup>[21]</sup>定义为

$$P'(R) = \frac{\sum_{i=1}^7 P_i(R)}{7} \times 100\% \quad (16)$$

式(16)中,  $P'(R)$  为所有信号在不同信噪比下的平均识别概率;  $P_i(R)$  为每种信号在每个信噪比下正确识别的概率。

如图 10 所示,本文提出的算法在信噪比为 3 dB 时信号的平均识别概率达到 95%,而文献[17]的算法在 6 dB 时达到 95%。信噪比较小时,本文所提算法的平均识别概率更高,性能更好。

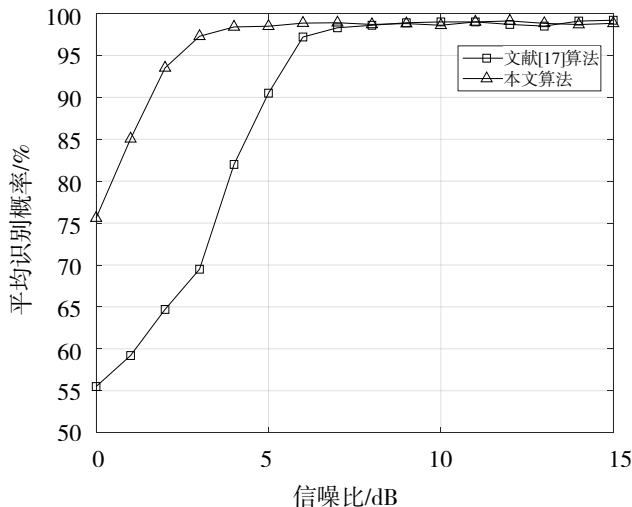


图 10 算法性能比较

### 3.3 调制识别算法性能的影响因素

#### 3.3.1 滚降因子

选定信号升余弦滚降因子  $r$  的范围为 0.1~0.5，步进为 0.1，在不同信噪比下对信号的平均识别概率（如 3.2 节定义）进行仿真。由图 11 可以看出，同一信噪比而不同滚降因子下，信号的平均识别概率近似相等。因此，可以说明所提算法基本不受滚降因子的影响。

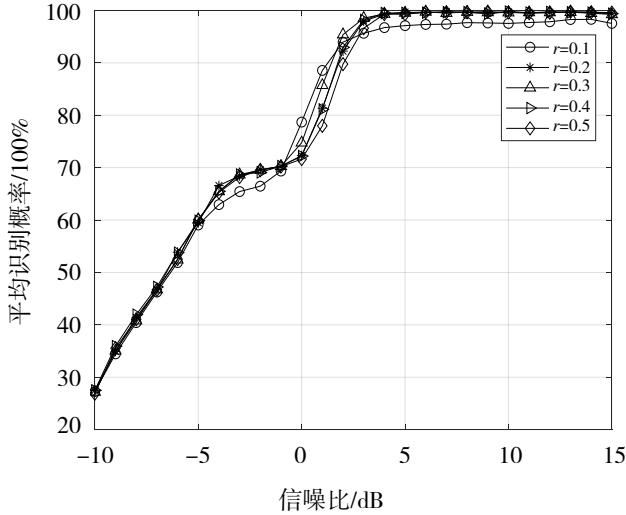


图 11 滚降因子对平均识别概率的影响

#### 3.3.2 符号个数（仿真时间）

选定符号个数  $n$  分别为 40, 100, 200, 400 和 1 000，即仿真时间分别为 10, 25, 50, 100 和 250 ms。在不同信噪比下对信号的平均识别概率（如 3.2 节定义）进行仿真。从图 12 可以看出，同一信噪比下，随着符号个数的增多，信号的平均识别概率逐渐提高。

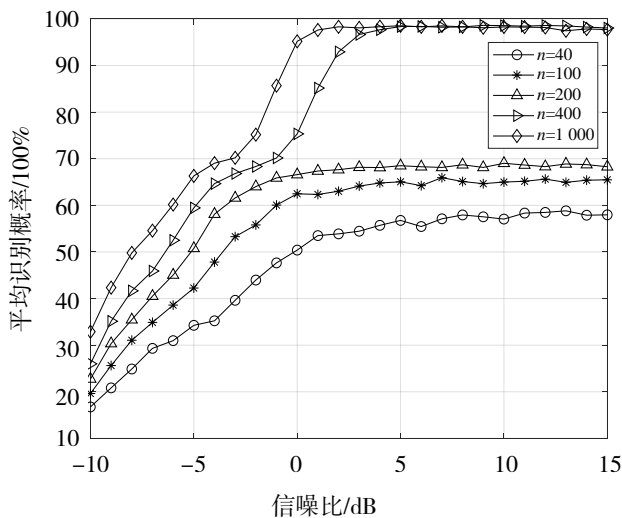


图 12 符号个数对平均识别概率的影响

#### 3.3.3 每个符号采样点数

选定每个符号采样点数  $l$  分别为 10, 20, 30, 40 和 50，在不同信噪比下对信号平均识别概率（如

3.2 节定义) 进行仿真。由图 13 可以看出, 当符号个数不变时, 同一信噪比下, 每个符号采样点数增加, 信号的平均识别概率有所提高。

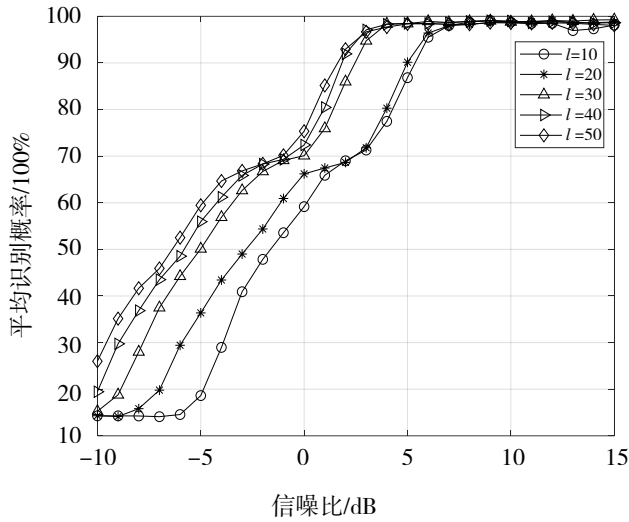


图 13 每个符号采样点数对平均识别概率的影响

## 4 结语

针对卫星通信信号采用升余弦或高斯成形使得传统高阶累积量值无法作为调制识别参考的问题, 本文在考虑上述两种成形方式的基础上, 仿真了 BPSK、QPSK、8PSK、OQPSK、 $\pi/4$ -QPSK、16QAM 和 GMSK 7 种信号的高阶累积量, 并基于信号包络四次方谱实现了 GMSK 信号的特征提取。对上述 7 种卫星信号提取高阶累积量、信号包络四次方谱和信号四次方谱特征并利用决策树分类器进行调制识别。利用高阶累积量特征  $|C_{80}|$ , 将信号分为 3 类: {BPSK}, {QPSK、OQPSK、16QAM} 和  $\{\pi/4$ -QPSK、8PSK、GMSK}, 再利用高阶累积量特征  $|C_{63}|$  对 {QPSK、OQPSK、16QAM} 信号进行调制识别; 最后利用信号包络四次方谱特征识别 GMSK 信号, 利用信号四次方谱特征识别  $\pi/4$ -QPSK 和 8PSK 信号。仿真实验表明该算法在信噪比为 3 dB 时平均识别概率可以达到 95% 且不受滚降因子的影响, 具有一定的实用性。

## 参考文献:

- [1] 曾创展, 贾鑫, 朱卫纲. 通信信号调制方式识别方法综述[J]. 通信技术, 2015, 48(3): 252-257.
- [2] 解辉, 陈冠一, 董庆军, 等. 基于中频信号特征参数的卫星通信调制样式识别[J]. 现代电子技术, 2019, 42(11): 11-14.
- [3] LIU M Q, ZHENG S F, LI B B. Modulation recognition of MPSK signals based on deep learning[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(5): 153-158.
- [4] KUMAR S, BOHARA V A, DARAK S J. Automatic modulation classification by exploiting cyclostationary features in wavelet domain[C]// Twenty-third National Conference on Communications (NCC), Chennai: IEEE, 2017: 1-6.
- [5] ALVAREZ J, MONTERO F E H. Classification of MPSK signals through eighth-order statistical signal processing[J]. IEEE Latin America Transactions, 2017, 15(9): 1601-1607.
- [6] 孙田亮, 代华建, 洪居亭. 基于高阶累积量与神经网络的调制识别[J]. 现代计算机, 2020(15): 64-67.
- [7] VANHOY G, ASADI H, VOLOS H, et al. Multi-receiver modulation classification for non-cooperative scenarios based on higher-order cumulants[J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2021(106): 1-7.

- [8] MARRIWALA, GHUNSAR M. An automatic digital modulation classifier using higher-order statistics for software-defined Radios[C] // Congress on Intelligent Systems, Proceedings of CIS 2020, New Delhi: [s.n.], 2020.
- [9] KUMAR Y, SHEORAN M, JAJOO G, et al. Automatic modulation classification based on constellation density using deep learning[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(6): 1275-1278.
- [10] JAJOO G, KUMAR Y, KUMAR A, et al. Blind signal modulation recognition through density spread of constellation signature[J]. Wireless Personal Communications: An International Journal, 2020(8): 3137-3156.
- [11] KHMELEV S L. Criterion for distinguishing between the FSK and PSK signals[J]. Radiophysics & Quantum Electronics, 2015, 58(7): 541-546.
- [12] CAMARA T, LIMA A, LIMA B, et al. Automatic modulation classification architectures based on cyclostationary features in impulsive environments[J]. IEEE Access, 2019(7): 138512-138527.
- [13] MA J T, QIU T S. Automatic modulation classification using cyclic correntropy spectrum in impulsive noise[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(2): 440-443.
- [14] 李成, 饶志宏. 卫星通信信号调制识别技术研究[J]. 通信技术, 2014, 47(5): 494-498.
- [15] 马兆宇, 韩福丽, 谢智东, 等. 卫星通信信号体系调制识别技术[J]. 航空学报, 2014, 35(12): 3403-3414.
- [16] 包锡锐, 吴瑛. 基于谱特征的模拟与数字调制方式识别方法[J]. 计算机工程与设计, 2008(14): 3569-3571+3576.
- [17] 高新诚, 王雪, 周生华, 等. 基于冲激谱线检测的调制识别[J]. 电讯技术, 2021, 61(2): 179-185.
- [18] LI T, LI Y, DOBRE O A. Modulation classification based on fourth-order cumulants of superposed signal in NOMA systems[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2021(16): 2885-2897.
- [19] 胡燕南. 数字调制信号监测识别系统关键技术研究及应用[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [20] 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.
- [21] 高新诚. 基于谱特征提取的调制识别算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.