

## 一种新型的数字调制信号的识别

蒋留兵, 柳政枝, 文德钢, 黄 韬

(桂林电子科技大学 研究生院, 广西 桂林 541004)

**摘 要:** 为解决信号调制方式在低信噪比情况下识别率低的问题, 提出了 TFC-KNN(Time-frequency analysis and higher-order cumulants-K nearest neighbor)算法. 该算法在信号时频分析的基础上引入了高阶累积量, 采用 K-NN 近邻算法对信号进行分类. 算法中所采用的信号特征参数能有效地抑制加性高斯噪声. 仿真结果表明, 在信噪比不小于 5 dB 的情况下, 该算法对不同的调制信号的识别率在 96% 以上.

**关键词:** 时频分析; 高阶累积量; K-NN; 低信噪比; 调制识别

**中图分类号:** TN975

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7180(2013)10-0123-04

## A New Recognition Algorithm of Digital Modulation Signals

JIANG Liu-bin, LIU Zheng-zhi, WEN De-gang, HUANG Tao

(Graduate School, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of low recognition of signal modulation in low SNR condition, TFC-KNN algorithm was proposed. It was based on Higher-Order Cumulants and K-NN Nearest Neighbor algorithm. According to the algorithm, the Higher-Order Cumulants is introduced on the basis of time frequency analysis, and the signal will be classified using K-NN Nearest Neighbor algorithm. The feature parameter, presented in the algorithm, can effectively restrain the additive white Gaussian noise. Simulation results show that the recognition rate for this recognition structure and algorithm can reach 96% for different modulated signal when the signal noise ratio is not less than 5 dB.

**Key words:** time-frequency analysis; higher-order cumulants; K-NN; low SNR; modulation recognition

### 1 引言

通信信号调制方式的分类识别是一种典型的模式识别问题, 它涉及到很多复杂的特殊因素. 随着通信技术的飞速发展, 通信信号的体制和调制样式变得更加复杂多样, 信号环境日趋密集, 使得常规的识别方法和理论很难适应实际需要, 这也给通信信号的识别研究提出了更高的要求.

信号调制模式识别主要分为统计模式识别算法和判决理论识别算法. 判决理论识别算法是更具概率论和假设检验中的贝叶斯理论来解决信号的识别问题, 这种方法需要先验知识多而且运算量大. 统计

模式识别算法一般由两部分组成: 特征提取和模式识别. 特征提取是从接收的信号中提取出特征参数, 用以区别不同的调制方式; 模式识别是根据提取的特征参数确定调制方式. 文献[1]中提出了基于信号瞬时时域特征的统计模式识别算法, 提取特征参数对六种数字调制方式进行识别. 文献[2-3]中提出了基于高阶累积量的信号调整方式识别算法, 该算法具有很好的信噪比适应能力. 文献[4]中提出了用 K-NN 近邻法对特征参数进行处理, 识别信号调制方式的算法.

本文在前人的基础上, 提出 TFC-KNN 算法. 该算法结合了时频特征和高阶累积量的参数提取方

收稿日期: 2012-11-08; 修回日期: 2013-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(61162007); 广西科学研究与技术开发计划项目(桂科攻 0996028); 广西研究生教育创新计划项目(2011105950810M11); 广西研究生教育创新计划项目(2011105950810M18)

法,引进 K-NN 近邻算法进行分类识别的调制识别算法.该算法结合了两类特征参数的优势,能对不同的调制方式进行更有效地识别.同时,后期模式识别用 K-NN 近邻算法对特征参数进行计算识别不同的调制方式. K-NN 近邻算法具有计算简单,识别效率高等优势.

## 2 系统模型

### 2.1 特征参数

#### 2.1.1 单一的瞬时频率功率密度最大值 $\gamma_{fmax}$

$$\text{正 } \gamma_{fmax} = 10 \lg(\max |DFT(f_{on}(n))|^2) \quad (1)$$

$$f_n(n) = |f(n)| / m_f \quad (2)$$

$$m_f = \frac{1}{N_S} \sum_{n=1}^{N_S} |f(n)| \quad (3)$$

式中,  $f_{on}(n)$  为零中心归一化瞬时幅度,  $f_{on}(n) = f_n(n) - 1$ ,  $f_n(n)$  为归一化瞬时幅度.  $m_f$  为瞬时频率的平均值.  $f(n)$  为采样点的瞬时频率. 图 1 中给出了不同信噪比下各调制方式的特征值  $\gamma_{fmax}$ .  $\gamma_{fmax}$  可以很好地区分 2ask, 4ask 和其他调制方式.

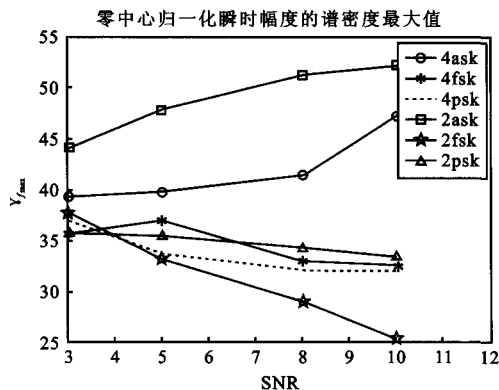


图 1  $\gamma_{fmax}$  随信噪比变换的性能

#### 2.1.2 零中心非微弱信号瞬时相位非线性分量标准偏差 $\sigma_{dp}$

$$\sigma_{dp} =$$

$$\sqrt{\frac{1}{c} \left( \sum_{a_n(i) > a_t} \varphi_{NL}^2(i) \right) - \left( \frac{1}{c} \sum_{a_n(i) > a_t} \varphi_{NL}(i) \right)^2} \quad (4)$$

$$\varphi_{NL}(i) = \varphi(i) - \varphi_0 \quad (5)$$

$$\varphi_0 = \frac{1}{N_S} \sum_{i=1}^{N_S} \varphi(i) \quad (6)$$

式中,  $a_t$  是判决弱信号的幅度判决门限,  $c$  是全部取样数据中非弱信号的个数,  $\varphi_{NL}(i)$  是经零中心化处理后的瞬时相位的非线性分量,  $\varphi(i)$  为瞬时相位. 图 2 中给出了不同信噪比下各调制方式的特征值  $\sigma_{dp}$ .  $\sigma_{dp}$  可以很好地区分 2fsk, 4fsk, 2psk, 4psk.

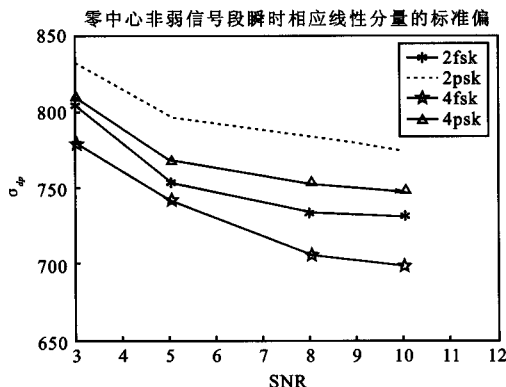


图 2  $\sigma_{dp}$  随信噪比变化的性能

#### 2.1.3 高阶累积量

对于零均值的复平稳随机过程  $x(t)$ , 定义其  $p$  阶混合矩为

$$M_{pq} = E\{[x(t)]^{p-q} [x^*(t)]^q\} \quad (7)$$

其中,  $*$  表示函数的共轭, 定义高阶累积量:

$$C_{20} = \text{cum}(x, x) = M_{20} \quad (8)$$

$$C_{21} = \text{cum}(x, x^*) = M_{21} \quad (9)$$

$$C_{40} = \text{cum}(x, x, x, x) = M_{40} - 3(C_{20})^2 \quad (10)$$

$$C_{41} = \text{cum}(x, x, x, x^*) = M_{41} - 3M_{20}M_{21} \quad (11)$$

$$C_{42} = \text{cum}(x, x, x^*, x^*) = M_{42} - |C_{20}|^2 - 2(C_{21})^2 \quad (12)$$

$$C_{60} = \text{cum}(x, x, x, x, x, x) = M_{60} - 15M_{20}M_{40} + 30(M_{20})^3 \quad (13)$$

$$C_{63} = \text{cum}(x, x, x, x^*, x^*, x^*) = M_{63} - 9C_{42}C_{21} - 6(C_{21})^3 \quad (14)$$

#### (1) 累积量特性

① 如果随机变量和统计独立, 则累积量具有“半不变性”, 即:

$$\text{cum}(x_1 + y_1, \dots, x_k + y_k) = \text{cum}(x_1, \dots, x_k) + \text{cum}(y_1, \dots, y_k) \quad (15)$$

#### ② 高斯随机变量阶数的累积量恒等于零.

由于高斯噪声变换到阶数大于 2 的累积量时, 其值恒等于零, 对叠加有高斯噪声的信号取大于 2 阶的累积量, 可以去除噪声对信号的影响.

#### (2) 提取特征

$$F_1 = \frac{|C_{63f}|^2}{|C_{42f}|^3} \quad (16)$$

式中,  $C_{63f}$  是  $C_{63}$  的傅氏变换,  $C_{42f}$  是  $C_{42}$  的傅氏变换. 图 3 中给出不同信噪比下各调制方式的特征值  $F_1$ .  $F_1$  可以很好地区分 2ask, 4ask, 2fsk, 4fsk, 2psk, 4psk.

下面分析三个特征参数的性能. 设置仿真条件

为:载波频率  $f_c = 20.4\text{ MHz}$ ,符号率  $f_d = 6\text{ MHz}$ ,采样率  $f_s = 64\text{ MHz}$ ,接收到的信号为 600 个,噪声为高斯噪声,信噪比为  $\{3, 5, 8, 10\}\text{ dB}$ .

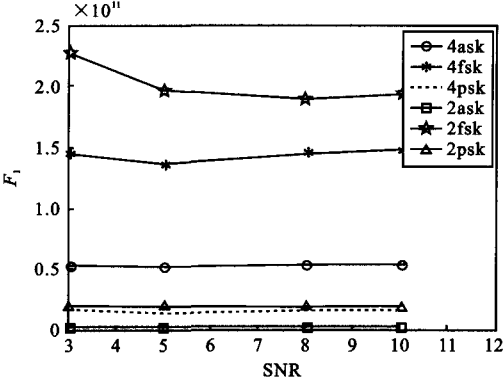


图 3  $F_1$  随信噪比变化的性能

图 4 是在信噪比为 10 dB 的条件下,各调制方式的三种特征参数分布图.由图可以看出,这三种特征值可以将调制方式很好地区分出来.

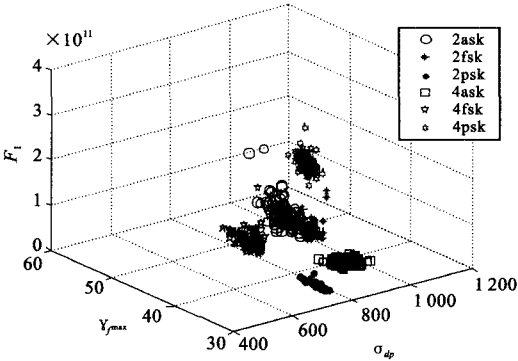


图 4 六种调制信号的特征参数分布图

2.2 分类识别

通过以上分析可以看到,TNC-KNN 算法选用的特征参数对信噪比不敏感,而且对每种调制信号都有很好的识别特性.可以通过简单的分类模式对调制方式进行识别.我们选用 K-NN 近邻算法对信号调制模式进行识别.

K-NN 近邻算法是一种在人工智能领域如专家系统、数据挖掘、模式识别等方面广泛应用的算法.该算法设计简单,训练时间短而且识别效率高.K-NN 近邻算法的主要思想是:对于一个新的样本,找出距它距离最近的  $K$  个训练样本,然后采取“少数服从多数”的决策方法,得到该样本所属的类别.

对于要被识别的  $N$  个属于类  $(\omega_1, \dots, \omega_N)$  的样本,定义函数  $F$  是关于样本  $x$  和固定模板  $T_s$  的函数.

$$g_d(x) = F(d_i(x, T_s)) \tag{17}$$

式中,  $d_i(x, T_s)$  是未知样本  $x$  和固定模板  $T_s$  之间

的距离.

分类准则:如果  $g_i(x) = \min g_d(x), i = 1, 2, \dots, N$ ,则未知样本  $X$  属于类  $\omega_i$ .

定义分类函数为

$$g_d(x) = (X - \mu_i)C^{-1}(X - \mu_i) \tag{18}$$

式中,  $X$  是未知样本的特征参数  $(\gamma_{fmax}, \sigma_{dp}, F_1)$ ,  $(\mu_i, C)$  是标准模板,  $\mu_i$  是从训练样本中计算得到的一种样本的特征参数均值,  $C$  是六种信号特征值的协方差矩阵.

上述主要步骤的流程图如图 5 所示.

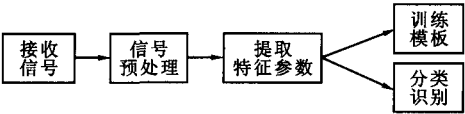


图 5 信号调制方式识别的流程图

3 仿真结果

调制识别系统主要对六种调制方式进行识别,六种调制方式生成的信号经过一个高斯信道到达接收端,对接收到的信号进行预处理,提取特征参数,训练模板,最后是分类识别.系统的主要流程如图 5 所示.

仿真条件:载波频率  $f_c = 20.4\text{ MHz}$ ,符号率  $f_d = 6\text{ MHz}$ ,采样率  $f_s = 64\text{ MHz}$ ,接收到的信号为 600 个,噪声为高斯噪声,信噪比为  $\{3, 5, 8, 10\}\text{ dB}$ .每种调制信号在每个信噪比下产生 25 个样本,每种调制信号产生 100 个样本,用以计算  $(\mu_i, C)$ .

在同样的仿真条件下,每种调制信号在每个信噪比下生成 100 个样本,每种调制信号生成 400 个样本.用这些样本作为测试数据,测试系统的识别率.识别效果如表 1 所示.

表 1 表各调制模式在不同信噪比下的识别率 %

| 模式 \ SNR | 3 dB | 5 dB | 8 dB | 10 dB |
|----------|------|------|------|-------|
| 2ask     | 55   | 98   | 100  | 100   |
| 2fsk     | 90   | 96   | 98   | 99    |
| 2psk     | 98   | 100  | 100  | 100   |
| 4ask     | 100  | 100  | 99   | 98    |
| 4fsk     | 93   | 98   | 99   | 99    |
| 4psk     | 100  | 100  | 100  | 100   |

实验结果表明,在  $\text{SNR} \geq 5\text{ dB}$  时,系统的识别率可以达到 96% 以上,在  $\text{SNR} \geq 3\text{ dB}$  时,除了 2ask 的识别率比较低以外,其他调制方式的识别率都可以达到 90% 以上.

仿真结果和文献[4]相比,TFC-KNN 算法能够

在更低的信噪比下达到更好的识别效果. 文献[5]中要做到相同的识别率需要  $\text{SNR} \geq 6$  dB. 与文献[6]相比, 使用了更少的特征参数得到了更好的识别率, 计算复杂度下降. 文献[6]使用了五个时频特征参数和两个高阶累积量参数, 在信噪比大于等于 5 dB 时, 可以达到 80% 的识别率, 算法复杂度主要集中在高阶累积量参数提取, 复杂度为  $O[n^9 + n^6 + n^3]$ . 相较于文献[6], TNC-KNN 算法仅使用了两个时频特征参数和一个高阶累积量参数, 在信噪比大于等于 5dB 时能达到 96% 的识别率. 由于算法复杂度主要集中在高阶累积量的提取上, 该算法减少使用一个高阶累积量, 复杂度为  $O[n^9 + n^6]$ , 复杂度有所下降. 和文献[4]相比, 在相同的信噪比下能识别更多的调制方式, TNC-KNN 算法可以识别 4ask, 这是文献[4]无法做到的.

#### 4 结束语

文中提出的 TFC-KNN 算法能有效地识别 2ask、4ask、2fsk、4fsk、2psk、4psk 这 6 种数字调制信号. 理论和仿真表明, 该算法能简单有效地识别各种数字调制信号. 同时与其他算法比较, 该算法识别效率高, 算法复杂度低, 识别信号种类多, 说明该算法是一种有效识别算法.

#### 参考文献:

- [1] Nnad A K, AZZouz E E. Algorithms of automatic modulation recognition of communication singals [J]. IEEE Transaction on Communication, 1998, 46(4): 431-436.
- [2] Swmi A, Sdaler B. Hierarchial digital modulation classification using cumulants[J]. IEEE Trans Commum, 2000, 48(3):416-429.
- [3] 吕正新, 魏平, 肖先赐. 利用高阶累积量实现数字调制信号的自动识别[J]. 电子对抗技术, 2004, 19(6):3-5.
- [4] Liu Ning, Guo Shuxia, Liu Bing, et al. Investigation on signal modulation recognition in the low snr[C]// International Conference on ueasuring Technology and Mecha-tronics Automation. Xi'an, China:IEEE,2010:528-546.
- [5] 位小记, 谢红, 郭慧. 基于高阶累积量和星座图的调制识别算法[J]. 哈尔滨商业大学学报: 自然科学版, 2011, 27(4):609-613.
- [6] 姚旭清. 一种新的混合模式调制识别算法[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.

#### 作者简介:

蒋留兵 男, (1973-), 硕士, 高级工程师. 研究方向为智能信号处理.

柳政枝 女, (1988-), 硕士研究生. 研究方向为智能信号处理.

(上接第 122 页)

- [8] Cook R L, Torrance K E. A reflectance model for computer graphics[J]. Computer Graphics, 1981, 15 (3): 307-316.
- [9] Kong Fanhui, Wang Yongxin. Reconstruction of solder joint surface based on shape from shading [C]//IEEE Third International Conference on Natural Computation (ICNC 2007). Jinan: IEEE, 2007:58-62.

- [10] 赵辉煌, 周德俭, 吴兆华. 基于小波包变换与自适应阈值的 SMT 焊点图像混合噪声去除[J]. 焊接学报, 2011, 32(11):73-76.

#### 作者简介:

赵辉煌 男, (1982-), 博士后. 研究方向为微电子组装、图像处理、计算机视觉.