

基于累积量和盒维数的 MFSK 信号调制识别算法

黄国庆^{1,2}, 靳朝¹, 元洪波²

(1. 郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 空军第一航空学院, 河南 信阳 464000)

摘 要: 针对 MFSK(多进制频移键控)调制信号的分类问题,通过改进高阶累积量特征值,联合利用盒维数理论构造二维特征矢量,设计神经网络分类器的识别方案,可以实现对 2FSK、4FSK、8FSK 信号的调制识别。理论及仿真表明,构造的二维特征矢量抗噪声性能好,对载波相位差不敏感,神经网络分类器可以适应较大的信噪比动态范围,在信噪比大于 5 dB 时可以达到 98% 的识别率。

关键词: 累积量;盒维数;调制识别;MFSK

中图分类号: TN91 **文献标识码:** A

0 引言

调制识别,也称作自动调制分类,是介于信号检测和调制方式解调的中间环节,主要应用于信号认证、频谱监管、干扰识别等军用和民用领域。在软件无线电以及认知无线电体系中,数字信号的调制识别可以完成对未知调制方式的认定,为后续信号处理提供依据,因此,通信信号的调制识别是通信信号处理研究中的重要课题之一。

通信信号的调制识别一般包括 3 个部分:信号的预处理、特征参数提取和分类判决。特征参数的提取是其中最重要的部分,不同的特征参数的区分度和稳健性往往对识别性能起决定作用。MFSK 信号作为常用的数字通信信号,国内外许多文献都有论述^[1]。文献[2]使用信号的瞬时频率实现对 2FSK 和 4FSK 的识别,但瞬时频率参数受信噪比影响大,稳健性差;文献[3]采用小波变换后的直方图识别 FSK 信号,但计算量较大,在低信噪比条件下识别率差;文献[4]将信号微分处理后利用四阶累积量和二阶累积量之比识别 2FSK 和 4FSK 信号,但高斯白噪声二阶累积量不恒为零,对分类性能影响大;文献[5]利用分形理论从信号中提取盒维数来识别 2FSK 和 4FSK 信号,盒维数对噪声不敏感。文献[4-5]都只能识别 2FSK 和 4FSK 信号。笔者联合基于高阶累积量和盒维数理论提取特征值并构造二维特征空间,

可以完成对 2FSK、4FSK 和 8FSK 信号集的正确分类,较好地克服了上述问题。

1 信号模型及信号预处理

考虑接收机接收到的中频信号经过下变频到基带,复基带 MFSK 信号为:

$$\begin{aligned} r(t) &= s(t) + n(t) \\ &= \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sqrt{E} \exp(jw_k t + j\Delta\theta) p(t - nT_s) + n(t), \\ &\quad (0 < t < NT_s) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $s(t)$ 为接收有噪声信号 $r(t)$ 中的感兴趣信号; $n(t)$ 是加性高斯白噪声; E 是每符号能量; $p(t)$ 为发送码元成形脉冲,理想条件下为矩形脉冲,实际系统中多选用升余弦等脉冲形式; T_s 为码元宽度; $\Delta\theta$ 为载波相位差; $w_k \in \{(2m-1-M)\Delta w, m=1, 2, \dots, M\}$ 是发送码元序列, Δw 为 FSK 信号的频偏。

对(1)式微分,中值滤波滤除含有的冲激项后得:

$$\begin{aligned} r'(t) &= \sum_k \sqrt{E} w_k \exp[j(w_k t + \Delta\theta + \pi/2)] \cdot \\ &\quad gp(t - kT_s) + n'(t) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $n'(t)$ 为经微分和中值滤波后的噪声,仍近似为高斯白噪声。对(2)式取模,功率归一化得:

$$|r'(t)| = \sqrt{E} \sum_k w_k P(t - kT_s) + n''(t) \quad (3)$$

式中: $n''(t)$ 为 $n'(t)$ 取模后的噪声量。(3)式不包

收稿日期:2010-05-29;修订日期:2010-08-03

基金项目:武器装备军内科研计划(KJ09×××)

作者简介:黄国庆(1963-)男,河南唐河人,郑州大学硕士生导师,空军第一航空学院副教授,主要从事通信导航技术的研究,Email: hguoqing@163.com.

含载波相位差 $\Delta\theta$,只含有频偏信息.

2 特征值提取及分析

2.1 基于累积量的特征值分析

一个零均值的复平稳随机过程 $X(t)$ 的 p 阶矩定义为^[6]:

$$M_{pq} = E\{[X(t)]^{p-q}[X^*(t)]^q\} \quad (4)$$

其中 $*$ 表示函数的复共轭,定义平稳随机过程 $\{x(t)\}$ 的 k 阶累积量为:

$$C_{kx}(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_{k-1}) = \text{cum}(x(t), x(t + \tau_1), \cdots, x(t + \tau_{k-1})) \quad (5)$$

高阶累积量可以由高阶矩表示为:

$$C_{20} = \text{cum}(X, X) = M_{20} = E\{|X(t)|^2\} \quad (6)$$

$$C_{21} = \text{cum}(X, X^*) = M_{21} = E\{|X(t)|^2\} \quad (7)$$

$$C_{40} = \text{cum}(X, X, X, X) = M_{40} - 3(M_{20})^2 \quad (8)$$

$$C_{41} = \text{cum}(X, X, X, X^*) = M_{41} - 3M_{20}M_{21} \quad (9)$$

$$C_{42} = \text{cum}(X, X, X^*, X^*) = M_{42} - |M_{20}|^2 - 2(M_{21})^2 \quad (10)$$

不同的调制信号,其高阶累积量的值也不同,所以可以用高阶累积量来区分不同的调制信号.但是直接对 MFSK 信号求高阶累积量,发现不同调制方式信号的高阶累积量相等.为利用累积量理论区分 MFSK 信号,文献[4]对微分后的 MFSK 信号进行累积量计算,选取 C_{42} 与 C_{21} 平方后的绝对值之间的比值 $F_1 = |C_{42}|/|C_{21}|^2$ 来区分 2FSK 和 4FSK 信号.

为消除载波相位差 $\Delta\theta$ 的影响,针对微分取模后的 MFSK 信号,将式(3)带入式(6)~(10),得出相应的累积量,记作 $C'_{ij}(i=2,4;j=0,1,2)$.此时,有

$$C'_{ij} = C_{ij}, \quad (j=0,1,2;t=0,1,2;i>t;i>j) \quad (11)$$

把 MFSK 信号的累积量 C'_{ij} 值列于表 1.

表 1 MFSK 信号微分取模后的累积量值
Tab. 1 Cumulant of MFSK signal after differential and absolute value

MFSK	$C'_{2j}(j=0,1)$	$C'_{4j}(j=0,1,2)$
2FSK	$E\Delta W^2$	$-2E^2\Delta W^4$
4FSK	$5E\Delta W^2$	$-34E^2\Delta W^4$
8FSK	$21E\Delta W^2$	$-546E^2\Delta W^4$

选取信号微分取模后的四阶累积量和二阶累积量平方之比作为特征值 F_2 :

$$F_2 = C'_{42}/(C'_{21})^2 \quad (12)$$

类似地,将表 1 中的累积量值带入式(12),得到不同调制方式下 F_2 的值如表 2.

表 2 MFSK 信号的 F_2 值
Tab. 2 The F_2 value for MFSK signal

特征值	2FSK	4FSK	8FSK
F_2	2	1.36	1.24

显然, F_2 能够区分 MFSK 信号,而且由式(3)可知,取模后的信号滤除了载波相位差 $\Delta\theta$,从而使得 F_2 对载波相位差不敏感.因此,笔者给出的基于 F_1 的改进特征值 F_2 ,可以有效地提高对 MFSK 信号识别的有效性和适应性.

2.2 基于盒维数的特征值分析

分形维数是分形理论中主要的参数,它定量描述了分形集的复杂度,通信信号作为一种时间序列,分形能够对它进行有效地刻画.盒维数作为分形理论中一种简单的分形维数,在实际应用中用来描述分形集的几何尺度^[5].

设信号的采样序列为

$f(t_1), f(t_2), \cdots, f(t_N), f(t_{N+1}), N$ 为偶数,令

$$d(\Delta) = \sum_{i=1}^N |f(t_i) - f(t_{i+1})| \quad (13)$$

$$d(2\Delta) = \sum_{i=1}^{N/2} (\max\{f(t_{2i-1}), f(t_{2i}), f(t_{2i+1})\} - \min\{f(t_{2i-1}), f(t_{2i}), f(t_{2i+1})\}) \quad (14)$$

则盒维数定义为

$$D = 1 + \log_2 \frac{d(\Delta)}{d(2\Delta)} \quad (15)$$

从理论上分析,2FSK,4FSK 和 8FSK 信号分别含有 1,2 和 3 个频偏,他们的频偏个数不同,即信号的复杂度有差别.因此,可以用表征复杂度的分形盒维数来区分 MFSK 信号.将接收到的 MFSK 信号取实部后带入式(13)~(15),可以得到 MFSK 信号的分形盒维数值.文献[5]证明了盒维数在一定的信噪比之上,噪声对其影响比较缓慢,能够充分保证分类特征在决策空间存在较为清晰的边界.

根据文献[5]的提示,这里将盒维数的应用从对 2FSK 和 4FSK 的识别扩展到 2FSK、4FSK 和 8FSK 集合.图 1 是在信噪比 5~20 dB 时得出的 MFSK 信号的盒维数值,可以看出,盒维数对噪声不敏感.需要指出的是,分形盒维数 D 的大小会受到采样点数影响,一般采样点数不宜过大,否则盒维数自身变化较小,易受噪声扰动.

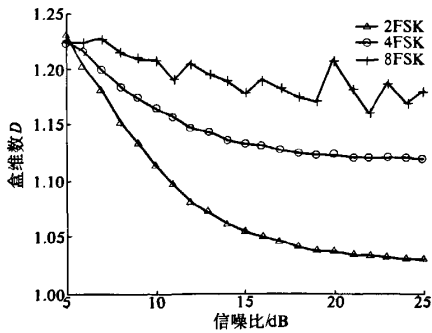


图 1 不同信噪比下盒维数 D 值
Fig. 1 Box dimension D values with different SNRs

2.3 构造特征值矢量空间

基于以上讨论,笔者构造二维矢量空间 $T = [F_2, D]$,作为分类特征向量.经计算,得出不同 MFSK 信号在理想条件下的 T 值:

$$T = [F_2, D] = \begin{cases} [2, 1.0], & 2\text{FSK} \\ [1.36, 1.084], & 4\text{FSK} \\ [1.24, 1.150], & 8\text{FSK} \end{cases} \quad (16)$$

其中, D 的计算是信号码元速率为 1 000 bit/s, 2FSK、4FSK 和 8FSK 的频偏分别为 2.5 kHz、2 kHz 和 1.5 kHz 时求得.分析(16)式的理论特征值可知,特征值 F_2 及 D 对于 2FSK 和 4FSK 的区分度明显,而 4FSK 和 8FSK 的特征值相距较近,仅仅一维的特征值在噪声扰动下不足以将二者区分开来,这正是采用二维特征空间的原因.

为更直观地表征不同 MFSK 信号在特征空间下的差异,我们在 SNR 5 ~ 20 dB 下,每单位 dB 采集 10 个样本,每类信号共计取 160 个样本点得出的特征空间分布图如图 2.特征空间分布图展示了采用二维特征矢量相较于单个特征值识别信号的优势,由此图可以看出特征空间 T 能够在 5 ~ 20 dB 信噪比下正确区分 2FSK、4FSK、8FSK 信号.

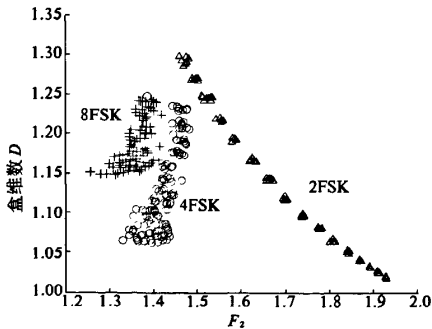


图 2 特征空间分布图
Fig. 2 Feature space distribution

3 分类判决算法及仿真分析

常用的分类方法有决策论法、聚类算法、神经网络等.其中,神经网络分类器由于具有强大的模式识别能力,能够自动适应环境变化,较好地处理复杂的非线性问题等诸多传统分类器所没有的优点,在信号调制识别领域中得到了广泛的应用.笔者采用 BP 神经网络分类器,综合考虑速度和存储空间平衡,选用变梯度的 SCG 算法.根据输入、输出向量个数及复杂度确定选用神经网络的拓扑结构即输入层、隐含层和输出层数目为 (2 - 25 - 3),隐含层传输函数使用 translog 函数,输出层使用 purelin 传输函数,目标函数为相应的单位矩阵.

仿真实验:本仿真对信号集 {2FSK, 4FSK, 8FSK} 进行识别,使用前面讨论的特征矢量 T ,通过 BP 神经网络实现自动分类.设信号的采样率为 40 kHz,码元速率为 1 000 bit/s, 2FSK、4FSK、8FSK 信号的频偏分别为 2.5 kHz、2 kHz、1.5 kHz,载波相位差设为 50 Hz;噪声为加性高斯白噪声,成形脉冲使用矩形脉冲.首先在 5 ~ 20 dB 条件下每 dB 产生 100 个样本组成训练集对神经网络进行训练;然后在任意信噪比下产生 200 个信号样本作为测试集对训练过的网络进行测试.这里把 4、5、6、10、20 dB 条件下进行 20 次蒙特卡罗仿真实验的结果列于表 3 的第 1 部分.结果显示:在信噪比大于 5 dB 时,信号的识别率在 98% 以上.

表 3 不同信噪比下信号识别率
Tab. 3 Signal identification probabilities with different SNRs

MFSK	4 dB	5 dB	6 dB	10 dB	20 dB
2FSK	0.75	1	1	1	1
4FSK	0.26	0.99	1	0.98	1
8FSK	0.94	1	1	1	0.99
MFSK	4 dB	5 dB	6 dB	10 dB	20 dB
2FSK	0	0.09	0.97	1	1
4FSK	0.98	0.95	0.95	0.98	0.43
8FSK	0.29	0.53	0.72	0.95	0.99
MFSK	4 dB	5 dB	6 dB	10 dB	20 dB
2FSK	1	1	1	0	1
4FSK	0	0	0	0.23	1
8FSK	0	0.64	0.99	0.61	0.98

表 3 的第 2 和第 3 部分分别表示在与本实验相同的参数设置及实验过程条件下,通过采用文

献[4]单特征值和文献[5]特征值的方法,得出MFSK信号的识别率.通过与表3第1部分对比知:单特征值 D 和 F_2 在识别MFSK信号时,不能得到满意的结果.而且,文献[5]中得到的结果是在训练序列和测试序列的信噪比相同条件下测试的,实用性差.相较于文献[4-5],在信噪比为5~20 dB大动态范围下,利用神经网络测试训练序列,良好的测试识别性能仍然是在15 dB的动态范围下得到的,这样的设置更接近于实际应用.

4 结论

给出了利用联合累积量和盒维数理论提取特征值,构造二维矢量空间,并通过神经网络对MFSK信号进行识别的方法,对MFSK信号的识别扩展到8FSK信号.仿真结果表明,该方法计算量小,抗噪声性能好,对载波相位差具有稳健性,在低信噪比下依然能够有效识别MFSK信号,具有较强的实用性.

参考文献:

- [1] DOBRE O A, ABDI A, BAR - NESS Y, et al. Survey of automatic modulation classification techniques: classical approaches and new trends [J]. IET Commun, 2007, 1(2): 137 - 156.
- [2] NANDI A K, AZZOUZ E E. Automatic identification of digital modulation types [J]. Signal Processing, 1995, 47(1): 55 - 69.
- [3] HO K C, PROKOPIW W, CHAN Y T. Modulation identification by the wavelet transform [C] // Proc. IEEE MILCOM, 1995: 886 - 890.
- [4] 吕新正, 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 - 6.
- [5] 吕铁军, 郭双冰, 肖先赐. 调制信号的分形特征研究 [J]. 中国科学, 2001, 31(6): 508 - 513.
- [6] 张贤达. 现代信号处理 [M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2002: 263 - 274.

Algorithm of MFSK Signals Modulation Identification Based on Cumulant and Box Dimension

HUANG Guo - qing^{1,2}, JIN Zhao¹, YUAN Hong - bo²

(1. School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. The First College Aeronautical of Air Force, Xinyang 464000, China)

Abstract: A new algorithm for automatic modulation classification of M-ray Frequency Shift Keying (MFSK) signals is proposed. By combining cumulant and box dimension parameters, constructing two - dimension vector space, and designing neural network classifier, the algorithm can correctly recognize 2FSK 4FSK and 8FSK signals. Both theory and simulation show that proposed two-dimension vector is anti-noise and is not sensitive to signal-to-noise ratio (SNR), and the neural network classifier is adaptable to large dynamic ranges of SNRs, and a 98% signal identification probability is obtained when SNR is above 5 dB.

Key words: cumulant; box dimension; modulation identification; MFSK