

Digital Modulation Identification by Distance and Fuzzy Evaluation

Wang Lanxun, Wu Honglin

School of Electronic & Information Engineering, Hebei University, Baoding, China

e-mail: wanglanxun@yahoo.com.cn, holypla@126.com

Abstract: At present, many papers use fixed threshold of the characteristic parameters of signals to identify signal, which often lead to erroneous identification. This paper presents a method that combines the feature distance and fuzzy comprehensive evaluation to identify signal. It is divided into two levels to identify the signal. First of all, compare the distance between the measured signals' characteristic parameters and standard non-noise signals' characteristic parameters to identify the interclass of signal. Secondly, use the characteristic parameters and fuzzy comprehensive evaluation to identify the type of signal. This article analyzes the effectiveness of the method very closely, and verifies the validity in identifying MPSK and MFSK signal through computer simulation.

Keywords: modulation recognition; feature distance; fuzzy comprehensive evaluation; MPSK&MFSK

基于距离和模糊评判的数字调制识别

王兰勋, 伍宏林

河北大学电子信息工程学院, 保定, 中国, 071002

e-mail: wanglanxun@yahoo.com.cn, holypla@126.com

【摘要】: 针对目前常利用信号特征参数固定阈值造成错误判别调制方式的问题, 提出了一种基于特征距离和模糊综合评判相结合的判别方法。该方法分两个层次进行调制方式的识别, 首先比较被测信号与标准无噪信号的特征参数距离对信号进行类间识别, 然后再利用特征参数和模糊综合评判对信号进行类内识别。从理论上分析了该方法的有效性, 并通过计算机仿真验证了该方法在识别 MPSK 和 MFSK 信号时具有良好的分类性能。

【关键词】: 调制识别; 特征距离; 模糊综合评判; MPSK&MFSK

1 引言

信号调制方式识别是在没有或仅有部分先验信息的情况下, 识别信号的调制方式。随着现代通信的发展, 通信系统呈现出多样化的趋势, 不断涌现出新的调制方式, 调制识别技术在军用和民用多模式接收机中也有重要的应用, 快速稳健地识别出接收信号的调制方式变得越来越重要。

目前, 有人认为调制识别是一个模式识别问题, 只要利用能表征信号特征的参数, 采用合适的模式识别算法, 就能识别信号的调制方式^[1]。以此为思路, 本文提出了一种基于特征距离和模糊综合评判相结合的调制识别新方法。

2 特征参数的提取与计算

特征参数的提取与计算是调制类型识别的关键。

假设接收到的信号为 $x(t)$, 其复数形式为:

$$x(t) = s(t) + n(t) = \tilde{s}(t)e^{j(\omega_c t + \theta_c)} + n(t) \quad (1)$$

其中 $s(t)$ 为已调复信号, $\tilde{s}(t)$ 为相位基带信号, $n(t)$ 为加性高斯白噪声, ω_c 为调制载波角频率, θ_c 为载波初始相位。

对于 MPSK 信号:

$$\tilde{s}(t) = \sqrt{s} e^{j\phi_i} u_T(t - iT) \quad \phi_i \in \left\{ \frac{2\pi}{M}(m-1) \right\}_{m=1}^M \quad (2)$$

对于 MFSK 信号

$$\tilde{s}(t) = \sqrt{s} \sum_i e^{j(\omega_i t + \theta_i)} u_T(t - iT) \quad \omega_i \in (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M), \theta_i \in (0, 2\pi) \quad (3)$$

其中 s 为信号功率, $u_T(t)$ 为矩形函数, T 为符号周期, ϕ_i 为各码元初始相位, 从上述各信号表达式可以看出, 在各符号之间, 由于幅度、相位或者频率的改变, 存在不同突变现象。为了识别 MPSK 和 MFSK

信号，本文主要提取了如下特征参数：

2.1 归一化中心瞬时频率的四阶矩紧致性 μ_{42}^f

由式 (4) 定义^[2]：

$$\mu_{42}^f = \frac{E\{f_N^4(n)\}}{\{E[f_N^2(n)]\}^2} \quad (4)$$

式中， N 为取样点数， $f_N(n)$ 为归一化中心瞬时频率。此参数对于信号中的频率个数是非常敏感的。试验证明这一参数用来区分 MPSK 信号和 MFSK 信号，效果理想。对 MPSK 信号，其值较大，且信号信噪比的变化是其值变化的主要因素，信噪比越大， μ_{42}^f 越大；对 MFSK 信号，其值较小，信噪比的变化对 μ_{42}^f 值几乎没有影响。

Table 1. μ_{42}^f interval value
表 1. μ_{42}^f 值变化区间值

信噪比	2FSK	4FSK	8FSK
8db	3.107~5.282	1.588~3.074	1.246~1.783
10db	2.727~4.841	1.463~2.941	1.190~1.839
15db	3.127~2.279	1.459~2.658	1.140~1.730
信噪比	2PSK	4PSK	8PSK
8db	5.129~11.043	3.811~10.202	3.712~10.507
10db	5.434~19.789	4.4366~16.037	4.345~13.412
15db	28.98~57.195	14.263~62.280	9.420~47.45

表 1 列出了不同信噪比条件下五十次实验 μ_{42}^f 值变化区间情况，从表中可以看出，MPSK 信号和 MFSK 信号两者的 μ_{42}^f 没有特别明确的区分值，尤其在信噪比较小的情况下，MPSK 的 μ_{42}^f 值也会很小，MFSK 也会取较大的值，单独利用这一特征参数来区分信号类别就会引起误判。

2.2 信号小波变换系数幅度方差 A_w

小波变换是把某一种被称为基本小波的函数 $\psi(t)$ 做位移 τ 后，再在不同尺度 a 下与待分析的信号 $x(t)$ 做内积，由式 (5) 定义

$$WT_x(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{a} \right) dt \quad a > 0 \quad (5)$$

本文采用的是小波分析中最早用也最简单的 Harr 函数。信号小波变换后系数幅度仅取决于前后码元的幅度或频率。在同一码元内或相邻码元相同时，小波变换系数幅度为恒定值。FSK 信号小波变换幅度变化取决于码元变化前后的频率差，而 PSK 小波变换幅度基本恒定，只在相位变化时有突变信号^[3]。对小波变换系数幅度进行中值滤波去除尖峰，理想 MFSK 信号的小波变换系数幅度为阶梯波，而 MPSK 的小波变换系

数幅度近似为一直流电平，因而通过计算小波变换系数幅度方差就可以大致区分出 MPSK 与 MFSK 信号。

Table 2. A_w *40 interval Value

表 2. A_w *40 值变化区间值

信噪比	2FSK	4FSK	8FSK
8db	3.742~5.882	6.608~17.452	4.368~15.414
10db	3.620~5.860	7.844~17.779	3.773~14.374
15db	4.230~5.811	5.735~18.388	5.982~17.052
信噪比	2PSK	4PSK	8PSK
8db	2.408~3.521	1.372~2.794	2.519~3.803
10db	1.899~3.033	2.291~3.382	2.036~3.287
15db	1.193~1.887	2.560~3.916	1.459~3.009

表 2 列出了不同信噪比条件下五十次实验 A_w *40 值的变化区间情况，从表中的数据我们可以看出，信噪比的变化对小波变换系数幅度方差 A_w 没有太大的影响，大多数情况下 MFSK 相比 MPSK 信号的小波变换系数幅度方差要大，但两者并没有特别明显的区分值。

通过上面的分析我们可以得出这样的结论，单独利用某一特征参数来区分信号类别会引起误判，然而在 μ_{42}^f 大于 8 时，我们可以断定信号是 MPSK 信号，在 A_w 大于 8 时，我们可以断定信号是 MFSK 信号，在这两者都小于 8 的情况下，利用归一化中心频率的四阶矩紧致性 μ_{42}^f 和小波变换系数幅度方差 A_w 这两个特征值来区分 MPSK 和 MFSK 信号，相比用单一特征参数值阈值判别有很明显的优势。如在某一特征参数值因环境，仪器计算误差等影响造成数值偏离正常域导致用单一特征值阈值的方法造成误判的情况下，本方法仍然可以做出正确识别。下面结合图形分析该方法的可行性和有效性。

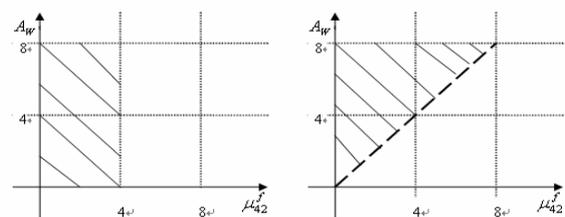


Figure 1. Comparison of traditional methods and the paper's method

图 1. 阈值方法和距离方法比较示意图

左图是用特征参数值阈值判别调制方式的示意图，以本文所识别的 MPSK 和 MFSK 信号为例，设置 μ_{42}^f 的分类点为 4，如果用单一特征参数 μ_{42}^f 分类， μ_{42}^f 小于 4，则判为 MFSK 信号（即图中阴影部分所示），反之则判为 MPSK 信号，一旦 μ_{42}^f 值发生抖动，很可能造成误判；右图即本文采用的方法示意图，单一特

征参数值小幅度偏离正常值并不会影响到判决结果，而是由两者综合决定，显然本文方法优越。

2.3 信号小波变换频率和相位直方图阶梯层数

$$C_M^f \text{ 和 } C_M^p$$

具体实现方法为：先对中频信号进行希尔伯特变换，然后进行功率归一化，再进行小波变换处理，经中值滤波，最后分别得到信号的频率和相位直方图。对于 MFSK 信号进行频率信息直方图统计，2FSK 信号，其频率直方图有两个或三个阶梯层；4FSK 信号，其频率直方图有三到五个阶梯层；8FSK 信号，其频率直方图有五到八个阶梯层。对 MPSK 信号进行相位直方图统计，2PSK 信号，其相位直方图有两个或者三个阶梯层；4PSK 信号，其相位直方图有三到五个阶梯层；8PSK 信号，其相位直方图有五到八个阶梯层。以四进制信号为例，信号小波变换系数幅度如图 2 所示：

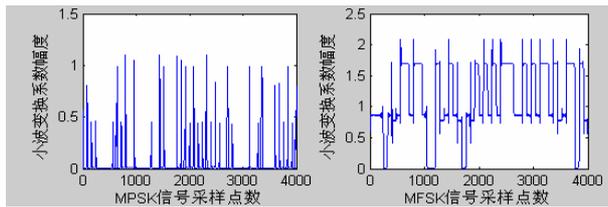


Figure 2. Magnitude diagram of wavelet transform coefficients

图 2. 信号小波变换系数幅度图

2.4 MFSK 信号归一化瞬时频率统计阶梯层数 F_M^f

MFSK 信号是以频率的大小来区分和表示信息的，它对应有 M 种不同的调制频率，那么我们只要得到信号瞬时频率的统计数值，就可以区分出是那种进制的调制。具体求法为：在信号希尔伯特变换的基础上，计算信号的瞬时相位，并修正相位初始值，然后用式 (6) 计算瞬时频率 $f_u(i)$ ：

$$f(i) = \phi(i) - \phi(i-1) \tag{6}$$

对式 (6) 取绝对值并归一化，得到归一化瞬时频率 $f_u(i)$ ：

$$f_u(i) = \frac{abs(f(i))}{\sum_{i=1}^N \max(abs(f(i)))} \tag{7}$$

然后经中值滤波，统计得出 $f_u(i)$ 的阶梯层数。对 2FSK 信号，对应两个或三个阶梯层；4FSK 信号，对应三到五个阶梯层；8FSK 信号，对应五到八个阶梯层。

2.5 MPSK 信号归一化瞬时频率统计峰值类数 L_M^p

由于瞬时频率是瞬时相位的导数，M 个相位的跳变得到的瞬时频率也应该是 M 个，而且经试验论证，

相位跳变的大小相应的带来瞬时频率大小的变化。对 2PSK 信号，对应两个或三个峰值；4PSK 信号，对应三到五个峰值；8PSK 信号，对应五到八个峰值。具体求解方法与 MFSK 信号归一化瞬时频率统计阶梯层数求解方法类同，不同点在于得到归一化瞬时频率后不进行中值滤波，直接统计归一化瞬时频率峰值类数。两者的实验观察和论证图以四进制信号为例，如图 3 所示：

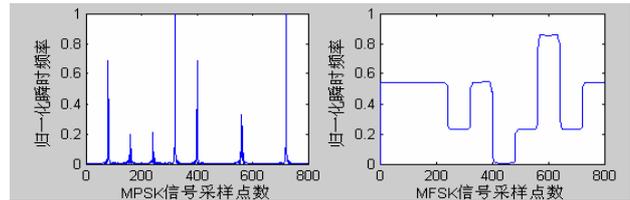


Figure 3. Normalized instantaneous frequency amplitude

图 3. 信号归一化瞬时频率幅值

3 模糊评判

模糊集合的概念是由美国控制论专家扎德 (L.A.Zadeh) 首次提出的。模糊数学在处理难以精确化的大系统、复杂系统中显得简单而有力。模糊评判方法基于模糊数学中的欧几里得贴适度概念和择近原则^[7]。设 $\underline{A}, \underline{B} \in F(U)$ ，欧几里得贴适度定义为：

$$N(\underline{A}, \underline{B}) = 1 - \frac{1}{\sqrt{N}} \left(\sum_{i=1}^N [A(u_i) - B(u_i)]^2 \right)^{1/2} \tag{8}$$

择近原则就是利用贴适度的概念来实现分类操作：设 $\underline{A}_i, \underline{B} \in F(U) (i=1, 2, \dots, n)$ ，若存在 i ，使式

$$N(\underline{A}_i, \underline{B}) = \max[N(\underline{A}_1, \underline{B}), N(\underline{A}_2, \underline{B}), \dots, N(\underline{A}_n, \underline{B})] \tag{9}$$

成立，则认为 \underline{B} 与 \underline{A}_i 最贴近，并判 \underline{B} 与 \underline{A}_i 为一类。

4 信号识别流程

本文所采用的信号识别的流程如图 4 所示：

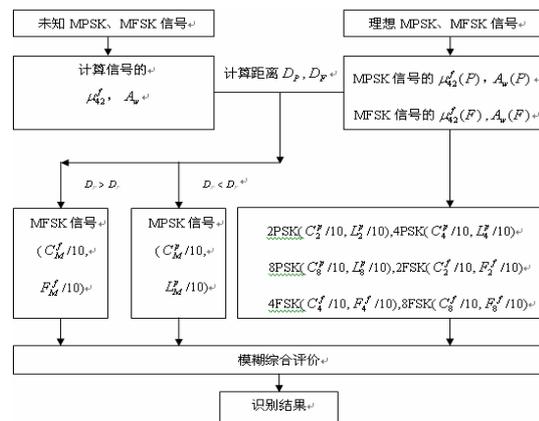


Figure 4. Flow diagram of the algorithm

图 4. 信号识别流程图

Table 3. The correct recognition rate of signal under various SNR
表 3. 不同信噪比条件下信号正确识别率

信噪比 [Ⓟ]	2FSK [Ⓟ]	4FSK [Ⓟ]	8FSK [Ⓟ]	2PSK [Ⓟ]	4PSK [Ⓟ]	8PSK [Ⓟ]
8db [Ⓟ]	0.986 [Ⓟ]	0.982 [Ⓟ]	0.982 [Ⓟ]	0.954 [Ⓟ]	0.952 [Ⓟ]	0.950 [Ⓟ]
10db [Ⓟ]	0.998 [Ⓟ]	0.996 [Ⓟ]	0.992 [Ⓟ]	0.984 [Ⓟ]	0.992 [Ⓟ]	0.978 [Ⓟ]
15db [Ⓟ]	1.000 [Ⓟ]					

识别过程为：首先计算未知 MPSK 信号或 MFSK 信号的归一化中心频率的四阶矩紧致性 μ_{42}^f 和小波变换系数幅度方差 A_w 的大小，若两者都不大于 8，则与理想 MPSK 信号的 $\mu_{42}^f(P)$ ， $A_w(P)$ 或理想 MFSK 信号的 $\mu_{42}^f(F)$ ， $A_w(F)$ 做参数特征距离计算，计算式为

$$D_p = \sqrt{[\mu_{42}^f - \mu_{42}^f(P)]^2 + [40A_w - 40A_w(P)]^2} \quad (10)$$

$$D_F = \sqrt{[\mu_{42}^f - \mu_{42}^f(F)]^2 + [40A_w - 40A_w(F)]^2} \quad (11)$$

若 $D_p > D_F$ ，则判未知信号为 MFSK 信号，否则判为 MPSK 信号，完成 MPSK 信号与 MFSK 信号类间识别。接下来计算 MPSK 信号的小波变换相位直方图阶梯层数及信号归一化瞬时频率统计峰值类数，或者 MFSK 信号小波变换频率直方图阶梯层数及信号归一化瞬时频率统计阶数，利用模糊综合评判法与理想 MPSK 或者 MFSK 信号相应值进行判决，完成信号类间识别。

5 计算机仿真

为验证该方法的有效信，使用 MATLAB 仿真对 2FSK,4FSK,8FSK,2PSK,4PSK,8PSK 六类信号进行识别，信号中频为 1KHz，采样频率为 80KHz，码元速率为 0.5KHz，信道为加性高斯白噪声信道，中值滤波器长度为 20 阶，仿真实验 500 次得到如下所示的数据表图：

6 结论

针对信号特征参数固定阈值造成错误判别调制方式的问题，提出了一种基于特征距离和模糊评判相结

合的判别方法。该方法首先利用特征参数距离对信号进行类间识别，然后利用特征参数和模糊评判对信号进行类内识别。理想信道环境下，不需要任何的信号先验知识，信噪比大于 8db 时，其正确识别率都达到了 95% 以上，尤其是 MFSK 的正确识别率能达到 98% 以上，证明该方法具有良好的分类性能。理论分析和计算机仿真表明本文方法比用单一特征参数阈值的识别方法更加有效，稳健，且具有良好的鲁棒性，是复杂电磁环境下信号调制识别的一种有效方法。

致谢

本文所完成的研究工作和论文撰写得到了系通信信号处理研究组成员的大力指导，同时实验室同事和朋友也给予了热情周到的帮助，在此衷心向他们表示感谢。

References (参考文献)

- [1] Imran Rashid, Hassan Maqbool, Mehmood-ur-Rehman, *et al.*, Digital Modulation Identification by Basic Modulation Parameters [C]. Proc. IEEE, INMIC, 2005.
- [2] Azzouz E E, Nandi A K. Automatic identification of digital modulations [J]. Signal Processing, 1995, 47(1): 55-69.
- [3] Feng Xuzhe, Luo Feilu, Yang Jun, *et al.*, Automatic modulation recognition using support vector machines based on wavelet transform [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 29(3): 87-92.
冯旭哲,罗飞路,杨俊,等.基于小波支持向量机的数字通信信号调制识别[J].电子测量与仪器学报,2009, 29(3): 87-92.
- [4] Jae-Do Jin, Yong-Jin Kwak, Kwang-Wook Lee, *et al.*, Modulation type classification method using wavelet transform for adaptive modulator [C]. Proc IEEE ISAPCS, 2005.
- [5] Ahmed Bakhraiba, Sabira Khatun, Nor Kamariah Noordin, *et al.*, Digital Modulation Identification in terms of Software Defined Radio for Traffic Management System [C]. Proc IEEE NCTT-MCP, 2008.
- [6] Hu Jianwei, Yang Shaoquan, Tang Jianlong. Modulation classification of MPSK signals in multi-path fading channel [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(4): 504-509.
胡建伟,杨绍全,汤建龙.多径信道下MPSK信号的调制分类算法[J].电波科学学报, 2005, 20(4): 504-509.
- [7] Liu Jian, Xia Feihai, Application of Data Fusion in Classifier of Modulation Types [J]. Communication Countermeasures, 2007, 98(3): 24-28.
刘健, 夏飞海.数据融合应用于通信信号调制样式识别[J]. 通信对抗, 2007, 98(3): 24-28.