

文章编号: 1001- 2486(2010) 04- 0088- 06

# 数字和模拟通信信号调制方式的自动识别\*

张志民, 欧建平, 皇甫堪, 王春雷

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 为自动识别数字和模拟通信信号的调制方式, 基于接收信号的一阶统计矩提出 9 个特征参数, 它们均可利用常规信号处理技术获得, 参数提取过程计算量小, 有利于信号的实时在线分析。以判决理论为基础提出一种调制方式自动识别算法, 给出算法的实现流程。计算机仿真结果表明, 在信噪比  $\geq 9$  dB 时, 算法平均识别成功率  $\geq 97\%$ , 有望用于实际非协作通信系统中信号的检测和快速识别。

**关键词:** 调制方式自动识别; 一阶统计矩; 特征参数

中图分类号: TN911. 72 文献标识码: A

## Automatic Modulation Recognition of Both Digital and Analog Communication Signals

ZHANG Zhi-min, OU Jian-ping, HUANGFU Kan, WANG Chun-lei

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In order to automatically classify the modulation types of both digital and analog communication signals, nine feature parameters based on the first statistical moments of the received signals were proposed. All those feature parameters were calculated using the conventional signal processing methods. The calculation process is less complicated and it is suitable for real time online analysis. Next, an automatic modulation recognition algorithm based on the decision theoretic approach was also developed and its realization was also presented in the form of a flowchart. Computer simulations shows that all the aforementioned types of communication signals have been recognized with an average success rate  $\geq 97\%$  at SNR  $\geq 9$  dB and the method proposed is suitable for the practical application of signal detection and fast recognition in non-cooperation communication systems.

**Key words:** automatic modulation recognition; the first statistical moment; feature parameters

调制方式是通信信号的一个重要特征参数, 调制方式的自动识别在军用和民用方面都有重要的应用: 军用方面, 主要有信号监视、电子对抗、威胁分析等; 民用方面, 主要有信号确认、干扰识别、信号监测、频谱管理等。通信信号调制方式的识别非常重要, 一方面, 如果对信号的调制方式识别有偏差, 则必将导致使用错误的解调方式去对信号解调, 这自然无法获取信号中蕴藏的信息; 另一方面, 在电子战中经常需要对某信号实施干扰, 但如果不了解被干扰信号的调制方式, 实施干扰便无从谈起<sup>[1]</sup>。另外, 调制方式识别也是软件无线电和认知无线电的重要组成部分<sup>[3]</sup>。

目前, 通信信号调制方式自动识别算法, 大致可分为判决理论和统计模式识别两种<sup>[2, 4-10]</sup>。在这些算法中所识别的信号类型, 大都侧重于单一的数字调制类型或模拟调制类型, 除文献[6, 11]以外, 一般较少涉及数字和模拟混合调制类型的识别。而且在这些算法中所用到的特征参数, 一般都基于接收信号的二阶或高阶统计矩, 参数提取过程计算复杂, 不利于信号的实时在线分析。本文在接收信号一阶统计矩的基础上, 提出 9 个特征参数, 它们都可利用常规信号处理技术获取, 与基于二阶或高阶矩的其它特征参数相比, 这些特征参数的提取过程计算量小, 提取方便。基于判决理论, 提出一种调制方式自动识别算法, 用以识别 MASK (ASK2, ASK4)、MFSK (FSK2, FSK4)、MPSK (PSK2, PSK4)、MQAM (QAM16, QAM64)、AM、DSB、USSB、LSSB、VSB(残留下边带)和 FM 等 14 种数字和模拟混合调制类型, 并给出识别算法的实现流程。

\* 收稿日期: 2010- 04- 07

作者简介: 张志民(1971-), 男, 博士生。

## 1 信号模型

对于上面提到的 14 种数字和模拟通信信号, 其时域表达式均可统一表示成

$$r(t) = A(t) \exp\left\{j\left[2\mathcal{Y}_c t + 2\mathcal{Y}(t)t + \phi(t)\right]\right\} + n(t) \quad (1)$$

式中,  $t$  表示时间,  $r(t)$  是接收信号,  $A(t)$  是信号的瞬时幅度或包络,  $f_c$  是载波频率,  $f(t)$ 、 $\phi(t)$  在本文中分别称为瞬时频率、瞬时相位, 在不致引起混淆时亦分别称为频率、相位,  $n(t)$  是窄带复高斯白噪声。一般情况下,  $A(t)$ 、 $f(t)$  和  $\phi(t)$  都是时间  $t$  的函数。对 MFSK、MPSK、FM 信号,  $A(t)$  近似为常数; 对 MASK、MPSK、MQAM、AM、DSB 信号,  $f(t)$  恒为零; 而对 MASK、AM 信号,  $\phi(t)$  恒为零。假设在接收机中已实现载波同步, 且已估计出数字通信信号的符号速率, 对码元同步不做要求。

## 2 特征参数

### 2.1 随机变量的统计矩

设  $\xi$  表示随机变量, 则它的数学期望  $v_1$ 、 $k$  阶原点矩  $v_k$ 、 $k$  阶绝对原点矩  $w_k$ 、 $k$  阶中心矩  $\mu_k$  和  $k$  阶绝对中心矩  $\delta_k$  的定义如下:

$$v_1 = E\{\xi\}, \quad v_k = E\{\xi^k\}, \quad w_k = E\{|\xi|^k\}, \quad \mu_k = E\{(\xi - v_1)^k\}, \quad \delta_k = E\{|\xi - v_1|^k\} \quad (2)$$

为叙述方便, 下面将随机变量  $\xi$  减去其平均值的处理过程称为对  $\xi$  进行“零中心”处理。

### 2.2 特征参数

将接收信号采样, 得到样本序列  $x(i) = r(i/F_s)$ ,  $i = 0, 1, \dots, N-1$ ,  $F_s$  为采样频率,  $N$  是样本总数。令  $A(i)$ 、 $\phi(i)$ 、 $f(i)$  分别表示第  $i$  时刻接收信号的幅度、相位和频率, 文献[6]中给出利用常规信号处理技术获取  $A(i)$ 、 $\phi(i)$  和  $f(i)$  的方法, 此处直接引用。首先定义  $A(i)$  的平均值  $m_a$  及归一化幅度  $A_n(i)$  如下:

$$m_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A(i), \quad A_n(i) = \frac{A(i)}{m_a} \quad (3)$$

在下面的特征参数中, 有些参数是在瞬时相位  $\phi(i)$  的基础上得到的, 因为  $\phi(i)$  的计算对噪声很敏感<sup>[7]</sup>, 所以需要引入一个用来描述接收信号强弱的  $A_n(i)$  的门限  $a_t$ , 即当  $A_n(i) > a_t$  时, 表示样本  $x(i)$  位于接收信号中的非弱部分, 否则表示  $x(i)$  位于接收信号中的较弱部分, 即位于噪声较强的部分。以下将  $x(i)$  中满足  $A_n(i) > a_t$  的信号样本所组成的全体称为信号的“非弱信号段”, 并用  $C$  表示其中的样本数, 所有以  $\phi(i)$  为基础的特征参数的计算均应在非弱信号段上进行。

在  $A(i)$ 、 $\phi(i)$ 、 $f(i)$ 、 $m_a$ 、 $A_n(i)$  和  $a_t$  的基础上, 应用式(2)中随机变量一阶统计矩的表达式, 提出如下 9 个特征参数, 参数标识符中的“abs”表示“绝对值”。

第一个特征参数  $absEw$ , 定义为归一化、零中心瞬时幅度  $A_{cn}(i)$  的一阶绝对原点矩

$$absEw = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |A_{cn}(i)| \quad (4)$$

这里

$$A_{cn}(i) = A_n(i) - 1 \quad (5)$$

特征参数  $absEnv$  反映了信号包络的变化情况:  $absEw$  越大, 说明信号包络变化幅度越大, 反之则越小。

第二个特征参数  $absSymm$ , 用于衡量带通信号频谱幅度在载波频率两边的对称性, 定义为

$$absSymm = \left| \frac{S_R - S_L}{S_R + S_L} \right|, \quad S_L = \sum_{i=1}^{I-1} |X(i)|, \quad S_R = \sum_{i=I+1}^{2I-1} |X(i)| \quad (6)$$

这里  $X(i)$  是  $x(i)$  的离散傅里叶变换,  $I$  是与载波频率  $f_c$  对应的样本序号。众所周知, USSB、LSSB 和 VSB 信号的频谱幅度关于  $f_c$  不对称, 而 ASK4、ASK2、QAM16、QAM64 和 DSB 信号的频谱幅度关于  $f_c$  对称。

第三个特征参数  $nIQ$ , 定义为复低通等效信号中正交分量与同相分量各自模的均值之比:

$$rIQ = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |A(i) \sin \phi(i)| / \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |A(i) \cos \phi(i)| \quad (7)$$

其中,  $A(i) \sin \phi(i)$ 、 $A(i) \cos \phi(i)$  分别是复低通等效信号中的正交分量和同相分量。对 USSB、LSSB 信号, 同相分量和正交分量模的均值相等, 故其  $rIQ$  等于 1, 而对 VSB(残留下边带) 信号, 由于同相分量模的均值要大于正交分量模的均值, 故其  $rIQ$  小于 1。

第四个参数  $Sym$ , 定义为

$$Sym = \frac{S_R - S_L}{S_R + S_L} \quad (8)$$

这里  $S_L$ 、 $S_R$  的含义见式(6)。对于 USSB,  $S_L = 0$ , 所以  $Sym = 1$ , 而对于 LSSB,  $S_R = 0$ , 故  $Sym = -1$ 。

第五个特征参数  $absPhase$ , 定义为非弱信号段上零中心相位  $\phi_c$  的一阶绝对原点矩:

$$absPhase = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C |\phi_c(i)|, \quad \phi_c(i) = \phi(i) - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \phi(k) \quad (9)$$

特征参数  $absPhase$  描述了相位的变化情况:  $absPhase$  越大, 说明  $\phi_c$  变化越剧烈, 反之越缓慢。

第六个特征参数  $absEnv2$ , 定义为归一化、零中心瞬时幅度  $A_{cn}(i)$  的绝对值的一阶绝对中心矩:

$$absEnv2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |B_{cn}(i) - m_b|, \quad B_{cn}(i) = |A_{cn}(i)|, \quad m_b = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N B_{cn}(k) \quad (10)$$

这里  $A_{cn}(i)$  的定义见式(5)。在理想无噪声情况下, 对于 ASK2 信号, 由于其归一化瞬时幅度  $A_n(i)$  包含两个离散值, 因此经零中心、取绝对值后, 其  $B_{cn}(i)$  为常数, 其  $absEnv2$  为零。另一方面, ASK4 信号的瞬时幅度  $A_n(i)$  包含 4 个离散值, 经零中心、取绝对值后, 其  $B_{cn}(i)$  将包括两个离散值, 其  $absEnv2$  不为零。

第七个特征参数  $absPhase2$ , 定义为非弱信号段上零中心相位  $\phi_c$  的绝对值的一阶绝对中心矩:

$$absPhase2 = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C \left| \theta(i) - \frac{1}{C} \sum_{k=1}^C \theta(k) \right|, \quad \theta(i) = |\phi_c(i)| \quad (11)$$

其中,  $\phi_c$  的定义见式(9)。在理想无噪声情况下, 对于 PSK2 信号, 由于其瞬时相位  $\phi(i)$  具有两个离散值  $0, \pi$ , 因此在零中心、取绝对值后都变成常数  $\pi/2$ , 故  $\theta(i)$  是常数, 其  $absPhase2$  等于零。另一方面, 由于 PSK4 信号的瞬时相位  $\phi(i)$  包含 4 个离散值, 因此经零中心、取绝对值后, 其  $\theta(i)$  将包含两个离散值, 所以其  $absPhase2$  不为零, 利用  $absPhase2$  可将二者区分。基于同样分析可知,  $absPhase2$  也适用于将 DSB 信号和 QAM16、QAM64 信号区分。

第八个特征参数  $absFreq$ , 定义为非弱信号段上零中心、归一化瞬时频率  $F(i)$  的一阶绝对原点矩

$$absFreq = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C |F(i)|, \quad F(i) = \frac{f(i) - f_a}{F_{sym}}, \quad f_a = \frac{1}{C} \sum_{k=1}^C f(k) \quad (12)$$

其中,  $F_{sym}$  是符号速率,  $F(i)$  的归一化系数针对  $F_{sym}$  进行。不难理解, 在理想无噪声情况下, 对于 FSK2、FSK4、FM 信号, 其  $absFreq$  不为零。另一方面, 对于 PSK2、PSK4 信号来说, 由于它们的  $f(i)$  恒为零, 故其  $absFreq$  也为零。

第九个特征参数  $absFreq2$ , 定义为非弱信号段上零中心、归一化瞬时频率  $F(i)$  的绝对值的一阶绝对中心矩:

$$absFreq2 = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C \left| F_2(i) - \frac{1}{C} \sum_{k=1}^C F_2(k) \right|, \quad F_2(i) = |F(i)| \quad (13)$$

其中,  $F(i)$  的定义见式(12)。在理想无噪声情况下, 对于 FSK2 信号, 由于其瞬时频率  $f(i)$  包含两个离散值, 因此经零中心、归一化、取绝对值后, 得到的  $F_2(i)$  是常数, 其  $absFreq2$  等于零。另一方面, FSK4 信号的瞬时频率包含 4 个离散值, 经零中心、归一化、取绝对值后, 其  $F_2(i)$  将包含两个离散频率值, 故其  $absFreq2$  不为零。

以上介绍了本文提出的 9 个特征参数。文献[6]中提出了一个特征参数, 即归一化瞬时频率峰值  $mu42f$ , 定义为

$$mu42f = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C F^4(i) / \left[ \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C F^2(i) \right]^2 \quad (14)$$

利用  $\mu 42f$  可将模拟 FM 调制信号同数字 FSK4、FSK2 调制信号分开。

### 3 调制方式识别算法

根据以上讨论, 在判决理论上, 得到图 1 所示的调制方式自动识别算法流程, 图中 T1~ T13 的含义见表 1。在图 1 中的每一个判决节点上, 都根据特征参数与对应门限大小的比较结果, 将原来的信号集一分为二。

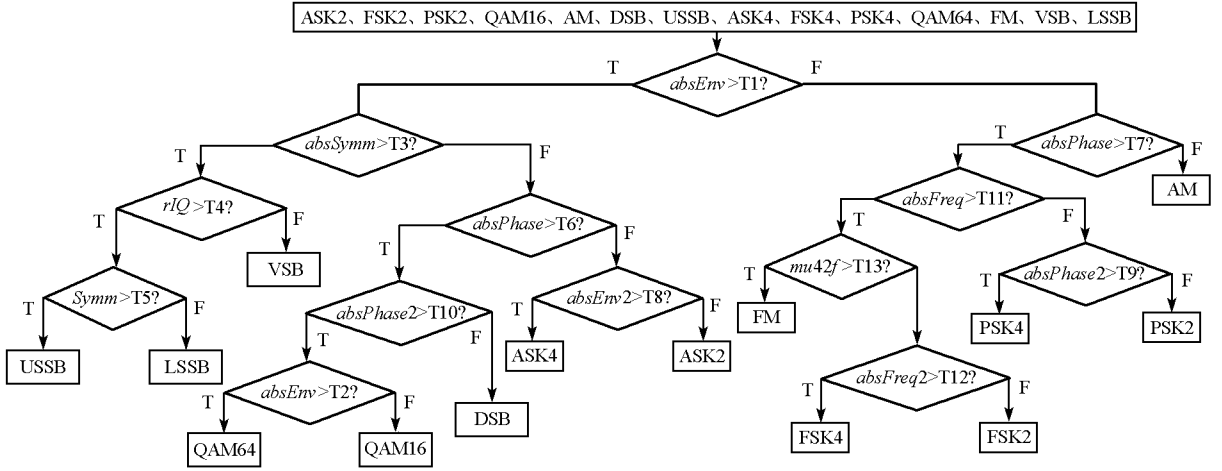


图 1 调制方式自动识别算法流程图

Fig. 1 Flowchart for the proposed modulation recognition algorithm

### 4 计算机仿真

#### 4.1 门限确定

为对本文提出的调制识别算法的性能进行评估, 首先通过计算机仿真确定各特征参数的门限。主要仿真参数为: 数字基带信号波形采用矩形脉冲, 每个符号对应的样本数为 100, 仿真符号总数 4000, 符号速率 10kHz, 载波频率 100kHz, 信噪比变化范围为 -15dB~ 40dB 且以 0.1dB 为步长改变,  $a_1$  取 1, 模拟基带信号带宽为 10kHz。为节省篇幅, 这里只给出第一个特征参数  $absEnv$  的仿真图形, 见图 2。从图 2 中可以看出, 门限 T1 应取 0.280, 要求的信噪比条件为  $SNR \geq 2dB$ 。

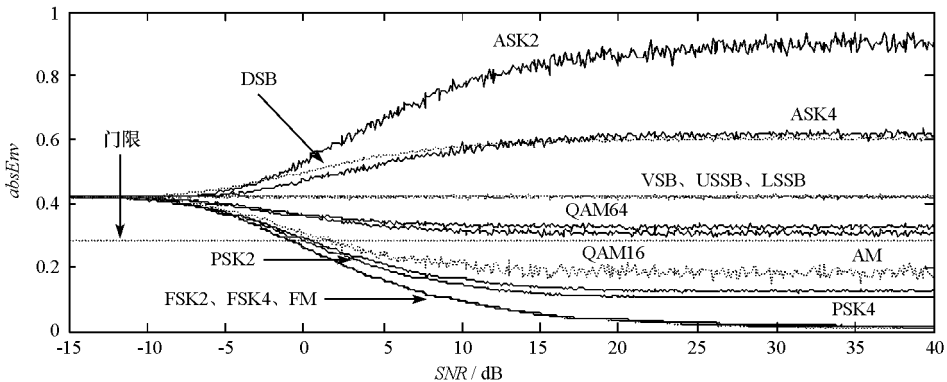


图 2 特征参数  $absEnv$  与信噪比的关系

Fig. 2  $absEnv$  vs.  $SNR$

表 1 中给出 13 个门限及适用的信噪比条件。例如对于第一个特征参数  $absEnv$ , 门限 T1 等于 0.280, 信噪比条件为  $SNR \geq 2dB$ , 这表示在信噪比大于或等于 2dB 时,  $absEnv$  门限值 0.280 有效。从表

中还可以看出,超过一半的特征参数门限所要求的信噪比下限都不高于-10dB。相对而言,  $absE_{rw}$  的门限 T2 对应的信噪比下限最高,为 9dB。

表 1 根据仿真结果确定的各特征参数的门限及要求的信噪比条件

Tab. 1 Derived thresholds of feature parameters and corresponding SNRs

特征参数	门限名称	门限值	信噪比条件	特征参数	门限名称	门限值	信噪比条件
$absE_{rw}$	T1	0.280	$\geq 2\text{dB}$	$absE_{rw2}$	T8	0.245	$\geq -1.3\text{dB}$
$absE_{rw}$	T2	0.320	$\geq 9\text{dB}$	$absPhase2$	T9	0.750	$\geq -15\text{dB}$
$absSymm$	T3	0.100	$\geq -10\text{dB}$	$absPhase2$	T10	0.820	$\geq -15\text{dB}$
$nQ$	T4	0.980	$\geq -15\text{dB}$	$absFreq$	T11	0.735	$\geq 2\text{dB}$
$Symm$	T5	0.000	$\geq -15\text{dB}$	$absFreq2$	T12	0.821	$\geq -5\text{dB}$
$absPhase$	T6	1.350	$\geq -15\text{dB}$	$mu42f$	T13	2.234	$\geq 6\text{dB}$
$absPhase$	T7	1.300	$\geq -15\text{dB}$				

## 4.2 性能评估

在已确定 13 个特征参数门限的基础上,对本文提出的调制方式识别算法的性能进行评估,并将之与其它同类算法进行比较。仿真中,对每一种调制类型、在每一信噪比下都进行 400 次实验,取实验结果平均值作为该信噪比下的平均识别率,其它实验条件与上面相同。

表 2 给出信噪比分别为 9dB 和 15dB 时,14 种通信信号的平均识别率,以百分比表示,括号中的数字对应于信噪比为 15dB 时的情形。从表中可以看出,在信噪比为 9dB 时,除 QAM16 信号的平均识别率较低(77.5%)外,其它信号的平均识别率都是 100%;当信噪比增大到 15dB 时,QAM16 的平均识别率上升到 99.25%,而其它类型信号的平均识别率仍保持 100%。这说明随着信噪比的增大,识别算法的平均识别率亦增大。从表 2 中还可以看出,QAM16 信号的平均识别率较其它信号为低,常被误判为 QAM64 信号。这是因为除门限的选取带有经验性以外,QAM16 与 QAM64 在瞬时幅度、瞬时相位的分布上大致相同,也就是说二者的特征参数差别不显著。

表 2 信噪比分别为 9dB 和 15dB 时,调制识别算法的平均识别率

Tab. 2 Average recognition success rate of proposed algorithm at SNR of 9dB and 15dB, respectively

待识别数字调制类型	平均识别率	待识别模拟调制类型	平均识别率
ASK2	100% (100%)	AM	100% (100%)
ASK4	100% (100%)	DSB	100% (100%)
FSK2	100% (100%)	USSB	100% (100%)
FSK4	100% (100%)	LSSB	100% (100%)
PSK2	100% (100%)	VSB	100% (100%)
PSK4	100% (100%)	FM	100% (100%)
QAM16	77.5% (99.25%) 识别为 QAM16, 22.5% (0.75%) 识别为 QAM64		
QAM64	100% (100%)		

作为对比, 文献[6]给出了识别 ASK2、ASK4、FSK2、FSK4、PSK2、PSK4、AM、DSB、VSB、LSB、USB、FM 等 12 种数字和模拟通信信号调制方式的算法, 作者声称在信噪比为 15dB 时, 平均识别率  $\approx 93\%$ 。因此可以得出结论: 无论在待识别信号类型的数量、最低信噪比要求, 抑或平均识别率上, 本文提出的调制方式识别算法的性能均优于该文献中的算法。

## 5 结论

调制方式是通信信号的重要特征参数之一, 调制方式的自动识别在军用和民用方面都具有十分重要的意义。本文首先基于接收信号的一阶统计矩, 在信号的瞬时幅度、瞬时相位和瞬时频率的基础上提出 9 个特征参数, 它们均可利用常规信号处理技术获得。与基于二阶或高阶矩的其它特征参数相比, 这些特征参数的提取过程计算量小, 提取方便。其次在判决理论上, 本文提出一种调制方式的自动识别算法, 用以识别 14 种数字和模拟通信信号的调制类型, 并给出算法的实现流程。需要注意的是, 该识别算法对码元同步没有要求。计算机仿真结果表明, 在信噪比  $\geq 9$ dB 时, 识别算法对上述信号调制方式的平均识别率均  $\geq 97\%$ , 性能优于同类算法, 可望用于实际的非协作通信系统中信号的检测和快速识别。

## 参考文献:

- [1] 游伟, 周先敏. 模拟调制信号的自动调制识别[J]. 信号处理, 2009, 25(1): 77- 80.
- [2] Nandi A K, Azzouz E E. Automatic Analogue Modulation Recognition[J]. Signal Processing, 1995, 46: 211- 222.
- [3] 杨小牛. 从软件无线电到认知无线电, 走向终极无线电——无线通信发展展望[J]. 中国电子科学研究院学报, 2008, 3(1): 1- 7.
- [4] Like E, Chakravarthy V D, Ratazzi P, et al. Signal Classification in Fading Channels Using Cyclic Spectral Analysis[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2009: 14.
- [5] Nandi A K, Azzouz E E. Algorithms for Automatic Modulation Recognition of Communication Signals[J]. IEEE Trans. Commun., 1998, 46(4): 431- 436.
- [6] Azzouz E E, Nandi A K. Automatic Modulation Recognition — I [J]. Journal of the Franklin Institute, 1997, 334B(2): 241- 273.
- [7] Azzouz E E, Nandi A K. Automatic Identification of Digital Modulation Types[J]. Signal Processing, 1995, 47(1): 55- 69.
- [8] Azzouz E E, Nandi A K. Procedure for Automatic Recognition of Analogue and Digital Modulations[J]. IEE Proceedings-communications, 1996, 143(5): 259- 266.
- [9] Wong M L D, Nandi A K. Automatic Digital Modulation Recognition Using Spectral and Statistical Features with Multi-layer Perceptrons[J]. IEEE the Sixth International Symposium on Signal Processing and its Applications, 2001, 2: 390- 393.
- [10] 程汗文, 吴乐南. 基于信息融合的信号调制方式识别[J]. 信号处理, 2009, 25(4): 625- 629.
- [11] Azzouz E E, Nandi A K. Automatic Modulation Recognition — II [J]. Journal of the Franklin Institute, 1997, 334B(2): 275- 305.