

## 通信信号数字调制方式自动识别算法研究

李 杨 李国通 杨根庆

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所小卫星工程部 上海 200050)

**摘 要:** 自动调制识别是非协调通信系统接收机设计中的重要研究课题, 该文针对工程中的应用提出了一种调制识别算法。与已有的算法相比, 该算法结构简单, 计算量小, 适合实时计算, 而且在低信噪比环境下有较高的识别准确度; 同时考虑了符号成形对参数提取的影响, 更能满足工程上的需要。

**关键词:** 符号成形, 瞬时参数提取, 调制方式识别

**中图分类号:** TN914, TN911.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)02-197-05

### Automatic Digital Modulation Recognition Algorithm of Communication Signals

Li Yang Li Guo-tong Yang Gen-qing

(R&D Department of Micro-Satellite,

the Institute of Shanghai Micro-System and Information Technology, Shanghai 200050, China)

**Abstract** Automatic modulation recognition is an important research area for the receiver design in the non-cooperative communication system. A digital modulation recognition algorithm is proposed in this paper for the engineering application. Contrast to other algorithm, this one is very simple to be calculated on-line and it also has a good recognition rate in the low SNR environment, furthermore the effect of symbol shape to the parameter extraction has been considered, which can satisfy the need of engineering.

**Key words** Symbol shape, Transient parameter extraction, Modulation Recognition

#### 1 引言

通信信号调制方式自动识别是信号分析领域中一个比较新的研究方向, 它有很大的应用前景, 尤其是在军事通信领域。随着电子对抗技术研究的不断升温, 迫切需要进行调制信号自动识别技术的研究, 它被广泛应用于: 信号确认、干扰识别、无线电侦听、电子对抗、信号监测和威胁分析等领域<sup>[1]</sup>。当前最具吸引力的实现平台是软件无线电以及其它可重构通信系统<sup>[2]</sup>。

近年来, 国外很多文献都集中到调制方式识别算法研究上来。文献[3-7]研究了几种不同的调制方式识别算法, 其中, 文献[3]提出了小波变换算法, 利用 Haar 小波基对信号进行小波变换, 检测变换后的幅度是否为常数值来判别信号的调制方式, 该算法在低信噪比环境下性能较好, 但识别的调制种类有限; 文献[4]提出了星座图识别算法, 通过提取信号的星座图来区分信号的调制方式, 这种方法比较直观, 但是信号的载波相位和系统时间误差都会给星座图的提取造成影响, 从而影响识别的准确度, 所以该方法要求接收系统严格做到同步; 文献[5]采用时频分布来区分信号的调制方

式, 通过 Margenau-Hill 分布、自回归模型和幅度变化来检测信号的相位、频率和幅度的变化情况, 对信号进行分类; 文献[6]提出了周期谱分析算法, 以上这 4 种识别算法要求的计算量较大, 不利于实时计算。文献[7]提出的决策理论算法, 算法简单, 而且能够识别较多的调制方式, 但没有考虑符号成形对信号瞬时参数提取的影响, 不符合实际工程中的情况; 文献[7]还对神经网络识别算法进行了研究。

本文针对通信信号数字调制方式的特点, 首先分析了符号成形对信号瞬时参数提取的影响; 然后在决策理论的基础上提出了一种调制方式识别算法, 并进行了软件仿真。仿真结果表明: 该算法不仅能识别现代通信常用的各种数字调制方式, 如 MPSK, MASK, MFSK 和 QAM, 而且算法简单, 适合实时操作, 同时具有较好的抗噪声性能和较高的识别准确度。

#### 2 符号成形对信号参数提取的影响

数字基带信号没有经过符号成形时是矩形波形, 它在频域内是无限延伸的, 在有限带宽信道中, 这必然会引起接收端信号的波形失真。为了在消除波形失真的同时保证不产生

新的码间干扰，实际中发射端一般都会采取升余弦滚降函数对数字基带信号进行成形处理。升余弦滚降函数的表达式如下，时域和频域波形如图 1 所示。

$$g(t) = \frac{\sin(\pi t/T) \cos(\alpha \pi t/T)}{(\pi t/T) [1 - (4\alpha^2 t^2/T^2)]}, \quad -3T < t < 3T \quad (1)$$

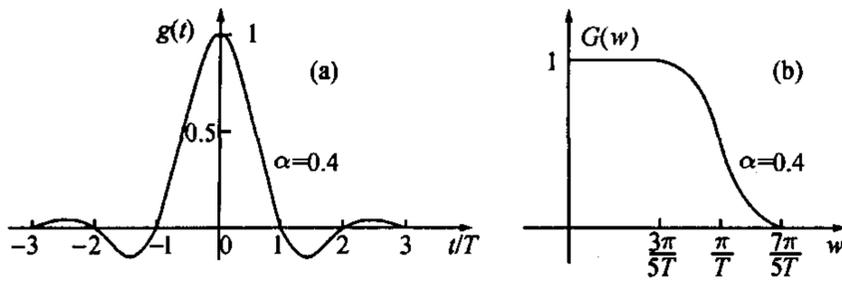


图 1 升余弦滚降信号时域(a)与频域(b)波形图

从图 1 可以看出  $g(t)$  在频域上是带限的，而时域上是无限的，只有在码元判决时刻始终为 0。我们一般只考虑 3 个窗口，3 个窗口后衰减很大，可以忽略。因为时域上是无限的，必然造成前后码元的相互影响，从而对信号瞬时幅度和相位的提取产生影响。下面以 BPSK 和 QPSK 信号为例，分析符号成形对信号瞬时幅度和相位提取带来的影响。

### 2.1 符号成形对 BPSK 信号的影响

成形后前后码元的相互影响如图 2 所示，码元  $a_{n-2}$ ,  $a_{n-1}$ ,  $a_{n+1}$ ,  $a_{n+2}$ ,  $a_{n+3}$  在区间  $[nT, (n+1)T]$  对码元  $a_n$  造成影响，经过成形后  $a_n$  变为

$$A_n = a_n g(t - nT) + a_{n-2} g[t - (n-2)T] + a_{n-1} g[t - (n-1)T] + a_{n+1} g[t - (n+1)T] + a_{n+2} g[t - (n+2)T] + a_{n+3} g[t - (n+3)T] \quad (2)$$

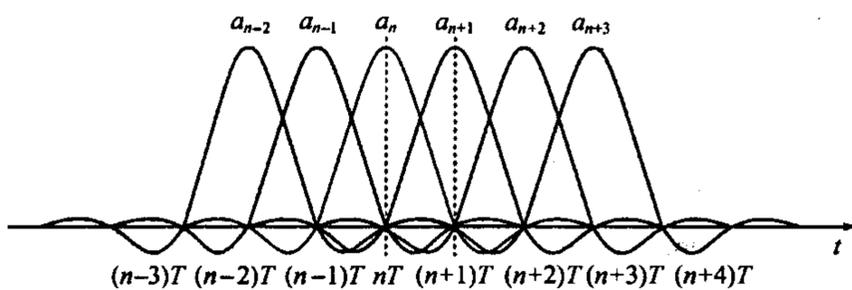


图 2 符号成形后前后码元的相互影响

BPSK 信号的表达式及其希尔伯特变换的表达式如下<sup>[8]</sup>：

$$S_{2psk}(t) = \left[ \sum_n a_n g(t - nT) \right] \cos w_c t = \sum_n A_n \cos w_c t \quad (3)$$

$$\hat{S}_{2psk}(t) = \left[ \sum_n a_n g(t - nT) \right] \sin w_c t = \sum_n A_n \sin w_c t \quad (4)$$

瞬时幅度为

$$A_{2psk} = \sqrt{\hat{S}_{2psk}^2(t) + S_{2psk}^2} = \left| \sum_n A_n \right| \quad (5)$$

瞬时相位为

$$\phi(n) = \begin{cases} \arctan \left[ \hat{S}_{2psk}(t) / S_{2psk} \right] = \arctan(\tan(w_c t)) = w_c t, & A_n > 0 \\ \pi + \arctan \left[ \hat{S}_{2psk}(t) / S_{2psk} \right] = \pi + w_c t, & A_n < 0 \end{cases} \quad (6)$$

提取出的相位去掉载波频率带来的线性相位后，得到瞬时相位 0 或  $\pi$ ，由  $A_n$  的符号决定。从上面的分析可以看出，符号成形使 BPSK 信号的幅度包络带有了  $g(t)$  函数的信息，但对相位的提取没有影响，反而会因为符号成形消除相邻码元在符号跳变处的影响，使提取出的相位比没有成形时更加平缓。成形前后提取出的幅度和相位比较如图 3 所示：

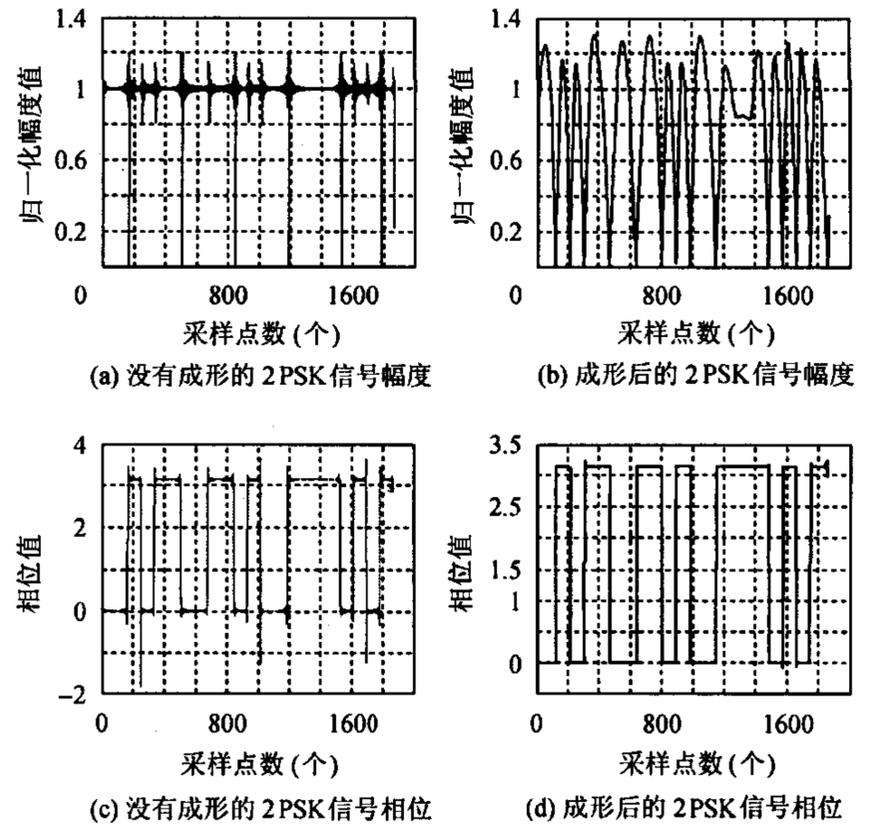


图 3 成形对 BPSK 信号的瞬时幅度和相位提取造成的影响

### 2.2 符号成形对 QPSK 信号的影响

对于 QPSK 信号，符号成形对瞬时幅度的提取与 BPSK 信号类似，这里只讨论成形对瞬时相位提取造成的影响。符号成形后，QPSK 信号变为

$$S_{4psk}(t) = \sum_n A_n \cos w_c t - \sum_n B_n \sin w_c t = \sum_n \cos(w_c t + \phi(n)) \quad (7)$$

$$\tan(w_c t + \phi(n)) = \frac{\sin(w_c t + \phi(n))}{\cos(w_c t + \phi(n))} = \frac{\hat{S}_{4psk}}{S_{4psk}} = \frac{A_n \sin w_c t + B_n \cos w_c t}{A_n \cos w_c t - B_n \sin w_c t} \quad (8)$$

其中  $\hat{S}_{4psk}(t)$  为  $S_{4psk}(t)$  的希尔伯特变换， $B_n$  是符号成形后前后码元对符号  $b_n$  影响的结果，从式 (7) 和 (8) 可以看出，符号成形影响了 QPSK 的瞬时相位，使其发生了畸变。成形前后提取出的瞬时相位比较如图 4 所示。

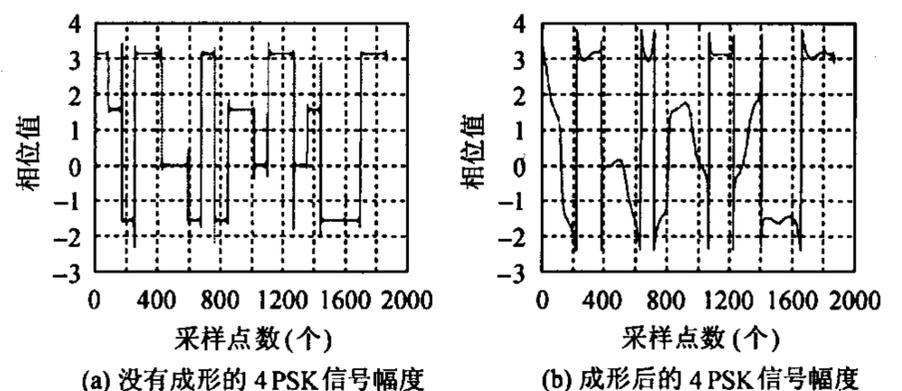


图 4 成形对 QPSK 信号瞬时相位提取造成的影响

从上面的分析可以看出，由于符号成形，使调制信号的瞬时幅度和相位发生了变化，以前大多数字调制识别算法都没有考虑符号成形对信号瞬时参数提取的影响，这不能满足工程应用的需要，下面提出的识别算法会对符号成形带来的影响加以考虑。

### 3 算法设计

本文要识别的数字调制方式包括：2PSK, 4PSK, 2ASK, 4ASK, 2FSK, 4FSK, MSK 和 QAM。各种调制方式统一的数学表达式：

$$S(t) = \text{Re} \left[ \sum_n a_n g(t-nT) e^{j(2\pi f_c t + \theta_c)} e^{j\theta_n} \right] + n(t) \quad (9)$$

其中  $a_n$  是调制码元， $g(t)$  为成形函数， $f_c$  和  $\theta_c$  分别是载波频率和相位， $\theta_n$  为调制相位， $n(t)$  为高斯白噪声。

从这些调制方式可以看出，它们中有的幅度调制，有的是相位调制，还有的是幅度和相位两种调制信息都有。因此可以从接收信号中提取出信号的瞬时幅度、相位和频率，并由这些瞬时参数构造出一些特征参数，通过设置的特定门限来区分不同的调制方式。

文献[7]中提出的决策理论算法，没有考虑符号成形的影响，不能满足实际工程中的需要，但其算法简单，易于实时计算。本文在它的基础上提出一种新的识别算法，保留了其中 3 个特征参数，再根据实际情况提出了 3 个新的特征参数，构成了本文的识别算法。特征参数如下，其中前 3 个特征参数详见文献[7]。

(1) 零中心归一化瞬时幅度的谱密度的最大值  $r_{\max}$ ：

$$r_{\max} = \max | \text{FFT} [a_{cn}(i)] |^2 / N_s \quad (10)$$

该特征参数用来区分带有幅度调制信息的调制方式和不带有幅度调制信息的调制方式。

(2) 零中心非弱信号段瞬时相位非线性分量绝对值的标准方差  $\sigma_{\text{ap}}$ ：

$$\sigma_{\text{ap}} = \sqrt{\frac{1}{C} \left[ \sum_{a_n(i) > a_t} \phi_{\text{NL}}^2(i) \right] - \left[ \frac{1}{C} \sum_{a_n(i) > a_t} |\phi_{\text{NL}}(i)| \right]^2} \quad (11)$$

该特征参数用来区分不含有绝对值相位信息的信号 BPSK, ASK 和含有绝对值相位信息的信号 QPSK 和 QAM。因为 BPSK 信号的相位不受符号成形的影响，因此符号成形给 QPSK 和 QAM 带来的相位变化并不影响该特征参数对这 3 种调制方式的区分。

(3) 零中心非弱信号段瞬时相位非线性分量的标准偏差  $\sigma_{\text{dp}}$ ：

$$\sigma_{\text{dp}} = \sqrt{\frac{1}{C} \left[ \sum_{a_n(i) > a_t} \phi_{\text{NL}}^2(i) \right] - \left[ \frac{1}{C} \sum_{a_n(i) > a_t} \phi_{\text{NL}}(i) \right]^2} \quad (12)$$

该特征参数用来区别不含直接相位信息的 ASK 信号和含有直接相位信息的 BPSK 信号。

(4) 瞬时幅度包络的均值  $E_a$ ：

$$E_a = \frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} A_n \quad (13)$$

该特征参数用来区分 QPSK 信号和 QAM 信号，QPSK 信号经过了符号成形，幅度包络不再是未成形时的常数，而是反映出升余弦滚降函数的形状，但它大多在 1 上下波动，而 QAM 信号本身带有幅度调制信息，以 8QAM 为例，它有两种幅度值 1 和  $\sqrt{2}/2$ ，其幅度的均值在 0.85 附近，成形后略有降低，因此可以通过幅度包络的均值将两种方式分开。

(5) 瞬时幅度包络的方差  $\sigma_a^2$ ：

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} \left( A_n - \frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} A_n \right)^2 \quad (14)$$

该特征参数用来区分 2ASK 信号和 4ASK 信号，因为 2ASK 只有两种幅度值 0.2 和 1，方差为 0.16，而 4ASK 有 4 种幅度值 0.25, 0.5, 0.75 和 1，方差为 0.078；成形后，方差只会在理想值附近波动，因此可以通过瞬时幅度包络的方差将两种调制方式区分开。

(6) 归一化瞬时频率的方差  $\sigma_f^2$ ：

$$\sigma_f^2 = \frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} \left( f_n - \frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} f_n \right)^2 \quad (15)$$

该特征参数用来区分 2FSK, 4FSK 和 MSK 这 3 种调制方式。采用符号速率对瞬时频率作归一化处理，2FSK 的归一化瞬时频率只有两个值  $\pm 2$ ，方差为 4；4FSK 有 4 个值  $\pm 1$  和  $\pm 2$ ，方差为 2.5；MSK 有两个值  $\pm 0.25$ ，方差为 0.0625，3 个方差差别较大，因此可以通过调制信号归一化瞬时频率的方差来区分这 3 种调制方式。

调制方式识别的流程图如图 5 所示，从图上我们可以看出，我们并不需要计算所有的 6 种特征参数，最坏的情况也只需要计算 4 个特征参数就可以识别出任何一种调制方式。

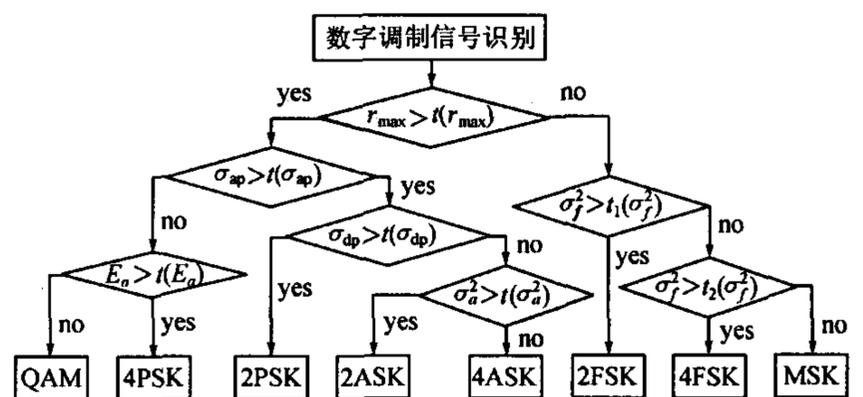


图 5 数字调制信号的识别流程图

### 4 仿真结果

仿真采用 Matlab 软件, 信号源采用随机二进制序列, 成形滤波器采用升余弦滚降函数, 滚降系数为 0.4。载波频率 408kHz, 采样率 3.264MHz, 符号率为 38.4kHz, 每个符号采样 85 次, 每次对 1870 个点进行处理, 相当于 22 个符号, 噪声为高斯白噪声, 信噪比为 0 到 25dB。仿真结果如图 6 所示。

经过大量仿真, 特征参数门限设定如表 1 所示。

在信噪比为 10dB 情况下对本算法进行了 1000 次测试, 识别准确率(%)如表 2 所示。

表 3 给出本算法与现有主要识别算法的比较, 其中识别准确度都是在 10dB 的信噪比条件下仿真的结果, 其他几种识别算法详见文献[3-7]。从表 3 可以看出, 本算法与已有算法相比: 算法简单, 计算量小, 识别种类多, 识别准确率高, 而且考虑了符号成形的影响, 更能满足工程上的需要。

表 1 特征参数门限

特征参数	$r_{max}$	$\sigma_{ap}$	$E_a$	$\sigma_{dp}$	$\sigma_a^2$	$\sigma_{1f}^2$	$\sigma_{2f}^2$
门限值	4	0.6	0.88	1	0.12	3.25	1.3

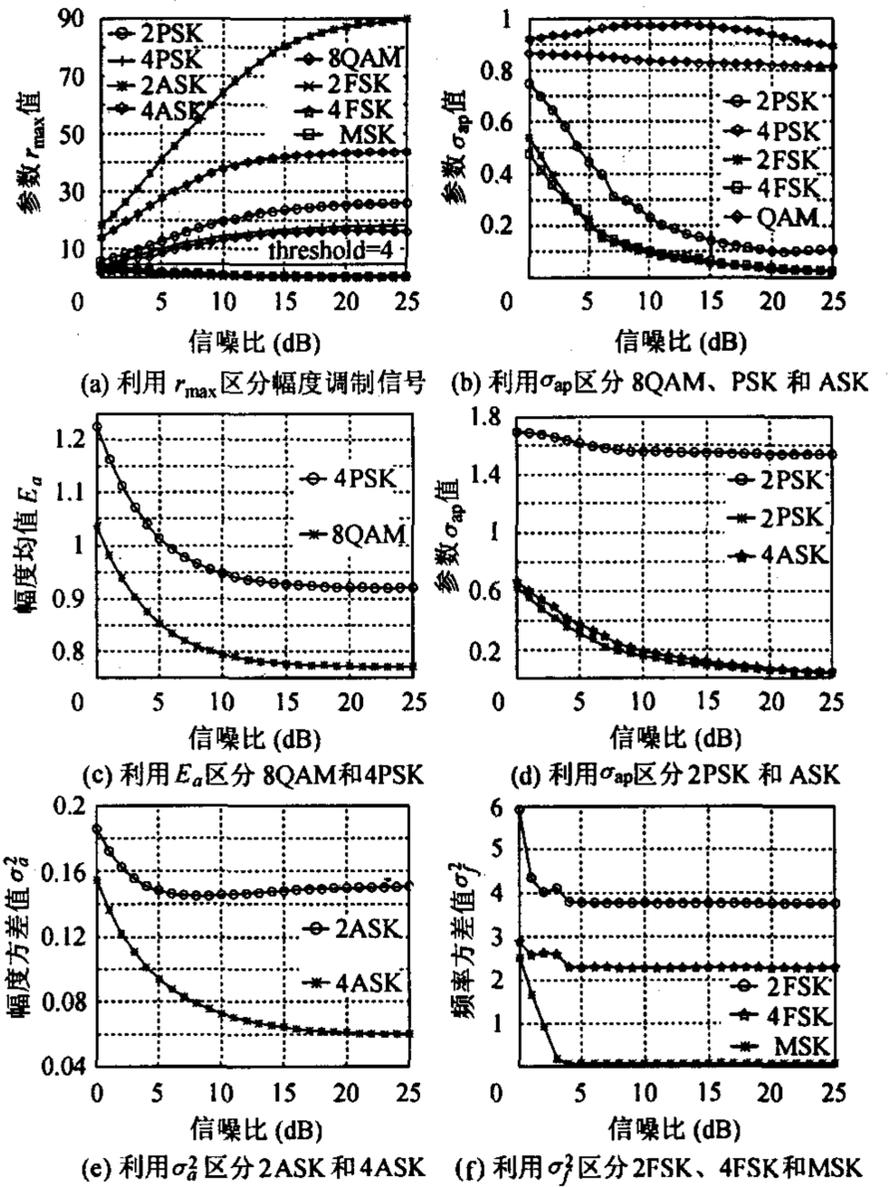


图 6 数字调制方式识别仿真结果

表 2 在 10dB 情况下本算法识别准确率 (%) 测试结果

发射调制方式	识别出的调制方式							
	8QAM	2PSK	4PSK	2ASK	4ASK	2FSK	4FSK	MSK
8QAM	99.2	0.01	0.07	—	—	—	—	—
2PSK	—	99.9	0.01	—	—	—	—	—
4PSK	—	0.01	99.8	—	—	—	—	0.01
2ASK	—	—	—	99.8	0.02	—	—	—
4ASK	—	—	—	0.01	99.9	—	—	—
2FSK	—	—	—	—	—	100	—	—
4FSK	—	—	—	—	—	—	99.8	0.02
MSK	—	—	—	—	—	—	—	100

表 3 本算法与已有识别算法的比较结果

算法	准确度 (%)	识别种类	计算量	优缺点
小波变换	98.7	3	大	低信噪比下性能较好, 但识别种类有限
星座图	95	5	较大	算法直观, 要求接收系统严格同步
时频分布	94	8	大	识别种类多, 时频变换计算量大
决策理论	98.3	6	小	算法简单, 没有考虑符号成形的影响
神经网络	93.5	6	大	计算量大, 实时性差
本算法	99.2	8	小	算法简单, 考虑了符号成形, 能满足工程需要

## 5 结论

本文针对工程中的应用提出了一种调制方式识别算法, 该算法结构简单、计算量小、适合实时计算, 而且考虑了符号成形对参数提取的影响。仿真结果表明: 在 10dB 信噪比条件下, 该算法的识别准确度在 99% 以上, 能够满足工程上的需要。

## 参 考 文 献

- [1] Yang Y, Soliman S S. Statistical moments based classifier for MPSK signal. Proc. GLOBECOM'91, Phoenix, December 1991, vol.1: 72 - 76.
- [2] Antti-Veikko Rosti. Statistic methods in modulation classification. [Master of Science Thesis], Tampere University of Technology Department of Information Technology, 1998: 39 - 46.
- [3] Liang Hong, Ho K C. Identification of digital modulation types using the wavelet transform. Proc. IEEE Military Commun.Conf. MILCOM'99, New Jersey, October 1999: 427 - 431.
- [4] Mobasser B G. Constellation shape as a robust signature for digital modulation recognition. Proc. IEEE Military Commun.

Conf. MILCOM'99, New Jersey, October 1999: 442 - 446.

- [5] Ketterer H, Jondral F, Costa A H. Classification of modulation modes using time-frequency methods. Proc. IEEE ICASSP-99, Phoenix, March 1999, vol.5: 2471 - 2474.
- [6] Garder W A. Exploitation of spectral redundancy in cyclostationary signals. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1991, 8(2): 14 - 36.
- [7] Azzouz E E, Nandi A K. Automatic modulation recognition of communication signals. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996: 77 - 94.
- [8] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现. 北京: 清华大学出版社, 2000: 126 - 127.

李 杨: 男, 1977 年生, 博士生, 现主要从事数字信号处理、软件无线电和调制方式识别的研究。

李国通: 男, 1970 年生, 研究员, 现主要从事卫星通信、软件无线电、电子对抗研究。

杨根庆: 男, 1952 年生, 研究员, 博士生导师, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所副所长, 创新一号小卫星总设计师。现主要从事小卫星技术研究。