

## 基于神经网络的数模混合信号调制识别算法

牛国庆<sup>1,2</sup>, 姚秀娟<sup>1</sup>, 闫毅<sup>1</sup>, 王春梅<sup>1</sup>

(1. 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100010)

**摘要:** 通信信号调制识别技术可用于信号确认、干扰识别、电子战对抗以及星间链路通信等方面。针对低噪声下信号调制方式识别率低与识别种类少的问题, 提出一种基于神经网络的数字模拟混合信号调制方式识别算法。简化并改进识别特征参数, 降低参数对噪声干扰的敏感度, 设计基于判决树的自动识别流程。通过自适应学习速率选取最优隐含层节点数, 改进 BP 神经网络算法。结合判决树和改进的神经网络算法, 给出基于神经网络的算法调制方式识别方案。仿真结果表明, 在信噪比不低于 0 dB 时, 该算法的平均识别成功率达到 98% 以上。

**关键词:** 数模混合信号; 调制方式识别; 决策理论; 神经网络; 星间链路

**中文引用格式:** 牛国庆, 姚秀娟, 闫毅, 等. 基于神经网络的数模混合信号调制识别算法[J]. 计算机工程, 2016, 42(4): 101-104, 111.

**英文引用格式:** Niu Guoqing, Yao Xiujuan, Yan Yi, et al. Modulation Recognition Algorithm of Digital and Analog Mixed Signal Based on Neural Network[J]. Computer Engineering, 2016, 42(4): 101-104, 111.

### Modulation Recognition Algorithm of Digital and Analog Mixed Signal Based on Neural Network

NIU Guoqing<sup>1,2</sup>, YAO Xiujuan<sup>1</sup>, YAN Yi<sup>1</sup>, WANG Chunmei<sup>1</sup>

(1. Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100010, China)

**[Abstract]** The modulation recognition technology of communication signal can be used in signal confirmation, interference identification, electronic warfare combat and intersatellite link communication. Aiming at the problem of the low signal modulation recognition rate under low Signal-to-noise-Ratio (SNR), an automatic modulation recognition algorithm based on neural network is proposed. By simplifying the identification feature parameters, the sensitivity of the parameters to noise is reduced and an identification process based on decision theory is presented. The BP neural network algorithm is improved by realizing adaptive learning rate and by choosing the optimal number of hidden layer nodes. Thus, an automatic modulation recognition scheme is given based on the combination of the neural network algorithm and the decision tree. Simulation results show that, when SNR is no less than 0 dB, the average recognition ratio of the proposed algorithm is above 98%.

**[Key words]** digital and analog mixed signal; modulation mode recognition; decision theory; neural network; Intersatellite Link (ISL)

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.04.019

#### 1 概述

为满足不同用户和业务的需求, 充分利用信道容量, 通信信号有着各种各样的调制方式, 与此同时, 通信信号调制方式识别技术也在不断发展。信号调制方式识别技术可用于信号确认<sup>[1]</sup>、干扰识别、无线电侦听<sup>[2]</sup>、电子战与电子对抗<sup>[3]</sup>、软件无

线电以及卫星星间链路通信<sup>[4-5]</sup>等方面。因此, 信号调制方式自动识别技术具有十分重要的意义和应用前景。

文献[6-7]提出了简化的决策论算法, 提取信号的瞬时参数, 直观统计识别特征参数。文献[2]基于决策论方法修正了部分识别参数, 对 9 种信号的识别在信噪比 (Signal-to-noise Ratio, SNR) 不小于 0 dB

基金项目: 国防科工局基础科研基金资助项目。

作者简介: 牛国庆 (1989 -), 女, 硕士, 主研方向为空间通信建模与仿真、软件无线电; 姚秀娟、闫毅、王春梅, 副研究员。

收稿日期: 2015-04-10 修回日期: 2015-05-06 E-mail: janes\_day@126.com

时,识别率在 80% 以上。文献[4-5]的识别算法在 SNR 不小于 5 dB 时,识别率在 70% 以上。文献[8]使用神经网络方法在低信噪比下识别 9 种数字信号。本文通过改进经典特征参数,设计了 13 种数字模拟信号调制识别的决策树分类器,简化识别算法;通过改进 BP 神经网络算法,并结合神经网络、决策树的优点改进了基于神经网络的新分类器,以便实际应用和扩展。

## 2 自动识别算法的特征参数设计

### 2.1 特征参数设计

调制方式自动识别的核心技术是提取、设计特征参数,常使用的特征参数有瞬时相位、瞬时幅度、瞬时频率等<sup>[2,6-7]</sup>。经典的特征参数存在一定理想性,其中一些运算量较大,且运算较为繁琐,因此,本文提出 6 种特征参数用于识别 AM, FM, LSB, USB, MSK, 2ASK, 4ASK, 2FSK, 4FSK, 2PSK, 4PSK, 16QAM, 32QAM 这 13 种数字模拟信号。

(1) 归一化的零中心瞬时幅度平均值  $M_1, M_2$ :

$$M_1 = \frac{1}{n} \sum_n |A_0| \quad (1)$$

$$M_2 = \frac{1}{n} |A_1| \quad (2)$$

其中,设  $s$  为实时信号; $A$  为信号瞬时幅值,那么信号的归一化零中心瞬时幅值  $A_0 = A / \text{average}(A) - 1$ , 令  $A_1 = |A_0| / \text{average}(|A_0|) - 1$ 。理论上,FSK 信号为恒包络信号,受噪声干扰信号幅值产生起伏,但与 ASK 信号较易区分,因此,该组参数主要通过信号的幅度信息分类识别调制信号,如区分 FSK 信号、ASK 信号与 QAM 信号。

(2) 归一化的零中心瞬时频率平均值  $M_{f_1}, M_{f_2}$ :

$$M_{f_1} = \frac{1}{n} \sum_n |A_f| \quad (3)$$

$$M_{f_2} = \frac{1}{n} |A_1| \quad (4)$$

其中,信号的归一化零中心瞬时频率  $A_f = |DIF\{Hilbert(s)\}| / \text{average}(|DIF\{Hilbert(s)\}|) - 1$ 。由于 MFSK 信号至少含有 2 个频率值,因此该组参数可用于区分 FSK 信号与 PSK 信号、QAM 信号;通过实质为  $M_{f_1}$  递归调用的参数  $M_{f_2}$ , 还可区分 2FSK, 4FSK 信号。

(3) 归一化的零中心瞬时相位平均值  $M_p$ :

$$M_p = \frac{1}{n} \sum_n |A_p| \quad (5)$$

其中,信号的归一化零中心瞬时相位  $A_p = |Hilbert(s)| / \text{average}(|Hilbert(s)|) - 1$ 。该组参数主要通过信号的相位信息分类识别调制信号,如区分 2PSK, 4PSK 信号。

(4) 归一化的零中心瞬时谱密度最大值  $R_{\max}$ :

$$R_{\max} = \max \left\{ \frac{|FFT\{a_{n_0}(k)\}|^2}{N_s} \right\} \quad (6)$$

$$a_{n_0}(k) = \frac{s(i)}{N_s} - 1 \quad (7)$$

$$N_s \sum_{i=1} s(i)$$

其中,  $N_s$  为信号的取样点数;  $a_{n_0}(k)$  为信号时刻  $k$  归一化的零中心瞬时幅值。在理论情况下,包络恒定、瞬时幅值不变的信号,  $R_{\max} = a_{n_0}(k) = 0$ , 可用于区分高信噪比下的恒包络信号与非恒包络信号, 如 FSK, ASK 信号。

(5) QAM 信号幅度距 ASM:

QAM 信号的星座图通常为矩形或十字, 因此, 统计一个码元内间隔固定的取样点幅值乘积所得二阶矩, 设  $N$  为 QAM 进制数, 可得:

$$M_{2, \text{MQAM}}^N = \begin{cases} \frac{N-1}{3} A^2 & N = 2^{2n} \\ \frac{31N-32}{96} A^2 & N = 2^{2n+1} \end{cases} \quad (8)$$

该参数无需载波频率、码速等先验知识, 计算简单, 性能受其他因素影响较小, 具有较好的实时性和抗干扰性, 可用于检测 M-QAM 信号<sup>[9-10]</sup>。

(6) 谱对称性  $P$ :

$$P = \frac{P_L - P_U}{P_L + P_U} \quad (9)$$

其中:

$$P_L = \sum_{k=1}^{f_{cn}} |S(k)|^2$$

$$P_U = \sum_{k=1}^{f_{cn}} |X(k + f_{cn} + 1)|^2$$

$$f_{cn} = \frac{N_s f_c}{f_s} - 1 \quad (10)$$

在式(10)中,  $f_c$  为载波频率;  $f_s$  为采样频率;  $S(k) = FFT\{s(k)\}$ ;  $P_L$  为下边带频谱;  $P_U$  为上边带频谱。该特征参数主要用于区分频谱不满足对称性的 USB, LSB 信号<sup>[11-12]</sup>。

### 2.2 特征参数仿真

为验证特征参数能否有效区分 AM, FM, LSB, USB, MSK, 2ASK, 4ASK, 2FSK, 4FSK, 2PSK, 4PSK, 16QAM, 32QAM 这 13 种数字模拟信号, 对以上 6 组特征参数分别进行仿真, 设载波频率  $f_c = 2$  kHz, 采样频率  $f_s = 4$  kHz, 以下为部分仿真结果。如图 1 仿真结果所示,  $M_{f_1}$  参数可以区别信号是否有多个频率, 主要分类 (2PSK, 4PSK) 与 (2ASK, 2FSK, 4FSK, 16QAM, 32QAM) 信号; 如图 2 所示,  $M_1$  参数则可用于分类 (2ASK), (2FSK, 4FSK) 与 (16QAM, 32QAM) 信号。

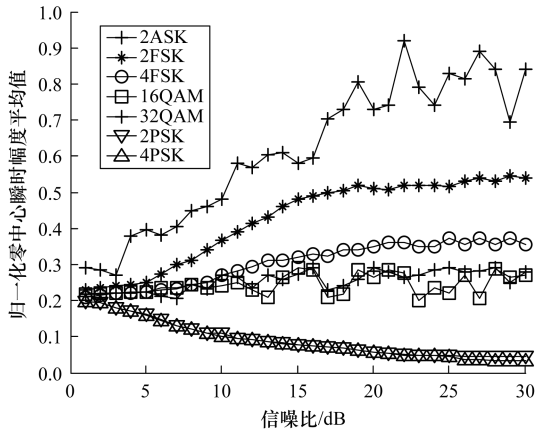


图 1 不同 SNR 下各信号的  $M_1$  参数值

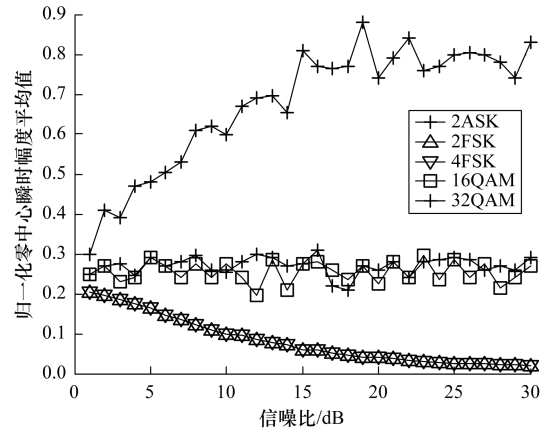


图 2 不同 SNR 下各信号的  $M_1$  参数值

### 3 决策树分类器设计

通过以上 6 组特征参数的仿真及判决门限设定,数字调制信号使用二进制序列作为信号源,模拟信号使用正弦模型,干扰均为 AWGN 噪声,根据所设计的特征参数对信号进行识别,决策树分类器设计如图 3 所示。其中的门限分别为:  $th_1(M_2) = 0.271$ ,  $th_1(R_{max}) = 4.75$ ,  $th_2(M_2) = 0.49$ ,  $th_2(R_{max}) = 14.95$ ,  $th(M_{f_1})$

$= 0.19$ ,  $th_1(M_1) = 0.312$ ,  $th_2(M_1) = 0.2$ ,  $th(M_{f_2}) = 0.425$ ,  $th(ASM) = 7.5$ ,  $th(M_{p_1}) = 0.445$ ,  $th_3(R_{max}) = 0.291$ ,  $th(P) = 0.1$ 。

仿真结果如表 1 所示,当 SNR > 10 dB 时,本文所设计决策树分类器识别率可达 100%,但信噪比较小时识别率较低,这是由于在不同信噪比下门限值也需随之调整,而门限值对整个识别率影响较大,于是根据仿真结果设定的门限值较为局限。

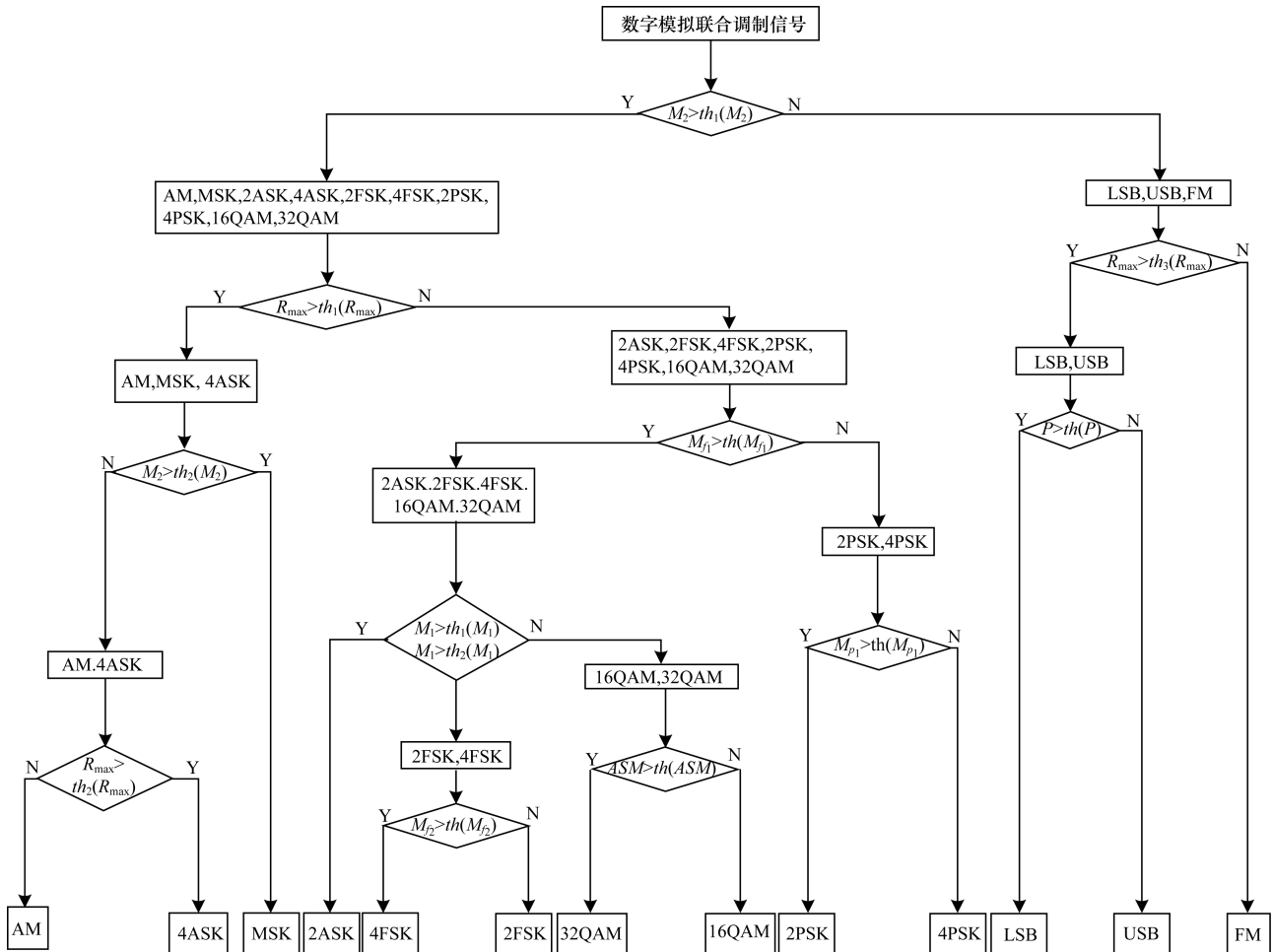


图 3 决策树分类流程

表 1 决策树分类流程识别率 %

数模信号	SNR 为 0 dB	SNR 为 5 dB
2ASK	72.45	85
4ASK	71.00	84
2FSK	76.00	90
4FSK	76.85	95
2PSK	75.40	89
4PSK	72.68	88
MSK	78.00	97
16QAM	78.20	90
32QAM	74.34	80
AM	77.00	86
USB	73.60	81
LSB	72.92	80
FM	80.00	88

#### 4 基于神经网络的分类器设计

由于低信噪比下决策树分类器算法识别度不高,接下来基于神经网络对该分类器进行改进。选取标准 3 层 BP 神经网络,输入层采用正切 S 型函数,输出层采用 purelin 线性函数;输入层、输出层节点个数分别选取 6 个特征参数、13 个信号调制类型。其中,对于隐含层的节点个数,通常根据经验或反复实验来确定<sup>[13-14]</sup>;本文对以上模型进行仿真,得到如表 2 所示网络误差与节点个数关系的仿真结果,选取输出误差最小的节点数  $N_{invi} = 12$ 。

表 2 输出误差随隐含层节点数的变化

节点数	误差
8	0.369
9	0.559
10	0.148
11	0.432
12	0.108
13	0.561
14	0.480

设置预定误差  $error_0$  约束输出误差,使下一时刻与上一时刻输出误差比值小于  $error_0$ ;学习速率初值设为  $lr = 0.05$ ;通过采用乘或除以学习率系数  $lr_{inc}$  实现自适应学习速率,这里取  $lr_{inc} = 1.05$ ;对于训练函数,采用收敛速度较快、训练误差较小的 LM 算法 (trainlm 函数)。

基于神经网络的混合信号调制方式分类器如图 4 所示,该识别流程结合了决策树算法与神经网络算法,还可根据所掌握新调制方式信号特征将分类器进行扩展。得到判决识别结果如表 3 所示,在

SNR 不小于 0 dB 时,本文所设计的调制方式识别算法平均正确率在 98% 以上。

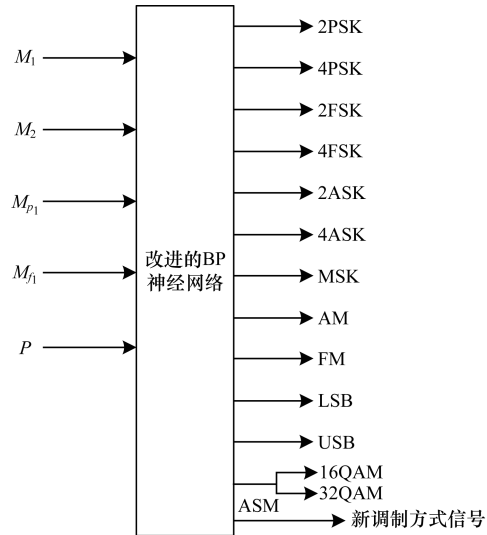


图 4 基于神经网络的分类器

表 3 基于神经网络的分类器识别率 %

数模信号	SNR 为 0 dB	SNR 为 5 dB
2ASK	98.80	100
4ASK	95.40	100
2FSK	98.30	100
4FSK	97.56	100
2PSK	99.13	100
4PSK	97.96	100
MSK	97.62	100
16QAM	99.20	100
32QAM	99.20	100
AM	98.40	100
USB	98.68	100
LSB	98.68	100
FM	99.20	100

#### 5 结束语

本文在简化经典特征参数、提取新特征参数的基础上,设计了基于判决树的混合信号调制方式识别算法及其门限值判定参考值,该算法计算简单,实时性较好,在 SNR 不低于 5 dB 时平均正确识别率可达 85% 以上。通过自适应学习速率、选取最优隐含层节点数,改进了 BP 神经网络算法,并结合所得判决树算法,提出一种更优的基于神经网络算法改进后的调制方式识别架构,提高了算法的正确识别率,在 SNR 不低于 0 dB 时平均正确识别率可达 98% 以上,并且该算法可扩展性强。在具体工程实践中,多种类型噪声、多径干扰环境下的信号调制方式识别方法,将有待于进一步研究。(下转第 111 页)

检测。总谱线估计均值法会忽略掉一些较弱频点而速度快;能量检测需要逐个慢慢累加,时间开销稍大,而迭代更具有速度优势,不过二阶矩门限法需要做方差,速度稍慢。归纳得出,循环门限更新法综合性能更好。

## 5 结束语

针对 GNSS 中干扰信号检测的需求以及传统干扰存在性检测算法的缺陷,本文基于频域门限检测,从优化门限设置进行算法的性能提升,提出选取小部分最小谱线来估计初始门限检测,进而将小于门限的谱线迭代更新到下一个门限的循环门限更新算法。对 6 种干扰信号样式的仿真结果表明,该算法检测性能良好,输出的干扰信号的频率、带宽和功率信息正常;同时分析了虚警概率对算法性能的影响,确定了其取值范围;最后通过与其他 3 种算法的对比表明本文提出的算法综合性能表现优秀。下一步工作将根据干扰检测结果,设计干扰的分类识别器,并针对不同干扰情况制定高效的抗干扰策略。

### 参考文献

- [1] 刘毅. GNSS 接收机抗干扰技术研究[ D ]. 成都:电子科技大学,2011.
- [2] 范广伟,晁磊,刘莉. 卫星导航干扰监测技术[J]. 四川兵工学报,2013,34(6):125-128.
- [3] 邓韦. 能量检测在认知无线电频谱感知中的应用[J]. 通信技术,2010,43(8):92-93,96.
- [4] 张玉恒,张勇. 基于分数阶傅里叶域 K 谱线算法的 LFM 干扰抑制[J]. 系统仿真学报,2009,21(15):4794-4796.
- [5] 张永飞,魏安全,孙玉琦. DSSS 系统频域干扰抑制最

佳门限选择算法研究[J]. 山西电子技术,2011,(1):82-84.

- [6] Wang Haiquan, Yang Enhui, Zhao Zhijin, et al. Spectrum Sensing in Cognitive Radio Using Goodness of Fit Testing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(11):5427-5430.
- [7] 杨威. 基于信噪比权值的累积量循环平稳检测协作感知[J]. 电子测量技术,2012,35(1):46-49,54.
- [8] de la Rosa J J G, Moreno-Munoz A, Palomares J C, et al. Automatic Classification of Power Quality Disturbances via Higher-order Cumulants and Self-organizing Networks[C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010: 1579-1584.
- [9] 樊明,魏泽鼎,郭艺. DSSS 频域干扰检测方法研究[J]. 现代电子技术,2007,30(13):15-17.
- [10] 谢岗. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
- [11] 张明友. 信号检测与估计[M]. 北京:电子工业出版社,2011.
- [12] Chen Jian, Gibson A, Zafar J. Cyclostationary Spectrum Detection in Cognitive Radios[Z]. 2008.
- [13] 严蔚敏,吴伟民. 数据结构[M]. 北京:清华大学出版社,2012.
- [14] 胡晓宁,作国锋,胡捍英. 已知噪声不确定性的双门限协作频谱感知[J]. 计算机工程与应用,2012,48(8):158-160,188.
- [15] Tandra R, Sahai A. SNR Walls for Signal Detection[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2008, 2(1):4-17.
- [16] 李维和,刘宏盛,沈阳,等. 战场电磁环境建模与仿真[M]. 北京:国防工业出版社,2014.
- [17] 杨小明,陶然. 直接序列扩频通信系统中干扰样式的自动识别[J]. 兵工学报,2008,29(9):1078-1082.

编辑 顾逸斐

(上接第 104 页)

### 参考文献

- [1] 王晓娜. 典型通信信号调制识别技术研究[ D ]. 西安:电子科技大学,2011.
- [2] 何晓华,谢建精,李式巨,等. 基于决策理论的模拟数字混合信号调制识别[J]. 计算机工程,2010,36(15):286-290.
- [3] 付仕平,杨丽,邵伟. 基于瞬时特征参数的数字信号调制识别算法[J]. 现代防御技术,2013,41(6):71-75.
- [4] 郭娟娟,尹洪东,姜璐,等. 利用高阶累积量实现数字调制信号的识别[J]. 通信技术,2014,47(11):1255-1260.
- [5] 于洋,李孝严,张晓春. BPSK, QPSK, UQPSK, 64QAM 信号自动调制识别[J]. 电子科技,2015,28(1):49-52.
- [6] Nandi A K, Azzouz E E. Automatic Analogue Modulation Recognition[J]. Signal Processing, 1995, 46(3):211-222.
- [7] Nandi A K, Azzouz E E. Algorithms for Automatic Modulation Recognition of Communication Signals[J].

IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(4):431-436.

- [8] 赖惠成,褚辉. 一种混合模式的神经网络自动调制识别器[J]. 电子与信息学报,2008,30(5):1203-1205.
- [9] 刘东华,李秋娜. 基于幅度矩的 MQAM 信号调制方式识别方法[J]. 系统仿真学报,2009,21(15):4782-4785.
- [10] 于风云,张平. QAM 调制与解调的全数字实现[J]. 现代电子技术,2005,29(3):53-55.
- [11] 熬仙丹,何世彪,黄付庆. 基于谱相关和神经网络的信号调制识别[J]. 重庆邮电大学学报,2008,20(5):577-681.
- [12] 张松华,何怡刚,李兵,等. 基于遗传小波神经网络的 RFID 调制识别[J]. 计算机工程,2011,37(2):191-193.
- [13] 包国平. 数字通信信号识别研究与参数提取[ D ]. 南京:南京理工大学,2004.
- [14] 张志民,欧建平,皇甫堪. 数字通信信号调制自动识别研究[J]. 计算机工程,2011,37(6):153-156.

编辑 索书志