

基于高阶累积量和循环谱的信号调制方式混合识别算法

赵雄文^① 郭春霞^{*①} 李景春^②

^①(华北电力大学电气与工程学院 北京 102206)

^②(国家无线电监测中心 北京 100037)

摘要: 为了识别当前通信系统所采用的主要调制方式,该文结合高阶累积量和循环谱的特点,采用混合识别算法,同时应用智能决策算法(神经网络)对信号进行识别。该算法基于四阶和六阶高阶累积量构造出一个新的特征参数,将数字调制信号分为{BPSK, 2ASK}, {QPSK}, {2FSK, 4FSK}, {MSK}和{16QAM, 64QAM}5类。然后利用高阶累积量的其它特征参数以及循环谱特征对{OFDM}, {16QAM, 64QAM}, {2ASK, BPSK}及{2FSK, 4FSK}进行识别。为便于工程实现,该文采用半实物仿真以及 LabVIEW 和 MATLAB 混合编程来验证算法。仿真结果证明,该算法能够在较低信噪比下实现对{OFDM, BPSK, QPSK, 2ASK, 2FSK, 4FSK, MSK, 16QAM, 64QAM}等多种信号的分类,在信噪比高于 5 dB 时,调制方式识别率可达 94%以上,由此证明了该方法的有效性。

关键词: 调制识别; 高阶累积量; 循环谱; 神经网络

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)03-0674-07

DOI: 10.11999/JEIT150747

Mixed Recognition Algorithm for Signal Modulation Schemes by High-order Cumulants and Cyclic Spectrum

ZHAO Xiongwen^① GUO Chunxia^① LI Jingchun^②

^①(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

^②(The State Radio Monitoring Center, Beijing 100037, China)

Abstract: To recognize the major modulation schemes which are applied to concurrent communication systems, a joint method based on the high-order cumulants and cyclic spectrum with intelligent decision algorithm (neural network) is proposed to recognize the modulation schemes for digital signals. Firstly, a new featured parameter is extracted from the four-order and six-order cumulants of the digital signals to identify the modulation schemes of {BPSK, 2ASK}, {QPSK}, {2FSK, 4FSK}, {MSK}, and {16QAM, 64QAM}, then {OFDM}, {16QAM, 64QAM}, {2ASK, BPSK}, and {2FSK, 4FSK} are classified by the other featured parameters of the joint high-order cumulants and cyclic spectrum algorithms. In order to facilitate the engineering implementation, the semi-physical simulation and mixed programming of LabVIEW and MATLAB are used to validate the proposed algorithms. Simulation results show that the algorithms can recognize modulations {OFDM, BPSK, QPSK, 2ASK, 2FSK, 4FSK, MSK, 16QAM, 64QAM} with small Signal-to-Noise Ratio (SNR). The average recognition rate is more than 94% with SNR greater or equal than 5 dB, which validates the effectiveness of the proposed algorithms.

Key words: Modulation recognition; High-order cumulants; Cyclic spectrum; Neural network

1 引言

近年来无线通信技术快速成长,数字信号调制分类的重要性日益上升。信号调制识别是信号检测和解调的中间过程,被广泛应用于光谱监视,干扰识别,智能调制解调器等等。在数字信号调制识别

的方法中,高阶累积量以及循环谱具有抗干扰的优点,因此受到广泛关注。文献[1]基于四阶累积量对数字调制信号 BPSK, QPSK, 4PAM, 16QAM 进行了识别,并讨论了信噪比和样本数对识别性能的影响;文献[2]基于四阶累积量完成了 BPSK, 4PSK, 8PSK 的识别,并对信号的未知参数进行了估计;文献[3]在无先验信息时,基于累积量实现了对卫星通信信号的识别;文献[4]基于四阶、六阶累积量和支持向量机的方法实现了数字调制信号 2ASK, 4ASK, 8ASK, 4PSK, 8PSK 的分类。文献[5]比较了

收稿日期: 2015-06-18; 改回日期: 2015-12-08; 网络出版: 2016-01-22

*通信作者: 郭春霞 guochunxia1002@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61372051)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61372051)

四阶和六阶累积量对 MPSK 调制信号的识别性能，得出六阶累积量的抗干扰性更强。在利用累积量对 MFSK 信号进行分类时，由于其各阶累积量完全相等，因此无法将其直接区分。文献[6]将信号微分后再计算其高阶累积量，实现了 MFSK 信号的识别。以上基于累积量的识别算法中，均未能将特征参数完全相同的 2ASK 和 BPSK 信号区分，具有一定的局限性。因此同样具有抗噪性能的循环谱识别方法被广泛应用，文献[7]在非高斯噪声下基于循环谱和频率谱截面的相关系数构成特征参数实现信号分类；文献[8]利用循环谱构建特征参数并使用神经网络分类器实现对调制信号的识别。但 BPSK, QPSK, 16QAM 的循环谱特征相似，识别有较大困难。文献[9]从信号的循环累积量中提取循环频率特征，实现对 BPSK, QPSK, OQPSK, MSK 的识别。文献[10]基于高阶累积量对 BPSK, QPSK, OQPSK, 8PSK, $\pi/4$ DQPSK, 16APK, 16QAM 以及 64QAM 进行了识别。文献[11]利用幅度分布特征实现了 QPSK, 16QAM, 16APSK, 32APSK 调制信号的识别。基于 LabVIEW 的数字信号识别也有广泛应用，文献[12]基于 LabVIEW 软件平台产生 2ASK, 4ASK, 2FSK, 4FSK, 2PSK, 4PSK 这几种数字调制信号并对其进行识别。文献[13]是基于 LabVIEW 的信号调制识别系统，并进行了系统的搭建与识别。以上基于高阶累积量和循环谱的方法中，识别信号种类较少或提取特征参数较多，都不能完全区分当前通信系统所采用的主要调制方式。

本文基于高阶累积量和循环谱提取特征参数，实现了一种混合识别算法，并用 LabVIEW 控制 USRP 进行半实物仿真验证。首先从信号发生器中产生信号，连接 USRP 接收信号，然后从接收信号的累积量以及循环谱中提取特征参数，利用神经网络分类器实现 {OFDM, BPSK, QPSK, 2ASK, 2FSK, 4FSK, MSK, 16QAM, 64QAM} 数字调制信号的分类。该算法结合了高阶累积量和循环谱特征的优点，增加了识别信号的种类，提高了识别率。仿真分析表明，该算法有较好的识别性能，验证了该方法的有效性。

2 高阶累积量与循环谱调制识别分析

2.1 高阶累积量理论

$\{x(t)\}$ 为平稳随机过程，其 k 阶累积量的定义为^[4,6]

$$C_{kx}(f_1, f_2, \dots, f_k) = \text{Cum}(x(t), x(t+f_1), \dots, x(t+f_{k-1})) \quad (1)$$

其中 $\text{Cum}(\cdot)$ 的含义为对 \cdot 求累量。它的 p 阶混合矩

定义如式(2):

$$M_{pq} = E\{[x(t)^{p-q} x^*(t)^q]\} \quad (2)$$

式中 $*$ 表示序列的共轭， q 为取其共轭的序列的个数。

因此，对于均值为零的平稳复随机过程 $x(t)$ ，各阶累积量的表达式如下：

(1) 二阶累积量：

$$C_{20} = \text{Cum}(x, x) = M_{20} \quad (3)$$

$$C_{21} = \text{Cum}(x, x^*) = M_{21} \quad (4)$$

(2) 四阶累积量：

$$C_{40} = \text{Cum}(x, x, x, x) = M_{40} - 3M_{20}^2 \quad (5)$$

$$C_{42} = \text{Cum}(x, x, x^*, x^*) = M_{42} - M_{20}^2 - 2M_{21}^2 \quad (6)$$

(3) 六阶累积量：

$$C_{60} = \text{Cum}(x, x, x, x, x, x) = M_{60} - 15M_{40}M_{20} + 30M_{20}^3 \quad (7)$$

$$C_{61} = \text{Cum}(x, x, x, x, x, x^*) = M_{61} - 5M_{40}M_{21} - 10M_{20}M_{41} + 30M_{21}M_{20}^2 \quad (8)$$

$$C_{63} = \text{Cum}(x, x, x, x^*, x^*, x^*) = M_{63} - 6M_{41}M_{20} - 9M_{21}M_{42} + 18M_{21}M_{20}^2 + 12M_{21}^3 \quad (9)$$

由于均值为零的高斯白噪声高于二阶的累积量为零，因此，接收信号累积量的值不受噪声干扰。假设信号能量为 E ，根据文献[1]中高阶累积量理论值计算方法，得到各数字调制信号的累积量的理论值如表 1 所示。

由表 1 可以看出，OFDM 信号高于二阶的累积量均为 0，利用 $|C_{42}|$ 可以把 OFDM 与其他信号区分开。同时，MFSK 各阶累积量的值相等，不能利用累积量直接将其区分。

2.2 数字调制信号的循环谱

数字信号谱相关的算法一般有两种^[8,14]。一是利用 Fourier 变换来计算，二是通过时域平滑来计算。

本文采用时域平滑，具体算法为：

(1) 计算 $x(n)$ 在时间长度为 $T = NT_s$ 的 N 点频谱：

$$X_T(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-j2\pi nk/N) \quad (10)$$

(2) 计算谱相关：

$$S_{x_T}^\alpha(k) = \frac{1}{N} X_T(k + \alpha/2) X_T^*(k - \alpha/2) \quad (11)$$

(3) 谱平滑：

$$S_{x_T}^\alpha(k)_{\Delta f} = \frac{1}{M+1} \sum_{m=-M/2}^{M/2} S_{x_T}^\alpha(k+m) \quad (12)$$

表 1 数字调制信号累积量的理论值

调制方式	C_{20}	C_{21}	C_{40}	C_{42}	C_{60}	C_{61}	C_{63}
OFDM	-	-	0	0	0	0	0
2ASK	E	E	$-2E^2$	$-2E^2$	$-16E^6$	$16E^6$	$16E^6$
BPSK	E	E	$-2E^2$	$-2E^2$	$-16E^6$	$16E^6$	$16E^6$
QPSK	0	E	E^2	$-E^2$	0	$4E^6$	$4E^6$
2FSK	0	E	0	$-E^2$	0	0	$4E^6$
4FSK	0	E	0	$-E^2$	0	0	$4E^6$
MSK	0	E	$-0.8E^2$	$-E^2$	0	$3.3E^6$	$4E^6$
16QAM	0	E	$-0.68E^2$	$-0.68E^2$	0	$2.08E^6$	$2.08E^6$
64QAM	0	E	$-0.62E^2$	$-0.62E^2$	0	$1.80E^6$	$1.80E^6$

2.3 特征参数选取

在选取特征参数对数字信号进行识别时, 要考虑两方面的因素, 一是相位的抖动对累积量产生的影响, 因此使用累积量的绝对值消除这一影响。二是信号的幅度对累积量产生的影响。因此选取基于高阶累积量的特征参数时, 采用的是比值形式。经过以上分析, 本文提取的特征参数为 $T_1 = |C_{42}|$, $T_2 = |C_{61}|^2 / |C_{42}|^3$, $T_3 = \max(S_{r_T}^\alpha)^{[15]}$ 。

文献 [16] 利用参数 $F_{e1} = |C_{40}| / |C_{42}|$ 识别出 {MASK, MPSK, 16QAM} 与 MFSK 信号, 然后利用 $F_{e2} = |C_{63}|^2 / |C_{42}|^3$ 识别出 {BPSK, 2ASK}, QPSK 和 16QAM 信号。可以看出文献 [16] 利用参数较多, 本文构造的特征参数 T_2 可以直接将信号区分为 {BPSK, 2ASK}, {QPSK}, {2FSK, 4FSK}, {MSK} 和 {16QAM, 64QAM} 5 类, 减少了特征参数的个数, 提高了抗干扰性。

根据表 1 中数字调制信号各阶累积量的理论值和式 (12), 分别计算得出特征参数 T_2 , T_3 的理论值, 如表 2、表 3 所示。

由表 2 可知, 特征参数 T_2 可以实现 QPSK 及

MSK 的分类, 且将余下的 6 种数字调制信号分类为 {BPSK, 2ASK}, {2FSK, 4FSK} 和 {16QAM, 64QAM} 3 类。BPSK 与 2ASK, 2FSK 与 4FSK 的各阶累积量完全相同, 且 16QAM 与 64QAM 的累积量十分相近, 无法利用高阶累积量对其进行识别, 因此利用循环谱特征参数 T_3 将其完全识别。

3 神经网络分类器设计

BP (Back Propagation) 神经网络相比于决策树有着很大的优势, 因此在本文中利用 BP 神经网络的算法对数字调制信号进行分类。相对于决策树识别, BP 神经网络分类器的优势在于对数字调制信号的识别速度较快, 且识别率较高。BP 神经网络的识别过程如下: 首先利用训练样本对神经网络进行训练, 即为神经网络的学习过程, 经过训练的神经网络可以对数字调制信号进行识别。

神经网络的结构分为 3 层, 输入层, 隐含层, 输出层。本文有 T_1 , T_2 , T_3 共 3 个特征参数, 9 种数字调制信号, 因此, 本文的 BP 神经网络的结构为: 输入层的节点为 3, 输出层的节点为 4。其所代表的数字调制方式以及表示方式如下表 4 所示。

表 2 数字调制信号特征参数 T_2 的理论值

调制方式	BPSK/2ASK	QPSK	2FSK/4FSK	MSK	16QAM	64QAM
T_2	32.00	16.00	0	10.89	13.76	13.59

表 3 数字调制信号特征参数 T_3 的理论值

调制方式	16QAM	64QAM	BPSK	2ASK	2FSK	4FSK
T_3	0.085	0.065	0.153	0.081	0.151	0.105

表 4 输出向量和所代表的调制方式

调制方式	OFDM	BPSK	2ASK	QPSK	2FSK	4FSK	MSK	16QAM	64QAM
输出向量	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000

对于隐含层的节点个数，有关文献给出了一个经验公式^[15]： $H = \sqrt{I+O} + T$ ， H 即为隐含层的节点数， I 为输入层的结点数， O 为输出层的结点数， T 的取值为 1~10 的之间的整数。根据公式可知， H

的取值范围为 4~13，因此，本文在信噪比为 5 dB 的条件下，选取单隐含层节点个数分别为 5, 8, 10, 12，对各神经网络的识别率进行仿真验证，结果如表 5 所示。

表 5 不同隐含层节点个数对应神经网络的识别率(%)

节点个数	调制信号								
	OFDM	BPSK	2ASK	QPSK	2FSK	4FSK	MSK	16QAM	64QAM
5	97.4	94.5	91.4	93.2	90.5	91.6	95.7	88.9	86.6
8	99.8	95.9	98.3	94.8	94.9	97.7	97.8	97.6	92.2
10	100	99.1	99.0	99.0	98.9	98.6	100	99.0	94.0
12	100	99.3	99.0	99.1	99.0	98.8	100	99.0	94.0

由表 5 可知，隐含层节点个数较少时，识别率较低，随着隐含层节点个数的增多识别率提高，当隐含层节点个数为 10 时，可以达到较高的识别率。继续增加隐含层节点个数，神经网络的识别率几乎不变或者少量提高，但使网络训练时间延长。因此，本文神经网络的单隐含层的节点个数为 10。

BP 神经网络的训练参数设置如下：隐含层及输出层的作用函数为 tansig 函数，训练函数选择 trainlm。网络训练允许的最大循环次数为 1000，学习速率为 0.05，最小期望误差为 10^{-5} 。

4 模型算法步骤及验证

4.1 算法步骤

利用以上 3 个特征参数对数字调制信号的识别流程如图 1 所示：

(1)使用信号发生器产生数字调制信号，然后利用连接在计算机上的 USRP 对信号进行接收；

(2)利用 LabVIEW 对接收的数字调制信号进行下变频处理以获得所接收的调制信号的基带信号；

(3)利用 LabVIEW 和 MATLAB 混合编程，计算接收信号的各阶累积量以及循环谱，并求 T_1 ，利

用 T_1 ，将 OFDM 信号区分出来，将信号分为{OFDM}和 {BPSK, 2ASK, QPSK, 2FSK, 4FSK, MSK, 16QAM, 64QAM}两类；

(4)计算 T_2 ，利用 T_2 将信号分为 {QPSK}, {BPSK, 2ASK}, {2FSK, 4FSK}, {MSK} 和 {16QAM, 64QAM}5 类，从而识别出 QPSK 和 MSK 信号；

(5)最后计算特征参数 T_3 ，利用 T_3 对调制方式 {16QAM, 64QAM}和 {BPSK, 2ASK}以及 {2FSK, 4FSK}进行类内区分。至此，完成了 9 种调制方式的识别。

4.2 算法仿真验证

本文采用半实物仿真验证，利用信号发生器产生数字调制信号，使用 USRP 接收信号，利用 LabVIEW 及 MATLAB 混合编程对数字调制信号进行处理。分为两个步骤进行，一是对接收信号的特征参数随信噪比变化情况的研究；二是对识别性能的研究。

实验 1 各数字调制信号的特征参数随信噪比变化情况的研究

本文产生的信号包括 OFDM 和 BPSK, 2ASK, QPSK, 2FSK, 4FSK, MSK, 16QAM, 64QAM 共 9 种数字调制信号，加入的噪声为高斯白噪声，信噪比为 0 到 20 dB，设定信号的载波频率 2.5 GHz，采样频率 16 GHz，码元速率 1 Gb/s。

特征参数随信噪比变化曲线如图 2~图 4 所示。

图 2 为不同信噪比情况下参数 T_1 的值，显示了噪声对数字调制信号的特征参数 T_1 的影响，可以看出参数 T_1 的值较为稳定。OFDM 信号的 T_1 值接近其理论值 0，与其他数字调制信号差别明显。证明利用 T_1 识别 OFDM 信号的正确性。

图 3 为不同信噪比情况下参数 T_2 的值，显示了噪声对特征参数 T_2 的影响，由图 3 可知，在信噪比

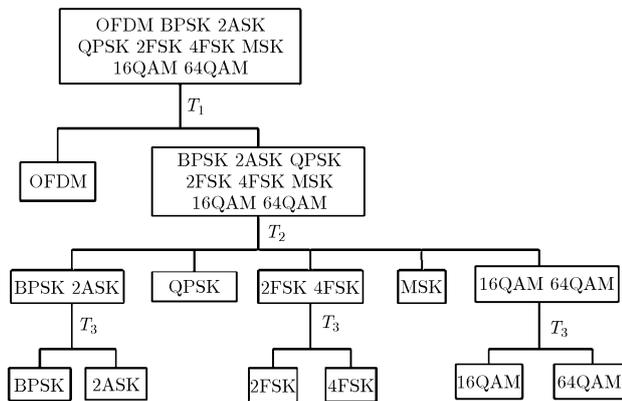
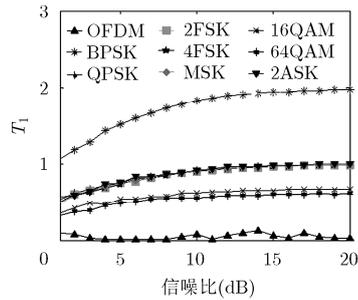
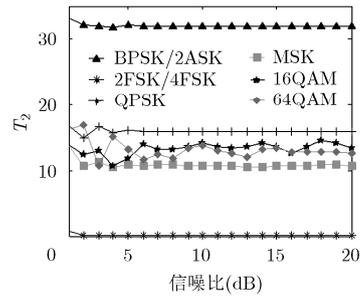


图 1 识别流程图

图2 T_1 仿真曲线图3 T_2 仿真曲线

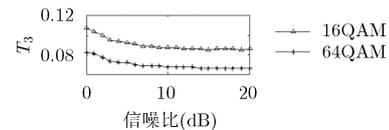
大于 5 dB 时, 参数 T_2 的值趋于稳定且接近理论值, 除 16QAM 和 64QAM 信号有混叠外, 其他信号均能有效区分。因此, 利用参数 T_2 可以将信号分为 {QPSK}, {BPSK, 2ASK}, {2FSK, 4FSK} 和 {MSK}, {16QAM, 64QAM} 5 类, 由此证明特征参数 T_2 的正确性。

图 4 为不同信噪比情况下参数 T_3 的值, 显示了噪声对数字调制信号 {BPSK, 2ASK, 2FSK, 4FSK, 16QAM, 64QAM} 的特征参数 T_3 的影响, 可以看出参数 T_3 的值较为稳定且接近理论值。利用特征参数 T_3 可以在信噪比大于 0 dB 时, 对 {16QAM, 64QAM}, {BPSK, 2ASK} 及 {2FSK, 4FSK} 3 类信号类内的两种信号有效的进行区分。证明了选取 T_3 参数的正确性。

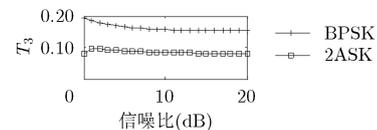
实验 2 各数字调制信号识别性能的研究

本文采用神经网络分类器对数字调制信号进行分类。对每种数字调制信号在不同信噪比下分别独立进行 1000 次的测试, 得到的对不同调制方式识别率如表 6~表 8 所示。

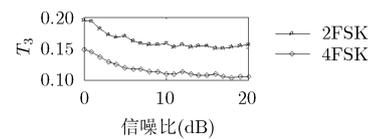
由表中结果可知, 当信噪比为 0 dB 时, 每种数字调制信号已经有较好的分类效果, 在信噪比为 5 dB 时, 信号的识别率都高于 94%, 当信噪比达到



(a) 16QAM, 64QAM



(b) BPSK, 2ASK



(c) 2FSK, 4FSK

图4 T_3 仿真曲线

10 dB 时, 识别率可以达到 98.9%。对比文献[17], 本文选取的特征参数更少, 降低了计算复杂度, 且识别信号种类更多, 同时引入了神经网络分类器, 识别率显著提高。

5 结论

高阶累积量受噪声影响较小, 具有较好的抗干扰性, 但是无法完全识别当前通信系统所采用的主

表 6 信噪比为 0 dB 时的识别率(%)

输入	输出								
	OFDM	BPSK	2ASK	QPSK	2FSK	4FSK	MSK	16QAM	64QAM
OFDM	100	0	0	0	0	0	0	0	0
BPSK	0	98.2	0	1.8	0	0	0	0	0
2ASK	0	0	89.1	0	0	0.1	1.8	9	0
QPSK	0	1.4	0	97.1	0	0	0.5	1	0
2FSK	0	0	0	0	99	0	1	0	0
4FSK	0	0	0	0	31.1	67.9	1	0	0
MSK	0	0.2	0	8	0	0	91.8	0	0
16QAM	0	0	3.6	0	0	0.3	14.2	81.9	0
64QAM	0	0	0	0	0	0	12.5	23.1	64.4

表7 信噪比为5 dB时的识别率(%)

输入	输出								
	OFDM	BPSK	2ASK	QPSK	2FSK	4FSK	MSK	16QAM	64QAM
OFDM	100	0	0	0	0	0	0	0	0
BPSK	0	99.1	0	0.9	0	0	0	0	0
2ASK	0	0	99	0	0	0.1	0.2	0.8	0
QPSK	0	0	0	99	0	0	0	1	0
2FSK	0	0	0	0	99	0	1	0	0
4FSK	0	0	0	0	0	98.6	1.4	0	0
MSK	0	0	0	0	0	0	100	0	0
16QAM	0	0	0	0	0	0	1	99	0
64QAM	0	0	0	0	0	0	6	0	94

表8 信噪比为10 dB时的识别率(%)

输入	输出								
	OFDM	BPSK	2ASK	QPSK	2FSK	4FSK	MSK	16QAM	64QAM
OFDM	100	0	0	0	0	0	0	0	0
BPSK	0	99.2	0	0.8	0	0	0	0	0
2ASK	0	0	98.9	0	0	0	0.1	0.8	0.2
QPSK	0	0	0	99	0	0	0	1	0
2FSK	0	0	0	0	100	0	0	0	0
4FSK	0	0	0	0	1	99	0	0	0
MSK	0	0	0	0	0	0	100	0	0
16QAM	0	0	0	0	0	0	0	100	0
64QAM	0	0	0	0	0	0	0.2	0	99.8

要调制方式, 为此引入了循环谱, 利用高阶累积量特征参数与循环谱特征相结合的混合识别算法实现了数字调制信号的分类。本文利用 LabVIEW 和 MATLAB 混合编程实现了{OFDM, BPSK, 2ASK, QPSK, 2FSK, 4FSK, MSK, 16QAM, 64QAM}的识别, 为了提高以上 9 种信号的识别率, 还加入了神经网络分类器。本文识别的调制方式包括了当前通信系统所采用的主要的调制方式, 同时采用半实物仿真验证, 有较好的工程实用价值。仿真表明, 该算法的识别率较高, 计算复杂度低, 便于工程实现。

参考文献

- [1] SWAMI A and SADLER B M. Hierarchical digital modulation classification using cumulants[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2000, 48(3): 416-429. doi: 10.1109/26.837045.
- [2] 程汉文, 朱雷, 吴乐南. 基于累计量的干扰信号调制识别算法[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(7): 1741-1745. CHENG Hanwen, ZHU Lei, and WU Yuenan. Modulation classification algorithm for jamming signal based on cumulant[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(7): 1741-1745.
- [3] SHAKRA Mahmoud M, SHAHEEN Ehab M, BAKR Hossam Abou, et al. C3. Automatic digital modulation recognition of satellite communication signals[C]. 32nd National Satellite Communication Signals, Giza, 2015: 118-126. doi: 10.1109/NRSC.2015.7117822.
- [4] WANG Lanxun, REN Yujing, and ZHANG Ruihua. Algorithm of digital modulation recognition based on support vector machines[C]. International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Baoding, 2009: 980-983. doi: 10.1109/ICMLC.2009.5212366.
- [5] 孙钢灿, 王忠勇, 刘正威. 基于高阶累积量实现数字调相信号调制识别[J]. *电波科学学报*, 2012, 17(4): 825-831. doi: 10.13443/j.cjors.2012.04.033. SUN Gangcan, WANG Zhongyong, and LIU Zhengwei. Performance analysis of modulation recognition of MPSK signals based on high-order cumulants[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2012, 17(4): 825-831. doi: 10.13443/j.cjors.2012.04.033.

- [6] LIU Mingzhu, ZHAO Yue, Shi Lin, *et al.* Research on recognition algorithm of digital modulation by higher order cumulants[C]. Fourth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), Harbin, 2014: 686-690. doi: 10.1109/IMCCC.2014.146
- [7] 刘明骞, 李兵兵, 曹超凤, 等. 认知无线电中非高斯噪声下数字调制信号识别方法[J]. 通信学报, 2014, 35(1): 82-88. doi: 10.3969/j.issn.1000-436x.2014.01.010
- LIU Mingqian, LI Bingbing, CAO Chaofeng, *et al.* Recognition method of digital modulation signals over non-Gaussian noise in cognitive radio[J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(1): 82-88. doi: 10.3969/j.issn.1000-436x.2014.01.010.
- [8] FEHSKE A, GAEDDERT J, and REED J. A new approach to signal classification using spectral correlation and neural networks[C]. IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Baltimore, MD, 2005: 144-150. doi: 10.1109/DYSPAN.2005.1542629.
- [9] 赵宇峰, 曹玉健, 纪勇, 等. 基于循环频率特征的单信道混合通信信号的调制识别[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(5): 1202-1208. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00454.
- ZHAO Yufeng, CAO Yujian, JI Yong, *et al.* Modulation identification for single-channel mixed communication signals based on cyclic frequency features[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(5): 1202-1208. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00454.
- [10] HAN Yu, WEI Guohua, SONG Chunyun, *et al.* Hierarchical digital modulation recognition based on higher-order cumulants[C]. Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), Harbin, 2012: 1645-1648. doi: 10.1109/IMCCC.2012.398.
- [11] 廖灿辉, 涂世龙, 万坚. 一种抗频偏的卫星幅相调制信号识别算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(2): 346-352. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00512.
- LIAO Canhui, TU Shilong, and WAN Jian. An anti-frequency-offset algorithm for modulation recognition of satellite amplitude-phase modulated signals[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(2): 346-352. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00512.
- [12] VISAN D A, JURIAN M, LITA I, *et al.* Modeling and simulation of an recognition system for digital modulated signals[C]. 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology(ISSE), Brno, 2009: 1-5. doi: 10.1109/ISSE.2009.5206992.
- [13] YAJNANARAYANA V and AHMED I Z. Novel method for blind constellation detection using template based classifier for quadrature digital modulation schemes[C]. 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), Chengdu, 2011: 1-4. doi: 10.1109/ICEMI.2011.6037934.
- [14] RAMKUMAR B. Automatic modulation classification for cognitive radios using cyclic feature detection[J]. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 2009, 9(2): 27-45. doi: 10.1109/MCAS.2008.931739.
- [15] 赵叶芳. 基于谱相关和神经网络的调制方式识别[D]. [硕士学位论文], 哈尔滨工业大学, 2011.
- ZHAO Yefang. Modulation recognition based on spectral correlation and network[D]. [Master dissertation], Harbin Institute of Technology, 2011.
- [16] 包锡锐, 吴瑛, 周欣. 基于高阶累积量的数字调制信号识别算法[J]. 信息工程大学学报, 2007, 8(4): 463-467.
- BAO Xirui, WU Ying, and ZHOU Xin. Algorithm of digital modulation recognition based on higher-order cumulants[J]. *Journal of Information Engineering University*, 2007, 8(4): 463-467.
- [17] 陈泽艺. 基于循环谱和高阶累积量的联合模式识别方法[J]. 电讯技术, 2015, 16(3): 328-332. doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2015.03.017.
- CHEN Zeyi. A combined modulation recognition based on cyclic spectrum and high-order cumulants[J]. *Telecommunication Engineering*, 2015, 16(3): 328-332. doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2015.03.017.
- 赵雄文: 男, 1964年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信.
- 郭春霞: 女, 1989年生, 硕士, 研究方向为无线通信中的信号处理.
- 李景春: 男, 1966年生, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为数字信号处理.