

基于小波和高阶累积量的数字调制识别算法

李世平,陈方超

(东北大学 信息科学与工程学院,沈阳 110819)

(lishiping@ise.neu.edu.cn; cfcolu87520qq@139.com)

摘要:利用基于高阶累积量的数字调制识别算法对数字调制信号进行分类识别时,六阶及六阶以上累积量的计算过于复杂,且多进制频移键控(MFSK)与8PSK信号各阶累积量的值均相等,直接计算无法识别。针对此问题,提出了一种基于小波和高阶累积量相结合的分类算法,先对MFSK与8PSK信号进行小波变换,再利用四阶累积量进行识别。实验证明,利用该算法所提取的特征参数能有效抑制高斯白噪声,除了识别2ASK/BPSK,4ASK,2FSK,4FSK,QPSK,8PSK信号外,还可识别16QAM,并且计算量小,易于实现。当信噪比大于等于3 dB时,总体识别率达到96%。与已有算法相比,仿真结果证明了该算法的优越性。

关键词:小波;高阶累积量;调制识别;特征参数;识别率

中图分类号: TN911.72 **文献标志码:** A

Recognition algorithm of digital modulation based on wavelet and high-order cumulants

LI Shi-ping, CHEN Fang-chao

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China)

Abstract: When using recognition algorithm of high-order cumulants to classify and recognize digital modulation signals, the calculation of six-order and six-order above cumulants are too complex and the signals of 8PSK and Multiple Frequency Shift Keying (MFSK) have the same cumulants, so it is impossible to recognize directly. To solve this problem, a new classification algorithm was proposed in this paper, which made wavelet transform on MFSK and 8PSK at first, and then used four-order cumulants recognition. The simulations show that the characteristic parameters could restrain Gaussian white noise efficiently and simply, and classify and recognize 2ASK/BPSK, 4ASK, 2FSK, 4FSK, QPSK, 8PSK and 16QAM successfully. When SNR (Signal-to-Noise Ratio) is 3 dB, the recognition rate reaches as high as 96%. Compared with the existing algorithms, the superiority of the algorithm is proved.

Key words: wavelet; high order cumulants; modulation recognition; characteristic parameter; recognition rate

0 引言

数字信号调制方式的识别是软件无线电技术的重要内容之一,在军事情报截获、电子侦察、无线电监控等领域有着广泛的应用;其基本任务是在未知调制信息的前提下,确定信号的调制方式,然后估计载波频率、码元速率、载波相位等调制参数,为接收端选择适当的解调器提供依据。

目前,通信信号的调制识别的方法主要有两类:基于决策论(Decision Theory, DT)方法和基于统计模式识别方法。基于决策论方法^[1]是采用概率论和复合假设检验理论,依据函数最小化原则导出用于分类的充分统计量,然后设置合适的门限,来完成调制识别的自动分类功能;这类方法判决准则简单,但计算量大,难于实时处理,且需要更多的先验知识。基于统计模式识别方法^[2]判决准则复杂,但特征提取简单,不需要一定的假设条件、易于计算,比较适合盲信号处理。因此在非协作通信中,一般采用基于统计模式识别方法。

在基于统计模式识别方法中,高阶累积量对于识别数字基带信号具有简单、有效、运算量小的特点,而且能有效抑制噪声,则基于该算法实现数字信号调制识别的研究越来越受到人们的重视。文献[3]利用四阶累积量实现二相相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)和四相相移键控

(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)信号的调制识别;文献[4]利用四阶累积量实现BPSK、QPSK、8PSK信号的调制识别;文献[5]利用二阶、四阶、六阶累积量实现2ASK、4ASK、QPSK、2FSK、4FSK信号的调制识别;文献[6]利用四、六阶累积量来识别4ASK、MFSK、MPSK和16QAM,并证明了高阶累积量对信号的幅度、相位偏差具有不变性。通常在信号识别中,使用六阶及六阶以上累积量,虽识别效果好,但计算复杂。文献[7]在前人的基础上利用二、四阶累积量识别2ASK和4ASK信号,并且针对多进制频移键控(Multiple Frequency Shift Keying, MFSK)与8PSK信号各阶累积量的值均相等,直接计算无法识别的问题,提出先对8PSK和MFSK信号微分,再利用二、四阶累积量进行信号识别的方法,但在低信噪比条件下该方法识别率较低,且特征参数不稳定。本文提出了新的特征参数,用于识别MASK信号;并提出对8PSK和MFSK信号先进行小波变换再利用四阶累积量来识别,且与已有算法进行对比。

1 高阶累积量特征提取

1.1 待识别调制信号模型

数字调制信号的复数形式^[8]可表示为:

收稿日期:2011-05-30;修回日期:2011-07-04。

作者简介:李世平(1960-),男,辽宁沈阳人,副教授,主要研究方向:信号处理;陈方超(1987-),男,辽宁沈阳人,硕士研究生,主要研究方向:信号处理、通信信号调制识别。

$$S(t) = \bar{E} \sum_n h_n p(t - nT_s) \cdot \exp[j(\omega_c + \theta_c)] + n(t) \quad (1)$$

其中: $p(t)$ 为发送码元波形, T_s 为码元宽度, ω_c 为载波频率, θ_c 为载波相位, h_n 为发送码元序列, $n(t)$ 为均值为零的复高斯白噪声, E 为发送码元波形的能量。

根据数字调制信号的性质,待分离数字调制信号的表示如下:

MASK:

$$S(t) = \bar{E} \sum_n a_n p(t - nT_s) \cdot \exp[j(\omega_c + \theta_c)] + n(t);$$

$$a_n \in \{2m - 1 - M \mid m = 1, 2, \dots, M\} \quad (2)$$

MFSK:

$$S(t) = \bar{E} \sum_n \exp(j\varphi_n) p(t - nT_s) \cdot \exp[j(\omega_c + \theta_c)] + n(t);$$

$$\omega_n \in \{(2m - 1 - M)\Delta\omega \mid m = 1, 2, \dots, M\} \quad (3)$$

其中 $\Delta\omega$ 为 MFSK 信号的频偏。

MPSK:

$$S(t) = \bar{E} \sum_n \exp(j\varphi_n) p(t - nT_s) \cdot \exp[j(\omega_c + \theta_c)] + n(t);$$

$$\varphi_n \in \{(m - 1)(2\pi/M) \mid m = 1, 2, \dots, M\} \quad (4)$$

MQAM:

$$S(t) = \bar{E} \sum_n (a_n + b_n) \cdot p(t - nT_s) \cdot \exp[j(\omega_c + \theta_c)] + n(t);$$

$$a_n, b_n \in \{(2m - 1 - \sqrt{M}) \mid m = 1, 2, \dots, \sqrt{M}\} \quad (5)$$

1.2 高阶累积量理论基础

对于零均值 k 阶实平稳随机过程 $\{x(n)\}$ 的 k 阶累积量^[9] 定义为:

$$c_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}) = \text{cum}(x(n), x(n + \tau_1), x(n + \tau_2), \dots, x(n + \tau_{k-1})) \quad (6)$$

对于零均值的平稳复随机过程 $\{X(k)\}$, 其 p 阶混合矩可表示为:

$$M_{pq} = E[X(k)^{p-q} X^*(k)^q] \quad (7)$$

其中 $X^*(k)$ 表示函数 $X(k)$ 的共轭, 简化高阶累积量如下:

$$c_{20} = \text{cum}(X, X) = M_{20} \quad (8)$$

$$c_{21} = \text{cum}(X, X^*) = M_{21} \quad (9)$$

$$c_{40} = \text{cum}(X, X, X, X) = M_{40} - 3M_{20}^2 \quad (10)$$

$$c_{41} = \text{cum}(X, X, X, X^*) = M_{41} - 3M_{21}M_{20} \quad (11)$$

$$c_{42} = \text{cum}(X, X, X^*, X^*) = M_{42} - |M_{20}|^2 - 2M_{21}^2 \quad (12)$$

1.3 数字调制信号高阶累积量分析

设接收信号模型为: $r = s + n$, s 为有用信号, n 为均值为零的高斯白噪声, 并且 s 和 n 相互独立, 由累积量的半不定性有:

$$\text{cum}(r) = \text{cum}(s) + \text{cum}(n) \quad (13)$$

根据现代信号处理理论与应用^[10] 可知, 均值为零的复高斯白噪声的高阶累积量 (大于二阶) 为零, 故式 (13) 可写为

$$\text{cum}(r) = \text{cum}(s) \quad (14)$$

由此可见, 接收信号和有用信号的高阶累积量值相等, 而不受高斯噪声的影响, 即高阶累积量可以很好地抑制噪声。而信号的各阶累积量取决于调制方式, 如果用接收到的被零均值高斯白噪声污染的信号的高阶累积量来建立识别参数, 就能识别信号的调制方式。这正是利用接收信号的高阶累积量识别调制类型的理论依据。

假设发送码元独立同分布, 在理想条件下, 由式 (6) ~ (12) 以及式 (14) 计算数字调制信号的高阶累积量。令信号的能量为 E , 则 MASK、MFSK、MPSK 三类数字调制信号各阶累积量的理论值如表 1 所示。

表 1 数字调制信号各阶累积量的理论值

信号类型	c_{20}	c_{21}	c_{40}	c_{41}	c_{42}
2ASK	E	E	$-2E^2$	$-2E^2$	$-2E^2$
4ASK	E	E	$-1.36E^2$	$-1.36E^2$	$-1.36E^2$
2FSK	0	E	0	0	$-E^2$
4FSK	0	E	0	0	$-E^2$
BPSK	E	E	$-2E^2$	$-2E^2$	$-2E^2$
QPSK	0	E	E^2	0	$-E^2$
8PSK	0	E	0	0	$-E^2$
16QAM	0	E	$-0.68E^2$	0	$-0.68E^2$

2 基于高阶累积量的信号识别和算法描述

为实现数字信号的调制分类, 考虑到计算复杂度和以最少的特征参数识别尽可能多的信号, 本文采用调制信号的二、四阶累积量建立识别特征参数。由表 1 知, 2ASK 和 BPSK 信号经预处理变换到基带时, 二者累积量相等, 利用高阶累积量无法实现其分类, 故在下面识别中把它们归为一类。文献 [7] 中用于识别 2ASK 和 4ASK 的特征参数性能较差, 当信噪比达到 8 dB 时, 才能正确识别; 当信噪比低于 8 dB 时, 难于识别, 直接影响着总体识别率; 同时, 利用微分对 8PSK 和 MFSK 信号处理后, 再利用四阶累积量识别, 其结果特征参数不稳定。针对以上问题, 本文给出了新的特征参数, 用于识别 MASK 信号; 并提出了对 8PSK 和 MFSK 信号先进行小波变换后, 再利用四阶累积量进行信号分析识别的改进算法。

设 $f_1 = |c_{40}/c_{42}|$, $f_2 = |c_{41}/c_{42}|$, $f_3 = |c_{41}^2/c_{20}|$, $f_4 = |c_{42}|$; 其特征参数的理论值如表 2 所示。其中, f_3 为改进的特征参数, 能有效识别 2ASK 和 4ASK; 利用 f_4 识别 MFSK 和 8PSK 信号时, 它们的特征参数差别不大, 对后续实验仿真时的门限值选取增加了很大的难度, 因此, 本文引入了 Haar 小波^[10]。

1) Haar 小波是小波分析中最早使用的一个具有紧支撑的正交小波函数同时也是最简单的一个。Haar 小波基函数 $\psi_{a,\tau}(t)$ 定义为:

$$\psi_{a,\tau}(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{a}}, & -0.5a \leq t \leq 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{a}}, & 0 < t \leq 0.5a \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

任意尺度下, 高斯白噪声的 Haar 小波变换可以表示为:

$$CWT_{n(t)} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-0.5a}^0 n(t) dt - \frac{1}{\sqrt{a}} \int_0^{0.5a} n(t) dt \approx 0 \quad (16)$$

其中 $n(t)$ 为高斯白噪声。

这表明 Haar 小波能有效抑制噪声的干扰, 提高特征参数的鲁棒性。

2) 小波变换是一个时频的局部变换, 能有效地从信号中提取信息, 被誉为“数学显微镜”, 故先对信号进行小波变换后, 能有效地表征信号特征参数之间的差别, 便于仿真时门限值的选取, 减少工作量。其变换的理论值如表 3 所示。

算法步骤:

- 1) 将接收到的信号进行下变频处理, 得到复基带调制信号;
- 2) 计算二、四阶累积量, 并计算其特征参数 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 ;
- 3) 利用 f_1 将待识别信号分为 (2ASK/BPSK, 4ASK, 4PSK,

16QAM)和(MFSK,8PSK)两类;

4)再利用 f_2 将上述两类信号分为(2ASK/BPSK,4ASK), (4PSK,16QAM)和(MFSK,8PSK)三类;

5)利用 f_3 识别2ASK和4ASK信号;

6)利用 f_4 识别出4PSK和16QAM信号;

7)再对MFSK和8PSK信号进行小波变换,计算其四阶累积量,并计算特征参数 f_4 ;

8)再利用 f_4 识别出2FSK,4FSK和8PSK信号。

表2 特征 f_1, f_2, f_3, f_4 参数的理论值

特征参数	2ASK/BPSK	2ASK	4ASK	2FSK	4FSK	QPSK	4PSK	8PSK	16QAM
f_1	1	—	1	0	0	1	—	0	1
f_2	1	—	1	—	—	0	—	—	0
f_3	—	$4E^3$	$1.85E^3$	—	—	—	—	—	—
f_4	—	—	—	—	—	—	E^2	—	$0.68E^2$

表3 识别MFSK和8PSK特征参数 f_4 的理论值

特征参数	2FSK	4FSK	8PSK
f_4	$\frac{8E^2}{\Delta\omega_2} \sin^8(2\Delta\omega_2)$	$\frac{8E^2}{9\Delta\omega_4} \sin^8(6\Delta\omega_4)$	$1.41E^2$

3 实验仿真与分析

3.1 实验仿真

利用计算机仿真验证改进算法的性能,使用采样点的平均代替理论的平均。仿真参数为:采样速率 $F_s = 40$ kHz,载波频率 $F_c = 10$ kHz,码元速率 $R_s = 1200$ bps,其中信号2FSK和4FSK的频偏分别为5 kHz, 2.5 kHz,小波尺度因子 $a = 8$;对待识别信号分别进行100次独立的蒙特卡洛实验,取其均值。仿真结果如图1所示。

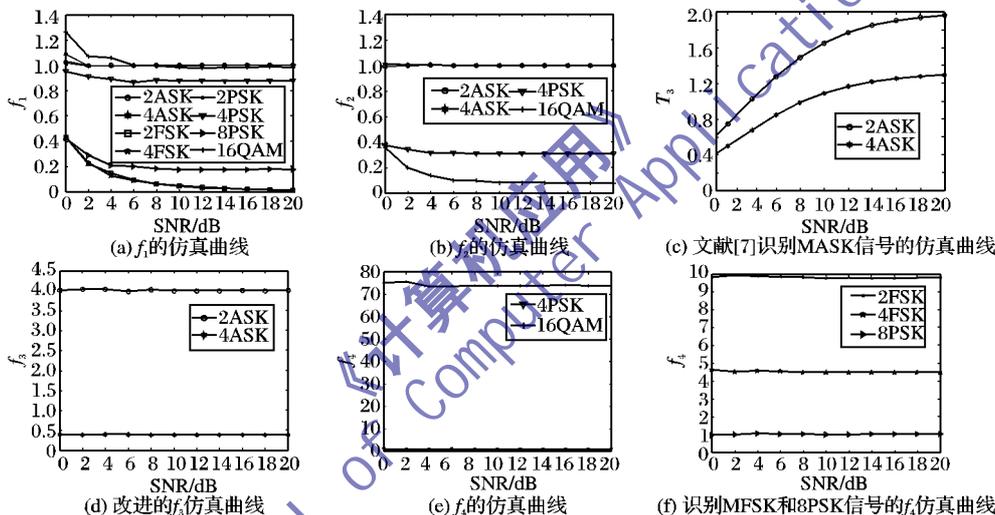


图1 特征参数的仿真曲线

从图1中可以看出,待识别的调制信号在信噪比(Signal-to-Noise Ratio,SNR)不小于0 dB时可以完全分类出来;特征参数 f_1, f_2, f_3, f_4 受噪声影响小,性能稳定。

采用决策理论,设置合适的判决门限,对本文提出的改进算法的识别率进行统计;每种待识别信号分别进行2000次蒙特卡洛实验。表4为数字调制信号的识别率,总体的识别率如图2所示。

表4 数字调制信号的识别率 %

SNR/dB	2ASK/BPSK	4ASK	2FSK	4FSK	QPSK	8PSK	16QAM
3	100.00	100.00	99.63	95.73	93.82	96.79	97.00
8	100.00	100.00	100.00	96.96	95.83	96.36	100.00

3.2 结果分析

文献[7],利用参数 $T_3 = |c_{42}/c_{21}^2|$ 识别2ASK和4ASK信号,但在低信噪比条件下识别率较低,当 $SNR = 8$ dB时,才能达到100%;本文在前人的基础上提出的改进算法:1)利用新的特征参数 f_3 识别2ASK和4ASK,由表4可知,当 $SNR = 3$ dB时,识别率就达到100%,适用信噪比范围提高了5 dB;2)对信号8PSK和MFSK进行Haar小波变换后,再利用四阶累积量来分类识别,且增加了识别信号16QAM,由图2可知,在低信噪比条件下,七种信号总体识别率较高;当 $SNR =$

3 dB时,2ASK/BPSK、4ASK和2FSK信号识别率基本达到100%;4FSK、8PSK和16QAM信号识别率都在96%以上;只有4PSK信号的识别率基本达到94%,其效果较佳。

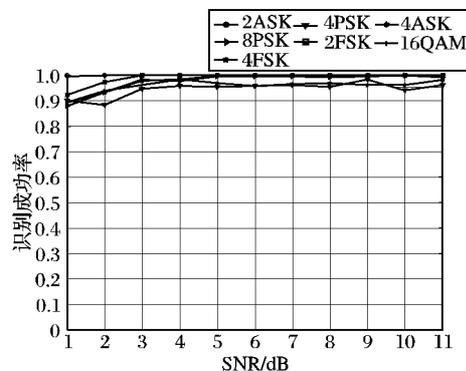


图2 七种信号总体的识别率

4 结语

本文针对数字调制信号,仅用四个特征参数来识别2ASK/BPSK,4ASK,2FSK,4FSK,QPSK,8PSK和16QAM七种信号。鉴于MASK在低信噪比条件下识别率低和MFSK与

(下转第2935页)

演化趋于稳定时,其演化形态如图 11 所示。

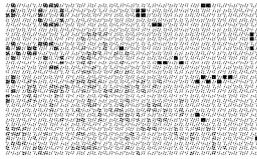


图 11 $w_1 = 0.25, w_2 = 0.15, w_3 = 0.6$ 时局部耦合区域演化的稳定形态

2) 当子区域 1、2、3 的影响权重分别为 $w_1 = 0.25, w_2 = 0.65$ 和 $w_3 = 0.1$ 时,该耦合空间的仿真形态如图 12 所示。此时,子区域 2 的影响权重 $w_2 = 0.65$ 明显大于其他两个子区域的影响权重,同时子区域 3 的影响权重明显小于其他 2 个子区域,因此子区域 3 内的元胞状态演化受其他 2 个子区域的影响十分明显,其后期演化状态如图 12(b) 所示,当该耦合区域内元胞状态演化趋于稳定时,其演化形态如图 13 所示。

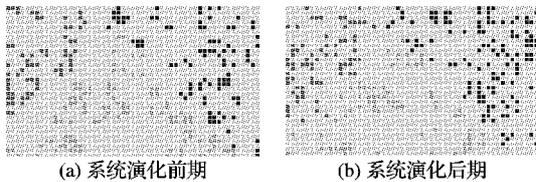


图 12 $w_1 = 0.25, w_2 = 0.65, w_3 = 0.1$ 时局部耦合区域的演化形态

此时,由于子区域 3 的影响权重 $w_3 = 0.1$ 过小,子区域 3 对该区域内元胞状态演化的影响远小于其他 2 个子区域的影响,因此最终导致在系统演化趋于稳定时,子区域 3 内元胞过于稀疏,如图 13 所示。

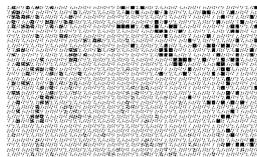


图 13 $w_1 = 0.25, w_2 = 0.65, w_3 = 0.1$ 时局部耦合区域演化的稳定形态

3 结语

本文利用区域耦合原理结合元胞自动机模型,构建多区域耦合关系模型,并对元胞的演化形态及区域间的信息交换对整个仿真系统的影响进行仿真研究。研究表明当耦合区域间的演化达到一定程度时,演化系统可以从原来的无序状态转变为一种时间、空间都相对有序的状态,形成新的耦合结构。模型的优点在于:非规则空间网格化与单元格状态属性的结合,避免了非均匀网格化模型的复杂性;将传统意义上的 CA 模型拓展应用到非规则空间,可以应用于相关研究领域,

如地域性产业集群的演化、城市化进程、非均匀空间下智能体的演化等,尤其针对非规则区域的仿真演化,提供了一种解决思路。

参考文献:

- [1] 李爱民,吕安民,隋春玲.集成 GIS 的元胞自动机在城市扩展模拟中的应用[J].测绘科学技术学报,2009,26(3):165-169.
- [2] WU FULONG. SimLand: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules [J]. International Journal of Geographic Information Science, 1998, 12(1):63-82.
- [3] YEH A G O, LI XIA. Constrained CA model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using gis [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2001, 28(5):733-753.
- [4] WHITE R, ENGELEN G. Cellular automata and fractal urban form: A cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns [J]. Environment and Planning A, 1993, 25(8):1175-1199.
- [5] CLARK K C, HOPPEN S, GAYDOS L J. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco bay and Washington bay area [EB/OL]. [2011-03-01]. <http://www.geog.ucsb.edu/~kclarke/Papers/clarkehoppengaydos.pdf>
- [6] 杜小丹,赵仕波,鄢涛,等.基于自主代理和元胞自动机的交通流模型[J].计算机科学,2010,31(5):231-239.
- [7] 雷丽,董力耘,葛红霞.基于元胞自动机模型的入口匝道合流处交替通行控制的研究[J].物理学报,2007,56(12):6874-6880.
- [8] FUKUJ M, ISHIBASHI Y. Traffic flow in 1D cellular automaton model including cars moving with high speed [J]. Journal of the Physics Society of Japan, 1996, 65(6):1868-1870.
- [9] 刘文,吴传生.基于元胞自动机的短信网络病毒传播模拟[J].复杂系统与复杂性科学,2009,6(3):81-86.
- [10] 田蓓蓓,李青,周美莲.复杂网络上病毒传播的元胞自动机模拟[J].计算机工程,2008,34(23):278-282.
- [11] FUENTES M A, KUPERMAN M N. Cellular automata and epidemiological models with spatial dependence [J]. Physica A, 1999, 267(3):471-486.
- [12] SIRAKOULIS G C, KARAFYLLIDIS I, THANAILAKIS A. A cellular automaton model for the effects of population movement and vaccination on epidemic propagation [J]. Ecological Modelling, 2000, 133(2):209-223.
- [13] 郑志镇,李尚健,李志刚.复杂曲面上的四边形网格生成方法[J].计算机辅助设计与图形学学报,1999,11(6):521-524.
- [14] 张清萍,尚勇,赵国群.二维全四边形网格的自动生成算法[J].山东大学学报:工学版,2002,32(3):254-259.

(上接第 2928 页)

8PSK 信号各阶累积量的值均相等,直接计算无法识别的问题,本文首先提出了新的特征参数 f_3 识别 2ASK 和 4ASK 信号,接着对 MFSK 和 8PSK 信号进行小波变换再利用四阶累积量进行识别,当信噪比不小于 3 dB 时,2ASK/BPSK、4ASK 和 2FSK 信号识别率基本达到 100%,其他信号总体识别率基本达到 96%。与类似算法相比,仿真结果表明,该算法性能优越,并且计算量小,便于实现。

参考文献:

- [1] 张达明,王旭.对基于决策论的数字信号调制识别方法的改进[J].计算机应用,2009,29(12):3227-3230.
- [2] 贺涛.数字通信信号调制识别若干新问题研究[D].成都:电子科技大学,2007.
- [3] SWAMI A, SADLER B M. Hierarchical digital modulation classification using cumulates [J]. IEEE Transactions on Communications,

2000, 48(3):416-429.

- [4] 陈卫东,杨绍全.利用累量不变量对 MPSK 信号分类[J].西安电子科技大学学报,2002,29(2):229-232.
- [5] 吕新正,魏平,肖先赐.利用高阶累积量实现数字调制信号的自动识别[J].电子对抗技术,2004,19(6):3-6.
- [6] 黄英,雷菁.卫星通信中调制识别算法研究[J].系统工程与电子技术,2009,31(6):1303-1306.
- [7] 张弛,吴瑛,周欣.基于高阶累积量的数字调制信号识别[J].数据采集与处理,2010,25(5):575-579.
- [8] PROAKIS J C. Digital communication [M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2001: 169-201.
- [9] 张忠.现代信号处理理论与应用[M].北京:电子工业出版社,2011:61-65.
- [10] 汤卫东.基于小波变换的数字通信信号调制识别研究[D].西安:西安电子科技大学,2010.