

瑞利信道下基于累积量的调制识别方法

朱洪波*, 张天骐, 王志朝, 李军伟

(重庆邮电大学 信号与信息处理重庆市重点实验室, 重庆 400065)

(* 通信作者电子邮箱 zhuhb1111@163.com)

摘要:针对瑞利信道下调制方式分类的问题,提出了一种基于累积量的识别方法。该方法利用四阶累积量和六阶累积量的组合作为特征参数,采用决策树分类器,能够实现二相相移键控(BPSK)、四相相移键控(QPSK)、四进制幅移键控(4ASK)、四阶正交幅度调制(16QAM)、五阶正交幅度调制(32QAM)、六阶正交幅度调制(64QAM)和正交频分复用(OFDM)七种调制方式的识别分类,且计算量小,易于实现。从理论上进行推导与分析,所提方法对瑞利衰落和加性高斯白噪声干扰不敏感。计算机仿真结果表明:信噪比大于4 dB时,正确识别率达到90%以上,说明了所提方法的可行性及有效性。

关键词:调制识别;瑞利信道;高阶累积量;正交频分复用;单载波信号

中图分类号: TN911.72 **文献标志码:** A

Algorithm for modulation recognition based on cumulant in Rayleigh channel

ZHU Hongbo*, ZHANG Tianqi, WANG Zhichao, LI Junwei

(Chongqing Key Laboratory of Signal and Information Processing,
Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Concerning the problem of modulation identification in the Rayleigh channel, a new algorithm based on cumulants was proposed. The method was efficient and could easily classify seven kinds of signals of BPSK (Binary Phase Shift Keying), QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), 4ASK (4-ary Amplitude Shift Keying), 16QAM (16-ary Quadrature Amplitude Modulation), 32QAM (32-ary Quadrature Amplitude Modulation), 64QAM (64-ary Quadrature Amplitude Modulation) and OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) by using the decision tree classifier and the feature parameters that were extracted from combination of four-order cumulant and six-order cumulant. Through theoretical derivation and analysis, the algorithm is insensitive to Rayleigh fading and AWGN (Additive White Gaussian Noise). The computer simulation results show that the successful rates are over 90% when SNR (Signal-to-Noise Ratio) is higher than 4 dB in Rayleigh channel, which demonstrates the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: modulation recognition; Rayleigh channel; high-order cumulant; Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); single carrier signal

0 引言

通信信号调制方式的自动识别是一个迅速发展的信号分析领域。调制识别技术是非协作通信的关键技术之一,它可用在军事领域的电子侦察和电子对抗等方面,也可用在无线电频谱管理等民用方面。由此可见,调制识别不仅是一个重要的研究课题,同时也具有十分重要的现实意义。

在对通信信号调制识别的研究中,目前常见的方法大致可以分为两大类:基于最大似然(likelihood-based)的识别方法和基于特征提取(feature-based)的模式识别方法^[1]。而在模式识别方法中,高阶累积量是一个应用较多的分类特征^[2]。文献[3]通过四阶累积量识别了二相相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)和四相相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)信号;文献[4]利用四

阶累积量的组合成功区分了BPSK、QPSK和八相相移键控(8-ary Phase Shift Keying, 8PSK)信号;文献[5]将高阶累积量和小波结合,实现了七种常见数字调制信号的分类;文献[6]利用高阶累积量和支持向量机(Support Vector Machine, SVM)实现了正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)信号及常见单载波信号的识别;文献[7]利用四阶累积量实现了OFDM与单载波信号的类间识别。文献[3-7]都是在高斯白噪声信道下进行分类的,并没有考虑瑞利衰落带来的影响,且文献[3-5]只是实现了单载波信号之间的识别,并未考虑OFDM信号。文献[8]利用高阶累积量在瑞利信道下实现了五种信号的分类,但识别类型有限;文献[9]在瑞利信道下利用高阶累积量组合仅对三种正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)信号进行了分类,识别类型单一。

收稿日期:2013-04-15;修回日期:2013-06-02。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61071196,61102131);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0927);信号与信息处理重庆市市级重点实验室建设项目(CSTC2009CA2003);重庆市杰出青年基金项目(CSTC2011jjjq40002);重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2010BB2398,CSTC2010BB2409,CSTC2010BB2411,CSTC2012JJA40008);重庆市教育委员会科研项目(KJ120525)。

作者简介:朱洪波(1987-),男,四川自贡人,硕士研究生,主要研究方向:通信信号的细微特征提取与调制识别;张天骐(1971-),男,四川眉山人,教授,博士,主要研究方向:宽带微弱无线电信号处理、盲信号与信息处理、通信对抗;王志朝(1987-),男,四川平昌人,硕士研究生,主要研究方向:宽带信号的波达方向估计、阵列信号处理;李军伟(1989-),男,河南漯河人,硕士研究生,主要研究方向:复杂直扩信号的首检测与盲估计。

针对以上方法的不足,本文在现有研究的基础上,提出了一种基于高阶累积量组合的调制识别方法,在瑞利信道下能够实现 OFDM 信号与常见单载波信号的类型识别及单载波信号的类内识别。计算机仿真结果表明该方法的可行性及有效性。

1 信号模型

假设信道为频率非选择性慢衰落信道,则该信道将导致发送信号的乘性失真,在至少一个信号传输间隔内该乘性过程可视为恒定的^[10],可表示为

$$r(t) = a(t)e^{j\theta(t)}s(t) + w(t); 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

其中: $r(t)$ 为接收到的信号; $s(t)$ 为发送信号; $a(t)e^{j\theta(t)}$ 表示信号的复衰落增益; $w(t)$ 表示均值为零,方差为 σ_w^2 的加性复高斯白噪声,且与信号不相关; T 为一个信号传输间隔。

由于信道为慢衰落信道,则相移 θ 能够从接收信号中估计出来^[10],但存在估计偏差。对接收到的信号进行下变频和过采样后得到采样序列:

$$r(n) = s(n) + w(n) = a(n)e^{j\Delta\theta} \sqrt{P}b(n) + w(n) \quad (2)$$

其中: $r(n)$ 为经过处理得到的采样序列, $a(n)$ 是服从瑞利分布的随机变量, $\Delta\theta$ 表示相移的估计偏差, P 是信号的平均功率, $b(n)$ 是发送端的基带复数符号序列, $w(n)$ 是高斯白噪声。

2 瑞利信道下的识别算法

2.1 高阶累积量理论基础

设 $y(n)$ 是一个具有零均值的复随机过程,则其高阶矩定义为

$$M_{pq} = E[y(n)^{p-q}(y^*(n))^q] \quad (3)$$

其中: $*$ 表示取共轭, $E[\cdot]$ 表示求期望。根据共轭位置的不同, $y(n)$ 的 p 阶累积量定义为:

$$C_{pq} = \text{cum}(\underbrace{y, \dots, y}_{p-q \uparrow}, \underbrace{y^*, \dots, y^*}_{q \uparrow}) \quad (4)$$

由累积量和矩的关系可得高阶累积量的表达式^[11]如下:

$$C_{20} = M_{20} \quad (5)$$

$$C_{21} = M_{21} \quad (6)$$

$$C_{40} = M_{40} - 3M_{20}^2 \quad (7)$$

$$C_{42} = M_{42} - |M_{20}|^2 - 2M_{21}^2 \quad (8)$$

$$C_{63} = M_{63} - 9C_{42}C_{21} - 6(C_{21})^3 \quad (9)$$

2.2 特征提取与分析

由高阶累积量的性质^[12]可知:均值为零的复高斯白噪声大于二阶的累积量为零,则对式(2)中 $r(n)$ 求高阶累积量可得:

$$C_{40}(r) = C_{40}(ae^{j\Delta\theta} \sqrt{P}b) + C_{40}(w) = C_{40}(ae^{j\Delta\theta} \sqrt{P}b) \quad (10)$$

$$C_{42}(r) = C_{42}(ae^{j\Delta\theta} \sqrt{P}b) + C_{42}(w) = C_{42}(ae^{j\Delta\theta} \sqrt{P}b) \quad (11)$$

$$C_{63}(r) = C_{63}(ae^{j\Delta\theta} \sqrt{P}b) + C_{63}(w) = C_{63}(ae^{j\Delta\theta} \sqrt{P}b) \quad (12)$$

由于 $a(n)$ 是服从瑞利分布的随机变量,其分布密度函数形式^[8]表达为:

$$\rho(a) = \frac{a}{\sigma^2} \exp(-a^2/(2\sigma^2)); a > 0, \sigma \text{ 为分布参数} \quad (13)$$

则可求得 $a(n)$ 的各阶矩为

$$\begin{cases} E[a^2] = 2\sigma^2 \\ E[a^4] = 8\sigma^4 \\ E[a^6] = 48\sigma^6 \end{cases} \quad (14)$$

把式(14)代入式(10)~(12)中并整理可得:

$$C_{40}(r) = P^2 \sigma^4 e^{j\Delta\theta} (8M_{40}(b) - 12M_{20}^2(b)) \quad (15)$$

$$C_{42}(r) = P^2 \sigma^4 (8M_{42}(b) - 4|M_{20}(b)|^2 - 8M_{21}^2(b)) \quad (16)$$

$$C_{63}(r) = P^3 \sigma^6 (48M_{63}(b) - 144M_{42}(b)M_{21}(b) + 96M_{21}^3(b) + 72|M_{20}(b)|^2 M_{21}(b)) \quad (17)$$

把本文待识别信号的高阶矩理论值代入式(15)~(17)中,可求得不同调制信号通过瑞利信道后的高阶累积量。为了消除相位估计偏差 $\Delta\theta$ 的影响,采用高阶累积量绝对值的形式,其理论值如表1所示。

表1 不同调制信号的高阶累积量理论值

调制类型	$ C_{40} $	$ C_{42} $	$ C_{63} $
BPSK	$4P^2\sigma^4$	$4P^2\sigma^4$	$72P^3\sigma^6$
QPSK	$8P^2\sigma^4$	0	0
4ASK	$1.12P^2\sigma^4$	$1.12P^2\sigma^4$	$72P^3\sigma^6$
16QAM	$5.44P^2\sigma^4$	$2.56P^2\sigma^4$	0
32QAM	$1.52P^2\sigma^4$	$2.48P^2\sigma^4$	$1.44P^3\sigma^6$
64QAM	$4.952P^2\sigma^4$	$3.048P^2\sigma^4$	$3.9744P^3\sigma^6$
OFDM	0	$8P^2\sigma^4$	$96P^3\sigma^6$

从表1中可以看出,不同调制类型信号的高阶累积量不尽相同,如果直接利用高阶累积量对调制信号进行识别分类,会受到瑞利衰落的影响。因此,为了消除瑞利衰落带来的影响,选取高阶累积量的组合形式作为分类特征,其表达式如下:

$$\begin{cases} T_1 = |C_{63}|^2 / |C_{42}|^3 \\ T_2 = |C_{42}| / |C_{40}| \end{cases} \quad (18)$$

由式(18)可得不同调制信号的特征参数理论值,如表2所示。需要特别说明的是 QPSK 信号的特征参数 T_{1-QPSK} ,从表1中可以看出 QPSK 的 $|C_{63}|$ 和 $|C_{42}|$ 的理论值为零,故其特征参数 T_{1-QPSK} 的分母和分子在理论上均为零,但是在实际分析时,信号的长度不可能取无穷大,只能截取有限部分进行研究,所以 T_{1-QPSK} 的分母和分子的理论值均为无穷小的值,从而有 $T_{1-QPSK} \approx \infty$ ^[9]。

表2 不同调制信号的特征参数理论值

调制类型	T_1	T_2
BPSK	81	1
QPSK	∞	0
4ASK	3689.9	1
16QAM	0	0.4706
32QAM	0.1359	1.6316
64QAM	0.5578	0.6155
OFDM	18	—

注: ∞ 表示无穷大, — 表示不存在。

由表2可知,特征参数 T_1 和 T_2 不受瑞利衰落的影响,且不同信号的特征值不尽相同,具有较好的区分度。 T_1 可以将待识别信号分类成 {BPSK}, {QPSK, 4ASK}, {16QAM, 32QAM, 64QAM} 和 {OFDM} 四个子类,然后再利用 T_2 可以完成 {QPSK, 4ASK} 的分类以及 {16QAM, 32QAM, 64QAM} 这三种信号的分类。

2.3 识别算法

根据前面的理论推导与分析,本文利用高阶累积量的组

合作为特征参数,采用决策树分类器,对七种数字调制信号进行识别,识别算法步骤如下:

1) 对接收到的信号进行预处理后得到复基带采样序列。

2) 计算其特征参数 T_1 :

若大于门限 th_1 , 则初步判为 {QPSK, 4ASK}, 并进行下一步识别;

若小于门限 th_1 且大于门限 th_2 , 则判为 BPSK, 识别结束;

若小于门限 th_2 且大于门限 th_3 , 则判为 OFDM, 识别结束;

若小于门限 th_3 , 则初步判为 {16QAM, 32QAM, 64QAM}, 并进行下一步识别。

3) 再计算其特征参数 T_2 :

对 {QPSK, 4ASK} 而言, 若大于门限 th_4 , 则判为 4ASK, 否则判为 QPSK。

对 {16QAM, 32QAM, 64QAM} 而言, 若大于门限 th_5 , 则判为 32QAM; 若小于 th_6 , 则判为 16QAM; 若小于 th_5 且大于 th_6 则判为 64QAM。

3 计算机仿真与分析

为了检验本文所提方法的性能, 利用 Matlab 软件进行仿真实验验证。设符号速率 $R_s = 2$ kBaud/s, 采样频率 $f_s = 40$ kHz, 载波频率 $f_c = 6$ kHz, 采用矩形脉冲成型方式。OFDM 信号的子载波数为 64, 子载波调制方式均采用 QPSK 调制。信道的幅度衰减 $a(n)$ 服从瑞利分布的随机序列, 相位估计偏差 $\Delta\theta$ 在 $[-\pi, \pi]$ 上随机取值。

实验一 对特征参数进行仿真并观察其随信噪比变化情况。观察符号数为 2000, 信噪比的变化范围为 0 ~ 20 dB, 变化步长为 2 dB, 每个信噪比下进行 200 次仿真, 然后取其平均值作为结果。图 1 给出了特征参数 T_1 的仿真结果, 图 2 给出了特征参数 T_2 的仿真结果。由于不同调制信号特征参数 T_1 之间的差距比较大, 为了能够明显地看出它们之间的差异, 所以把它们分成了四个部分。

从图 1、图 2 中可以看出, 仿真结果与理论分析基本一致。本文所选的特征参数具有较好的区分度, 在信噪比大于 0 dB 时, 可以对七种调制信号识别分类。

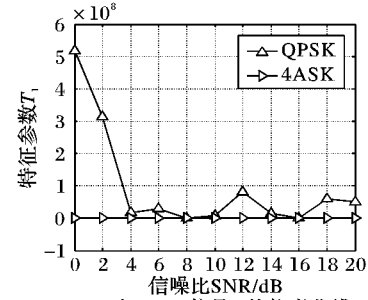
实验二 根据实验一和经过多次仿真后的结果确定识别算法中的判决门限值, 如表 3 所示。

表 3 各判决门限的值

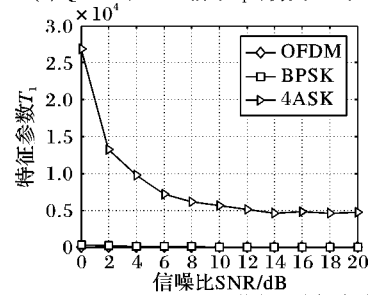
门限	值	门限	值	门限	值
th_1	400	th_3	5	th_5	1.11
th_2	55	th_4	0.5	th_6	0.54

根据表 3 中的判决门限值进行识别结果仿真, 观察符号为 1000 个, 信噪比变化为 -4 ~ 20 dB, 变化步长为 2 dB, 每一种信号在不同信噪比下进行 200 次蒙特卡罗仿真, 正确识别结果如图 3 所示。

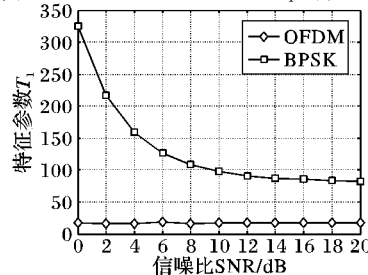
从图 3 中可以看出, 当信噪比大于 4 dB 时, 整体的识别率都在 90% 以上, BPSK、4ASK 的识别率更是达到了 100%; 信噪比大于 10 dB 时, 七种信号的识别率都在 95% 以上, OFDM 的识别率更是达到了 100%。但同时也可以发现, 当信噪比小于 0 dB 时, 识别性能变差, 究其原因, 主要有两个方面: 一方面是由于随着信噪比的降低, 特征参数受噪声的影响变大; 另一方面是受判决门限的影响, 因为判决门限是在信噪比大于 0 dB 的情况下选取的, 所以当信噪比小于 0 dB 时, 门限变得不再适用。



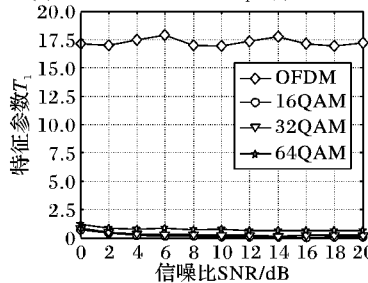
(a) QPSK与4ASK信号 T_1 的仿真曲线



(b) 4ASK、OFDM与BPSK信号 T_1 的仿真曲线

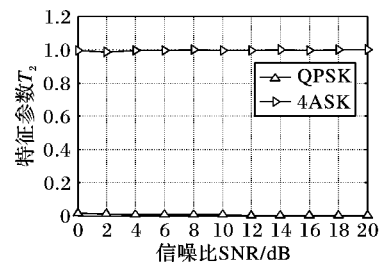


(c) BPSK与OFDM信号 T_1 的仿真曲线

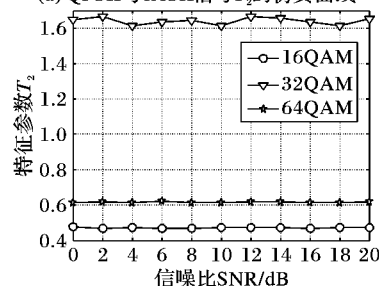


(d) OFDM与MQAM信号 T_1 的仿真曲线

图 1 特征参数 T_1 随信噪比变化的曲线



(a) QPSK与4ASK信号 T_2 的仿真曲线



(b) 三种QAM信号 T_2 的仿真曲线

图 2 特征参数 T_2 随信噪比变化的曲线

实验三 当信噪比为 10 dB 时,测试正确识别率随观察符号数变化的情况。符号个数从 200 增加到 1800,变化步长为 200,每一种信号在不同符号数下进行 200 次蒙特卡罗仿真,其识别结果如图 4。

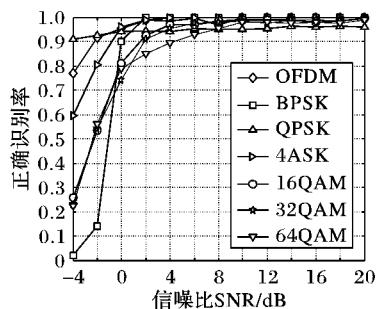


图 3 正确识别率与信噪比变化的关系

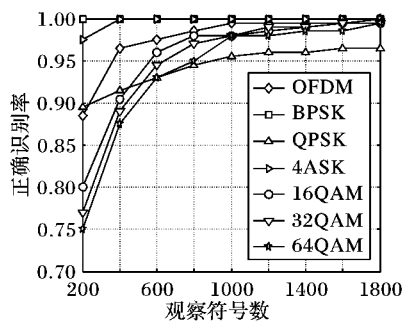


图 4 正确识别率与符号个数变化的关系

由图 4 可以看出,正确识别率随着观察符号个数的增多而提高,当观察符号数多于 1000 个时,七种信号的正确识别率均达到 95% 以上,识别效果较好。由此可以得到一个结论:在信噪比不变的情况下,用于观察的符号个数越多,识别信号的正确率就越高,当观察符号个数达到一定数量后,识别率趋于稳定。其原因是由于只有当接收到的数据量足够大时,才能更好地体现信号的调制特性,并且高斯噪声的高阶累积量才趋于零,因此正确识别率会随着数据量的增加而提高。但是算法的计算复杂度会随着数据量的增加而提高,所以在保证识别率的前提下,为了减少运算量,选择长度合适的接收数据进行处理也很重要。

4 结语

本文在瑞利信道下提出了一种基于累积量组合的识别方法,仅用两个特征参数和决策树分类器就能够实现 OFDM 信

号与常见单载波信号之间的类间识别及单载波信号之间的类内识别。通过理论推导与分析,所提方法对瑞利衰落与噪声干扰不敏感。计算机仿真结果表明,当信噪比大于 4 dB 时,整体识别率都在 90% 以上,说明本文方法的可行性及有效性。文献[8]用四个特征参数仅实现了五种信号的识别,且没有考虑 OFDM 信号;文献[9]只是讨论了三种 QAM 信号的分类,识别类型有限,因此,本文方法与同类算法相比,具有一定的优越性。但当信噪比小于 0 dB 时,识别性能下降,如何能在低信噪比的情况下有效实现调制方式的识别是需要进一步研究的问题。

参考文献:

- [1] DONRE O A, ABDI A, BAR-NESS Y, *et al.* Survey of automatic modulation classification techniques: classical approaches and new trends[J]. *Institution of Engineering and Technology*, 2007, 1(2): 137 - 156.
- [2] 党月芳, 徐启建, 张杰. 数字调制识别的关键技术与发展趋势[J]. *传感器与微系统*, 2012, 31(10): 1 - 5.
- [3] SWAMI A, SADLER B M. Hierarchical digital modulation classification using cumulants[J]. *IEEE Transactions on Communication*, 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] 李世平, 陈方超. 基于小波和高阶累积量的数字调制识别算法[J]. *计算机应用*, 2011, 31(11): 2926 - 2928.
- [6] LI P H, ZHANG H X, WANG X Y, *et al.* Modulation recognition of communication signals based on high order cumulants and support vector machine[J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2012, 19(1): 61 - 65.
- [7] 李彦柱, 罗明, 李霞. 基于高阶累积量的 OFDM 信号调制识别技术[J]. *电子信息对抗技术*, 2012, 27(4): 1 - 4.
- [8] 李鹏, 汪美平, 王赞基. 瑞利平坦衰落信道中的调制识别算法[J]. *电路与系统学报*, 2009, 14(2): 107 - 110.
- [9] 李艳玲, 李兵兵, 刘明骞. 瑞利衰落信道下 MQAM 信号的盲识别方法[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(4): 76 - 79.
- [10] PROAKIS J G. *Digital communication*[M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [11] 杨琳. 数字通信信号调制方式自动识别技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
- [12] 张贤达. *现代信号处理*[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2002.

(上接第 2764 页)

参考文献:

- [1] 张永光, 楼才义, 王挺. 一种线性分组码编码参数的盲识别方法: 中国, 201010131103. 3[P]. 2011-09-28.
- [2] 鲁俊军, 李艳斌. 低码率二进制线性分组码的盲识别[J]. *无线电工程*, 2009, 39(1): 19 - 22.
- [3] 王兰勋, 李丹芳, 汪洋. 二进制本原 BCH 码的参数盲识别[J]. *河北大学学报: 自然科学版*, 2012, 32(4): 416 - 420.
- [4] 杨晓静, 闻年成. 基于码根信息差熵和码根统计的 BCH 码识别方法[J]. *探测与控制学报*, 2010, 32(3): 69 - 73.
- [5] 闫郁翰, 汤建龙. 基于汉明距离的二进制线性分组码盲识别方法[J]. *通信对抗*, 2011(4): 20 - 23.
- [6] 丁宇. 分组码的矩阵识别分析[J]. *计算机安全*, 2012(7): 39 - 42.
- [7] 陈金杰, 杨俊安. 基于码重信息熵低码率线性分组码的盲识别[J]. *电路与系统学报*, 2012, 17(1): 41 - 46.
- [8] 宋镜业. 信道编码识别技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [9] 张永光, 楼才义. 信道编码及其识别分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [10] CLUZEAU M, FINIASZ M. Recovering a code's length and synchronization from a noisy intercepted bitstream[C]// *Proceedings of the 2009 IEEE International Symposium on Information Theory*. Piscataway: IEEE, 2009: 2737 - 2741.
- [11] 陈金杰, 杨俊安. 基于比特频率检测低码率线性分组码的盲识别[J]. *电子测量与仪器学报*, 2011, 25(7): 642 - 647.
- [12] 杨晓静, 闻年成. 基于秩函数和 Euclidean 算法的循环码盲识别[J]. *电路与系统学报*, 2012, 17(5): 120 - 123.