

一种改进的基于支持向量机的 OFDM 识别算法

史文娟,冯全源

(西南交通大学 微电子所,四川 成都 610031)

摘 要: 针对 OFDM 信号与单载波信号调制识别,提出了一种基于高阶累积量特征的改进方法.通过分析复信号幅值的归一化四阶累积量特性,以及信号的瞬时频率和功率谱特征,改进和提出新的特征参数,采用支持向量机分类器,实现了 AWGN 信道下包括 OFDM 在内的 9 种信号的制式自动识别.该方法具有特征参数易于提取、抗噪性好、识别准确率高的优点.利用 MATLAB 仿真证明在信噪比不小于 7 dB 的情况下,OFDM 信号的识别准确率达 99%.

关键词: 调制识别;特征参数提取;高阶累积量;支持向量机

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)10-0098-05

Improved Automatic Modulation Recognition Algorithm for OFDM Based on SVM

SHI Wen-juan, FENG Quan-yuan

(Institute of Microelectronics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Aiming at the automatic modulation recognition of OFDM signal and Single carrier signals, this paper proposes a improved method based on high-order cumulants. By analysing the normalized fourth-order cumulant features of the complex signal amplitude, the characteristics of instantaneous frequency and power spectrum, new feature parameters are proposed. With support vector machine (SVM) classifier, the automatic identification of 9 kinds of signals including OFDM in the AWGN channel is achieved. The method has lots of advantages, such as the feature parameters could be extracted easily and have good anti-noise performance, and recognition accuracy rates are also very high. When SNR is not less than 7 dB, the simulation results on MATLAB indicate that identification probability of this proposed method is 99%.

Key words: modulation recognition; feature extraction; higher-order cumulant; support vector machine(SVM)

1 引言

数字调制信号的调制类型识别研究,在软件无线电通信监视和频谱管理、自适应调制和电子对抗中都具有非常重要的地位,是实现非协作通信的关键技术之一^[1],在军用及民用领域都有广阔的应用前景.信号调制方式识别分为两类:一类是类间识别,即不同调制体制下的识别;另一类是相同调制体制下的不同调制阶数的识别^[2].本文主要研究 OFDM 与单载波两类信号类间识别,以及单载波信号的类内识别.

对于多载波的 OFDM 信号,从信号特征角度考

虑,OFDM 信号在时域表现为渐进高斯性,而单载波是非高斯的,由于高斯随机变量的高阶(> 2)累积量恒等于零,所以基于高阶累积量可以进行 OFDM 信号识别^[3].一种比较经典的识别 OFDM 信号的方法是利用四阶累积量来区分 OFDM 信号和单载波信号的算法,由 W. Akmouche 提出^[4].文献[5]中利用数字信号的 2 阶和 4 阶累积量的组合作为分类特征信息,文献[6]中提出了一种新的基于高阶累积量组合特征参数和三角矩特征参数的统计模式识别算法,文献[7]中利用 OFDM 信号时域包络具有渐进高斯性,提取复中频信号模制的四阶累

收稿日期: 2013-12-20; 修回日期: 2014-02-17

基金项目: 国家“八六三”计划项目(2012AA012305)

积量平方多次观测平均值和方差来判决其调制方式。

本文在文献[7]的基础上,对 OFDM 信号识别参数进行改进,改进后的参数不需要多次统计,利用基于支持向量机方法可直接进行有效判决。此外,在前人研究基础上,对于单载波信号的调制识别,基于瞬时频率特征和功率谱特征,提出 3 个新的参数,依次对 2ASK、16QAM、2PSK、4PSK、8PSK、2FSK、4FSK 和 MSK 进行识别。

2 识别算法设计

本算法假设待处理信号已完成信号分离、下变频等预处理,并且信号传输信道为加性高斯白噪声(AWGN)信道。

2.1 特征参数提取

2.1.1 表格的规范化复值序列高阶累积量 P_1

对待处理信号进行 Hilbert 变换求复值序列,计算复值序列模值的归一化四阶累积量 P_1 。本文中采用二阶累积量 C_{21} 平方对四阶累积量 $|C_{42}|$ 进行能量归一化,即 $|C_{42}| / |C_{21}|^2$,参数复值序列高阶累积量 P_1 定义如式(1)所示:

$$P_1 = \text{cum}4\left(\sum_k |c_{n,k}|\right) \quad (1)$$

式中, $|c_{n,k}|$ 是构造的复制序列模制, $\text{cum}4$ 表示对 $|c_{n,k}|$ 计算 $|C_{42}| / |C_{21}|^2$ 的值。

MPSK 信号和 MFSK 信号的 $|c_{n,k}|$ 恒定为一常数, P_1 值最大为 2;MQAM 信号是幅度与相位联合调制, $|c_{n,k}|$ 与 M 值有关, P_1 值小于 2;2ASK 信号是幅度调制,与其他单载波调制信号相比,高斯性较强,因此值也小于 2,且比 MQAM 信号的 P_1 值小。OFDM 信号的各个子载波调制方式为 MPSK 或 MQAM, $|c_{n,k}|$ 与 M 值有关,随着子载波数目的增多, P_1 值趋近于零,远小于 MPSK、MFSK、MQAM 模值的 P_1 值。因此,根据参数 P_1 可以直接将 OFDM、16QAM 和 2ASK 从信号集合中识别出来。

2.1.2 归一化瞬时频率的包络波动参数 P_2

P_2 参数可以用来表征归一化瞬时频率信号包络的变化程度,其数学表达式如式(2)所示:

$$p_2 = \frac{\sigma^2}{\mu^2} \quad (2)$$

式中, σ^2 是归一化瞬时频率信号包络的方差, μ 为归一化瞬时频率信号包络的均值。

由于 MFSK 和 MPSK 信号都是恒包络信号,直接对其求 R 参数,区分效果并不好,所以求归一化瞬时频率信号,构造 P_2 参数。对于 MFSK 信号,基带信

息携带在瞬时频率上,所以其瞬时频率信号包络呈现阶梯状,包络波动较小,而 MPSK 信号瞬时频率信号包络波动较大,因此, P_2 参数可以区分 MPSK 信号和 MFSK 信号。

2.1.3 平方信号归一化功率谱峰值 P_{31} , 四次方信号归一化功率谱峰值 P_{32}

本文利用信号的同向分量与正交分量的乘积构造高阶信号,并对功率谱信号用功率总和进行归一化,使归一化功率谱表示谱值与总谱值能量比, P_{31} 定义如式(3)所示, P_{32} 定义如式(4)所示:

$$p_{31} = \max \left\{ \frac{Y_2(k)}{\text{sum}(Y_2(k))} \right\} \quad (3)$$

$$p_{32} = \max \left\{ \frac{Y_4(k)}{\text{sum}(Y_4(k))} \right\} \quad (4)$$

式中,平方信号由信号同向分量与正交分量的乘积构造, $Y_2(k)$ 表示平方信号功率谱, $\text{sum}(Y_2(k))$ 为谱值总和;四次方信号由平方信号的同向分量与正交分量的乘积构造, $Y_4(k)$ 表示四次方信号功率谱, $\text{sum}(Y_4(k))$ 为其谱值总和。

相比于 4PSK 和 8PSK, 2PSK 平方信号谱峰占总谱值比最大,即 P_{31} 值最大;同理, 4PSK 四次方信号较 8PSK 四次方信号峰值占总谱值比较大,即 P_{32} 值较大。根据 P_{31} 可以将 2PSK 信号识别出来,根据 P_{32} 可以将 4PSK 信号识别出来。

2.1.4 谱线与能量密度系数 P_4 [9]

P_4 反映了信号的归一化功率谱特征。若频带内的谱线条数与带宽之比为谱线密度,谱线幅值与带宽之比为能量密度系数, P_4 为谱线密度与能量密度系数之积,则 P_4 的表达式如式(5)所示:

$$4 = \left\{ \frac{n}{B} \cdot \frac{\sum Y(k)}{B} \right\}_{Y > a_i} \quad (5)$$

式中, $Y(k)$ 为信号的归一化功率谱, a_i 为某一设定值, B 为谱线幅值大于 a_i 的粗估计带宽, n 为 B 内幅值大于 a_i 的谱线条数, $\sum Y(k)$ 则为 n 条谱线幅值之和。利用 P_4 参数可以区分 2FSK 信号和 MSK 信号。

2.2 识别算法

2.2.1 支持向量机分类器与识别流程

支持向量机的核心思想是通过非线性变换,将一个线性不可分的低维空间映射到一个线性可分的高维空间,将输入数据从低维映射到高维空间,通过构造线性最优平面,解决低维空间线性不可分的问题[10]。相比于决策树分类器,支持向量机不需要设置门限值;相比于神经网络分类器,支持向量机不存在过学习或欠学习的问题。除此之外,在训练样本较少

的情况下,支持向量机具有识别效果好的优势^[11-12].

本文采用支持向量机作为分类器,通过 MATLAB 的支持向量机工具箱获得每个支持向量机的偏置、拉格朗日系数和支持向量.步骤为:(1)产生样本信号:信号载频为 30~40 MHz;信噪比为 0~50 dB;MFSK 的调制系数为:0.5~2;数据点为 2 048.(2)采用 3 次多项式作为核函数,惩罚因子为 1,采用交叉验证法将参数样本随机分为训练样本和测试样本.利用测试样本验证训练好的支持向量机,使识别结果满足要求.

结合提取到的五个特征值对信号进行识别,整个识别流程框图如图 1 所示.图中每个判断框都代表一个已经训练好的 SVM 分类器, $P_{(th)}$ 表示参数 P 的门限值 th ,门限值是由支持向量机根据训练样本和训练规则自动生成的.

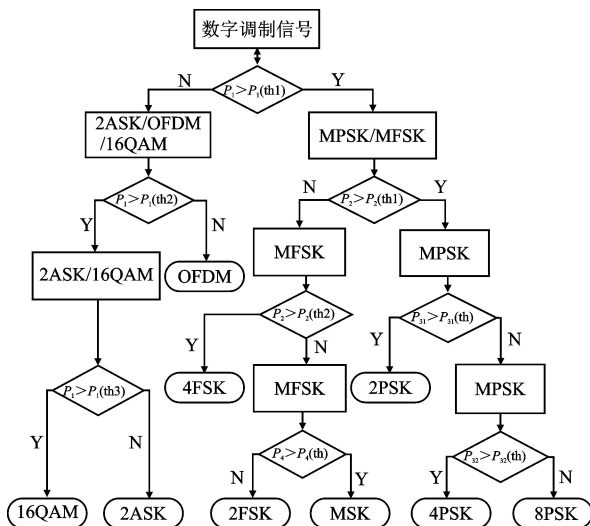


图 1 系统识别流程

首先,利用 $P_{1(th1)}$ 将信号分成 2ASK/OFDM/16QAM 和 MPSK/MFSK 两大类.对于第一类信号,先利用 $P_{1(th2)}$ 将 OFDM 识别出来,再利用 $P_{1(th3)}$ 区分 2ASK 和 16QAM.对于第二类信号,先利用 $P_{2(th1)}$ 将信号分为 MFSK 和 MPSK 两类,MFSK 类由 $P_{2(th2)}$ 识别出 4FSK,再由 $P_{4(th)}$ 区分 2FSK 和 MSK,而 MPSK 类则先由 $P_{31(th)}$ 识别出 2PSK,再由 $P_{32(th)}$ 区分 4PSK 和 8PSK,完成整个系统的识别流程.

2.2.2 算法仿真

在 MATLAB R2012a 平台上进行仿真,信号源采用随机二进制序列,OFDM 信号采用 DVB-T 2K 模式,单载波信号采样率为 200 MHz,载波频率为 30.5 MHz,符号速率为 8.25 MBaud,MFSK 信号频偏等于 2 倍符号速率值,每次对 2 048 个样本点进行处理,噪声为加性高斯白噪声.在不同信噪比

下,利用上述算法对信号进行仿真.

(1) 特征参数随信噪比变化仿真

为了测试本文算法的抗噪性能,对不同信噪比条件下各特征参数进行仿真测试.设信噪比为 5~30 dB 以 1 dB 为间隔变化,各特征参数仿真结果见图 2.

(2) 特征参数随符号速率变化仿真

为测试本文提出的特征参数对符号速率的敏感度,不改变在其他仿真条件的情况下,对符号速率进行 6.25~12.5 MBaud 以 1 MBaud 为间隔进行扫描,信噪比为 10 dB,每种测试条件下进行 350 次独立仿真,测试结果如图 3 所示.从图 3 可以看出,符号速率在 6.25~12.5 MBaud 变化时,本文所采用的特征参数对其不敏感,说明本文提出算法有较大带宽识别能力.理论上,本文选取参数大多基于累积量特征和功率谱特征,相比基于瞬时特征的方法,特征参数对符号速率不敏感.仿真结果也证实了只有基于瞬时频率特征的 P_2 在所有参数中对符号速率较为敏感,而其他参数对其不敏感.

(3) 支持向量机分类识别仿真

图 4 中显示了信噪比从 5~30 dB 以 1 dB 为间隔变化时,本文算法对各信号的正确识别率,每种信号在相同信噪比条件下进行了 500 次独立识别仿真,识别结果如图 4 所示.图 4 中,OFDM、16QAM、2ASK 和 MSK 在不小于 7dB 条件下,识别率已达到 97%;MPSK 在 10dB 条件下,正确识别率已达 98%;在不小于 12 dB 的情况下,MFSK 的识别准确率大于 96%.

将本文算法和文献[7]中算法进行各方面性能对比,结果如表 1 所示.

表 1 本文算法和文献[7]算法性能对比

	本文算法	文献[7]算法
参数计算量	直接计算信号复值序列归一化四阶累积量	计算信号复值序列四阶累积量的多次观测平均值和方差
单载波信号种类	8 种 (2ASK、16QAM、2PSK、4PSK、8PSK、2FSK、4FSK、MSK)	5 种 (16QAM、64QAM、2PSK、4PSK、2FSK)
识别单载波信号	依次实现 OFDM 信号与单载波信号识别,2ASK/16QAM 信号与 MPSK/MFSK 信号识别,以及 MPSK 和 MFSK 两类信号识别.	仅实现了 OFDM 信号与单载波信号的大类识别
符号速率敏感度	对符号速率不敏感,有较大带宽识别能力	未考虑
分类器	支持向量机分类器,无需设定门限值	二叉树分类器,需要设定门限值
OFDM 信号识别率(>5 dB)	≥99%	100%

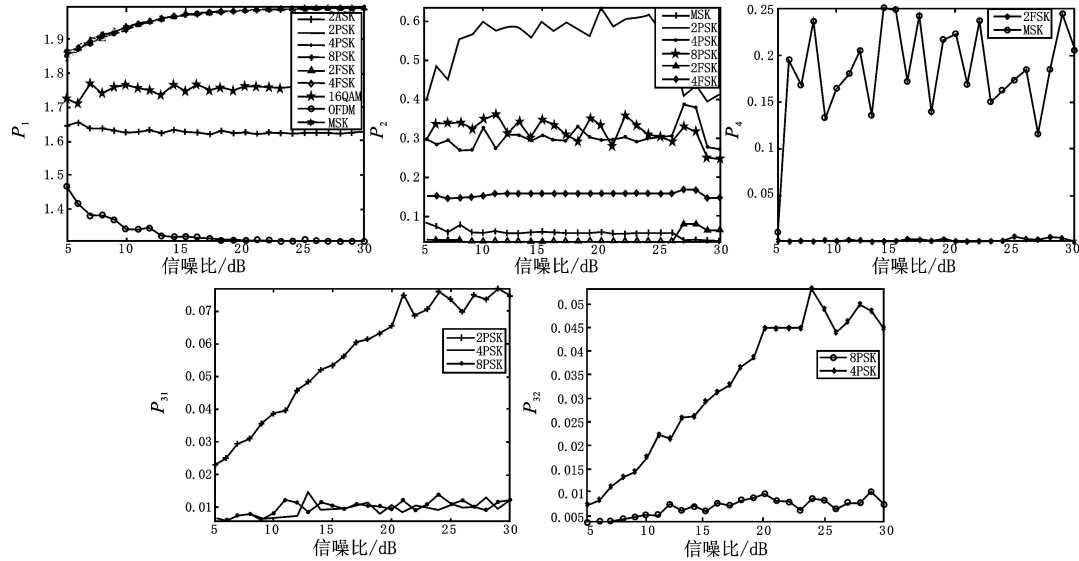


图2 不同信噪比下参数分布

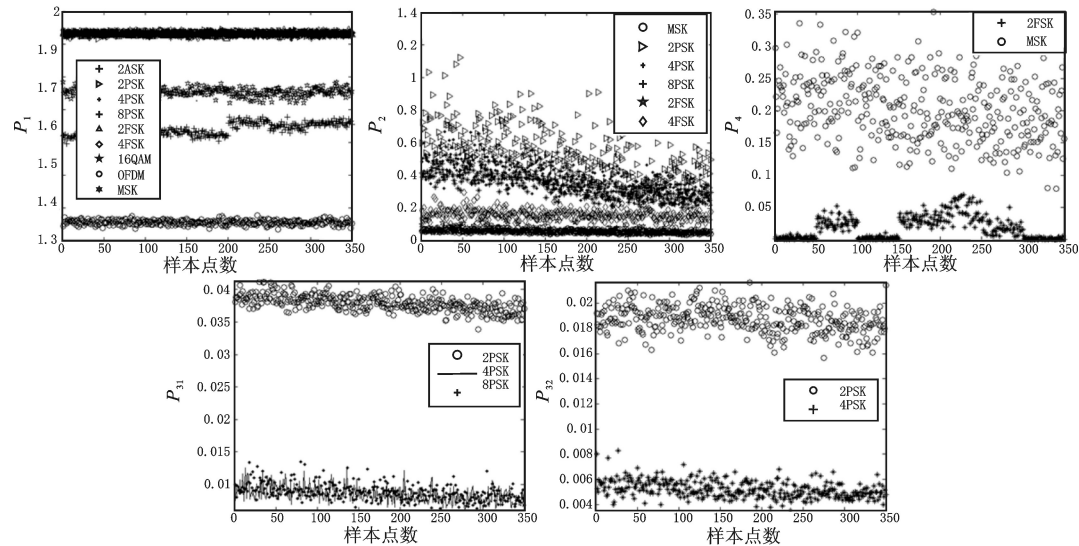


图3 不同符号速率下参数分布

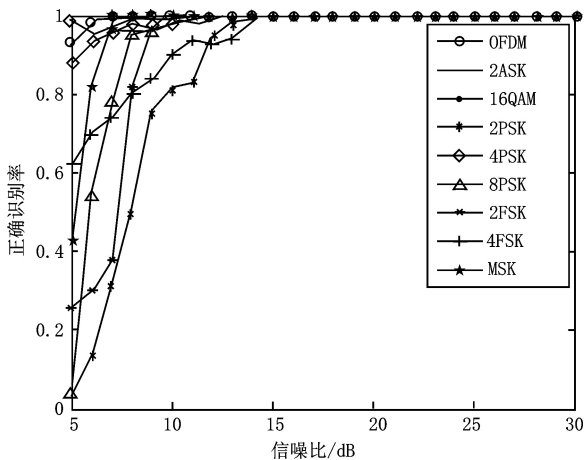


图4 不同信噪比下各信号正确识别率

3 结束语

本文提出了一种 OFDM 信号与 8 种单载波信号的调制识别方法,采用支持向量机分类器,完成了 OFDM 信号与单载波信号的类间识别,2ASK/16QAM 信号与 MPSK/MFSK 信号的识别,以及 MPSK 和 MFSK 两大类信号的自动识别.与现有相似算法相比,该算法结构简单,考虑了符号速率对特征参数的影响,仅用 5 个特征参数识别 9 种信号,识别效率高,计算量较小.本算法的不足在于信道环境为加性白噪声高斯信道,更加复杂信道(如多径信道、衰落信道等)下的 OFDM 信号调制识别也是需要深入研究的问题.

参考文献:

- [1] 朱颜锐,田斌,安金坤,等. 一种快速 OFDM 调制信号识别算法[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版, 2012,39(1):17-22.
- [2] 王晓东,刘镝. 一种 MPSK 信号调制方式[J]. 电声技术, 2013,37(2):74-83.
- [3] 王永娟,基于高阶累积量的 OFDM 信号调制识别技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2009.
- [4] AKMOUCHEW. Detection of multicarrier modulations using 4th-order cumulants [C]//MILCOM'99, Atlantic City, NJ:IEEE, 1999: 432-436.
- [5] 刘献玲,陈健,阔永红,等. 基于累量的 OFDM 信号调制识别[J]. 电子科技, 2007,209(2):29-32.
- [6] 郭黎明,于志明. 基于多参数特征的 OFDM 信号盲识别[J]. 西南交通大学学报, 2010,45(5):732-738.
- [7] 李彦栓,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] Chan Y, Gadbois L. Identification of the modulation type of a signal[J]. Signal Processing, 1989, 16(2): 149-154.
- [9] 周敏. 数字通信信号制式自动识别与参数估计算法研究与实现[D]. 成都:西南交通大学,2013.
- [10] Lan-Xun W, Yu-Jing R. Recognition of digital modulation signals based on high order cumulants and support

vector machines[C]//CCCM 2009, ISECS International Colloquium on. [s. l.]:IEEE, 2009:271-274.

- [11] 黄如容. 数字信号调制方式识别方法的设计与实现[D]. 成都:西南交通大学,2012.
- [12] 徐勋华,王继成. 支撑向量机的多类分类方法[J]. 微电子学与计算机, 2004,21(10):149-152.

作者简介:



史文娟 女, (1990-), 硕士研究生. 研究方向为数字信号处理.



冯全源 男, (1963-), 博士生导师, IEEE 高级会员. 研究方向为数字、模拟、射频与混合信号集成电路设计, 数字系统设计和嵌入式系统研究, 现代天线技术、RFID 技术(物联网技术).

(上接第 97 页)

- [2] 张建明,杨玉娟,江浩斌,等. 车辆自组网的位置隐私保护技术研究[J]. 通信学报, 2012, 33(8): 180-189.
- [3] Xiong Hu, Zhiguang Qin, Fagen Li, et al. Secure vehicle-to-roadside communication protocol using certificate-based crypto system[J]. IETE Technical Review, 2010, 27(3): 214-219.
- [4] Xiaodong Lin, Xiaoting Sun, Pin-Han Ho, et al. GSIS: a secure and privacy preserving protocol for vehicular communications[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2007, 56(6): 3442-3456.
- [5] N Koblitz, A Menezes, S Vanstone, et al. The state of elliptic curve cryptography[J]. Designs, Codes and Cryptography, 2000, 19(2): 173-193
- [6] Morten Dahl, Stephanie Delaune. Formal analysis of Privacy for vehicular mix-zones[C]// Proceedings of the 15th European Symposium on Research in Comput-

er Security, 2010: 55-70.

- [7] Albert Wasef, Yixin Jiang, Chuang Lin, et al. DCS: an efficient distributed certificate service scheme for vehicular networks[J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2010, 59(2): 533-549.
- [8] Johnson Don, Menezes Alfred, Vanstone Scott, et al. The elliptic curve digital signature algorithm (ECDSA) [J]. Int'l J. Information Security, 2001, 1(1): 36-63.

作者简介:

张盼盼 女, (1985-), 硕士研究生. 研究领域为网络安全技术.

沈明玉 男, (1962-), 博士, 副教授, 硕士生导师. 研究方向为网络与信息安全.