

# 基于谱分析的 OFDM 调制识别新方法

史文娟, 冯全源

(西南交通大学 微电子研究所, 四川 成都 610031)

**摘要:**针对正交频分复用(OFDM)信号与单载波信号调制识别,提出了3个基于功率谱特征的识别参数。根据 OFDM 信号功率谱边沿陡峭的特性,通过对归一化功率谱进行分析、统计和曲线拟合,提取3个参数,实现加性高斯白噪声信道(AWGN)条件下 OFDM 信号与9种单载波信号的识别仿真。该文识别参数具有特征参数易于提取、识别准确率高的优点。

**关键词:**调制识别;正交频分复用(OFDM);特征参数;功率谱;加性高斯白噪声信道(AWGN)

**中图分类号:**TN911.72

**文献标识码:**A

## New Modulation Recognition Methods for OFDM Based on Spectral Analysis

SHI Wenjuan, FENG Quanyuan

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

**Abstract:** To discriminate orthogonal frequency division multiplexing(OFDM) from single carrier signals, this paper proposes three new feature parameters based on spectral analysis. Since the edge of power spectrum of the OFDM is sharp, by statistical analysis and curve fitting the normalized power spectral, three new feature parameters are extracted, and the recognition simulation of OFDM and 9 kinds of single carrier signals under the additive white Gaussian noise (AWGN) is carried out. The method has lots of advantages, such as the feature parameters could be extracted easily and recognition accuracy rates are also very high.

**Key words:** modulation recognition; orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); feature extraction; power spectrum; additive white gaussian noise (AWGN)

### 0 引言

正交频分复用(OFDM)是一种多载波调制方式,其基本原理是将信号分割为 $N$ 个子信号,然后用 $N$ 个子信号分别调制 $N$ 个相互正交的子载波。由于子载波的频谱相互重叠,因而,可得到较高频谱利用率,此外 OFDM 具有良好的抗多径干扰能力,因此,近年来 OFDM 在无线通信领域得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。

数字调制信号的调制类型识别研究,是指在缺乏先验条件下对接收机截取信号的调制模式作出判断,并给出相应的调制参数<sup>[3]</sup>,在军、民用领域应用前景广。目前,调制类型识别研究对象主要是单载波信号<sup>[4-9]</sup>,而以 OFDM 为对象的调制识别研究较少。从信号特征角度考虑,OFDM 信号在时域表现为渐进高斯性,而单载波是非高斯性的。由于高斯随机变量的高阶( $>2$ )累积量恒为0,所以很多识别

方法基于高阶累积量。此外,单载波与多载波的模式识别方法还包括功率谱分析<sup>[10]</sup>及小波变换<sup>[11]</sup>等方法。本文主要从信号功率谱特征角度研究多载波 OFDM 信号与单载波信号的调制模式识别。与文献[10-11]相比,本文采用的基于信号功率谱特征的方法不需复杂的数学理论为基础,特征提取法易实现,运算量小且识别性能良好。

本文通过分析理想高斯信道下 OFDM 信号与单载波信号的功率谱特征,提取3个特征参数,利用参数对 OFDM 信号与单载波信号识别获得良好的类间分类效果。为提高特征参数对信号分类的适用性,本文对信号功率谱进行预处理,并分别对特征参数在 AWGN 条件下仿真 OFDM 信号与9种单载波信号的识别,其中单载波信号调制方式包括 2ASK、16QAM、2PSK、4PSK、8PSK、OQPSK、2FSK、4FSK 和 MSK。

收稿日期:2014-07-01

基金项目:国家自然科学基金重大基金资助项目(60990320,60990323);国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)重大基金资助项目(2012AA012305);国家自然科学基金面上资助项目(61271090);四川省科技支撑计划基金资助项目(2012GZ0101)

作者简介:史文娟(1990-),女,黑龙江黑河人,硕士生,主要从事数字信号处理的研究。冯全源(1963-),男,江西景德镇人,教授,博士生导师,博士,主要从事数字、模拟及射频集成电路设计的研究。

## 1 识别算法设计

### 1.1 信号预处理

功率谱归一化<sup>[12]</sup>为

$$X_N(k) = \frac{X(k)}{\max(X(k))} \quad (1)$$

式中:  $X(k)$  为  $N$  点信号的单边功率谱;  $k=1 \sim \frac{N}{2}$ ;  $\max(X(k))$  为  $X(k)$  的最大谱线值;  $X_N(k)$  为归一化后的单边功率谱。

### 1.2 信号功率谱特征分析

图 1 为 OFDM 各子载波具有相同功率时, 子载波个数  $N_c$  不同时 OFDM 功率谱密度图。由图可知, 随着  $N_c$  的增加, 在归一化频率  $f_T \in [-0.5, 0.5]$  的区间上幅频特性将更平坦, 边缘将更陡峭, 因此也更逼近理想的低通滤波器<sup>[13]</sup>。

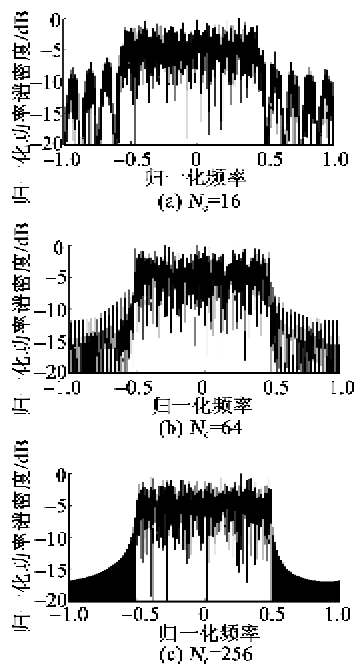


图 1  $N_c$  不同时 OFDM 功率谱密度图

与单载波信号相比, OFDM 信号的功率谱无明显冲击分量, 带内频谱相对平坦, 且旁瓣相对较窄, 因此, 针对  $N_c$  较多的 DVB-T 2K 模式的 OFDM 信号与单载波信号调制识别, 本文提取出 3 个特征参数。

## 2 特征参数提取

### 2.1 通带边沿谱值突变系数 $M$

定义  $M$  为信号功率谱通带两侧边沿值分别与其相邻的非通带谱均值比的乘积, 用来刻画通带边沿谱的突变程度, 且

$$M = \sqrt[4]{\frac{Y(p_1)}{(\sum_{k=p_1-5}^{p_1-1} Y(k))/5} \cdot \frac{Y(p_2)}{(\sum_{k=p_2+1}^{p_2+5} Y(k))/5}} \quad (2)$$

式中:  $Y(k)$  为信号的归一化功率谱, 通带边沿最小值设为 0.24;  $p_1$  和  $p_2$  分别为功率谱两侧第一个大于 0.24 的谱线位置。

$\frac{Y(p_1)}{(\sum_{k=p_1-5}^{p_1-1} Y(k))/5}$  为左边沿值与其左侧 5 点均值的比;  $\frac{Y(p_2)}{(\sum_{k=p_2+1}^{p_2+5} Y(k))/5}$  为右边沿值与其右侧 5 点均值的比。

本文 10 种信号中, 功率谱逼近理想的低通滤波器的 OFDM 信号, 其频带边沿的突变程度大, 即  $M$  值最大, 而具有冲击分量的 2ASK 信号和 MFSK 信号的  $M$  值居中, 其余没有冲击分量的单载波信号的  $M$  值较小。

### 2.2 特定段谱值计数值 $S$

对信号功率谱取值分段计数, 特定取值段的计数值  $S$  为

$$S = \text{num}(Y(k)) \quad m_1 < Y(k) \leq m_2 \quad (3)$$

式中:  $Y(k)$  为信号的归一化功率谱;  $m_1$  和  $m_2$  分别为取值段的 2 个端值;  $\text{num}$  函数对取值段内的功率谱值进行计数。

对信号功率谱值分段统计, OFDM 信号频带边沿陡峭, 谱值在 0.1~0.2 范围内点数为 0; 2ASK 信号在该范围内点数为 2; 2FSK 信号谱值在 0.1~0.2 范围内点数为 8, 在 0.8~1 范围内点数较 OFDM 信号少; 其余信号谱值在 0.1~0.2 范围内点数较多。综上分析可知, OFDM 信号与单载波信号功率谱值在 0.1~0.2 间统计数差别较大, 因此, 式(3)中的  $m_1$  和  $m_2$  分别设为 0.1 和 0.2, 即参数  $S$  考察信号功率谱取值在 0.1~0.2 间的点数。

### 2.3 高斯曲线拟合尺度参数 $\sigma_n$

若随机变量  $X$  服从一个位置参数为  $\mu$ 、尺度参数为  $\sigma^2$  的概率分布, 记为

$$X \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (4)$$

式中  $\sigma$  为正态分布的标准差, 决定了分布的幅度。则其概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

正态分布的数学期望值或期望值为  $\mu$ , 决定了

分布的位置;其方差的开平方或标准差为  $\sigma^2$ , 决定了分布的幅度。

定义功率谱拟合的高斯曲线拟合尺度参数为

$$\sigma_n = \sqrt{2} \sigma \quad (6)$$

由式(6)可知,  $\sigma_n$  与信号功率谱主瓣衰减快慢有关。

在 MATLAB 中利用 cftool 工具箱对信号归一化功率谱进行高斯曲线拟合, 2ASK 信号功率谱主瓣衰减最快, 且有一个冲击分量, 拟合为一个幅度很小的高斯曲线,  $\sigma_n$  很小; 其次 OFDM 信号功率谱主瓣衰减较快, 但无冲击分量, 拟合高斯曲线幅度较小, 即  $\sigma_n$  较小; 其次是功率谱主瓣衰减较快的 MSK 信号和 OQPSK 信号; 除 MFSK 信号的其余信号的  $\sigma_n$  居中, 而 2FSK 信号和 4FSK 信号因谱峰较多, 所以  $\sigma_n$  较大。

### 3 参数仿真

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, 载波数为 1 705, 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 MHz, 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。

为测试本文识别参数的抗噪性能, 对不同信噪比条件下各特征参数进行仿真测试, 设信噪比为从 0~20 dB, 以 1 dB 为间隔变化。

图 2 为参数仿真结果。由图 2(a)可知, 在信噪比小于 5 dB 时, OFDM 信号与单载波信号的参数值  $M$  差值很小, 而在信噪比大于 5 dB 时,  $M$  参数可很好区分 OFDM 信号与 9 种单载波信号。由图 2(b)可知, 2FSK 信号的  $S$  参数值远大于其他信号的  $S$  参数值, OFDM 信号取值远小于其他信号值, 且取值随信噪比变化小, 但易与 16QAM 信号发生混叠, 因此在信噪比不小于 0 时可成功识别出 OFDM 信号与 8 种单载波信号。由图 2(c)可知, 在信噪比小于 12 dB 时, OFDM 信号的  $\sigma_n$  参数取值稳定在 23~25 间。由于拟合方法选取的原因, 主瓣衰落较快的 MSK 信号、OQPSK 信号与 OFDM 信号的  $\sigma_n$  参数取值发生混叠, 无法区分 3 种信号, 另外信噪比较大时, 除 2FSK 和 4FSK 外, 其余信号  $\sigma_n$  参数值接近, 而在信噪比小于 12 dB 时, OFDM 信号可与其他单载波信号完成识别, 因此,  $\sigma_n$  参数适用于低噪比的 OFDM 识别。

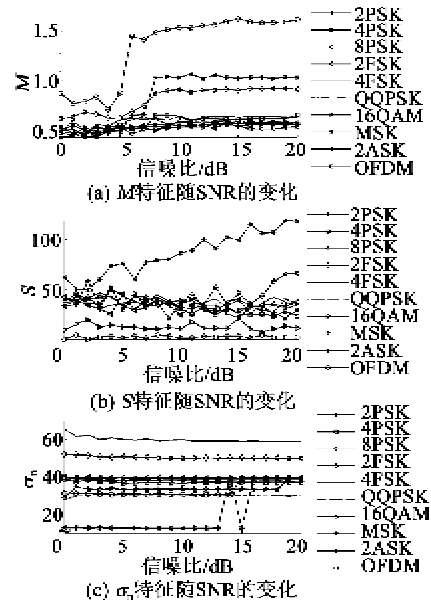


图 2 参数仿真结果

表 1 为本文各参数性能对比情况。本文参数的优势在于在高斯信道条件下, 参数识别信号种类多, 且识别性能良好。

表 1 本文各参数性能对比

参数	识别信号种类	信噪比/dB	10 dB 识别率/%
$M$	10	$>5$	100
$S$	9	$\geq 0$	98.8
$\sigma_n$	8	$\leq 12$	100

### 4 结束语

本文基于信号归一化功率谱提出了 3 个特征参数, 分别是频带边缘谱值突变系数  $M$ 、特定段谱值计数值  $S$  和高斯曲线拟合尺度参数  $\sigma_n$ , 用于 OFDM 信号与 9 种单载波信号的调制识别。在 AWGN 条件下对各特征参数进行仿真, 对 OFDM 信号与可区分单载波信号的识别情况进行统计。与现有提出的 OFDM 信号与单载波信号识别参数相比, 本文中参数在理想高斯信道下正确识别率高, 计算量较小, 能实现 OFDM 信号与 9 种单载波信号的识别。本文提出的参数主要是针对子载波数较多的 OFDM 信号, 对于子载波数较少的 OFDM 信号识别具有局限性, 如何改进识别参数, 降低子载波数目对识别参数影响, 提高 OFDM 信号正确识别率是未来研究的方向。

### 参考文献:

- [1] 谭泽富, 袁祥飞, 王海宝. OFDM 的关键技术及应用 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2005.

- [2] 杨路,朱嘉羲,马广浩. OFDM 系统中基于二阶多项式奈奎斯特窗的边带加窗技术研究[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版,2014,26(3):325-329.  
YANG Lu, ZHU Jiaxi, MA Guanghao. Edge windowing of second order polynomial Nyquist windows in OFDM systems[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2014, 26(3): 325-329.
- [3] 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.
- [4] CHAVALI V G, DA SILVA C R C M. Maximum-likelihood classification of digital amplitude-phase modulated signals in flat fading non-Gaussian channels[J]. Communications, IEEE Transactions on, 2011, 59(8): 2051-2056.
- [5] ZENG D G. Automatic modulation classification of radar signals using the generalised time-frequency representation of Zhao[J]. Atlas and Marks Radar, Sonar & Navigation, IET, 2011, 5(4): 507-516.
- [6] GARDNER W A, SPOONER C M. Signal interception: performance advantages of cyclic-feature detectors[J]. IEEE Trans Commun, 1992, 40(1): 149-159.
- [7] HO K C, PROKOPIW W, CHAN Y T. Modulation identification of digital signals by the wavelet transform[J]. Proc IEE Radar, Sonar and Navigat, 2000, 147(4): 169-176.
- [8] 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, 2005, 19(6): 3-6.  
LV Xinzhen, WEI Ping, XIAO Xianci. Automatic identification of digital modulation signals using high order cumulants [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2005, 19(6): 3-6.
- [9] 王建新,宋辉. 基于星座图的数字调制方式识别[J]. 通信学报, 2004, 25(6): 166-173.  
WANG Jianxin, SONG Hui. Digital modulation recognition based on constellation diagram [J]. Journal of China Institute of Communications, 2004, 25(6): 166-173.
- [10] 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.  
ZHU Yanrui, TIAN Bin, AN Jinkun, et al. Fast OFDM modulated signal recognition algorithm [J]. Journal of Xidian University: Nature Science Edition, 2012, 39(1): 17-22.
- [11] 李彦栓. OFDM 信号调制识别与参数估计研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2012.
- [12] 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.
- [13] 樊昌信,曹丽娜. 通信原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2011.

(上接第 296 页)

- [4] 张迎春,周香娜,王秀. 固相法合成  $\text{ZnNb}_2\text{O}_6$  微波介质陶瓷的结构与性能[J]. 黑龙江科技学院学报, 2006, 16(4): 201-204.  
ZHANG Yingchun, ZHOU Xiangna, WANG Xiu. Structure and properties of  $\text{ZnNb}_2\text{O}_6$  microwave dielectric ceramics prepared by solid state route[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science & Technology, 2006, 16(4): 201-204.
- [5] 甘国友,严继康,杜景红,等. 熔盐法制备  $\text{ZnNb}_2\text{O}_6$  陶瓷粉体研究[C]//长沙:中国材料研讨会, 2010.
- [6] 晏忠,黄金亮,顾永军,等. 复合烧结助剂对  $\text{ZnNb}_2\text{O}_6$  陶瓷的低温烧结与性能的研究[J]. 电子元件与材料, 2013, 32(3): 26-29.  
YAN Zhong, HUANG Jinliang, GU Yongjun, et al. Effects of composite sintering additives low temperature sintering and properties of  $\text{ZnNb}_2\text{O}_6$  ceramics[J]. Electronic Components and Materials, 2013, 32(3): 26-29.
- [7] 庄永勇,蒲永平,刘丹,等.  $\text{ZnNb}_2\text{O}_6$  粉体的水热合成研究[J]. 人工晶体学报, 2011, 40(3): 668-671.  
ZHUANG Yongyong, PU Yongping, LIU Dan, et al. Preparation of  $\text{ZnNb}_2\text{O}_6$  Powders by hydrothermal method [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2011, 40(3): 668-671.
- [8] DAI Jinhui, ZHANG Chao, SHI Leiyang, et al. Low-temperature synthesis of  $\text{ZnNb}_2\text{O}_6$  powders via hydrothermal method [J]. Ceramics International, 2012, 38: 1211-1214.
- [9] 张迎春,周香娜,刘凤,等. pH 值对 Sol-Gel 法合成铌酸锌陶瓷粉体粒度的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(1): 449-451.  
ZHANG Yingchun, ZHOU Xiangna, LIU Feng, et al. Effects of pH values on the grain size of  $\text{ZnNb}_2\text{O}_6$  ceramics powders by Sol-Gel route[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(1): 449-451.
- [10] 陈向楠,吴淑雅,陈湘明. 共沉淀法合成  $\text{NdAlO}_3$  陶瓷粉末[J]. 材料科学与工程学报, 2013, 31(3): 380-385.  
CHEN Xiangnan, WU Shuya, CHEN Xiangming. Synthesis of  $\text{NdAlO}_3$  fine ceramic powders via Co-precipitation process [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2013, 31(3): 380-385.
- [11] MERGEN A, SERT D. Production of  $\text{Ba}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_8$  ceramic by coprecipitation[J]. Materials Characterization, 2012, 63: 63-69.