

# 单载波与多载波调制系统中调制识别算法研究

力 智<sup>1</sup> 胡学龙<sup>2</sup>

(1. 扬州通信设备有限公司 扬州 225012; 2. 扬州大学信息工程学院 扬州 225127)

**摘 要:**首先叙述了调制识别技术在通信对抗中的研究意义、单载波与多载波调制的通信调制系统和灵巧通信对抗,然后介绍了无线数字信号的调制样式识别的研究现状。为了能够为灵巧通信对抗打下良好的基础,很好地实现单载波与多载波调制系统中信号特征的类型间、类内识别是十分重要的。提出了一种用于识别串行单载波和并行多载波的调制样式识别算法,此算法能够对快变瑞利信道下完成 MPSK 和 OFDM 的调制样式识别。仿真结果表明,在信噪比为 7 dB 时,识别正确率可以达到 90% 以上。

**关键词:**单载波;多载波;高阶累积量;OFDM;MPSK

**中图分类号:** TN914 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Research of modulation recognition algorithm in the single carrier and multicarrier modulation system

Li Zhi<sup>1</sup> Hu Xuelong<sup>2</sup>

(1. Yangzhou Communications Equipment Co., Ltd., Yangzhou 225012, China;

2. Information Engineering College, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

**Abstract:** Firstly, this paper describes the significance of research on modulation identification techniques in communication countermeasure, the single carrier and multicarrier communication modulation system, the smart communication countermeasure. Then, it introduces the actuality of research on modulation identification about wireless digital communication. For making a good foundation for the smart communication, it is very necessary to realize the signal features' inter-class and intra-class identification well in the single carrier and multicarrier modulation system. This paper proposes a new algorithm for modulation identification about the single carrier and multicarrier. The algorithm is able to complete the signal features' modulation identification over the time-varying Rayleigh channel between OFDM and MPSK. Simulation results demonstrate an over 90% correct classification rate could be reached when the SNR is above 7dB.

**Keywords:** single carrier; multicarrier; high order cumulant; OFDM; MPSK

### 1 引 言

多年的实践经验表明,无线电技术在现在战争中发挥着越来越显著的作用,无线电通信侦察是其中的一个分支,它可以对战争的胜负起到直接的主导作用。对无线电通信信号进行调制样式识别是侦察工作的主要任务之一,目前对单载波串行数据传输和多载波并行数据传输<sup>[1]</sup>的调制样式识别是业内研究热点。

在通信对抗和无线电频谱管理等应用方向,数字调制样式识别<sup>[2]</sup>是为设备的自动解调、解码等信号深度分析做准备,因此,数字调制样式识别技术是通信对抗装备的关键技术之一。尤其是随着通信抗干扰技术的不断发展,以

及作战样式的改变,现代战场通信系统越来越复杂,灵巧干扰技术成为现代通信干扰的发展趋势。灵巧干扰技术引入了通信的过程特征,不同于常规干扰方法的工作机理,能够对数字通信发挥更好的干扰效能。目前短波数据通信系统<sup>[3]</sup>里 2 400 bps 以下的体制中,并行多载波、串行单载波体制<sup>[4]</sup>成为国内外的主要通信体制,是目前短波数字通信的主流方式。灵巧干扰技术中也采用并、串行体制,这就使得在捕获到某信道上存在信号后,对单载波与多载波调制系统中信号特征的类型间<sup>[5-6]</sup>、类内识别<sup>[7]</sup>成为实现灵巧干扰的基础。由此可见,好的单载波与多载波调制系统中信号特征的类型间识别算法变得尤为重要。

目前,数字无线通信信号的调制样式识别主要分为基

于决策理论的最大似然法<sup>[8]</sup>和基于特征理论的统计识别法<sup>[9]</sup>。基于决策理论的最大似然法可以在最小误差判决准则下获得较高的分类精度,但计算量较大,不适宜工程实现;基于特征理论的统计识别法计算量较小<sup>[10]</sup>,特征参数提取相对容易,特别适用于调制方式的盲识别,但识别精度比最大似然法略低。为满足工程设计需要,本文采用基于高阶累积量进行特征提取的统计识别法,该法具有良好的稳定性和易开发性。

## 2 系统模型

首先考虑式(1)所示的信道与信号格式:

$$y(t) = s(t) \cdot h(t) \cdot e^{j2\pi f_d t} + \omega(t) \quad (1)$$

式中:  $s(t)$  为输入信号,该输入信号为带通信号,该信号的传输信道为瑞利信道,因此,令瑞利衰落因子为  $h(t)$ ,多普勒频移为  $f_d$ ,加性高斯白噪声为  $\omega(t)$ ,其方差为  $\sigma_\omega^2$ ,均值且为零,输入信号、瑞利衰落和高斯噪声是相互独立的。所以,  $s(t)$  属于信号集合  $\{s_{\text{OFDM}}(t), s_{\text{MPSK}}(t)\}$  中的任意一种,信号集中的信号可用如下式所示:

$$s_{\text{OFDM}}(t) = N_p \sum_k \sum_{n=0}^{N-1} c_{n,k} e^{j2\pi(f_c + n\Delta f)t} \quad (2)$$

$$s_{\text{MPSK}}(t) = N_p \sum_k c_k e^{j2\pi f_c t} g(t - kT_s) \quad (3)$$

式中:  $N_p$  为功率归一化因子,  $f_c$  为载波频率,  $T_s$  为码元周期,两种调制方式的传输符号分别为  $c_{n,k}, c_k, g(t)$  是矩形成形脉冲函数, OFDM 信号的频率间隔为  $\Delta f_0, \Delta f_k = \left[ i - \left( \frac{M-1}{2} \right) \right] \Delta f_0, i = 0, 1, \dots, M-1, \Delta f = 1/NT_s$ 。

## 3 基于高阶累积量的调制识别新算法

高阶累积量 (high order cumulants) 的定义最早由 CHRYSOSTOMOS L 等提出<sup>[11-12]</sup>,其主要特点就是对高斯噪声抑制能力较强,无需预知信号的信噪比,且计算复杂度较低,易于工程设计实现,是近年通信对抗领域和频谱监测管理领域设计研究的热点。

假设  $s'(n) = s(n) \times h(n) \times e^{j2\pi f_d n T_s}$ , 则  $y(n) = s'(n) + \omega(n)$ 。因为瑞利衰落与信号相互独立,所以  $s'(n)$  的各阶矩及累积量可计算得到:

$$M_{2,0}(s') = E((s'(n))^2) = E((s(n))^2) \times E((h(n))^2) \times e^{j4\pi f_d n T_s} \quad (4)$$

$$M_{2,1}(s') = E(s'(n) \times s'(n)^*) = E(|s(n)|^2) \times E(|h(n)|^2) \quad (5)$$

$$M_{4,2}(s') = E(s'(n)^2 \times (s'(n)^*)^2) = E(|s(n)|^4) \times E(|h(n)|^4) \quad (6)$$

设  $h(n) = h_s(n) + jh_c(n), h_s(n), h_c(n)$  相互独立并且均值都为零、方差是  $\sigma_h^2$  的正态分布,所以可以得到:

$$E((h(n))^2) = E((h_s(n) + jh_c(n))^2) = 0 \quad (7)$$

瑞利信道衰落因子  $h(n)$  特点如下:

$$E(|h(n)|^k) = (2\sigma_h^2)^{\frac{k}{2}} \Gamma\left(\frac{1}{2}(2+k)\right), k \geq 0 \quad (8)$$

则:

$$M_{2,1}(h) = E(|h(n)|^2) = 2\sigma_h^2 \quad (9)$$

$$M_{4,2}(h) = E(|h(n)|^4) = 8\sigma_h^4 \quad (10)$$

由此通过计算可得:

$$M_{2,0}(s') = 0 \quad (11)$$

$$M_{2,1}(s') = 2\sigma_h^2 E(|s(n)|^2) = 2\sigma_h^2 M_{2,1}(s) \quad (12)$$

$$M_{4,2}(s') = 8\sigma_h^4 E(|s(n)|^4) = 8\sigma_h^4 M_{4,2}(s) \quad (13)$$

$s'(n)$  的各阶累积量为:

$$C_{s',20} = M_{2,0}(s') = 0 \quad (14)$$

$$C_{s',21} = M_{2,1}(s') = 2\sigma_h^2 M_{2,1}(s) \quad (15)$$

$$C_{s',42} = M_{4,2}(s') - |M_{2,0}(s')|^2 - 2M_{2,1}^2(s') = 8\sigma_h^4 (M_{4,2}(s) - M_{2,1}^2(s)) \quad (16)$$

因信号与高斯噪声是相互独立的,则:

$$C_{y,21} = 2\sigma_h^2 M_{2,1}(s) + M_{2,1}(\omega) \quad (17)$$

在信噪比足够大的时候:

$$C_{y,21} \approx 2\sigma_h^2 M_{2,1}(s) \quad (18)$$

因为  $s(n)$  是一个具有零均值的平稳随机过程,接收信号  $y(n)$  的 4 阶累积量等于信号  $s'(n)$  的 4 阶累积量,所以  $y(n)$  的 4 阶累积量可以如下表示:

$$C_{y,42} = C_{s',42} = 8\sigma_h^4 (M_{4,2}(s) - M_{2,1}^2(s)) \quad (19)$$

通过以上的理论推导,为了完全消除瑞利衰落带来的影响,累积量特征组合值按照下式进行选取:

$$d = |C_{y,42}/C_{y,21}^2| \quad (20)$$

对于单载波信号,参数  $d$  的理论值为 0;对于多载波信号,参数  $d$  的理论值为 2,因此可以利用  $d$  来区分单载波和多载波调制信号,由于在进行上述理论分析中计算  $C_{y,21}$  时忽略了噪声能量,  $d$  的实际值都应略小于上面的理论值,在设计门限值时需进行合理的修正。

## 4 结果分析

仿真采用 MATLAB 软件,仿真条件为单载波和多载波条件下基于累积量的调制识别算法,符号速率为 1 800 波特、采样速率为 7 200 Hz,取 1 800 个数据,进行 10 次试验得出的结果如图 1 所示。

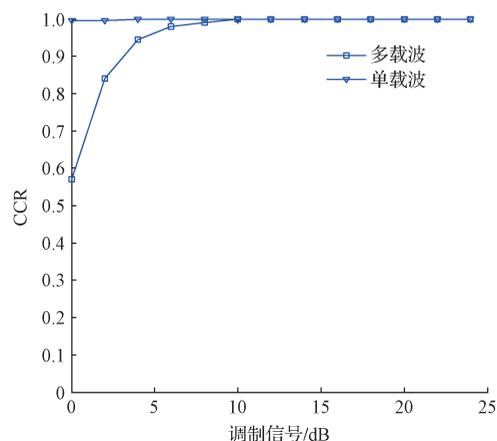


图 1 各种调制信号正确识别率

由图1可看出,在信噪比5 dB时,单载波的正确识别率可以达到100%,在信噪比为7 dB时,多载波的正确识别率可以达到90%以上。这种方法相对于其他算法的优点在于所选取的累积特征量对高斯过程是“盲”的,算法复杂度比较简单,特别易于工程实现。

## 5 结 论

本文立足于实际工程应用需求,利用信号高阶累积量在瑞利信道中完成单载波与多载波类间识别。实验结果表明,此算法拥有90%以上甚至100%的高识别正确率,且本算法已成功应用到某型号通信对抗装备中,满足了实际应用需求。随着系统的研发进展,日后将继续对短波信号脆弱性环节和针对脆弱性分析进行灵巧干扰设计方向的研究。

### 参 考 文 献

- [1] 王金龙. 短波数字通信研究与实践[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [2] 韩丙寅,程乃平. 数字调制识别的FPGA实现方法研究[J]. 国外电子测量技术,2011,30(3):33-36.
- [3] 王金龙,吴启晖,龚玉萍,等. 认知无线网络[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [4] 李小捷,许录平,陈佳. 基于联合参数估计的最大似然调制识别算法[J]. 仪器仪表学报,2008,29(12):2509-2514.
- [5] 曹伟炯,李玉杰. 一种基于支持向量机的数字调制识别方法[J]. 电子测量技术,2009,32(2):24-27.
- [6] 冯旭哲,罗飞路,杨俊,等. 基于小波支持向量机的数字通信信号调制识别[J]. 电子测量与仪器学报,2009,23(3):87-92.
- [7] 王晓东,唐振宏,韩溟. 一种MFSK信号的类内调制方式识别算法研究[J]. 数字技术与应用,2015(10):148-149.
- [8] 张光山,李墩泰,张一民. 有源RFID测试系统中低复杂度多读写器检测方法[J]. 国外电子测量技术,2016,35(6):29-31.
- [9] DOBRE O A, ABDI A, BAR-NESS Y, et al. Survey of automatic modulation classification techniques: classical approaches and new trends[J]. Iet Communications, 2007, 1(2):137-156.
- [10] 柳颖. 数字通信信号基于统计模式识别理论的调制识别方法综述[J]. 科学与财富,2016,8(4):728-729.
- [11] VERMA P, SINGH B. Simulation study of double threshold energy detection method for cognitive radios[C]. International Conference on Signal Processing and Integrated Networks, 2015, 29(2):232-236.
- [12] ZIDANE M, SAFI S, SABRI M, et al. Bit error rate analysis of MC-CDMA systems with channel identification using higher order cumulants[J]. ResearchGate, 2016, 1(1):138-152.

### 作 者 简 介

力智,1982年出生,工学硕士,工程师,主要研究方向为通信对抗系统、数字信号处理技术。

E-mail: yztxlzh@sina.com

胡学龙,1960年出生,工学硕士,教授,主要研究方向为电子测量与仪器、信号与信息处理。

E-mail: huxuelong@126.com