

OFDM 信道下数字调相信号的调制识别

张端金, 吕书允

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 研究 OFDM 信道系统下的 MPSK 调制方式, 对其二阶累量和四阶累量进行推导和分析, 给出一种针对 MPSK 调制阶数进行识别的新特征构造方法, 新特征提取方法简单, 而且容易实现, 能够有效实现调制识别目的. 笔者分别对 OFDM 系统传输系统性能和识别率进行了计算机仿真, 把基于高阶累量的调制识别算法的识别率与基于谱线特征算法的调制算法识别率做了仿真对比. 仿真结果表明, 在相同信噪比的情况下, 基于高阶累量的调制识别算法要远远优于基于谱线特征的算法, 当信噪比高于 3 dB 时, 识别率可以达到 100%.

关键词: OFDM 信道; 调制识别; 高阶累量; MPSK 信号

中图分类号: TN911.23

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2013.00.016

0 引言

数字信号的调制识别在无线通信中具有至关重要的作用, 它是信号检测的后继工作, 是对接受信号进行分析处理的前提. 数字调相信号是数字通信中最受欢迎的调制方式之一, 对 MPSK (M-ary Phase Shift Keying) 调制阶数的分类识别具有非常重要的意义. 赵岚在文献[1]中对采用基于信号的功率谱, 2 次方谱和 4 次方谱以及包络平方谱提取的特征值算法对 MPSK 的调制阶数分类做出了研究和详细介绍, 这种方法不需要先验信息, 但是对信噪比要求较高. 近几年以来, 高阶累量因为具备很好的抑噪等性能成为调制识别领域研究的热点, Sum Gangcan 等人在文献[2]推导出基于六阶累积量的 MPSK 调制识别特征值, 识别率很高, 但是阶数增加, 抑制高斯噪声的性能降低. Yang Lin, 李旷代, Jon Hambins 等人在文献[3-5]中分别对不同环境中的 MPSK 信号调制识别进行了研究.

在通信环境不断变化、空间信号日益密集的情况下, 通信系统中相关技术也在不断地发展和更新. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 传输技术因其具备高频带利用率和较强的抗多径干扰能力而在无线通信领域受到重视,

成为近年来研究的热点, 经由 OFDM 信道系统传输的数字信号调制识别技术也在不断发展. 王建勇和 Nikopour Hosein 分别在文献[6]和文献[7]研究 OFDM 的传输系统以及该系统下的调制识别问题.

笔者采取一种基于高阶累量分析的数字调相信号调制识别算法, 推导了 OFDM 信道系统下数字调相信号分类特征值的表达式, 对 MPSK 信号的调制阶数进行有效分类, 并对不同的调制算法做了仿真比较. 仿真实验证明, 在 OFDM 信道系统下基于高阶累量的特征值算法对抑制高斯噪声和多径干扰具有很好作用, 能够达到 MPSK 信号调制阶数分类识别的目的.

1 OFDM 信道系统 MPSK 模型

OFDM 是一种并行的信号传输系统, 每个子载波的调制方式可以是多进制相移键控 (MPSK) 或是多进制正交复调调制 (MQAM), 笔者主要针对 MPSK 这种调制方式进行研究. OFDM 系统首先把串行传输的信号通过变换分配到传输速率相对较低的子信道中, 然后对信号进行离散傅里叶逆变换, 把频域信号转换为时域信号进行处理, 接着对每个独立子信道上的信号进行数字调制和传输. 接收到的信号要先经过信号检测, 然后进行

收稿日期:2012-11-22; 修订日期:2013-01-06

基金项目:河南省基础与前沿技术研究计划资助项目(102300410003)

作者简介:张端金(1966-), 男, 湖北荆州人, 郑州大学教授, 博士, 主要研究方向为通信信号处理、故障检测与估计, E-mail:iedjzhang@zzu.edu.cn.

调制识别和解调之类的后续工作,系统框图 如图1所示.

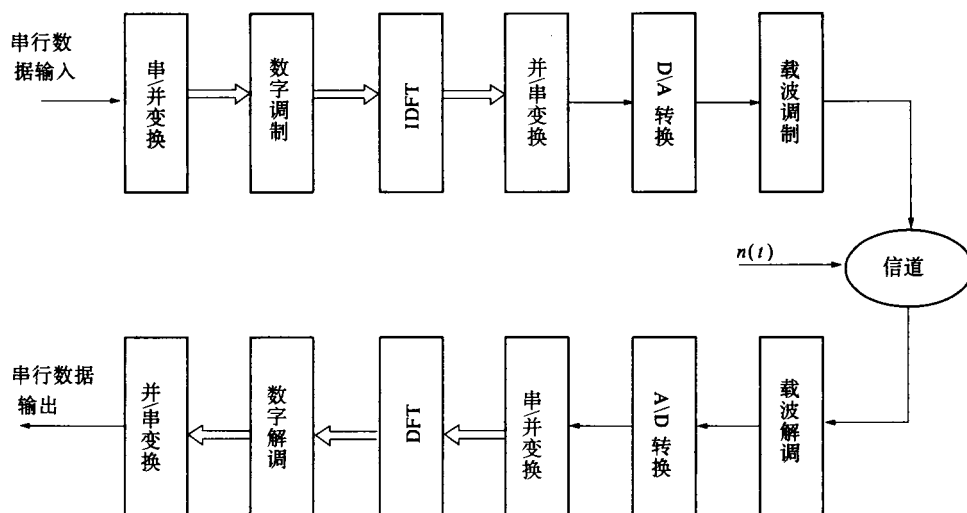


图1 OFDM 系统模型

Fig.1 OFDM system model

一个系统总带宽为 W , 码元周期为 T_s , 码元保护间隔为 T_g 的 OFDM 复基带码元可以表示为

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} S_k \frac{1}{\sqrt{T}} \exp(j2\pi k \Delta f (t - T_g)) \quad t \in [0, T_s], \quad (1)$$

式中: N 为子信道的总数; $\Delta f = W/N$; $T = 1/\Delta f$; $T_s = T + T_g$; T 是有用的符号周期.

假设信道的最大时延不超过码元保护间隔, 考虑第 L 个码元周期接收到的信号, 那么接收到的信号表达式为

$$r(t) = \sum_{k=0}^{N-1} S_{k,L} \exp(j2\pi k \Delta f (t - T_g - LT_s)) + n(t). \quad (2)$$

对 $r(t)$ 进行间隔为 T_s 的采样, 可以得到下面表达式

$$R(k) = \sum_{n=0}^{N-1} S_n \frac{1}{T} \int_0^T \exp[j2\pi(n-k)\Delta f t] dt + N(k) \quad k = 0, 1, \dots, (N-1). \quad (3)$$

在 OFDM 系统中调相信号的时域表达式可以表示为

$$s_{\text{MPSK}}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} c_i g(t - iT_s) \exp(j2\pi f_i t), \quad (4)$$

式中: N 表示子信道的总数; f_i 表示第 i 个信道载波的频率; c_i 为 MPSK 信号的传输符号, $g(t)$ 表示矩形脉冲函数.

对时域信号进行采样、离散傅里叶逆变换等一系列处理, 可以得到 MPSK 调制信号的形式表示为

$$s(k) = s\left(\frac{kT_s}{N}\right) = \sum_{i=0}^{N-1} c_i \exp\left(j \frac{2\pi f_i k T_s}{N}\right),$$

$$0 \leq k \leq (N-1). \quad (5)$$

2 基于累量分析的分类算法

对于一组平稳随机变量 $[x_1, x_2, \dots, x_n]$, 它们的 r 阶矩和 r 阶累量 ($r = k_1 + k_2 + \dots + k_n$) 可以分别定义为式(6)和(7).

$$\begin{aligned} \text{Mom}[x_1^{k_1}, x_2^{k_2}, \dots, x_n^{k_n}] &= E[x_1^{k_1}, x_2^{k_2}, \dots, x_n^{k_n}] \\ &= (-j)^r \frac{\partial \phi(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)}{\partial \omega_1^{k_1} \partial \omega_2^{k_2}, \dots, \partial \omega_n^{k_n}} \bigg|_{\omega_1 = \dots = \omega_n = 0}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Cum}[x_1^{k_1}, x_2^{k_2}, \dots, x_n^{k_n}] &= \\ (-j)^r \frac{\partial [\ln \phi(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)]}{\partial \omega_1^{k_1} \partial \omega_2^{k_2}, \dots, \partial \omega_n^{k_n}} \bigg|_{\omega_1 = \dots = \omega_n = 0}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\Phi(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = E\{\exp[j(\omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 + \dots + \omega_n x_n)]\}$ 是随机变量联合特征函数, 也叫矩生成函数 (或者第一特征函数). $\ln \phi(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 是累量生成函数, 也叫第二特征函数.

随机向量的累量生成函数和矩之间有以下关系

$$\begin{aligned} \text{Mom}[x_1^{k_1}, x_2^{k_2}, \dots, x_n^{k_n}] &= \\ \sum (-1)^{p-1} (p-1)! E\left\{\prod_{i \in S_1} x_i\right\}, \dots, E\left\{\prod_{i \in S_p} x_i\right\} \end{aligned} \quad (8)$$

一个零均值的平稳随机过程 $\{x(k)\}$ 的 2 阶累量和 4 阶累量可以表示为

$$C_{20}(\tau) = E\{x(k)x(k+\tau)\} = R_x(\tau), \quad (9)$$

$$\begin{aligned} C_{21}(\tau) &= E[x(k)^* x(k+\tau)], \quad (10) \\ C_{40}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) & \end{aligned}$$

= Cum[x(k), x(k + τ₁), x(k + τ₂), x(k + τ₃)]
= E[x(k)x(k + τ₁)x(k + τ₂)x(k + τ₃)] -
E[x(k)x(k + τ₁)]E[x(k + τ₂)x(k + τ₃)] -
E[x(k)x(k + τ₂)]E[x(k + τ₁)x(k + τ₃)] -
E[x(k)x(k + τ₃)]E[x(k + τ₁)x(k + τ₂)],
(11)

C₄₁(τ₁, τ₂, τ₃)
= Cum[x(k), x(k + τ₁), x(k + τ₂), x*(k + τ₃)]
= E[x(k)x(k + τ₁)x(k + τ₂)x*(k + τ₃)] -
E[x(k)x(k + τ₁)]E[x(k + τ₂)x*(k + τ₃)] -
E[x(k)x(k + τ₂)]E[x(k + τ₁)x*(k + τ₃)] -
E[x(k)x*(k + τ₃)]E[x(k + τ₁)x(k + τ₂)],
(12)

C₄₂(τ₁, τ₂, τ₃)
= Cum[x*(k), x(k + τ₁), x(k + τ₂), x*(k + τ₃)]
= E[x*(k)x(k + τ₁)x(k + τ₂)x*(k + τ₃)] -
E[x*(k)x(k + τ₁)]E[x(k + τ₂)x*(k + τ₃)] -
E[x*(k)x(k + τ₂)]E[x(k + τ₁)x*(k + τ₃)] -
E[x*(k)x*(k + τ₃)]E[x(k + τ₁)x(k + τ₂)],
(13)

式中: x*(k) 是 x(k) 的共轭。
在接收端接收到的信号序列可以表示为
x(k) = √W a_kexp(jθ) + n_k k = 1, 2, ..., N.
(14)

式中: a_k 是未知调制阶数的感兴趣信号的归一化码元序列; W 是待识别信号的平均功率; θ 是未知的载波相位偏差; n_k 是复高斯白噪声序列. 根据式(14) 可以把 MPSK 信号表示为 s_{MPSK} = a_kexp(jθ), a_k ∈ [exp(j2π(m - 1)/M), m = 1, 2, ..., M], 假设 a_k 是独立同分布的, 那么根据累积量的计算方法, 进行数值运算, 就可以得到 MPSK 信号 s_{MPSK} 不同阶数的二阶累量和四阶累量的期望值, 如表 1.

表 1 MPSK 信号的 2 and 4 阶累量的期望值
Tab. 1 The 2 and 4-order cumulants of MPSK

	C ₂₁	C ₄₀	C ₄₁	C ₄₂
2PSK	W	- 2W ²	- 2W2e ^{j2θ}	- 2W2e ^{j4θ}
4PSK	W	- W ²	0	W2e ^{j4θ}
8PSK	W	- W ²	0	0

分析表中各个数值之间的关系, 可得 MPSK 的分类特征表达式

F₁ = |C₄₀| / |C₂₁|² = { 2 M = 2, 2PSK
1 M ≥ 4, MPSK. (15)

使用这个特征值可以把 2PSK 从 MPSK 中识别出来, 下面构造 M 值为 4 或者 8 时候的分类特征

F₂ = |C₄₂| / |C₄₀| = { 1 M = 4, 4PSK
0 M = 8, 8PSK. (16)

综合式(15) 和(16), 可以得出 MPSK 不同调制阶数的分类特征向量表示式

F = [F₁, F₂] = { [2, 1] 2PSK
[1, 1] 4PSK
[1, 0] 8PSK, (17)

式中: F = [F₁, F₂] 为接收信号分类特征向量.

3 仿真结果

根据以上分析, 使用 MATLAB 软件做了 2 个实验. 第一个是以 QPSK 调制信号为例, 在高斯白噪声情况下, 对 OFDM 系统性能做出仿真; 第二个是分别使用基于高阶累量和基于谱线特征两种方法对 MPSK 信号的调制识别率进行仿真.

3.1 OFDM 系统的误码率仿真

在这里设定在不同的信噪比 (Signal Noise Ratio, SNR) (-3dB ≤ SNR ≤ 9dB) 情况下, 对传输的 10 000 个 QPSK 符号进行误码率 (Bit Error Rate, BER) 仿真, 将传输的仿真结果与理论计算值做出对比, 如图 2 所示.

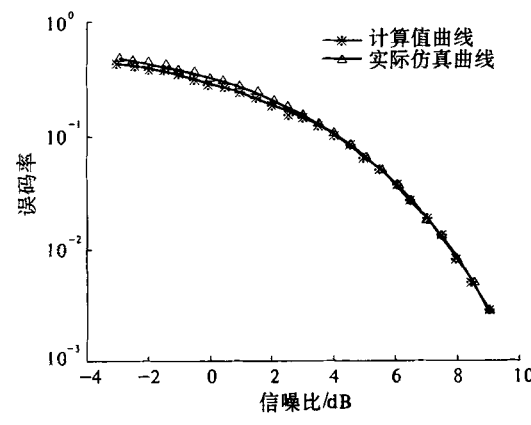


图 2 OFDM 系统的误码率
Fig. 2 BER of OFDM system

由图 2 可以看出, 在高斯白噪声下 OFDM 系统具有很好的传输性能, 其误码率与理论计算结果在信噪比高于 2dB 的情况下基本相同.

3.2 MPSK 调制识别率仿真

在这个仿真实验中, 根据前文中提取的 MPSK 信号调制阶数分类特征值, 实现 2PSK、4PSK 和 8PSK 的调制识别, 在 MATLAB 中可以得到这 3 种调制信号的调制识别率 (Recognition

Rate,RR). 同时还做了相同信噪比情况下,基于谱线特征的调制识别率情况,如图3.

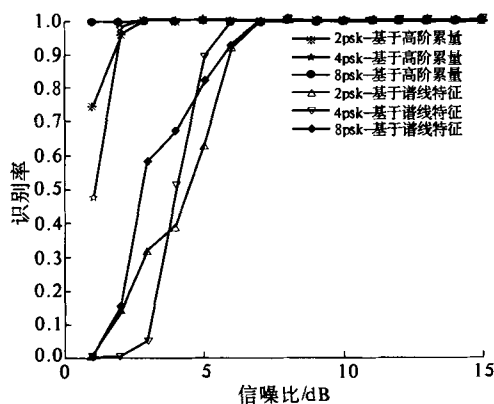


图3 MPSK信号调制识别率

Fig.3 RR of MPSK

通过仿真图3中可以看出,当信噪比高于3 dB时候,由于高阶累量算法具有很强的抑制高斯噪声和多径干扰性能,采用高阶累量算法的识别率基本可以达到100%,这比相同信噪比情况下基于谱线特征的算法要高出很多.

4 结论

针对OFDM信道系统下的数字调制识别问题,推导出了一种基于高阶累量分析的二阶累量和四阶累量分类算法.通过特征值 F_1 把2PSK从MPSK信号组中分离出来,然后通过特征值 F_2 把4PSK和8PSK两种调制类型做出分类,实现MPSK调制信号分类的目的.对OFDM传输系统可实现性、传输误码率以及笔者提出的特征值分类算法做了仿真.由仿真结果证明,在信噪比高于3 dB的情况下,OFDM传输系统的误码率仿真值

与理论计算值基本上是一样的.识别率的仿真结果可以证明,笔者提出的特征值算法,在信噪比高于3 dB的情况下,识别率可以达到100%,比相同信噪比情况下的基于谱线特征识别算法的识别率高出很多.

参考文献:

- [1] 赵岚. 基于谱线特征的调制方式自动识别方法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2012, 4(2):182-190.
- [2] SUN Gang-can, MPSK signals modulation classification using sixth-order cumulants[J]. Image and Signal Processing, 2010, 9(3):4404-4407.
- [3] YANG Lin, JI Zhi. Modulation classification in multipath fading environments[J]. Wireless Communication Systems, 2007, 10(4):171-174.
- [4] 李旷代, 郭黎利, 石荣, 等. 单信道时频重叠MPSK信号调制识别方法[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(2):150-153.
- [5] JON H. Modulation classification of MPSK for space applications[C]//proc of Global Telecommunications Conference, 2006:1-5.
- [6] 王建勇, 王海. 基于高阶累积量和SVM的OFDM调制制式识别[J]. 计算机与数字工程, 2008, 36(6):41-44.
- [7] NIKOPOUR H. Turbo-coded OFDM transmission over a nonlinear channel[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2005, 54(4):1361-1371.
- [8] 陈卫东, 杨绍全. 基于循环平稳分析的MPSK信号调制算法[J]. 信号处理, 2006, 22(3):408-411.
- [9] 陈卫东. 数字通信信号调制识别算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学通信工程学院, 2001.

Modulation Classification of MPSK Based on OFDM Channel System

ZHANG Duan-jin, LV Shu-yun

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: This paper studies the modulation of MPSK based on OFDM channel system. by deduction and analysis of the second-order cumulants and the fourth-order cumulants of MPSK signal An innovative feature to distinguish the modulation order of the MPSK is presented. This feature, due to its simple extracted approach and easy realization, can efficiently achieve the goal of modulation classification. The paper gives transmission bit error rate and the modulation recognition rate of OFDM system, and gives a comparison simulation of the MPSK recognition rate between the modulation algorithm based on high-order cumulants and spectrum line feature. The result shows that the advantage of high-order cumulants analysis.

Key words: OFDM system; modulation classification; high-order cumulant; MPSK signal