

高阶矩的衰落信道中 OFDM 信号检测算法

齐晓东, 郭黎利, 李海明

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要:正交频分复用是一种具有很强抗多径干扰、码间干扰和窄带干扰以及很高频谱利用率的高效数据传输技术,已经得到广泛的应用;OFDM 信号的自动识别和调制参数的估计是非协作通信和认知无线电中的关键问题。以基于高阶累积量的正交频分复用(OFDM)信号检测算法为研究对象,针对衰落信道将影响信号高阶统计特性的问题,提出一种适用于衰落信道环境中的基于高阶矩的 OFDM 信号检测算法,用以区别多载波信号(OFDM)与单载波信号(MFSK, MQAM);并通过数学推导和仿真数据验证了所提算法的可行性和衰落信号适应能力。

关键词:OFDM;高阶累积量;高阶矩;瑞利衰落信道;检测

中图分类号: TN911.72 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2008)05-0048-04

由于具有诸如频谱利用率高、抗多径衰落和脉冲噪声能力强、可根据信道条件灵活选取调制方式及分配功率等诸多技术优势,正交频分复用(OFDM)在众多领域得到了广泛的应用,已经成为第4代多媒体移动通信系统的关键传输技术^[1]。

通信信号的检测和自动识别是无线电监测系统的核心技术问题。目前,国内外对单载波数字调制信号在加性高斯白噪声信道中的调制方式盲识别技术进行了广泛而深入的研究^[2],并取得了良好的识别效果;但在 OFDM 信号检测和调制模式识别领域,相关的技术研究尚属理论探讨阶段。

本文以 OFDM 信号检测算法为研究对象,根据 OFDM 系统和单载波信号高斯渐进性方面存在的技术差异^[3-4],利用高阶统计量作为检测工具,探索了基于高阶累积量和高阶矩的 OFDM 信号检测算法的可行性和检测性能。基于高阶累积量的 OFDM 信号检测算法只适用于加性高斯白噪声信道。在瑞利(Rayleigh)衰落信道中,单载波信号统计特性呈现高斯性。因此,本文提出了基于高阶混合矩的分类特征对采样信号进行处理,实现对于单载波信号和 OFDM 信号的分选任务。

1 OFDM 信号的高斯渐进性分析

多载波调制信号 $x(t)$ 由实部和虚部两部分组成,即:

$$x(t) = x_r(t) + jx_i(t) \quad (1) \quad x_r(t) = \sqrt{\frac{1}{N}} \sum_{n=-N/2}^{N/2} \sum_k s_{rk,n}(t) \quad (2)$$

$$s_{rk,n}(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} s_{k,n} \exp[j2\pi(f_0 + \Delta f)g(t - kT_s)] \right\} \quad (3)$$

式中: Δf 是子载波间的频率间隔,一般取 $\Delta f = 1/T$, T 为子载波周期; $g(t)$ 为符号传输的波形; N 为子载波数。

$x_r(t)$ 的 4 阶累积量(取 $t = t_0$) 为

$$\text{Cum4}(x_r) = \text{Cum4} \left(\sqrt{\frac{1}{N^4}} \sum_{n=-N/2}^{N/2} \sum_k s_{rk,n}(t_0) \right) \quad (4)$$

收稿日期:2008-05-20

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20050217016)

作者简介:齐晓东(1959-),男,北京人,博士生,主要从事通信系统与网络工程研究. E-mail: qxdoo@sina.com

由于各子载波调制信号的独立性,由 4 阶累积量的线性特点可得:

$$\text{Cum4}(x_r) = \sqrt{\frac{1}{N^4}} \sum_{n=-N/2}^{N/2} \text{Cum4}\left(\sum_k s_{rk,n}(t_0)\right) \quad (5)$$

式中: $\text{Cum4}\left(\sum_k s_{rk,n}(t_0)\right)$ 是每个子信道的 4 阶累积量,这是一个有限值,并且对每个子信道的 4 阶累积量都相等,从而得到:

$$\text{Cum4} = \frac{1}{N^2} N \text{Cum4}\left(\sum_k s_{rk,n}(t_0)\right) = \frac{1}{N} \text{Cum4}\left(\sum_k s_{rk,n}(t_0)\right) \quad (6)$$

可得:

$$\text{Cum4}(x_r) \rightarrow 0 \quad (7)$$

对于虚部用上述方法可以得到相同的结论。

由 OFDM 信号具有高斯性,因此它的 4 阶累积量趋近为零,这是单载波调制信号所不具有的性质。

2 衰落信道中 OFDM 信号的检测算法

当只考虑加性高斯白噪声信道时,通过 4 阶累积量来检测单载波信号和多载波信号的高斯渐进性可有效对 OFDM 信号进行检测。在 Rayleigh 衰落信道中,由于信道的影响,单载波信号的统计特性会发生变化,也会呈现高斯性。这样高阶累积量的识别方法就会失去意义。本文提出一种适用于 Rayleigh 信道的基于混合高阶矩的 OFDM 信号检测算法。

对于信号 $s(n)$ 的 $p+q$ 阶混合矩定义为

$$M_{p+q,q}(s) = E\left(\underbrace{s \times \dots \times s}_{p \text{ 项}} \times \underbrace{s^* \times \dots \times s^*}_{p \text{ 项}}\right) \quad (8)$$

则:

$$M_{2,1}(s) = E(s \times s^*) = E(|s|^2) \quad (9)$$

$$M_{4,2}(s) = E(s^2 \times (s^*)^2) = E(|s|^4) \quad (10) \quad M_{6,3}(s) = E(s^3 \times (s^*)^3) = E(|s|^6) \quad (11)$$

复信号 $s(n)$ 的归一化峰度定义为

$$K(s) = \frac{E(|s|^4)}{E^2(|s|^2)} = \frac{M_{4,2}}{M_{2,1}^2} \quad (12)$$

由于归一化峰度等于 3 的实信号为高斯信号^[5-7],则通过推导可得到:归一化峰度等于 2 的复信号为高斯信号。

若复信号 $s(n)$ 为高斯信号,则:

$$\frac{E(|s|^6)}{E^3(|s|^3)} = \frac{M_{6,3}}{M_{2,1}^3} = 6 \quad (13)$$

对于输入信号 $s(n) \in \{\text{OFDM}, \text{MQAM}_{M=16}, \text{MPSK}_{M=2,4}\}$ 定义 2 个参数分别为

$$k_{20} = \frac{M_{4,2}(s)}{M_{2,1}^2(s)} \quad (14)$$

$$k_{30} = \frac{M_{6,3}(s)}{M_{2,1}^3(s)} \quad (15)$$

假定 $ch(n) = a(n)e^{j\varphi(n)}$, $u(n) = ch(n)s(n)$, $y(n) = u(n) + w(n)$, $ch = r_r + jr_i$ 为 Rayleigh 衰落因子; r_r 和 r_i

为统计独立的高斯随机变量,均值为 0,方差为 δ^2 。

由 $E(|ch(n)|^k) = (2\delta^2)^{k/2} \Gamma(1/2(2+k))$, $k \geq 0$ ^[8-10],可以得到

$$E(|ch(n)|^2) = 2\delta^2 \quad (16)$$

$$E(|ch(n)|^4) = 8\delta^4 \quad (17)$$

$$E(|ch(n)|^6) = 48\delta^6 \quad (18)$$

不同调制方式 k_{20} 和 k_{30} 的理论值如表 1 所示。

表 1 常见数字信号的高阶矩的特征参数

Tab. 1 The higher order moment characteristic parameters of common digital signals

	k_{20}	k_{30}
OFDM	2	6
MPSK	1	1
16QAM	1.312	1.93
32QAM	1.306	1.88
64QAM	1.378	2.21

定义对信号 u 进行识别的 2 个参数为

$$m_{20} = \frac{M_{4,2}(u)}{M_{2,1}^2(u)} = 2k_{20} \quad (19)$$

$$m_{30} = \frac{M_{6,3}(u)}{M_{2,1}^3(u)} = 6k_{30} \quad (20)$$

表 2 给出了 u 的理想特征参数。

由于接收信号 $y(n)$ 不仅是信道衰落因子有关,还与加性高斯白噪声有关,设 $E(|u(n)|^2) = S, E(|w(n)|^2) = N_w$, 定义对 $y(n)$ 的识别参数为

$$v = \frac{M_{6,3}(y)}{M_{2,1}^3(y)} = \frac{E(|y(n)|^6)}{E^3(|y(n)|^2)} = \frac{m_{30}(S/N_w)^3 + 9m_{20}(S/N_w)^2 + 18(S/N_w) + 6}{(S/N_w)^3 + 3(S/N_w)^2 + 3(S/N_w) + 1} \quad (21)$$

分析上式可以得到如下结论:①对于 MPSK 信号,可以推出无论 SNR 怎么变化, v 恒等于 6;②对于 OFDM 信号,SNR 的范围为 0dB - +∞ 时, v 的取值范围为 12 - 36;③对于 MQAM 信号,SNR 在 0dB - +∞ 时, $M = 64$ 时, v 的取值范围是 7.76 - 13.26;④对于 MQAM 信号,SNR 在 0dB - +∞ 时, $M = 32$ 时, v 的取值范围是 7.4 - 11.58。

3 算法性能分析

在高斯白噪声信道中,信噪比分别为 0 dB 和 1 dB 时,对单载波信号(BPSK、QPSK、16QAM)和多载波(OFDM)信号进行信号识别,采用 4 阶高阶累积量,进行 50 次蒙特卡罗仿真。OFDM 信号子载波数为 64,子载波采用 16QAM 调制。

由图 1 可见:在理想信道(高斯白噪声信道)中信噪比为 10 dB 时,多载波信号和单载波信号存在高斯渐进性的差异,利用高阶累积量的方法(4 阶累积量)可有效分辨 OFDM 信号,且具有很高的识别率。

由图 2 和图 3 可见,信道的不理想特性(例如衰落特性)将影响已调信号的高斯渐进性特性;当信号经过具有 Rayleigh 衰落的信道环境时,单载波信号呈现在高斯性,基于高阶累积量的 OFDM 信号检测算法失效。此时采用联合高阶矩的方法对经过具有 Rayleigh 衰落的信号进行识别,信噪比为 10dB 的信道环境下,做 50 次蒙特卡罗仿真。从图 3 中可以得到与理论值相符的结果,说明算法的有效性和信道的适应能力。

表 2 经 Rayleigh 信道衰减后的高阶矩的特征参数

Tab.2 The higher order moment characteristic parameters after rayleigh fading channel

	m_{20}	m_{30}
OFDM	2×2	6×6
MPSK	1×2	1×6
16QAM	1.312×2	1.93×6
32QAM	1.306×2	1.88×6
64QAM	1.378×2	2.21×6

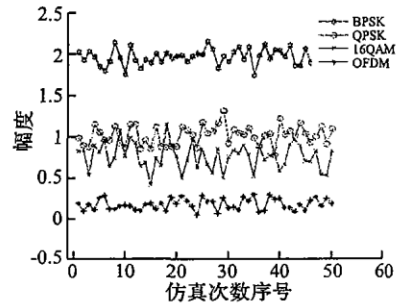


图 1 高斯白噪声信道中的信号高阶累积量识别曲线

Fig.1 Higher order cumulants identification in the AWGN channel

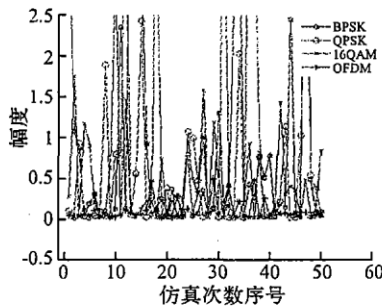


图 2 经过 Rayleigh 衰落高阶累积量识别(SNR = 0 dB)
Fig.2 Higher order cumulants identification after rayleigh fading channel(SNR = 0 dB)

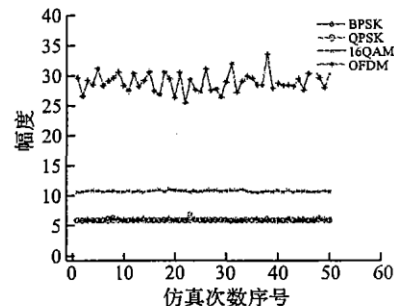


图 3 经过 Rayleigh 衰落高阶矩识别(SNR = 0 dB)
Fig.3 Higher order moment identification after rayleigh fading channel(SNR = 0 dB)

4 结束语

本文以基于高阶统计量的 OFDM 信号检测算法为研究对象,针对信号高斯渐进性易受信道特性影响的问题,提出了基于高阶矩的 OFDM 信号检测算法,该算法可有效降低由 Rayleigh 信道导致的单载波信号高斯

渐进性畸变对于检测算法产生的影响,通过理论分析和仿真数据验证了新算法的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] Bingham J A C. Multi - carrier Modulation for Data Transmission: An Idea Whose Time Has Come [J]. IEEE Trans on Communications, 1990, 28 (5): 5 - 4.
- [2] Swami A. Hierarchical Digital Modulation Classification Using Cumulants [J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(3): 141 - 144.
- [3] Giannakis G B. Time - domain Tests for Gaussian and Time - reversibility [J]. IEEE Trans Autom, Control, 1990, 35(1): 18 - 26.
- [4] 王 彬. 一种基于高阶矩的 OFDM 信号调制盲识别算法[J]. 数据采集与处理, 2006, 21(1): 37 - 41.
WANG Bin. Algorithms for Blind Identification of OFDM Signal Based on Higher Order Moments [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2006, 21(1): 37 - 41. (in Chinese)
- [5] Akmouche W. Detection of Multi - carrier Modulations Using 4th - order Cumulants: IEEE MII - COM99 [C]. Atlantic, NJ, USA: IEEE, 1999: 432 - 436.
- [6] Grimaldi D. An Automatic Digital Modulation Classifier for Measurement on Telecommunication Networks: Proc of IMTC2002 [C]. USA: IEEE, 2002: 957 - 962.
- [7] DAI Wei. Joint Power Estimation and Modulation Classification Using Second - and - higher Statistics: Proc of WCNC2002 [C]. Orlando, Florida, USA: IEEE, 2002: 135 - 158.
- [8] Keller T. Adaptive Modulation Techniques for Duplex OFDM Transmission [J]. IEEE Trans Veh Technology, 2000, 49(5): 1893 - 1906.
- [9] Torrance J M. Upper Bound Performance of Adaptive Modulation in A Slow Rayleigh Fading Channel [J]. Electronics Letters, 1996, 32(8): 718 - 719.
- [10] Yucek T, Arslan H. A Novel Sub - optimum Maxim Unlikelihood Modulation Classification Algorithm for Adaptive OFDM Systems [J]. Wireless Communications and Networking Conference, 2004, 2: 739 - 744.

(编辑:徐楠楠)

Detection Methods of OFDM Signal in Fading Channels Based on Higher Order Moments

QI Xiao - dong, GUO Li - li, LI Hai - ming

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, 150001, China)

Abstract: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) technique is an efficient data transmission technique with good immunity for the effects of multi - path channel interference, inter - symbol interference, narrow-band interference and high frequency spectrum utilization ratio. It has been widely used in practice. Automatic identification and modulated parameter estimation of communication signal of OFDM are key technologies in non - cooperative communication and software radio. Aiming at the detection methods of OFDM signal based on higher order cumulants, the paper proposes a novel method used to detect OFDM signal in the fading channel based on four higher order moments. This method can detect OFDM from signal - carrier modulated signals (MPSK or MQAM). Theory analysis and simulation data can prove that the algorithm has beautiful detection and identification deflection and fading signal adaptability.

Key words: OFDM; higher order cumulants; higher order moments; rayleigh fading channel; detection