

# 自适应 OFDM 中信号盲检测技术

韩 钢<sup>1,2</sup>, 李建东<sup>1</sup>, 李长乐<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学 综合业务网理论与关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071;  
2. 深圳中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057)

**摘要:** 提出了一种基于高阶累积量的正交频分复用信号子信道调制方式盲检测算法. 该算法利用高阶累积量检测特征实现对子信道调制方式的检测, 所提出的检测特征可抑制高斯噪声的影响. 从理论上证明了高阶累积量检测特征对于子信道的信道衰减和相位旋转具有不变性. 通过计算机仿真评估了正交频分复用信号子信道调制方式盲检测算法的性能, 表明这种算法在慢时变信道下具有很高的调制方式检测性能和良好的稳健性.

**关键词:** 自适应正交频分复用; 信号检测; 调制识别; 高阶累积量

**中图分类号:** TN914.3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-2400(2006)04-0602-05

## Study of blind detection techniques in adaptive OFDM

HAN Gang<sup>1,2</sup>, LI Jian-dong<sup>1</sup>, LI Chang-le<sup>1</sup>

(1. State Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071, China;  
2. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

**Abstract:** A blind detection algorithm based on Higher-order cumulants(HOC) is proposed to detect the modulation scheme for the OFDM subcarriers. Its detection feature is robust to the Gaussian noise and is invariant with respect to the attenuation and the phase rotation induced by subchannels. The invariant property is theoretically proved. The high performance and robustness of the blind detection algorithms are proved by simulation.

**Key Words:** adaptive OFDM; signal detection; modulation recognition; HOC

随着现代通信的发展, 语言、视频等数据通信业务量的巨大增长, 以及移动电话业务的飞速扩展, 通信系统呈现出多样化的趋势. 正交频分复用(OFDM)技术作为新的调制方式, 具有良好的抗码间干扰效果, 可在频率选择性信道中实现高速传输, 是目前研究的热点<sup>[1~5]</sup>.

多数 OFDM 系统为了简化系统, 对于所有的子载波采用固定的调制方式. 自适应 OFDM 传输根据估计得到的信道状态信息自适应改变信号调制参数, 是一种有效提高传输速率的方法<sup>[2~4]</sup>. 对于一个蜂窝网络系统利用自适应调制技术可使系统容量提高, 然而在容量增加的同时, 也增加了其他开销. 为了进一步提高数据的传输速率, 接收机可采用盲信号检测的方法估计接收信号的参数以减少信令的开销<sup>[1]</sup>.

目前估计 OFDM 信号子载波调制方式方面的工作较少, 文献<sup>[4]</sup>提出一种基于信噪比估计的调制方式检测方法用来估计 OFDM 信号的子载波采用的调制方式. 这种检测方法均衡每一子载波接收到的符号, 比较均衡后的符号与每一种调制方式的标准符号并统计误差能量, 选择具有最小能量的一种调制方式为子载波采用的调制方式. 这种方法前提是信道的估计必须准确无误, 这在实际中很难做到. 笔者把累积量识别调制方式的算法<sup>[6,7]</sup>应用到 OFDM 信号中, 提出一种基于高阶累积量的 OFDM 信号子信道调制方式检测算

收稿日期: 2005-08-08

基金项目: 国家自然科学基金和微软亚洲研究院联合资助项目(60372048); 国家自然科学基金重大项目(60496316); 国家“863”计划课题(2005AA123910); 高等学校博士学科点专项科研基金(20050701007); 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目; 教育部科学技术研究重点项目(104171)

作者简介: 韩 钢(1975-), 男, 博士.

法,无须估计信道,具有良好的调制方式检测性能。

## 1 信道模型

信道传播的多径现象是无线通信系统设计和分析中一个重要的问题.通常多径信道模型可建模为 FIR 模型,其冲击响应表示为<sup>[5]</sup>

$$g(k) = \sum_{i=0}^{L-1} \alpha_i \delta(k-i) \quad (1)$$

式中信道 FIR 模型的阶数为  $L$ ,  $\alpha_i, i = 0, 1, \dots, L-1$  是滤波器抽头系数.信道噪声建模为零均值独立同分布复高斯噪声并具有方差  $\sigma^2$ .

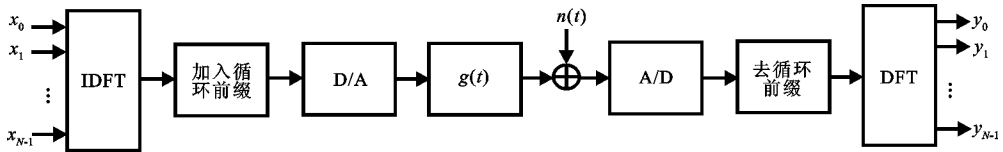


图 1 OFDM 基带传输模型

设 OFDM 自适应收发机工作在相干、同步环境下,接收到的信号已经实现载波同步、定时同步,OFDM 信号加入循环前缀以消除码间干扰的影响.图 1 是 OFDM 基带传输模型,这里假设信道为慢衰落信道,认为信道在一次突发中保持恒定.在这种条件下,系统等效为一组并行相关衰减的瑞利信道<sup>[5]</sup>,如图 2 所示.每一子信道的衰减系数为

$$h_k = G(k/(NT_s)) \quad , \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

其中  $G(\cdot)$  为信道  $g(k)$  的频率响应, $N$  为载波数, $T_s$  为系统采样周期.此时,OFDM 系统以矩阵形式表示为

$$y = Xh + n \quad (3)$$

式中  $y$  为接收向量, $X$  为对角阵,包含传输信号信息; $h$  为信道衰减向量, $n$  为高斯噪声向量.

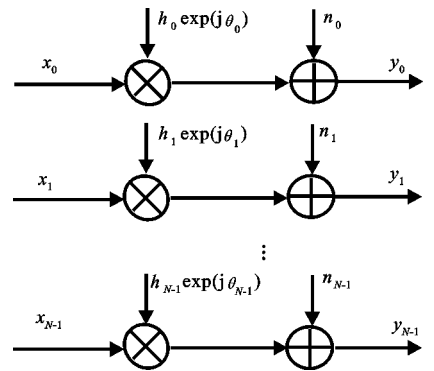


图 2 OFDM 系统的等效并行高斯信道模型

## 2 OFDM 信号子信道调制方式盲检测算法

### 2.1 基于信噪比估计的 OFDM 信号子信道调制方式盲检测算法

OFDM 接收机根据接收到的信号利用盲检测算法估计子信道的调制方式,文献[4]提出一种基于信噪比估计的调制方式检测算法.这种算法把子载波分成子载波组,首先均衡子载波组内每一子载波接收到的符号,以消除信道衰落的影响,并将均衡后的符号与每一种调制方式的标准符号相比较,得到误差能量,然后统计子载波组内所有子载波的误差能量,即

$$e_k = \sum_i (y_i/\hat{h}_i - \hat{y}_{i,k})^2 \quad , \quad k \text{ 为 BPSK, QPSK, 16QAM} \quad (4)$$

其中  $e_k$  为当调制方式为  $k$  时子载波组内所有子载波的误差能量, $y_i$  为第  $i$  个子信道接收到的码元, $\hat{h}_i$  为估计得到的第  $i$  个子信道的衰减因子, $\hat{y}_{i,k}$  为当调制方式为  $k$  时,标准星座图中与接收码元最近的标准码元,选择具有最小能量  $e_k$  的一种调制方式  $k$  为子载波采用的调制方式.

### 2.2 基于高阶累积量的 OFDM 信号子信道调制方式盲检测算法

定义接收信号的累积量为

$$C_{um_m}(y(1), y(2), \dots, y(k)) = C_{um_m}(x(1) + n(1), x(2) + n(2), \dots, x(k) + n(k)) \quad (5)$$

设发射信号和高斯白噪声相互独立,根据累积量的性质,上式又可表示为

$$C_{um_m}(y(1), y(2), \dots, y(k)) = C_{um_m}(x(1), x(2), \dots, x(k)) \quad , \quad m > 2 \quad . \quad (6)$$

从公式可看出, 高斯噪声大于 2 阶的累积量为零, 因此把接收到的含有高斯噪声的非高斯信号变换到累积量域处理, 就可消除噪声的影响. 因此高阶累积量具有良好的抗噪声性能, 广泛用于信号处理中<sup>[6,8]</sup>. 在文献[6]的启发下, 笔者提出一种基于高阶累积量的 OFDM 信号子信道调制方式盲检测算法, 以检测 OFDM 信号每一子信道所采用的调制方式.

根据图 2 所示的并行等效高斯信道模型, 以第  $i$  条子信道为例, 得到的码元同步采样复信号序列可表示为

$$y_i(k) = x_i(k) + n_i(k) = E^{1/2} a_i(k) h_i \exp(j\theta_i) + n_i(k), \quad k = 1, 2, \dots, L; i = 1, 2, \dots, N-1 \quad , \quad (7)$$

其中  $a_i(k)$  为第  $i$  条子信道发送的平均功率归一化的码元序列,  $E$  是信号的平均功率,  $h_i, \theta_i$  分别为第  $i$  条子信道引入的衰减和相位旋转,  $L$  为观察的码元数目,  $N$  是 OFDM 信号的信道数目.  $n_i(k)$  为加性高斯噪声.

信号调制制式的盲检测是通过计算信号累积量的检测特征向量  $F_x$  进行的,  $F_x$  定义为

$$F_x = [f_{x1}, f_{x2}] = [|C_{40}/C_{42}|, |C_{41}/C_{42}|] \quad , \quad (8)$$

其中  $\{C_{4n}, n = 0, 1, 2\}$  是平稳复信号  $x(k)$  的 4 阶累积量, 分别定义为

$$C_{40} = C_{um}[x(k), x(k), x(k), x(k)] = M_{40} - 3 M_{20}^2 \quad , \quad (9)$$

$$C_{41} = C_{um}[x^*(k), x(k), x(k), x(k)] = M_{41} - 3 M_{21} M_{20} \quad , \quad (10)$$

$$C_{42} = C_{um}[x^*(k), x(k), x(k), x^*(k)] = M_{42} - |M_{20}|^2 - 2 M_{21}^2 \quad . \quad (11)$$

公式中  $x^*(k)$  表示信号的复共轭.  $M_{pq}$  代表信号的各阶矩, 定义为

$$M_{pq} = E[x(k)^{p-q}(x^*(k))^q] \quad . \quad (12)$$

在自适应 OFDM 研究中, 笔者采用与文献[3]相同的调制方式集合, 各子载波采用的调制方式集合  $\Omega$  为 {BPSK, QPSK, 16QAM}. 假设各子信道的信号序列  $a_i(k)$  是调制集合  $\Omega$  中独立同分布的零均值复随机序列, 经过简单计算, 平均功率归一化信号累积量的理论值如表 1 所示.

表 1 平均功率归一化信号的高阶累积量

信号	$C_{21}$	$C_{42}$	$C_{41}$	$C_{40}$	$F_x$
BPSK	$E h_i^2$	$-2 E^2 h_i^4$	$-2 E^2 h_i^4 \exp(j 2\theta_i)$	$-2 E^2 h_i^4 \exp(j 4\theta_i)$	$[1, 1]$
QPSK	$E h_i^2$	$-E^2 h_i^4$	0	$E^2 h_i^4 \exp(j 4\theta)$	$[1, 0]$
16QAM	$E h_i^2$	$-0.64 E^2 h_i^4$	0	0	$[0, 0]$

从表中可看出调制检测特征向量  $F_x$  消除了第  $i$  条子信道的信道衰减和相位旋转的影响, 因此检测特征向量  $F_x$  对子信道的信道衰减和相位旋转具有不变性. 另外对于调制集合中  $\Omega$  的各种信号, 调制检测特征向量  $F_x$  取不同的特征值. 因此可利用信号特征向量  $F_x$  和欧氏距离分类方法, 得到 OFDM 信号子信道调制方式盲检测算法的判决准则为

$$\hat{X} = \min_{x \in \Omega} (|\hat{F}_r - F_x|) \quad , \quad (13)$$

式中  $\hat{F}_r$  是从接收的子载波信号中提取的特征,  $\hat{X}$  为判定的信号调制类型.

### 3 性能仿真和分析

利用计算机仿真实验分析基于高阶累积量的 OFDM 信号子信道调制方式盲检测算法性能. 仿真参数为: 子载波数是 128; 时钟频率是 20 MHz; 射频频率为 2 GHz; 码元周期为  $160 T$ , 保护时间为  $32 T$ , 其中  $T$  为时钟周期 ( $1/20$  MHz).

仿真时为了分析笔者提出算法的调制方式检测性能, 信噪比从  $0 \sim 20$  dB, 每 2 dB 评估一次检测概率, 在每一信噪比条件, 128 个子信道分别在调制方式集合  $\Omega$  中随机选取一种调制方式. 接收方检测接收信号每一子信道的调制方式并与发送方相比较, 得到检测性能.

图 3 给出了在高斯信道下, 笔者提出的 OFDM 信号子信道调制方式盲检测算法的性能, 以及观察码元数目不同对信号检测性能的影响. 从图中可看出, 笔者提出的算法可正确检测 OFDM 子信道的调制方式. 当

信噪比为 6 dB、观察数据长度为 200 时,信号正确检测率(DCR)已达到 90%。当信噪比为 10 dB、数据长度为 400 时,DCR 已经接近 100%。图 3 同时给出参考文献[4]中原始算法与笔者提出算法的性能比较,可看到原始算法存在门限效应,在低信噪比下性能较差,而笔者提出算法则具有良好的检测性能。

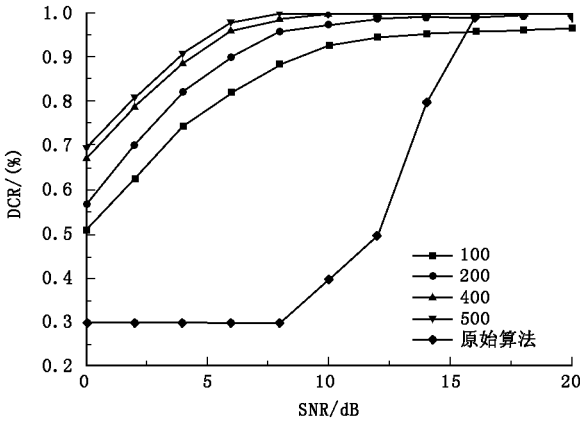


图 3 高斯信道下 OFDM 信号子信道调制方式盲检测算法性能

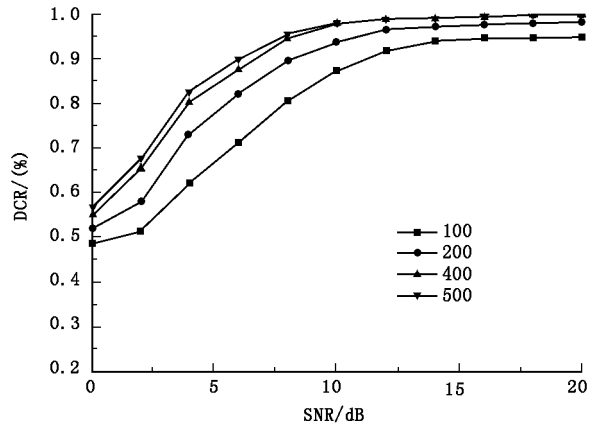


图 4 衰落信道下 OFDM 信号子信道调制方式盲检测算法性能

图 4 给出了在多径衰落信道下,笔者提出算法在不同观察数据长度时的信号检测性能,设定移动台速度 1 km/h,为慢时变信道。信道环境采用 M. 1225 车速环境 A 类信道参数(见表 2),信道模型选用 Grespo&Jimenez 模型<sup>[9]</sup>。

表 2 M. 1225 车速环境的 A 类信道参数

抽头号	相对延时/ns	平均功率/dB	多普勒谱类型
1	0	0.0	Classic
2	310	-1.0	Classic
3	710	-9.0	Classic
4	1 090	-10.0	Classic
5	1 730	-15.0	Classic
6	2 510	-20.0	Classic

从图 4 中可看出,在衰落信道下,算法可正确检测 OFDM 信号各子载波的调制方式,并保持较高的检测性能,验证了笔者提出的算法对于信道引入的衰减和相位旋转具有较好的稳健性。图 5 给出了在信噪比为 15 dB 时,多普勒频移对算法检测性能的影响。随着移动速度不断增大,多普勒频移不断地增加,信道变化越来越快,从图 5 中可看出,在移动台速度为 10 km/h 时,对于不同的观测数据长度,算法的检测概率均在 90% 以上。经过计算,此时的最大多普勒频率为 18.5 Hz,归一化多普勒频移为  $1.48 \times 10^{-4}$ 。同时从图中可看到,随着移动速度的增加,检测性能随着观测数据长度增加有所下降,原因是随着多普勒频移增加,信道变化越来越快,由于信道引起的信号星座图的失真也就越大,导致检测性能下降,因此应用时需要综合考虑多普勒频移和数据观测长度,以获得良好的检测效果。

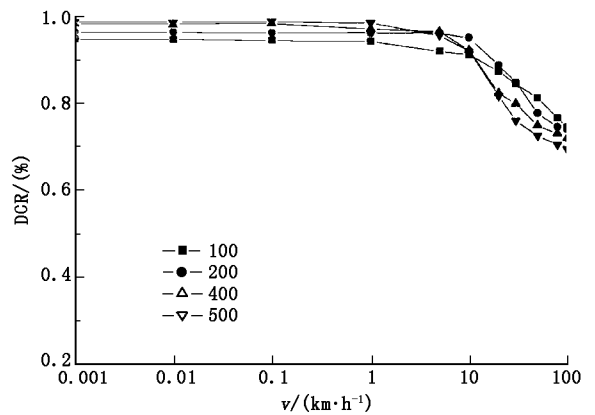


图 5 多普勒频移对性能的影响

## 4 结束语

自适应 OFDM 信号传输中,子信道根据信道质量相应地改变调制方式和编码复杂度等信号参数,参数

的改变需要以信令方式告知接收机,所需信令的开销就很大.为进一步提高传输效率,采用盲信号检测技术对接收信号的调制方式等参数进行估计是一种可供选择的方案,然而对这个问题的研究至今依然非常有限.笔者提出一种基于高阶累积量的 OFDM 信号子信道调制方式盲检测算法,该算法利用高阶累积量检测特征实现对子信道的调制方式的检测,对于子信道的信道衰减和相位旋转具有不变性,并抑制了有色或白的加性高斯噪声的影响.笔者从理论上证明了不变性,并利用计算机仿真评估了盲检测算法的性能,与已有算法在高斯信道下进行了性能比较,同时评估了在多径衰落时变信道中算法的检测性能.仿真表明,笔者提出算法具有很高的信号检测性能和良好的稳健性.

#### 参考文献:

- [1] Lawrey E. Multiuser OFDM[A]. ISSPA'99: Vol 2[C]. Brisbane: IEEE, 1999. 761-764.
- [2] Wong C Y, Cheng R S, Letaief K B, et al. Multiuser OFDM with Adaptive Subcarriers, Bit and Power Allocation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(10): 1747-1758.
- [3] Keller T, Hanzo L. Blind-detection Assisted Sub-band Adaptive Turbo-coded OFDM Schemes[A]. VTC'99(Spring): Vol 1[C]. Houston: IEEE, 1999. 489-493.
- [4] Hanzo L, Wong C H, Yee M S. Adaptive Wireless Transceivers: Turbo-coded, Turbo-equalized and Space-Time Coded TDMA, CDMA and OFDM Systems[M]. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [5] Edfors O, Sandell M, Beek J, et al. OFDM Channel Estimation by Singular Value Decomposition[J]. IEEE Trans on Communications, 1998, 46(7): 931-939.
- [6] Yang S Q, Chen W D. Classification of MPSK Signals Using Cumulant Invariants[J]. Journal of Electronics, 2002, 19(1): 99-103.
- [7] Han Gang, Li Jiandong, Zhang Wenhong, et al. Study of Modulation Recognition Based on MWD and SVM[J]. Journal of Xidian University, 2003, 30(7): 19-24.
- [8] Swami A, Sadler B M. Hierarchical Digital Modulation Classification Using Cumulants [J]. IEEE Trans on Communications, 2000, 48(3): 416-429.
- [9] Gresop P M, Jimenez J. Computer Simulation of Radio Channel Using a Harmonic Decomposition Technique[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 1995, 44(3): 414-419.

(编辑: 郭 华)

## 简 讯

**微软全球副总裁张亚勤博士受聘我校名誉教授** 2006年3月17日下午,微软公司全球副总裁、微软中国研发集团总裁张亚勤博士受聘我校名誉教授仪式在我校举行.张亚勤博士在无线和卫星通讯、网络、数字影像以及多媒体等领域有着深厚的造诣.他拥有50多项美国专利,撰写了10多部专业著作和300多篇学术论文.张亚勤博士是很多高科技公司的董事会成员,参与过多种国际技术标准的制订,是很多国际技术标准委员会的成员.同时担任IEEE杂志及出版物主编.他还被全球20多所知名大学聘为客座或名誉教授.现为微软公司全球副总裁、微软中国研发集团总裁.

**德国达姆施塔特技术大学 Hans Jurgen Karcher 博士来我校讲学访问** 2006年3月26~28日德国达姆施塔特技术大学 Hans Jurgen Karcher 博士来我校进行了讲学访问. Hans Jurgen Karcher 在数学、力学和结构工程学等领域有很深的造诣,具有丰富的实际工程经验,是国际知名的天线结构设计专家.

**美国俄亥俄大学 David Chelberg、刘俊东博士来我校讲学访问** 美国俄亥俄大学电子工程与计算机学院 David Chelberg 博士和刘俊东博士于2006年3月12~15日来我校讲学访问. David Chelberg 博士的研究方向包括计算机视觉、机器人、人工智能、医学图像处理等,他是俄亥俄大学机器人世界杯参赛队的创始人和领队.刘俊东博士的研究方向包括医学图像分析、计算机视觉、计算机图形学和计算几何等.

(转自《西电科大报》2006年第3期)