

# 基于分数间隔均衡器和 ML 算法的新型 DWPM 调制系统

周 雷, 李建东, 张光辉

(西安电子科技大学 信息科学研究所 宽带无线通信实验室, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 在多径衰落信道下, 提出了一种基于 ML 的新型离散小波包调制系统. 利用基于 LMS 算法的分数间隔均衡抑制由多径衰落信道引起的码间干扰并且利用最大似然算法对解调后的码元进行检测. 在多径衰落信道和白高斯噪声情况下, 分析了基于小波包的新型多载波调制系统的传输性能. 仿真结果表明, 所提出的基于小波包的新型多载波调制系统的性能要优于传统的正交频分复用多载波调制系统.

**关键词:** 离散小波包调制; 分数间隔均衡器; 最大似然检测算法; 多径衰落信道; LMS 算法

**中图分类号:** TN919.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2006)04-0509-05

## Novel DWPM system based on fractionally spaced equalizers and the maximum likelihood algorithm

ZHOU Lei, LI Jian-dong, ZHANG Guang-hui

(Lab. of Broadband Wireless Communications,

Research Inst. of Information Science, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** A novel Discrete Wavelet Packet Modulation(DWPM) system based on Fractionally Spaced Equalizers(FSE) and the Maximum Likelihood (ML) algorithm is studied for multipath fading channels. The proposed FSE based on the least mean square (LMS) algorithm can mitigate the detrimental effects of the inter-symbol interference (ISI) caused by the multipath fading channel. The demodulated symbols are detected by the maximum likelihood (ML) algorithm. The transmission performance is analyzed in the multipath fading channel and the Additive Gaussian White Noise (AWGN). Simulation results show that the proposed DWPM scheme can provide greater immunity to multipath fading channels and AWGN than the traditional orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) scheme.

**Key Words:** DWPM; fractionally spaced equalizers; maximum likelihood algorithm; multipath fading channels; LMS algorithm

正交波形编码广泛地应用于复用技术其形式为 OFDM<sup>[1]</sup> 或者 TDM<sup>[2]</sup>. 在当前的研究中, 由于小波包的分解和重构可以产生一系列的自正交和互正交波形, 因此其可用于正交复用. Kon Max Wong 等<sup>[3]</sup> 验证了离散小波包调制对脉冲噪声的抑制能力要强于 TDM 和 OFDM. Kon Max Wong 和 Jiang Feng Wu<sup>[4]</sup> 提出了利用小波包复用技术(Wavelet Packet Division Multiplexing 即 WPDM)中的内在自由度来减小定时错误的影响. Wei Min Yang<sup>[5]</sup> 提出了 WPDM 无线传输系统的两个新方面: 多速率传输服务和抗非平稳噪声, 并且分析了该系统在脉冲噪声和单信道干扰时的性能.

## 1 系统模型

在多径衰落信道下, 基于分数间隔均衡器(Fractionally Spaced Equalizer, 简称 FSE)和最大似然

收稿日期: 2005-08-06

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); 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划; 国家自然科学基金重大项目(60496316); 国家“863”计划课题“认知无线电技术研究”(2005AA123910); 教育部科学技术研究重点项目(104171)

作者简介: 周 雷(1977-), 男, 西安电子科技大学博士研究生.

(Maximum Likelihood, 简称 ML) 算法的离散小波包调制 (Discrete Wavelet Packet Modulation, 简称 DWPM) 系统模型如图 1 所示. 系统将开关  $K_1$  和  $K_2$  置于位置  $P$  处, 然后利用训练序列在最小均方准则下更新分数间隔均衡器的权值; 当分数间隔均衡器达到预值的时候; 系统将开关  $K_1$  和  $K_2$  由位置  $P$  处切换到位置  $Q$  处. 这时, 系统将每个信号帧包含的信息比特映射成正交幅度调制 (QAM) 码元, 然后, 系统将 QAM 码元加载到离散小波包调制 (DWPM) 的子载波上发送出去. 发送端的数据码元通过多径衰落信道和附加白高斯噪声到达接收端. 在接收端, 首先, 接收机利用已训练的分数间隔均衡器来抑制多径衰落信道引起的码间干扰 (Inter-Symbol Interference, 简称 ISI) 对数据码元的影响; 然后, 分数间隔均衡器输出的数据码元再经过离散小波包解调处理; 最后利用最大似然检测算法对离散小波包变换输出的数据码元进行判决; 并将判决后数据码元映射成信息比特.

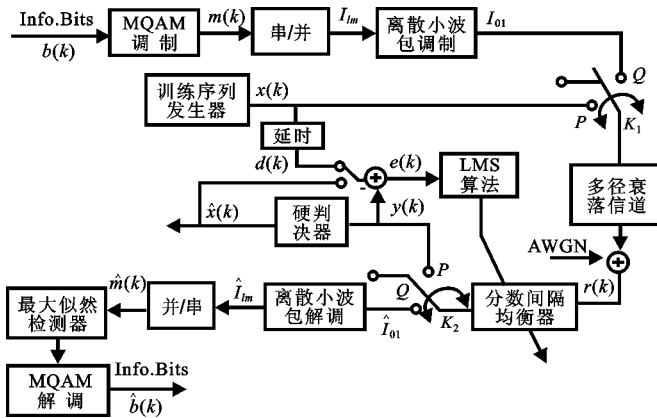


图 1 基于分数间隔均衡器和最大似然算法的 DWPM 系统模型

### 1.1 自适应分数间隔均衡器 (Adaptive Fractionally Spaced Equalizer)

如图 1 所示, 首先, 系统将开关  $K_1$  和  $K_2$  置于位置  $P$  处, 然后利用训练序列在最小均方准则下更新分数间隔均衡器的权值; 如图 2 所示, 分数间隔均衡器利用  $q$  个滤波器来抑制码间干扰并且在每一个子序列或者子信道都提供一个可调节的滤波器. 因而, 实际的均衡器是由  $q$  个滤波器组成的一个矢量. 分别定义输入信号矢量, 输出信号矢量和噪声矢量为

$$x[k] \triangleq [x[k] \cdots x[k-L-M]]^T, \quad r[k] \triangleq [r[k] \cdots r[k-M]]^T$$

和

$$w[k] \triangleq [w[k] \cdots w[k-M]]^T.$$

对于阶数有限的实际信道, 可注意到  $h[k] = 0, \text{ for } k < 0 \text{ or } k > M$ , 则信道的卷积矩阵可表示为

$$H_L(h) \triangleq \begin{bmatrix} h[0] & h[1] & \cdots & h[M] & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & h[0] & & \cdots & h[M] & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & & & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & h[0] & h[1] & \cdots & h[M] \end{bmatrix} \Bigg\}^{L+M+1} \cdot (L+1)q. \quad (1)$$

信道输出的矢量形式可表示为  $r[k] = H_L(h) x[k] + w[k]$ , 分数间隔均衡器参数矢量  $\theta$  为  $\theta \triangleq [\theta[0] \cdots \theta[L]]^T$ , 则均衡器的输出可表示为

$$y[k] = \theta^T r[k] = \theta^T (H_L(h) x[k] + w[k]). \quad (2)$$

系统总的脉冲响应的矢量形式为  $c \triangleq [c[0] \quad c[1] \quad \cdots \quad c[M+L]]^T = H_L(h)^T \theta$ , 则均衡器的输出可改写成

$$y[k] = c^T x[k] + \theta^T w[k]. \quad (3)$$

### 1.2 最小均方 (Least Mean Square—LMS) 算法

如图 1 所示, 在时刻  $k$  的误差信号表达式为

$$e[k] = d[k] - y[k], \quad (4)$$

式中  $d[k]$  是发送的码元. 将式(3)代入式(4)中, 则表达式可改写成

$$e[k] = d[k] - \mathbf{c}^T \mathbf{x}[k] - \boldsymbol{\theta}^T \mathbf{w}[k] = d[k] - \boldsymbol{\theta}^T (\mathbf{H}_L[\mathbf{h}] \mathbf{x}[k] + \mathbf{w}[k]) \quad (5)$$

为了推导最小均方算法, 利用  $e^2[k]$  作为  $e[k]$  的估计值. 那么在自适应迭代处理过程中, 梯度估计可表示为

$$\nabla = \frac{\partial e^2[k]}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \left[ \frac{\partial e^2[k]}{\partial \theta[0]} \quad \frac{\partial e^2[k]}{\partial \theta[1]} \quad \dots \quad \frac{\partial e^2[k]}{\partial \theta[L]} \right]^T = -2e[k](\mathbf{H}_L[\mathbf{h}] \mathbf{x}[k] + \mathbf{w}[k]) \quad (6)$$

为了自适应调节分数间隔均衡器参数矢量  $\boldsymbol{\theta}$ , 系统利用 LMS 算法更新  $q$  个滤波器的权值使得其预判的代价函数达到最小值. 可通过最小均方算法的代价函数推导出随机梯度下降算法, 系统在  $k+1$  时刻可根据随机梯度下降算法更新分数间隔均衡器的参数矢量, 其表达式为

$$\boldsymbol{\theta}[k+1] = \boldsymbol{\theta}[k] - \mu \mathbf{V}[k] \quad (7)$$

式中  $\mu$  表示迭代的最小步长;  $\mathbf{V}[k]$  表示梯度矢量; 根据式(6), (7)可改写成

$$\boldsymbol{\theta}[k+1] = \boldsymbol{\theta}[k] + 2\mu e[k](\mathbf{H}_L[\mathbf{h}] \mathbf{x}[k] + \mathbf{w}[k]) \quad (8)$$

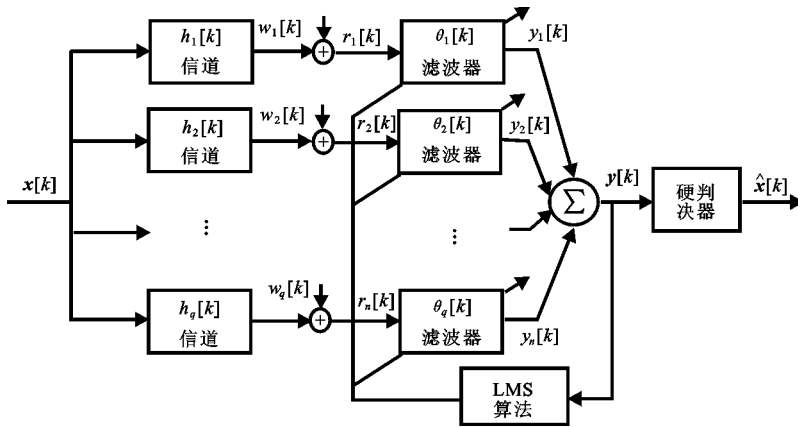


图 2 分数间隔均衡器(FSE)的结构模型

### 1.3 解调处理

如图 1 所示, 当分数间隔均衡器达到预值的时候, 系统将开关  $K_1$  和  $K_2$  由位置  $P$  处切换到位置  $Q$  处. 这时, 式(3)的均衡器输出可改写为

$$\hat{I}_{01}[k] = \mathbf{c}^T \mathbf{I}_{01}[k] + \boldsymbol{\theta}^T \mathbf{w}[k] \quad (9)$$

式中, 分数间隔均衡器输入的信息码元矢量定义为  $\mathbf{I}_{01}[k] \triangleq [I_{01}[k] \quad \dots \quad I_{01}[k-L-M]]^T$ ;  $I_{01}[k]$  为离散小波包调制(DWPM)输出的信息码元序列, 可表示为<sup>[6]</sup>

$$I_{01}[k] = \sum_{l \in L, m \in C_l} \sum_{n \in Z} f_{lm}(k-2^l n) I_{lm}[n] \quad (10)$$

式中,  $L$  表示为离散小波包调制树型结构包含所有级数的集合;  $C_l$  表示为离散小波包调制树型结构第  $l$  级包含的所有终端结点的集合;  $I_{lm}[k]$  表示离散小波包调制的输入码元;  $I_{01}[k]$  表示离散小波包调制的输出码元;  $f_{lm}[k]$  表示由正交镜像滤波器(Quadrature Mirror Filters, 简称 QMF)  $h[k]$  和  $g[k]$  所组成的滤波器. 那么利用离散小波包解调公式  $I_{lm}[n] = \sum_{k \in z} f_{lm}(k-2^l n) I_{01}[k]$  可从离散小波包调制(DWPM)输出的信息码元  $I_{01}[k]$  中恢复出原始的信息码元  $I_{lm}[n]$ . 根据式(9), 离散小波包解调的输出  $\hat{I}_{lm}[n]$  可表示为

$$\hat{I}_{lm}[n] = \sum_{k \in Z} f_{lm}(k-2^l n) \hat{I}_{01}[k] = \sum_{k \in Z} f_{lm}(k-2^l n) (\mathbf{c}^T \cdot \mathbf{I}_{01}[k] + \boldsymbol{\theta}^T \mathbf{w}[k]) \quad (11)$$

### 1.4 最大似然(ML)检测算法

根据最大似然检测算法原理即具有最大似然概率的发送码元就是与解调信号欧式距离最小的那个码元. 令所有可能发送的码元表示为  $I_i$ , 式(11)中的解调信号可改写为

$$\hat{I}_{ML}[k] = \arg \min_{I_i} (\|\hat{I}_{lm}[k] - I_i\|^2) \quad (12)$$

### 2 仿真结果

仿真采用 128 个抽头系数的有限脉冲响应信道模型<sup>[7]</sup>,信道模型的脉冲响应幅值如图 3 所示.该信道能够引起严重的码间干扰 (ISI).离散小波包调制 (DWPM) 采用的小波函数为著名的 Haar 小波函数即  $\psi = [1 \ -1]/2^{1/2}$ ,尺度函数为  $\phi = [1 \ 1]/2^{1/2}$  并且采用 64 个子载波.利用分数间隔均衡器对信道输出进行均衡并且均衡器的采样因子为 2,即  $q = 2$ .仿真中,利用 16QAM 信号作为信道输入,在 16QAM 二维信号空间的矩形星座图中,相邻两点的最小欧式距离为 2.分数间隔均衡器的抽头系数为 57 并且迭代收敛系数为  $\mu = 10^{-4}$ .信道的附加白高斯噪声为 25 dB;系统利用 10 000 个 16QAM 码元来训练均衡器同时更新均衡器的权值.图 4 所示在白噪声为 25 dB 条件下,信道与分数间隔均衡器 (Channel-FSE) 联合脉冲响应的幅值.在多径信道下,基于分数间隔均衡器的 DWPM 系统与基于分数间隔均衡器的 OFDM 系统之间的码元误码率性能的比较如图 5 所示.对于带有 64 个子载波的 OFDM 系统的性能评价也是在相同信道下进行的.仿真结果表明:基于分数间隔均衡器的 DWPM 系统的码元误码率 (Symbol Error Rate, 简称 SER) 性能要优于基于分数间隔均衡器的 OFDM 系统.图 6 所示为基于分数间隔均衡器的 DWPM 系统与基于迫零均衡器的 DWPM 系统之间的码元误码率性能的比较.仿真结果表明,基于分数间隔均衡器的 DWPM 系统的码元误码率 (SER) 性能要优于基于迫零均衡器的 DWPM 系统;并且基于分数间隔均衡器的 DWPM 系统的性能也会受到迭代收敛系数  $\mu$  的影响.如果减小迭代收敛系数  $\mu$ ,那么基于分数间隔均衡器的 DWPM 系统的性能会提高.

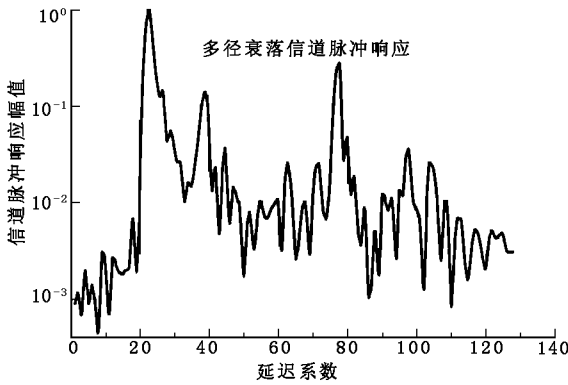


图 3 信道脉冲响应幅值

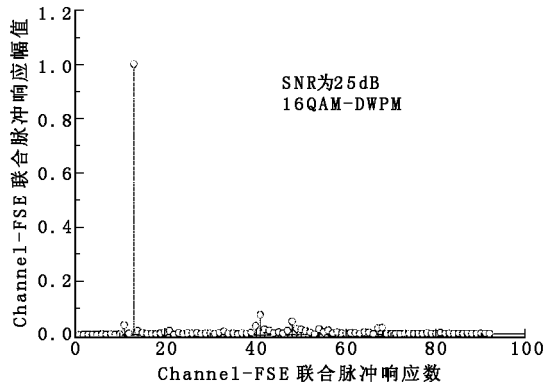


图 4 信道与分数间隔均衡器联合脉冲响应幅值

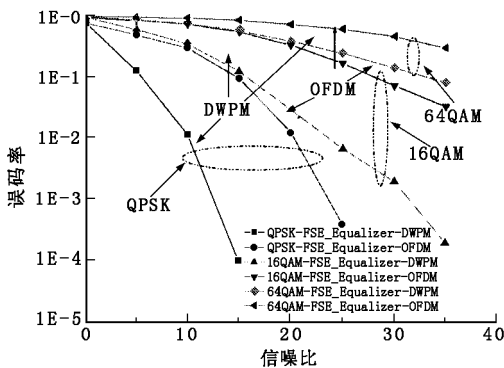


图 5 基于分数间隔均衡器的 DWPM 系统与基于分数间隔均衡器的 OFDM 系统之间的性能比较

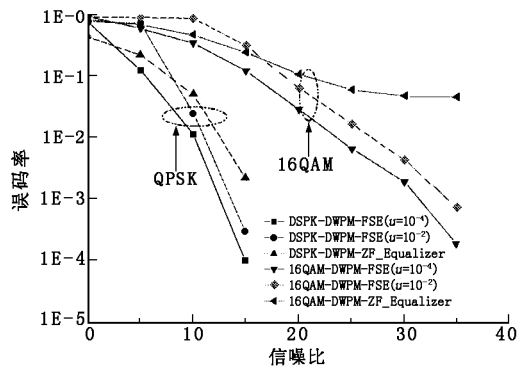


图 6 基于分数间隔均衡器 DWPM 系统与基于迫零均衡器的 DWPM 系统之间的性能比较

### 3 结束语

在多径衰落信道下,提出了一种基于 ML 算法及分数间隔均衡器的新型离散小波包调制 (DWPM) 系统.分析了基于 ML 算法及分数间隔均衡器的 DWPM 系统的传输性能并且将分数间隔均衡器和最大似然

检测算法应用于离散小波包调制(DWPM)系统中. 利用 LMS 算法来获得最佳均衡器权值的分数间隔均衡器相对简单并且易于实现. 仿真结果表明,在多径衰落信道下,提出的 DWPM 系统的码元误码率性能要优于传统的 OFDM 系统;基于分数间隔均衡器的 DWPM 系统的码元误码率性能要优于基于迫零均衡器的 DWPM 系统. 所有系统的性能仿真都是在相同条件下进行的. 由于移动信道具有衰落特性;那么在衰落信道下,离散小波包调制系统的性能决定了基于小波包的新型多载波调制技术适用于移动通信系统.

#### 参考文献:

- [1] Chen Chen, Li Jiandong, Han Gang, et al. ML Estimation of Integer Frequency Offset in OFDM Systems[J]. Journal of Xidian University, 2004, 31(6): 846-849.
- [2] Proakis J G. Digital Communications, 3rd Edition[M]. New York: McGraw-Hill, 1995.
- [3] Wong K M, Wu J F, Davidson T N, et al. Performance of Wavelet Packet Division Multiplexing in Impulsive and Gaussian Noise[J]. IEEE Trans on Communications, 2000, 48(7): 1083-1086.
- [4] Wong K M, Wu J F, Davidson T N, et al. Wavelet packet Division Multiplexing and Wavelet Packet Design Under Timing Error Effects[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1997, 45(12): 2877-2890.
- [5] Yang W M, Bi G G, Yum T S P. A Multirate Wireless Transmission System Using Wavelet Packet Modulation[A]. IEEE VTC[C]. New York: IEEE, 1997. 368-372.
- [6] Zhou Lei, Li Jiandong, Liu Jing, et al. A Novel Wavelet Packet Division Multiplexing Based on Maximum Likelihood Algorithm and Optimum Pilot Symbol Assisted Modulation for Rayleigh Fading Channels[J]. Circuits Systems and Signal Processing, 2005, 24(3): 287-302.
- [7] Johnson C R, Lee H J. On Fractionally-spaced Equalizer Design for Microwave Radio Channels[A]. Asilomar Conf on Signals, Systems, and Computers[C]. New York: IEEE, 1995. 698-702.

(编辑: 李维东)

## 电子装备结构设计实验室通过教育部专家论证

2006年4月7日,我校电子装备结构设计实验室建设计划顺利通过了由教育部科技司组织的专家现场论证.这是继计算机网络与信息安全、宽禁带半导体材料两个教育部重点实验室后,我校的第3个教育部重点实验室.

电子装备结构设计实验室依托我校机械制造及其自动化与机械电子工程专业,拥有博士学位授予权和博士后流动站.

电子装备结构设计教育部重点实验室建成后,将针对当前国民经济发展和国家安全等提出的基础科学问题,在电子装备机电场耦合理论、机电精密控制、电子装备环境保护、现代设计理论与方法等方面展开研究,研究结果可以提升我国电子装备结构设计的技术水平,为国民经济的高速、健康发展和国防技术现代化做出贡献.

(转自《西电科大报》2006年第4期)