

# 高速率通信系统中均衡技术的研究

张 捷, 葛万成

(同济大学中德学院, 上海 200092)

**【摘 要】**文章将原先用于时域均衡中经典的最小均方 (LMS) 算法与单载波频域均衡技术相结合, 提出了使用 LMS 算法来更新频域均衡器的均衡系数, 从而使均衡器的均衡系数根据信道特性自适应地变化。通过仿真实验验证了 LMS 算法在频域均衡技术中的有效性, 并取得了良好的均衡效果。

**【关键词】**单载波频域均衡技术; 时域均衡; LMS 算法

**【中图分类号】**TN91

**【文献标识码】**A

**【文章编号】**1002-0802 (2009) 04-0019-03

## Equalization Technology in High Speed Communication System

ZHANG Jie, GE Wan-cheng

(Chinese-German School for Postgraduate Studies, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**【Abstract】**In this paper, Least Mean Square (LMS) algorithm, which is originally used in time domain equalization (TDE), is combined with Single-carrier Frequency Domain Equalization (SC-FDE) technology. LMS algorithm is used to update the weights of adaptive frequency domain equalizer, so that the weights of frequency domain equalizer are adjusted according to channel characters. The simulation results show that the LMS algorithm is suitable for equalizers in frequency domain and could achieve good performance in equalization.

**【Key words】**TDE; SC-FDE; LMS

### 0 引言

为了消除码间干扰, 降低无线传输的误码率, 均衡器被广泛的应用在通信系统中。在多径频率选择性衰落信道中进行高速率数据传输时, 传统的时域均衡器抽头系数太多, 往往难以实现。而 SC-FDE 系统由于接收端使用 FFT 变换对数据块进行处理, 大大降低了接收端的复杂性, 提高了系统效率。又由于采用的单载波, 其对载频同步和定时误差的敏感度要明显小于 OFDM 系统, 且没有峰均功率高的问题, 是实

现高速率无线数据传输的关键技术之一。本文将时域 LMS 算法应用到 SC-FDE 频域均衡技术上, 希望对其均衡算法提出改进, 以提高算法的性能。

### 1 SC-FDE 系统的基本原理

SC-FDE 系统发送的是调制后的高速率单载波信号, 接收端通过 FFT 和 IFFT 变换来实现频域均衡, 实际上是对接收信号的频域分析。SC-FDE 系统的结构如图 1 所示。

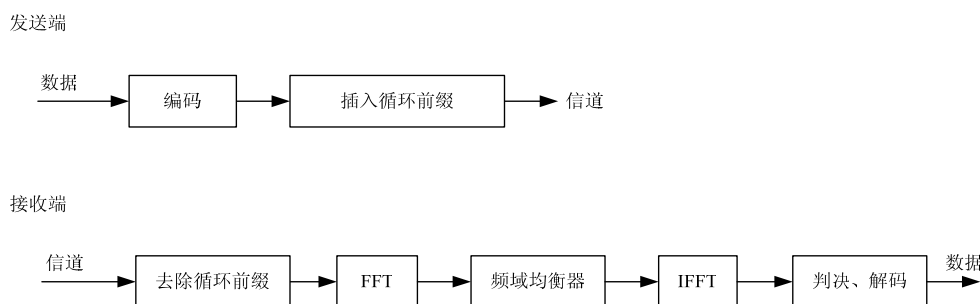


图 1 SC-FDE 系统结构框

收稿日期: 2008-09-11。

基金项目: 德国罗德与施瓦茨公司资助。

作者简介: 张 捷 (1984-), 男, 研究生, 主要研究方向为移动通信中的信号与信息处理; 葛万成 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 德国工学博士, 主要研究方向为信号与信息处理。

在发射端,数据符号经过串并变换成长度为  $N$  的帧,将每帧的最后  $N_g$  个符号复制到帧头作为循环前缀 (Cyclic Prefix, CP),形成长度为  $N+N_g$  的数据块。然后经过并串变换通过多径衰落信道和高斯白噪声信道到达接收端。

在接收端,对接收到的数据块进行删除循环前缀的操作,然后使用 FFT 将信号变换到频域,在频域经过均衡处理后,再通过 IFFT 操作变换回时域进行判决,得到重建的数据符号。

## 2 采用 LMS 算法的频域均衡技术

### 2.1 最速下降法

最速下降法 (Method of Steepest Descent) 是一种古老而又非常有用的通过迭代寻找极值的方法。在自适应滤波器的性能表面搜索过程中,最速下降法沿性能表面最速下降的方向,即负梯度方向,或者性能函数  $\zeta(\bar{w}(n))$  的梯度  $\nabla(n)$  的反方向连续调整滤波器的权矢量  $\bar{w}(n)$ , 梯度矢量可以表示为

$$\bar{\nabla}(n) = \frac{\partial \zeta(\bar{w}(n))}{\partial \bar{w}(n)}, \quad (1)$$

这样,最速下降法可以表示为

$$\bar{w}(n+1) = \bar{w}(n) + \mu(-\bar{\nabla}(n)), \quad (2)$$

式中,  $\mu$  是正值常数,称为收敛因子,用于调整自适应迭代的步长。

### 2.2 最小均方 (LMS) 算法

一般来说, LMS 算法包括两个基本过程:滤波过程和自适应过程。在滤波过程中,自适应滤波器计算其对输入的响应,并且通过与期望响应比较,得到估计的误差信号。在自适应过程中,系统估计误差自动调整滤波器自身的参数。这两个过程共同组成一个反馈环。如图 2 所示。

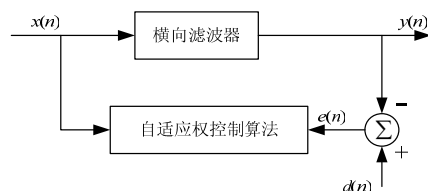


图 2 自适应横向滤波器的原理框

可得到自适应滤波器的误差信号为

$$e(n) = d(n) - y(n), \quad (3)$$

图中,

$$y(n) = \bar{x}^T(n) \bar{w}(n) = \bar{w}^T(n) \bar{x}(n), \quad (4)$$

现在的任务是采用一种方法来估计均方误差函数  $\zeta = E[e^2(n)]$  的梯度  $\nabla(n)$ , 并以此梯度估值  $\hat{\nabla}(n)$  来替代最速下降法中的理论情况下的梯度真值。LMS 算法进行梯度估计的方法是以误差信号每一次迭代的瞬时平方值替代其均方值, 并以此来估计梯度的, 即

$$\hat{\nabla}(n) = \frac{\partial e^2(n)}{\partial \bar{w}(n)}, \quad (5)$$

将式(3)和(4)代入式(5), 得到

$$\hat{\nabla}(n) = 2e(n) \frac{\partial e(n)}{\partial \bar{w}(n)} = -2e(n) \bar{x}(n), \quad (6)$$

用梯度估值  $\hat{\nabla}(n)$  替代最速下降法中的梯度真值  $\bar{\nabla}(n)$ , 有

$$\bar{w}(n+1) = \bar{w}(n) + \mu(-\hat{\nabla}(n)) = \bar{w}(n) + 2\mu e(n) \bar{x}(n), \quad (7)$$

式中,  $\mu$  为自适应滤波器收敛因子。式(7)即为著名的

LMS 算法的滤波器权矢量迭代公式。

## 3 SC-FDE 中 LMS 均衡算法的仿真与分析

采用 Matlab 中的 Simulink 工具进行 LMS 算法频域均衡系统仿真。搭建的系统如图 3 所示。

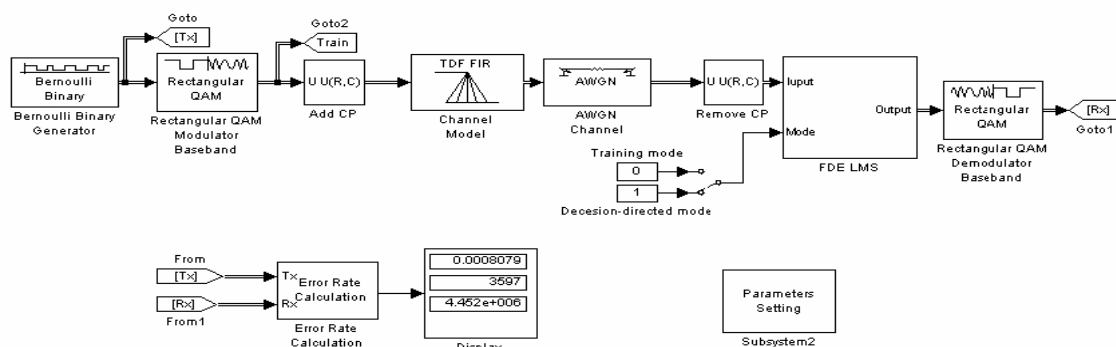


图 3 采用 LMS 算法的频域均衡系统

首先,让系统工作在训练模式,然后把 FDE LMS 模块输出的均衡后信号输入 Simulink 的 Discrete-Time Scatter Plot Scope 模块来观测均衡后信号的星座图。可以观察到输出的数据点由杂乱无章逐渐集中到 16QAM 调制的 16 个点附近。同时 Display 模块中显示的错误数据数也在增加到某一数值后就不再增长。此时的均衡器就已经完成了训练过程,能够正确的均衡接收数据了。接下来改变观察的角度,从信道的频率响应与滤波器系数的对应关系

来考察均衡的过程。本仿真中使用的信道的频率响应如图 4 所示。该曲线是一个频域为全 1 的信号通过该信道得到的。

图 5 给出了训练过程中频域均衡系数的变化过程,从这两张图中可以看到 LMS 的迭代过程使频域均衡的系数从杂乱无章逐渐变化最终到稳定状态,比较该图和图 4,可以发现频域均衡系数的峰值对应于信道频率响应的谷值,即均衡的增益刚好可以补偿由信道所引起的衰落。

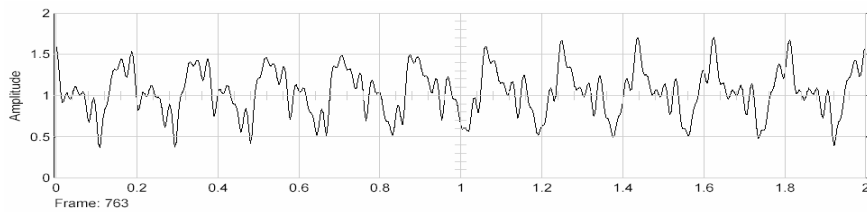


图4 信道频率响应

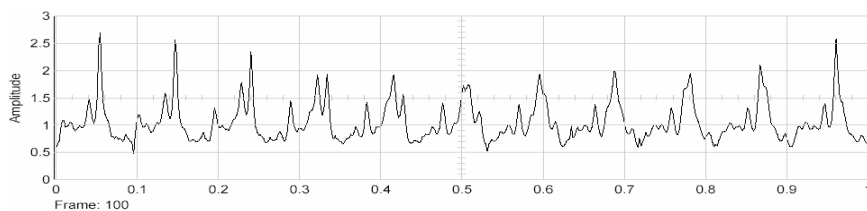
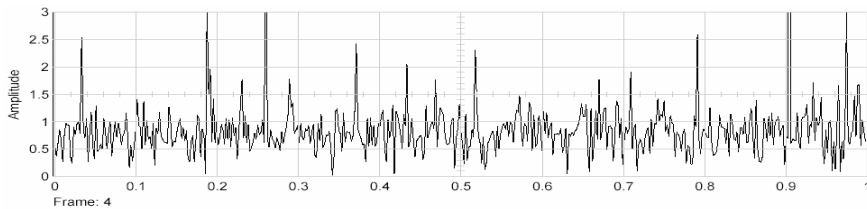


图5 频域均衡器均衡系数变化过程

## 4 结语

单载波频域均衡是一种很有前途的抗多径干扰的方法。在将时域 LMS 算法应用到 SC-FDE 技术中后,通过仿真可以看到,在训练模式下,通过不断的迭代,均衡器的均衡系数逐渐收敛到信道频域响应的互逆,接收信号的星座图也从杂乱逐渐过渡到集中。在完成训练过程进入跟踪模式后,均衡信号的星座图依然集中,接收的信号基本没有误码。训练后的系统可以进行高效的数据传输。本文由于篇幅的关系仅仅是对 SC-FDE 技术中的均衡算法环节进行了初步的研究,SC-FDE 中还有很多关键环节值得深入的研究,譬如循环前缀的选取等。近年来出现的将该技术与 MIMO 技术相结合的研究课题将进一步地提高整个系统的频谱利用率,使其在未来的无线通信领域有更广阔的应用前景。

## 参考文献

- [1] Andress F. Molisch. Wideband Wireless Digital Communications [M]. 许希斌, 赵明, 栗欣, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2002:117-210.
- [2] Proakis J G. Digital Communications (Fourth Edition) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003:577-636.
- [3] David Falconer, Sirikiat Lek Ariyavisitakul, Anader Benyamin-Seeyar etc. Frequency Domain Equalization for Single-Carrier Broadband Wireless Systems[D]. IEEE Communication Magazine, 2002: 58-66.
- [4] Qing Zhang, Tho Le-Ngoc. Channel-estimate-based frequency-domain equalization (CE-FDE) for broadband single-carrier transmission[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2004, 4:449-461.

(上接第18页)

## 3 结语

捕获是扩频通信能够正常能够工作的第一步,设计实现性能优越的捕获系统对扩频通信意义重大,本文设计了抗频偏的捕获算法及自适应门限调整策略并将抗频偏算法与自适应门限调整策略在FPGA中实现,目前本文设计的捕获系统已在实际通信系统中应用,经测试性能良好。

## 参考文献

- [1] 刘芳,高鹏飞,曹叶文. 扩频通信系统中数字匹配滤波器的实现及其捕获性能分析[J]. 山东工业大学学报, 2001, 31(4): 356.

- [2] 赵艳杰. 大频偏长周期PN码捕获算法研究及其DSP实现[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2007.
- [3] B. Persson, D. C Dodds. A segmented matched filter for CDMA code synchronization in systems with Doppler frequency offset[J]. IEEE transactions on communications, 2001, 47(9): 648-653.
- [4] 景卓. 基于软件无线电的扩频系统载波和PN码的联合同步[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.
- [5] 杨波, 王跃科, 杨俊, 宫二玲, 周永彬. 基于软件无线电平台的低轨卫星扩频通信的信号快速捕获和跟踪[J]. 兵工学报, 2004. 25(5): 641-645.