



中文核心期刊

中国科技核心期刊

科学出版社

ISSN 1007-0249

CODEN DYXUF 9

CN 44-1392/TN

电路与系统学报

第十八卷第一期(总第八十九期)

二〇一三年二月

科学出版社

电路与系统学报

JOURNAL OF CIRCUITS AND SYSTEMS

第18卷第1期 Vol. 18 No. 1

2013

中国科学院广州电子技术研究所主办

科学出版社 出版

ISSN 1007-0249



9 771007 024139



02>

电 路 与 系 统 学 报

(Dianluyuxitong Xuebao)

第 18 卷 第 1 期 2013 年 2 月

目 次

论文

- 一种特别适用于片上 LDO 系统的过流保护电路-----胡佳俊, 陈后鹏, 金荣, 王倩, 宋志棠(1)
- 基于差分演化二进制人工蜂群算法的多用户检测-----刘婷, 张立毅, 邹康, 鲍韦韦(5)
- 基于 DTPSO 算法的混合极性 XNOR/OR 电路功耗优化-----俞海珍, 汪迪生, 汪鹏君(11)
- 基于灵敏度分析及 Volterra 级数的非线性模拟电路故障诊断-----韩海涛, 马红光, 谭力宁, 张家良(17)
- 一种基于 Kademia 的 P2P 语音通信模型-----陈立全, 陈景波, 刘海东(23)
- 快衰落信道下修正的卡方-AD 联合检测-----王海泉, 雷绍婷, 沈雷(28)
- 基于电流镜的电流型 PUF 电路设计-----张学龙, 汪鹏君, 张跃军(33)
- BICM-ID 卫星系统的 DFE 均衡及其改进-----崔鹏辉, 杨育红, 曾祥峰, 吕静(38)
- 结合 AIG 和两变量观测策略的 SAT 满足性算法-----张超, 竺红卫, 马琪(42)
- 相干光正交频分复用系统偏振模色散研究-----郝耀鸿, 王荣, 李玉权, 黄卫卫, 李波(47)
- 基于特征矢量稀疏分解的 DOA 估计方法-----李鹏飞, 张旻, 钟子发(53)
- 压缩感知的冗余字典及其迭代软阈值实现算法-----赵慧民, 倪霄(59)
- 基于选择性集成径向基神经网络的来波方向估计-----罗争, 张旻, 陈思剑(65)
- 一种低信噪比损失 SVD 滤波部分频带干扰抑制算法-----刘松, 张水莲, 李世凯, 张伟(70)
- QC-LDPC 码在混沌 DSSS-NBJ 抑制中的性能分析-----李思佳, 毛玉泉, 李波, 裴鑫, 吴崇虎(76)
- 基于空间响应偏差约束的最小二乘宽带波束形成-----陈明建, 罗景青(84)
- 采用多级噪声抵消技术的 CMOS 全差分 LNA 设计-----姚春琦, 毛陆虹, 张世林, 谢生(90)
- 单载波信号波特率参数的宽带估计算法-----赵艳, 罗胜恩, 万坚(95)
- 线性可调全差分 OTA 的实现-----李志军, 曾以成(102)
- 一种基于改进线性规划的 LDPC 码混合译码算法-----陈紫强, 欧阳缮, 李民政, 臧岚, 肖海林(107)
- 高精度的时域频率稳定度测量仪的研制-----屈八一, 周渭, 王江安, 李珊珊(113)
- 包含无关项逻辑函数的固定极性转换-----汪迪生, 汪鹏君, 孙飞, 俞海珍(117)
- 基于 LPFT 时频滤波器的 WVD 交叉项抑制方法-----李秀梅, 杨国青, 高广春(122)
- 高效机载 SAR 实时成像处理系统设计-----杨磊, 刘亚波, 唐禹, 邢孟道(127)
- 基于最小 l_1 稀疏图表学习分类的图像识别方法研究-----蒋业文, 于昕梅(133)
- 一种改进的增维型双边滤波的快速算法-----李俊峰, 杨丰, 黄靖(137)
- 二分之一连续相位切普键控及性能分析-----孙志国, 王鹏宇, 李迎, 郭黎利(144)

OSTBC 信号累积量的特征分析-----	赵知劲, 谢少萍, 王海泉(150)
源信号空间分布对欠定盲源分离可辨识性影响的分析-----	董天宝, 杨瑞民, 杨景曙(156)
3 用户 MIMO 干扰信道中稳健的机会干扰对齐方法-----	赵知劲, 彭庆, 王海泉(161)
基于贝叶斯压缩感知理论的超宽带通信信道估计-----	王蔚东, 杨俊安(168)
一种三阶 Volterra 自适应滤波算法-----	严平平, 赵知劲, 尚俊娜(177)
文氏桥超混沌电路时滞反馈混沌控制-----	潘赛虎, 马正华, 包伯成, 张红琴(182)
基于改进群搜索优化算法的认知无线电协作频谱感知-----	江辉, 陈飞飞, 杜文峰(187)
基于功能复用的抗老化 BIST 设计-----	梁华国, 黄正峰, 杨叔寅, 徐辉, 秦晨飞, 李志杰(193)
高效的用于 CMMB 的 LDPC 解码器设计-----	姜小波, 黎红源, 梁祥泰(199)
一种可配置的老化预测传感器设计-----	梁华国, 汪静, 黄正峰, 李志杰, 徐辉, 李扬(205)
一种消除浮空点的多功能稳定性检测器-----	黄正峰, 李志杰, 梁华国, 汪静, 徐辉, 常郝(212)
基于范数优化的对角加载稳健自适应波束形成-----	史英春, 钟子发, 邹翔, 张旻(218)
阵列系统中采集节点地址的动态分配方法---	蒋佳佳, 段发阶, 陈劲, 王凯, 张超, 常宗杰, 华香凝(224)
一种适用于医学领域的频率可调滤波器-----	李严, 陆云, 张元亨(229)
ICE 超声图像斑点噪声的统计分析-----	李铁鹏, 黄春明, 黄超, 李睿(232)
基于置信传播的视频运动目标检测-----	郭春生, 张大状(237)
目标特性对 MIMO 雷达检测性能影响研究-----	姜秋喜, 刘月平, 孙志勇, 刘文术(243)
MIMO OFDM 系统中一种基于 MMSE 准则的优化型 Turbo-BLAST 检测算法-----	
-----	耿欣, 胡捍英, 敦亚南(249)
网络雷达对 Swerling II 目标检测性能分析-----	刘月平, 姜秋喜, 孙志勇(255)
OTA 正弦振荡器的系统综合法研究-----	李永安(263)
认知网络中基于数据冲突的帧结构优化-----	姬国庆, 杨士亮, 朱洪波(269)
基于 SIFT 和 PCA 的图像感知哈希方法-----	孙锐, 闫晓星, 高隼(274)
基于干扰图的家庭基站分簇频谱分配算法-----	史菊蓉, 朱琦(279)
四翼超混沌系统的动力学特性分析及其电路实现-----	孙克辉, 刘璇, 朱从旭(285)
一种基于投影的 MIMO 物理层安全传输方法-----	张艳语, 朱义君, 张水莲(290)
利用空域稀疏性的 L 型阵下二维波达方向估计-----	崔琛, 王粒宾(297)
非整数倍路径时延下的 OMP 信道估计方法-----	王东梅, 侯晓赞(304)
基于自适应投影矩阵的压缩感知超宽带信道估计-----	王蔚东, 杨俊安(310)
传输线网络瞬态响应灵敏度分析-----	赵进全, 周先, 姜良刚, 樊乃娟(318)
一种简化的 LTE 系统下行信道估计 LMMSE 算法-----	卞青, 黄鹤, 丁美玲(322)
数字通信系统中基于线性分组码的交织器检测-----	张玉, 郑鹏鹏, 杨晓静(327)

一种抑制 ESD 保护电路闩锁效应的版图研究-----	柴常春, 张冰, 杨银堂, 吴晓鹏, 王婧(332)
集成温度传感器的无源超高频标签芯片设计-----	刘伟峰, 庄奕琪, 齐增卫, 唐龙飞, 杜永乾(336)
3D 视频目标分割与快速跟踪-----	朱仲杰, 张慧敏, 王玉儿(343)
基于凸优化的 MIMO 雷达的优化滤波器组设计-----	牛朝阳(348)
电流自动可调低功耗 LED 驱动电路-----	石合地, 曾以成, 李祥(353)
基于 LBP 纹理特征的随机游走图像分割-----	郭艳蓉, 蒋建国, 郝世杰, 詹曙, 李鸿(357)
并行机载双站斜视 SAR ELBF-CS 成像算法-----	冉金和, 张剑云, 武拥军, 李小波(365)
基于 PSO-CF 的有限目标信号盲抽取算法-----	石文斌, 魏锋, 王大鸣, 仵国锋, 崔维嘉(372)
MIMO 系统中基于因子图的联合迭代检测和 LDPC 译码-----	王忠勇, 靳梦瑶, 段琳琳, 王行业(379)

短文

自动变步长 BLMS 自适应均衡的优化实现-----	姜斌, 包建荣(384)
基于 DS-VCC-DDEA 算法的短波信道均衡研究-----	田伟, 周新力, 初建崇, 郁成飞(390)
一种改进的循环谱估计算法-----	刘锋, 郑鹏, 张鑫, 陶然(397)
反激式开关电源控制芯片中的高精度原边反馈技术-----	邱建平, 林玲, 何乐年(403)

研究简报

利用噪声抵消技术设计低噪声放大器-----	张滨, 杨银堂, 李跃进(408)
基于 EVD 分解的 OFDM 系统时变信道估计-----	丁敬校, 王可人, 金虎(412)
分布式 MIMO 系统中最优检测的简化算法-----	窦冬冬, 吕璐, 李兆训, 刘军博(417)
LDPC 码的交替迭代分层置信传播译码-----	姜小波, 李芳苑(423)
一种占空比可调的两相非重叠时钟发生器-----	张学敏, 王卫东(427)
均匀圆阵下的宽带信号 DOA 估计算法-----	曾浩, 朱自华, 李慧君, 王娅(432)
基于时频分布 Rényi 熵特征的雷达辐射源识别-----	白航, 赵拥军, 沈伟, 徐永刚(437)
基于 OSTBC 的有限反馈预编码设计-----	刘顺兰, 刘艳艳, 王海泉(443)
一种适用于相变存储器锁相环时钟的新型电荷泵-----	宏潇, 陈后鹏, 宋志棠, 刘波(449)

自动变步长 BLMS 自适应均衡的优化实现*

姜斌¹, 包建荣^{1,2#}

(1. 杭州电子科技大学 通信工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江大学 信息与通信工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 介绍了自动变步长分块最小均方 (Block Least Mean Square, BLMS) 自适应均衡算法。通过自动变更步长, 改善了算法的收敛与稳态误差性能。针对改进后的快速 BLMS 算法硬件实现特点, 对其中采用重叠保留法的快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transformation, FFT) 模块, 进行了优化, 降低了该算法的计算复杂度。相关仿真表明, 该算法能在典型多径高速传输环境下能快速收敛, 并接近理想性能, 且跟踪信道的性能较好, 部分 FFT 计算过程还得到优化。故该算法在保证性能的基础上, 还减少了计算资源, 具有较大工程实践意义。

关键词: 自适应均衡; 频域滤波; 块最小均方误差; 可变步长; 资源优化

中图分类号: TN911

文献标识码: A

1 引言

在多径无线通信中, 码间干扰 (Inter-Symbol Interface, ISI) 是高速率传输的主要问题之一。而均衡是对抗 ISI 的有效技术, 能克服多径所引起的 ISI。为了在缓变多径信道中, 也能获得较好均衡效果, 需引入自适应机制, 从而业界陆续发展了最小均方 (Least Mean Square, LMS) 等自适应算法^[1,2], 并得到改进: 为了改善计算效率, 提出了频域数字滤波: 在频域上对该滤波器结构进行了研究^[3]; 为了兼顾收敛效率与稳态残差, 提出了基于参考序列与真实值间的误差参量及其扩展的相关函数的变步长更新方案^[4-6], 并发展出众多改进变步长方案: 通过改进 LMS 均衡算法, 使其具有低信噪比条件下较好的收敛性、稳态误差性能及实时运算等综合性能^[7]; 考虑了接收机和均衡器的联合设计, 提出可变步长归一化 LMS (Normalized LMS) 算法, 把接收机信噪比引入到变步长算法, 提高了收敛速度并增大了动态范围^[8]; 根据信号和噪声不相关特点, 用误差自相关估计来调节步长因子, 并引入绝对估计误差扰动量加快自适应滤波器抽头权向量的收敛速度^[9]; 针对变步长算法收敛速度和稳态误差的矛盾, 建立步长与误差间的新非线性函数, 使算法在未知时变等阶段步长增大, 而稳态时步长很小, 克服输入端不相关噪声对步长的影响, 提高性能和收敛性^[10]; 在块最小均方 (Block Least Mean Square, BLMS) 自适应算法上, 通过引入补偿因子, 使步长随着块平均误差变化而更新, 改进其稳态误差性能^[11]。

在算法实现方面, 相关的频域最优分组算法和非约束频域最优分组算法性能虽好, 但需复杂矩阵运算, 不适合实时处理^[12]; 故在块最小均方误差的基础上, 采用沿梯度估值方向更新, 实现了频域 BLMS 自适应算法^[13]。但其硬件实现结构还可进一步优化。

在上述研究基础上, 本文提出了改进变步长的快速 BLMS 算法, 通过简化分阶段渐变步长的方式, 使步长变化适应信道和算法不同阶段, 以更低复杂度折中了稳态误差与收敛速度间的关系。同时, 该算法还优化了实现结构, 消除了循环卷积序列丢弃数据的计算模块, 获得了较好的算法性能和适中实现复杂度。最后, 根据仿真及复杂度分析, 该算法能有效地应用于无线多径通信的应用场合。

2 BLMS 自适应均衡

快速 BLMS 算法主要是对经典 LMS 算法在频域上的改进。该改进可使其适用于高速传输场合,

* 收稿日期: 2012-06-04 修订日期: 2012-11-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61001133, 61102066); 中国博士后科学基金 (2011M500999)

通信作者: E-Mail: ibaojr@zju.edu.cn

避免因时域均衡器因抽头个数多造成的延迟过大问题。另外, 在 BLMS 算法基础上, 还可在变步长和资源优化等两方面进行进一步改进。

FFT 算法为 BLMS 算法中快速卷积运算提供了高效计算手段。BLMS 算法流程如下^[2,3]:

根据最佳效率的 50%重叠保留法, 可将滤波器 M 个抽头权值用等量的零来填充, 并用 N 点 FFT 变换计算。其中: $N=2M$ 。则 $N \times 1$ 均衡器补零后系数 FFT 变换后为:

$$\hat{W}(k) = FFT \begin{bmatrix} \hat{w}(k) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $\hat{w}(k)$ 为抽头权向量; 0 为 $M \times 1$ 的零向量, $FFT[\cdot]$ 表示快速傅里叶变换。因 50%重叠保留法, 频域权向量 $\hat{W}(k)$ 的长度是时域权向量 $\hat{w}(k)$ 长度的两倍。令:

$$U(k) = diag\{FFT[u(kM-M), \dots, u(kM-1), u(kM), \dots, u(kM+M-1)]\} \quad (2)$$

其中, $u(k/M)$ 为输入数据; $U(k)$ 为输入数据的 FFT 变换。该式表示对输入数据的两个相继子块进行 FFT 变换得到一个 $N \times N$ 对角阵。将重叠保留法用于卷积计算, 得到 $M \times 1$ 向量:

$$y^T(k) = [y(kM), y(kM+1), \dots, y(kM+M-1)] = IFFT[U(k)\hat{W}(k)] \quad (3)$$

其中, $IFFT[\cdot]$ 表示逆 FFT 变换。式 (3) 中只有最后 M 个元素被保留, 因最前 M 个元素都是重复的循环卷积结果。

对于第 k 块, 定义 $M \times 1$ 期望响应向量及相应 $M \times 1$ 误差信号向量分别如下:

$$d(k) = [d(kM), d(kM+1), \dots, d(kM+M-1)]^T \quad (4)$$

$$e(k) = [e(kM), e(kM+1), \dots, e(kM+M-1)]^T - d(k) - y(k) \quad (5)$$

在式 (3) 所述线性卷积中, 最前的 M 个元素已从输出中丢弃。将误差信号向量 $e(k)$ 变换到频域得:

$$E(k) = FFT \begin{bmatrix} 0 \\ e(k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

线性相关本质就是线性卷积的“翻转”。故将重叠保留法用于线性相关, 可得:

$$\phi(k) = IFFT[U^H(k)E(k)] \text{ 的最前 } M \text{ 个元素} \quad (7)$$

在式 (3) 所示的线性卷积下丢弃了最前 M 个元素, 则在式 (7) 中可舍弃其最后 M 个元素。

最后, 考虑到滤波器抽头权向量更新的过程, 及式 (1) 所示的频域权向量 $\hat{W}(k)$ 定义中的时域权向量 $\hat{w}(k)$ 后的 M 个零元素, 得权系数更新的频域表示如下:

$$\hat{W}(k+1) = \hat{W}(k) + \mu FFT \begin{bmatrix} \phi(k) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, μ 为均衡器系数更新步长。而式 (1) 到式 (8) 则定义了一个完整的快速 BLMS 算法流程。

3 BLMS 算法改进与资源优化

根据上述快速 BLMS 算法原理及分析, 可得相关的信号流程图结构如图 1 所示。由图 1 可见: 在均衡过程中, 算法受均衡器自身系数更新步长影响; 另外, 图中有较多采用重叠保留法的 FFT 模块, 且部分计算数据需要丢弃或用 0 替代。故可减少相关 FFT 模块中部分冗余资源, 以减少计算量和实现复杂度。图 1 也标记了该算法在计算效率与资源使用上的改进, 并分别在以下内容描述:

3.1 BLMS 算法的自适应变步长改进

影响均衡算法性能的参数主要有均衡器系数更新步长。它部分决定了均衡算法的收敛速度与收敛

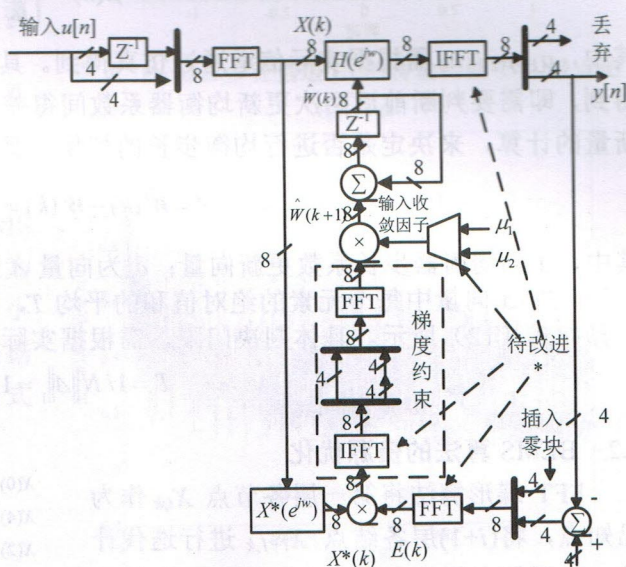


图 1 快速 BLMS 算法的信号流程图

稳态误差性能。由相关分析得^[1]：在一定范围内，均衡器系数更新步长越大，则均衡收敛的速度越快。但此时其稳态误差性能越差，即较大的步长，使均衡器系数更新波动幅度变大，造成不能较高精度的跟踪信道的传输函数。反之，更新步长越小，则均衡收敛速度越慢，但其跟踪效果较好，残余的稳态误差较小。

对于固定步长 BLMS 自适应均衡算法，其收敛速度和失调量是一对固有矛盾：步长大时，收敛快但失调量大；步长小时，则相反。解决该矛盾的方法是采用可变步长，但不宜变化过多，而增加判断切换的计算量。在理论上，可设变步长的更新公式为^[8]：

$$\mu(n) = \alpha(n-1) + F(n) \quad (9)$$

其中， α 为衰减系数，且有 $0 < \alpha < 1$ ； $F(n)$ 是信噪比的函数。故 $\mu(n)$ 是由衰减项加上信噪比函数项共同决定：当处于训练阶段时，衰减项起主导作用，使均衡器快速衰减；当基本收敛后， $F(n)$ 起主导作用，使均衡器能适应各种信噪比环境。

该算法性能虽好，但计算复杂，不利于工程实现。故本文在该理论基础上，综合考虑了均衡器系数更新步长所带来的影响，可采用新准则的变步长方案，来有效地折中吸取步长大小的特点及信噪比影响，提高均衡效果。通常，经过对实际多径信道的仿真，来确定均衡器系数更新步长的值：首先，采用较大的均衡器系数更新步长，使算法快速进入收敛状态。然后，则在该收敛状态情况下，将系数更新步长快速切换到较小的值，实现综合性能较好的效果。同时，还需要采用算法来估计均衡器达到较好收敛的状态点，以便在算法达到收敛效果后，及时切换均衡器系数更新步长。在传统快速 BLMS 算法中，可控步长只有固定值 μ 。而本文采用变步长来解决收敛速度和失调量的矛盾。

设变步长的更新公式为：

$$\mu(n) = \begin{cases} \mu_1, & n < n_0 \\ \mu_2, & n \geq n_0 \end{cases} \quad (10)$$

其中， $\mu_1 > \mu_2$ ； n_0 需根据实际信道通过仿真得到。具体可通过判断均衡器系数的均方差是否达到稳态而得到，即需要判断前后两次更新均衡器系数间得差值的均方值，来判决是否收敛。即通过式 (8) 中更新量的计算，来决定是否进行均衡步长的切换。具体，可用式 (11) 来计算步长切换点：

$$\Delta = \hat{W}(k) - \hat{W}(k) = \mu FFT \begin{bmatrix} \phi(k) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中， Δ 为均衡器步长系数更新向量； δ_i 为向量 Δ 中的元素，且 $1 \leq i \leq N$ 。通过计算 Δ 的 1-范数 $\|\Delta\|_1$ 的平均，即 Δ 向量中每个元素的绝对值和平方的平均 T ，即可作为判断是否进行步长切换的判决门限。相关计算如式 (12) 所示。具体判决门限，需根据实际信道由仿真确定。

$$T = 1/N \|\Delta\|_1 = 1/N \cdot \sum_{i=1}^N |\delta_i| \quad (12)$$

3.2 BLMS 算法的资源优化

FFT 蝶形算法将第一层各节点 $X_{i,k}$ 作为已知点，将 $(i+1)$ 层各节点 $X_{i+1,k}$ 进行迭代计算，直至算出最后一层为止。其中，在部分输出数据丢弃或部分输入数据为 0 的计算中，可按算法要求整理出所有冗余度计算节点，并加以优化，得到优化后的均衡算法。

3.2.1 输出数据丢弃的 FFT 模块优化

按时间抽取 FFT 蝶形算法为顺序输出，以下以 8 点 FFT 蝶形计算为例，说明在一般数据输出丢弃过程中，可减少的 FFT 计算量。对输出丢弃节点进行简化，得简化结构如图 2 所示。

其中，前 4 个元素是循环卷积的结果，只需保留最后 4 个元素。故图 2 虚框中虚线箭头为可省去的结构。这样既可在将简化滤波器结构，也可降低算法的复杂度。具体可减少 4 次加/减法运算。

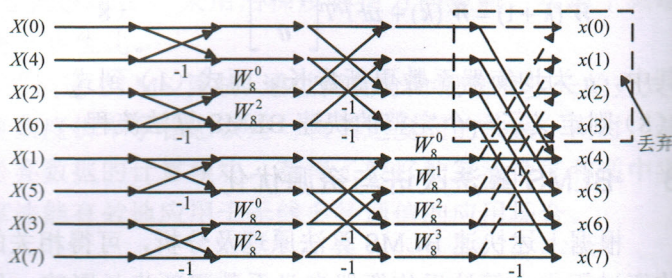


图 2 8 点按时间抽取蝶形 FFT 图解

3.2.2 输入数据为 0 的 FFT 模块优化

按频率抽取 FFT 蝶形算法为顺序输入, 以下仍以 8 点 FFT 蝶形计算为例, 说明在前一半输入数据为 0 的过程中, 可减少的 FFT 计算量。根据 BLMS 算法的流程, 有前 M 个数据输入为 0, 或后 M 个数据输入为 0。根据该要求, 对这些输入为 0 的节点进行了简化, 得简化结构如图 3 所示。

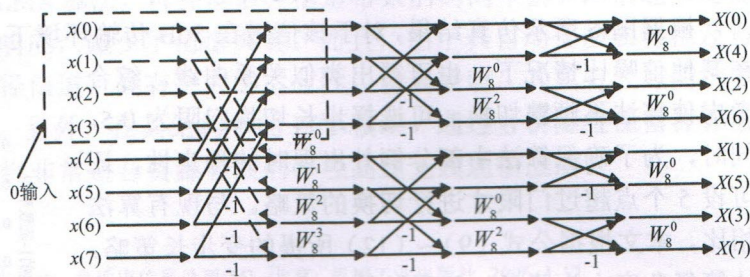


图 3 8 点频率抽取蝶形 FFT 图解

图 3 中虚线箭头为可省去的结构。因 0 不参与计算, 故可减少 8 次加/减法运算。另外, 对于后半输入数据为 0 的 BLMS 结构, 由类似图 3 的 FFT 结构图, 也可得相同计算量减少的结论。

4 算法仿真与结果分析

4.1 仿真参数设置

算法采用如图 1 所示的结构进行仿真, 仿真参数设置如下: 调制为正交移相键控 (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK); 信道为多径高斯白噪声信道。其中, 信噪比 (E_b/N_0) 选取的范围为: 0-10dB; 多径信道采用经典 Proakis 多径传输信道 III, 其信道冲击响应为 $\{[0.227, 0.460, 0.688, 0.460, 0.227]\}^{[14]}$ 。该信道传输函数的零-极点图如图 4 所示。

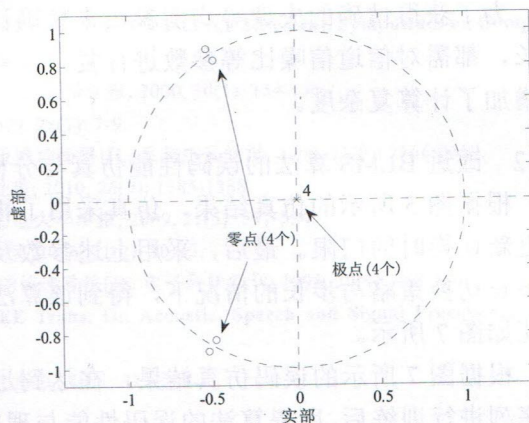


图 4 Proakis 多径信道 III 的传输特性 (零-极点图)

因该信道传输函数的零点非常接近单位圆, 易造成较大的码间干扰且难以均衡。而且该传递函数的零-极点, 不全在单位圆内, 属于非最小相位系统, 为不稳定传输系统; 均衡器抽头长度为 32, 可在 BLMS 算法中采用 16 点的 FFT 计算模块, 并设置初始值为长度 16 的向量 $[1, 0, \dots, 0]^T$; 均衡器步长采用 3.1 小节所示的自动更新步长算法, 且其步长更新门限根据实际信道环境由相关仿真决定, 步长的取值根据式 (9), 可分别取 μ_1 和 μ_2 为: 0.03 和 0.0015。

4.2 仿真结果及分析

4.2.1 BLMS 算法的步长变更门限

根据 3.1 节的讨论, 以下对固定步长 BLMS 自适应均衡算法, 在选择不同步长时的收敛速度和失调量进行了仿真。算法中采用不同的收敛步长 μ 进行仿真, 分析其对收敛速度和稳态性能的影响。

在图 5 中, 深黑色曲线表示 $\mu=0.015$ 时算法的收敛情况; 灰色曲线表示 $\mu=0.3$ 时算法的收敛情况。该仿真结果表明: 在步长较大时, 收敛快但失调量大; 在步长小时, 则反之。故采用 3.1 节所提的思路, 采用 2 个可变步长的步长, 但不宜变化过多, 而增加判断切换的计算量。另外, 本方案在该基础上, 通过仿真来计算变换步长所需的门限, 即采用计算量较小的平均参数——式 (11) 所示 Δ 的 1-范数 $\|\Delta\|_1$, 即 Δ 向量中每个元素的绝对值的和, 可作为判断是否进行步长切换的门限。该门限可根据实际信道由仿真确定。如采用上述信道, 可得在不同迭代次数及不同步长下, 均衡器频域权向量误差 1-

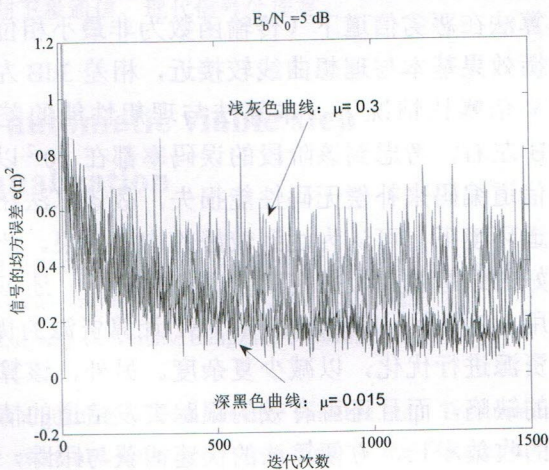


图 5 收敛步长对均衡器性能的影响

范数值的平均值的仿真结果如图6所示。

根据图6所示仿真结果,对于该信道在5dB传输环境下,可选式(12)所示步长切换门限 T 为0.45。在其他信噪比情况下,也可得出类似关系曲线。综合考虑使算法不频繁切换,可选择步长切换门限为0.5。同时,为了确保算法中部分例外出现时的稳定性,还可设5个点超过门限才进行切换的策略。与现有算法相比,本文根据公式(9)~(12)所提的变步长策略,计算复杂度大为降低:仅需计算2个近似的不同阶段的收敛步长值,而最后所得均衡信号均方误差及抽头系数差的1-范数平均,都非常接近理想值,计算量大为降低,方便工程实现。而文献[7~11]所用变步长算法,为了获得精确的失调等均衡参数来精确计算最佳步长,都需对信道信噪比等参数进行复杂计算,极大地增加了计算复杂度。

4.2.2 改进 BLMS 算法的误码性能仿真与分析

根据图5所示的仿真结果,仿真采用了相应的步长更新切换时的门限。最后,采用上述参数及新提出的步长切换策略与步长的情况下,得到该算法的误码性能如图7所示。

根据图7所示的误码仿真结果,在达到足够多参考序列进行训练后,所提算法的误码性能与理想无ISI的QPSK性能曲线非常接近:在较低信噪比情况下,本算法在恶劣信道下(传输函数为非最小相位系统),均衡效果基本与理想曲线较接近,相差3dB左右;在较高信噪比情况下,本算法与理想性能的差距也在4dB左右,考虑到该阶段的误码率都在 10^{-2} 以下,可用信道编码来补偿无码性能损失,故该算法在该恶劣信道环境下,可认为达到较好的均衡效果。此外,还通过自动变步长更新,还将对缓变的时变信道有较好的跟踪效果,并在突发通信情况下,还可快速自动切换步长,能及时跟踪信道变化。而且,还可采用3.2节所示的BLMS中FFT计算资源的优化,但不影响BLMS算法的流程,只是将部分冗余计算资源进行优化,以减少复杂度。另外,该算法还能根据步长的切换策略,不仅能克服固定步长收敛慢的缺陷,而且还可有效的跟踪突发信道的情况,使其在均衡器系数误差较大的情况下,及时切换到大的收敛步长,方便算法的快速捕获与跟踪,而具有较大的实用性。另外,根据上述该算法收敛性分析及相关的对照算法仿真,该算法相对于现有算法,仍可近似达到类似的误码率性能,但该算法的实现复杂度相对较低,能满足无线多径信道抗ISI的工程应用需求。

在计算复杂度方面,根据3.2节的FFT模块在0输入或数据丢弃情况下的计算容易改进的分析,结合图1所示BLMS图,如设均衡器抽头为 $2M$,且分别有2个FFT模块需要丢弃一半数据,且有2个FFT模块需要输入一半为0的数据,则与传统BLMS算法相比,可节省加/减计算量为: $6M$ 。但是,为了计算门限,本算法又增加了 $2M$ 次的均衡器频域抽头的绝对值计算和加法计算,还附加一次比较计算,如忽略计算量少的比较及取绝对值计算,则还能减少 $4M$ 次加/减计算。

5 结束语

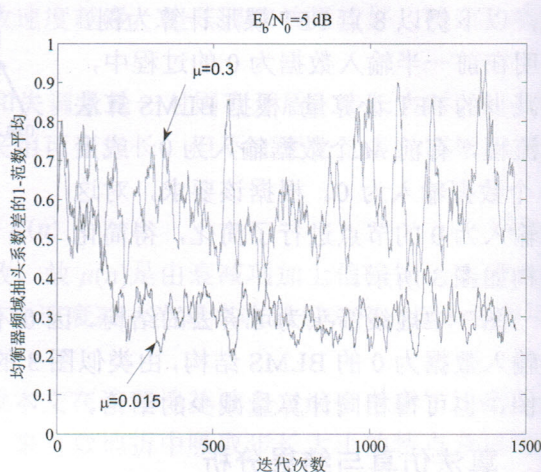


图6 收敛步长及迭代次数对均衡器频域权向量的影响

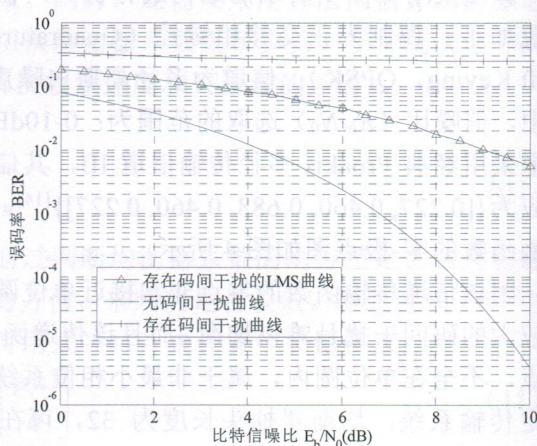


图7 BLMS 算法的误码性能曲线

本文所介绍的改进自动变步长快速 BLMS 算法, 可补偿多径信道带来的码间干扰。即信道和均衡器传输函数的卷积, 近似等效为单位冲激响应, 减少了信道失真。而且, 由于其自动变步长特性及自适应均衡的本质, 可有效跟踪缓变时变多径信道, 具有更大的适应性。仿真表明: 其具有较好的抗多径效果, 接近理想性能, 且收敛速度较快。另外, 在其结构中的 FFT 模块, 通过分析重叠保留计算流程, 还能节约丢弃及填零部分计算资源, 将非常适合资源有限的多径高速无线通信应用。

参考文献:

- [1] Bernard Widrow, Samuel D. Stearns[美], 王永德, 龙宪惠译. 自适应信号处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 1-12.
- [2] Simon Haykin [美], 郑宝玉, 等译. 自适应滤波器原理(第4版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006. 1-9.
- [3] Mikhael W B, Spanias A S, A fast frequency-domain adaptive algorithm [J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems*, 1987, CAS-34(10): 1152-1160.
- [4] Khaled F. Abusaleem and Yu Gong, Variable step LMS algorithm using the accumulated instantaneous error concept [A]. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2008* [C]. WCE 2008, 2008-07. 1-4.
- [5] Wang J, Zhang B. Design of adaptive equalizer based on variable step LMS algorithm [A]. *Proc. of the Third Int. Symposium on Computer Science and Computational Technology (ISCSCT'10)* [C]. 2010-08. 256-258.
- [6] 李欣, 赵犁丰, 奕春华, 陈国良. 一种改进的变步长 BLMS 算法[J]. 青岛海洋大学学报, 2000, 30(1): 154-158.
- [7] 王松, 穆道生, 刘浩然. 一种改进的 LMS 均衡算法研究[J]. 测控技术, 2009, 28(1): 7-9.
- [8] 陈晓挺, 赵国栋, 金萍, 刘会杰, 梁旭文. 一种变步长 NLMS 自适应判决反馈均衡器[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(9): 2666-2669.
- [9] 靳翼, 邵怀宗. 一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法及其仿真[J]. 信号处理, 2010, 26(9): 1385-1388.
- [10] 李方伟, 张浩. 一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法及其仿真[J]. 重庆邮电大学学报, 2009, 21(5): 591-594.
- [11] 肖海英, 何方白. 一种时域变步长 BLMS 自适应算法[J]. 西南科技大学学报, 2006, 21(2): 30-35.
- [12] 何汉翔, 尹俊勋, 欧阳景正. 约束和非约束频域分组 LMS 自适应滤波器的快速算法[J]. 电子科学学报, 1998, 20(4): 480-480.
- [13] Clark G A, et al. Block implementation of adaptive digital filters [J]. *IEEE Trans. On Acoustic, Speech and Signal Processing*, 1981, ASSP-29(3): 744-754.
- [14] John Proakis[美], 张力军, 等译. 数字通信(第5版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011. 413-509.

作者简介: 姜斌 (1980-), 男, 浙江杭州人, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 无线通信、自适应信号处理等; 包建荣 (1978-), 男, 浙江杭州人, 博士后, 讲师, 研究方向: 无线与卫星通信、现代信号处理等。

Optimized implementation of automatic viable step BLMS adaptive equalization

JIANG Bin¹, BAO Jian-rong^{1,2#}

(1. School of Telecommunication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. Institute of Information and Communication Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This paper introduces a block least mean square (BLMS) algorithm with automatic variable step. By automatic variable step method, its performances of convergence and stable error are improved. According to the features of the implementation of the improved variable step fast BLMS algorithm, the Fast Fourier Transformation (FFT) module with overlap saving method is optimized for realization. Thus it reduces the computation complexity and saves much computation resources, which make it very efficient in practice, especially in resource limited multi-path high data-rate wireless communications.

Key words: adaptive equalization; frequency domain filter; block least mean square (BLMS); variable step; resource optimization

电路与系统学报
DIANLUYUXITONG XUEBAO
(双月刊, 1996年创刊)
第18卷 第1期 2013年2月

JOURNAL OF CIRCUITS AND SYSTEMS
(Bimonthly, Started in 1996)
Vol.18 No.1 February, 2013

编辑 中国科学院广州电子技术研究所
《电路与系统学报》编辑部
地址: 广州市先烈中路100号
邮政编码: 510070
电话: (020) 87680717
[Http://dlytxb.periodicals.net.cn](http://dlytxb.periodicals.net.cn)
<http://dlyxt.chinajournal.net.cn>
电子邮件: jcas@giet.ac.cn

主编 陈衍仪
主管 中国科学院
主办 中国科学院广州电子技术研究所
出版 科学出版社
北京东黄城根北街16号 邮政编码: 100717
电话: 010-64034563
E-mail: journal@cspg.net

印刷 广东省商业印刷厂
发行 中国科学院广州电子技术研究所
国外发行: 中国国际图书贸易总公司
地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044

Edited by Editorial Office of Journal of Circuits and Systems,
Guangzhou Institute of Electronic Technology, CAS
Add: Guangzhou Institute of Electronic Technology,
Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China
Tel: (+8620) 87680717
[Http://dlytxb.periodicals.net.cn](http://dlytxb.periodicals.net.cn)
<http://dlyxt.chinajournal.net.cn>
E-mail: jcas@giet.ac.cn

Editor-in-Chief CHEN Yan-yi
Administrated by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Guangzhou Institute of Electronic Technology, CAS
Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
Tel: (+8610) 64034563
E-mail: journal@cspg.net

Printed by Guangdong Commercial Printing House
Distributed by Guangzhou Institute of Electronic Technology, CAS
Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P.O.Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 44-1392/TN

国外发行代号: BM4793

国内定价: 75.00元

国内外公开发行人