一种浅海水声信道分数间隔自适应均衡算法研究

孙丽君 13, 连卫民 2, 孙 超 3

(1.河南工业大学信息科学与工程学院,郑州 450001;2.河南高等商业专科学校计算机系,郑州 450045;3.西北工业大学声学工程研究所,西安 710072

摘要:水声信道是最为复杂的数据通信环境之一,而具有重要军用和商用价值的浅海水声信道,其多径与频散效应 更为严重。在浅海水声数字通信中,普遍存在着码间干扰和码内干扰效应,严重影响了水下通信的速度和质量。在判 决反馈结构的基础上,采用分数的方法,提出了一种适用于浅海水声信道的自适应均衡算法,并通过计算机仿真实验 与整数方法进行了性能对比。传输信号采用正交相移键控调制方式,以有效利用有限通信带宽。仿真结果表明,该算 法获得了较快的收敛速度和较小的稳态误差,提高了水声通信的有效性及可靠性,因而具有良好的工程应用价值。 关键词:水声通信;自适应均衡,分数间隔,判决反馈,码间干扰

中图分类号:TN911.5 文献标识码 A 文章编号:1000-3630(2007)-01-0137-04

Adaptive fractionally spaced equalization algorithm for shallow water acoustic channels

SUN Li-jun^{1,3}, LIAN Wei-min², SUN Chao³

School of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001;
 Department of Computer, Henan Business College, Zhengzhou 450045;

3. Institute of Acoustic Engineering, Northwestern Polytechnic University, Xi an 710072, China)

Abstract: An underwater acoustic channel is a complicated medium for data communications, especially in shallow coastal regions, which is important in military and commercial applications. Signals sent through a shallow water channel are often corrupted by inter-symbol interference (ISI) and intra-symbol interference, seriously affecting the underwater acoustic communication quality. We propose an adaptive equalization algorithm based on the decision feedback structure, and using a fractional sampling method. The performance is compared with the baud-spaced adaptive equalization in computer simulations. Quadrature phase shift keying (QPSK) signaling is employed to make efficient use of the available bandwidth. Mont Carlo simulations are performed, showing that the proposed algorithm with high convergence rate and low steady state error results in improved communication effectiveness and reliability.

Key words: underwater acoustic communication; adaptive equalization; fractionally-spaced; decision feedback; inter-symbol interference

收稿日期 2005-11-26 ;修回日期 2006-02-27

基金项目 河南省自然科学基金项目(0511011700),河南省教育厅 自然科学计划资助项目(200510463007),河南省杰出青年 科学基金项目,河南工业大学博士基金。

作者简介 :孙丽君(1968.5-),女 ,河南人 ,汉族 ,博士 ,副教授 ,硕士生 导师, 研究方向 :信号与信息处理、水声通信、数字通信等。 通信作者 :孙丽君 ,E-mail:sunlijunzz@163.com



近年来,水声通信在军用及商用领域得到了广 泛关注,如水下遥测、遥控,语音和图像传输,潜艇间 通信等。然而由于其高度的散射响应和快速的时变 性 水声信道对于数字信号来讲,是一种极具挑战性 的传输媒质^[1]。在带宽严重受限的水声信道进行高 速数字通信时,由于多径传播而导致的码间干扰 (IS: intersymbol interference),使传输信号发生畸 变,从而在接收端造成误码。因此,在水声通信领域, ISI成为水下数据传输(尤其是高速数据传输)的根 本障碍。信道均衡是克服 ISI 的一种有效手段。

在水声数字通信系统中,水声信道尤其是浅海 信道往往表现出严重的频率选择性衰落和时间变化 性。与无线电信道相比,浅海信道的传输条件十分恶 劣。在浅海环境中,海面和海底声场的相互作用,可 以产生严重的信道变化,内波、混响等许多其它效应 也是造成通信性能不可靠的原因。因此研究此类信 道的均衡问题,在水声通信中具有十分重要的意义。

均衡器从结构上可分为线性均衡器和非线性均 衡器两大类。线性均衡器结构相对简单,在信道失 真不十分严重时能够较好地消除信道影响。然而, 当信道多径衰落严重时,信道频域响应中会出现很 深的频谱零点。为了补偿频谱零点附近的幅度衰落, 线性均衡器必须对该段频谱设置高增益 从而导致 该频段的噪声增强。而非线性均衡器在这种恶劣的 信道环境下会取得良好的均衡效果,如判决反馈均 衡器(DFE: decision feedback equalizer)²]。波特间 隔均衡器(BSE: baud-spaced equalizer)的抽头间隔 等于码元间隔 T, 它对输入信号以波特率 1/T 进行 采样,而分数间隔均衡器(FSE: fractionally-spaced equalizer)的抽头间隔为码元间隔的分数倍 T/N(其 中N为整数)其采样速率是波特率的整数倍 即 NT。 波特间隔均衡器只能补偿混叠接收信号的频率响 应 不能补偿信道固有的失真。而分数间隔均衡器对 采样时间的选择不敏感,且可以补偿固有的信道失 真[34]。由于浅海信道还存在着严重的码内干扰 影 响了通信的可靠性,采用分数间隔均衡器可以有效 地抑制码内干扰。

综上所述,针对多径衰落浅海水声信道,本文研 究了一种适用于浅海水声信道的自适应均衡算法: 分数间隔判决反馈均衡(FS-DFE: fractionally-spaced decision feedback equalization)算法,并与波特间隔 判决反馈均衡(BS-DFE: baud-spaced decision feedback equalization)算法进行了性能对比。计算机仿 真结果表明,对于多径衰落的浅海水声信道,FS-DFE 算法的性能优于 BS-DFE 算法。

2 水声信道判决反馈自适应均衡算法

2.1 系统等效模型

实际中通常采用两种基本的均衡器结构^[4]。一 种是线性均衡器,之所以被冠以线性,是因为其输出 是接收信号及其延迟形式的组合,而判决反馈均衡 器是一种非线性处理器,原因是其判决装置的输入 为已滤波的输入信号与非线性判决回路的滤波输出 的叠加。

算法基带等效模型见图 1。如图所示,DFE 由一 个前馈滤波器 w(k)和一个反馈滤波器 b(k)组成, 其中反馈滤波器 b(k)由判决装置输出的判决驱动。 从结构上看,正是由于判决反馈均衡器引入了反馈 回路,在码元被检测时,可以从当前码元估计值中, 除去先前被检测码元引起的 IS^[3]。



图 1 判决反馈均衡基带等效模型 Fig.1 Baseband model of the decision feedback equalizer

如图所示 w(k) [w(0) w(1),... w(N_t-1)]表 示长度为N_t的前馈滤波器的抽头系数向量, b(k)= [b(0) b(1),... b(N_b-1)]表示长度为N_b的反馈滤 波器的抽头系数向量。h(k) [h(0) h(1),... h(N_b-1)] ^T为信道脉冲响应,其中N_b为信道响应长度。r(k)为 信道加性噪声 X(k) [x(k) x(k-1),... x(k-N_t-1)] ^T为均衡器输入递归向量 Q表示判决装置,s(k)为 判决装置对 x(k) 做出的判决 N 为抽取因子。

接收信号X(k)可表示为

$$x(k) = \sum_{i=0}^{N-1} h(i) x(k-i) + n(k)$$
 (1)

前馈滤波器输出

$$(k) = w(k) X(k)$$
(2)

则判决器输入<u>x</u> k 如下

(z k)=(y k)-(v k)

$$= \sum_{i=0}^{N_{r}-1} \psi k (k + i) - \sum_{i=0}^{N_{r}-1} b k (k + i)$$
 (4)

图 1 中的 N 表示抽取因子 ,↑ 箭头向上为过采 样 ,↑ 箭头朝下为欠采样。当 N=1 时 ,由于对接收信 号以波特率 1/T 进行采样 ,此时的均衡器为波特间 隔均衡器。当 N=2 时 表示对接收信号进行过采样 , 采样间隔为 T/2 ,过采样速率为 2/T ,则均衡器为分 数间隔均衡器。本文采用的就是这种实际中最常用 的 T/2 间隔均衡器。分数的方法是基于对接收到的 模拟信号的过采样 ,以便获得关于传输信道的更详 细的信息 ^{4]} ,因此 ,将判决反馈均衡器和分数间隔的 方法相结合 ,可以更好地对失真信道进行补偿 ,减轻 码间/码内干扰 ,从而进一步降低误码率 ,改善均衡 器性能 ,提高通信质量。FS-DFE 的多信道等效模型 见图 2。



图 2 分数间隔判决反馈均衡器多信道模型 Fig.2 Multi-channel model of the fractionally-spaced decision feedback equalizer

图 2 中,前馈滤波器为常用的 T/2 间隔的分数 间隔均衡器,由于分数间隔前馈滤波器的输出被一 个因子 2 抽取,得到的输出序列是 T 间隔的,所以 反馈滤波器和上一节一样,仍为波特间隔均衡器。其 中 K_k)和 K_k) x (k)和 K_k) r (k)和 K_k)分别 表示信道 t k)、前馈均衡器 w k)及加性噪声的奇 数和偶数分量。

2.2 算法迭代过程

算法迭代过程如下

 $(k + 1) = (k + \mu_1 X^{(k)} + \mu_1 X^{(k)} + \mu_1 X^{(k)} = k)$ (5)

(6) (6) (6)

其中 * 表示共轭运算 μ₁,μ₂ 为迭代步长,且自 适应误差项为

(e k) = (z k) - (s k) (7)

3 计算机仿真

本节通过计算机仿真对上述水声信道自适应均 衡算法的性能进行了分析。仿真采用离散多径浅海 信道模型⁵¹,该信道模型参数如下:信息传输波特率 为1000bit/s,风速20节,载波频率为10kHz,信道 带宽为2kHc或Q值为5),作用距离取5km,接收 机和发射机均位于水下10m,选用声压幅度较大的 8条本征声线,声线参数如表1所示。信道的脉冲响 应为

$$\mathfrak{h}(t) = \sum_{i=1}^{8} a_i p_i t - \tau_i$$
 (8)

式中 a 为对应于不同本征声线的归一化声压幅值, τ_i 为相应的相对时延 f t)是滚降系数为 20%的升 余弦脉冲。该信道零极点分布如图 3 所示。由图 3 可 见,有两个零点紧靠单位圆 因此该信道应具有很深 的频谱零点 均衡难度比较大。

表 1	浅海信道模	型直达与多	8径信号	参数	(表
Table 1 Para	meters of th	e original	signal	and	multi-path

signals for the shallow water channel model

声线数 i	归一化幅度 a	相对时延 $ au_{i}$
1	1.000 0	0.000 0
2	- 1.000 0	0.130 0
3	- 0.328 6	0.130 0
4	0.328 6	0.500 0
5	0.328 6	0.500 0
6	- 0.328 6	1.200 0
7	- 0.108 0	1.200 0
8	0.108 0	2.100 0

算法仿真条件为:发射信号采用 QPSK 信号,波 特率为1000bit/s,信噪比为15dB,算法迭代步长均 为3×10⁻³,前馈均衡器权长61,反馈均衡器权长20, 中心抽头初始化,迭代长度为L=5000,200次蒙特卡 罗仿真绘制剩余均方误差曲线如图4所示。

由图 4 可以看出,T/2 间隔 FS-DFE 与波特间隔 BS-DFE 相比,表现出了较快的收敛速度和更小的 剩余均方误差。图 5 中 a)(b)(c)分别是均衡前接 收信号、BS-DFE 及 FS-DFE 算法收敛后的输出信号 星座图,由图可见,两种算法收敛后,眼图都清晰张 开,而 6 c)比 6 b)所示星座更为清晰。由此可见,当 信道具有较深的频谱零点时,自适应 FS-DFE 和自 适应 BS-DFE 均能对失真信道进行补偿,相比之下, 前者较后者性能更为优越。



4 结 论

收敛速度和剩余均方误差是衡量均衡器性能的 主要指标之一。本文研究了分数间隔自适应均衡算 法在多径衰落浅海水声信道均衡中的应用,并将其 性能与波特间隔自适应均衡算法进行了比较。计算 机仿真表明,对于严重频率选择性衰落的浅海信道 来讲,自适应 FS-DFE 算法与 BS-DFE 算法相比,不 仅有效克服了 ISI,而且还减轻了码内干扰的作用, 收敛速度快,剩余均方误差小,因而具有更加优越的 性能及实用价值。

参考文献

underwater acoustic telemetry J]. IEEE J. Oceanic Eng., 2000, 26, 1): 4-27.

- [2] Labat J, Macchi O, Laot C. Adaptive decision feedback equalization: Can uou skip the training perio[] J].
 IEEE Transactions on Communications, 1998, 4(§ 7): 921-930.
- [3] DING Zhi. On convergence analysis of fractionally spaced adaptive blind equalizers
 [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 46 3): 650-657.
- [4] John G. Proakis. Digital communications (4th edition)[M]. Boston: McGraw-Hill, 2001.
- [5] Adam Zielinski, Young-Hoon Yoon, Lixue Wu. Performance analysis of digital acoustic communication in a shallow water chann. J. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1995, 20, 4): 293-299.