

盲均衡的一种快速算法

刘文龙¹, 李兴斯²

(11 大连理工大学应用数学系, 辽宁大连 116024; 21 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

摘 要: 本文提出了盲均衡的一种快速算法. 该方法与通常的盲均衡算法有着本质的区别, 它不需要使用代价函数, 也就不需要一个最小化代价函数的算法, 从而避免了一些盲均衡器不能全局收敛的问题. 本算法基于信道输入信号的一些先验的统计知识, 并充分运用了信道输入序列与信道输出观测序列之间的关系. 新算法主要的运算为比较运算, 只用到了少量的乘、加运算, 所以计算量远小于通常的盲均衡器算法.

关键词: 盲均衡; 代价函数; 全局收敛

中图分类号: TN911.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 02-1212-04

A Fast Algorithm for Blind Equalization

LIU Wenlong¹, LI Xingsi²

(11 Dept of Applied Math, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

21 State Key Lab of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: In this paper, we proposed a fast algorithm for blind equalization. This algorithm is essentially different from usual ones for blind equalization in the sense that it does not resort to any merit function and corresponding minimization algorithm so that it completely avoids the difficulty of global convergence. The new algorithm is based on a priori knowledge of some statistical properties of the channel input sequence and fully uses the relation between the channel input sequence and the observed output sequence. It only uses operations for comparison and few multiplication and addition so that the computational costs are much lower than that of usual blind equalization algorithms.

Key words: equalization; cost function; global convergence

1 引言

盲信道均衡是通信技术和信号处理的基本问题之一, 其目的在于克服信道传输中的码间干扰. 盲均衡器不需要知道信道的准确特性, 也不需要知道信道输入序列. 不同于一般的信道均衡器, 它不需要一个训练序列来获得有关的信道特性. 这个训练序列非常浪费资源, 而且在一些情况下(尤其在一点对多点通信中)提供一个训练序列是很困难的, 例如数字电视系统^[1]. 在过去几十年中, 人们对盲信道均衡进行了大量的研究, 诸如文献[2~8].

通常的盲均衡器结构如图1所示.

其中, $a(k)$ 是信道输入信号; $H(z)$ 是未知的信道传递函数; $W(z)$ 是一个有限脉冲响应(FIR)接收滤波器. $W(z)$ 的输入为 $y(k)$, 它的输出

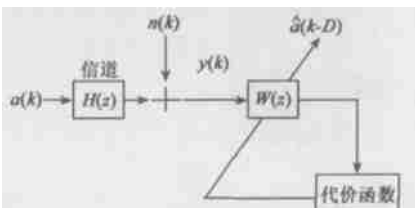


图1 通常的盲均衡器结构

为 $\hat{a}(k-D)$, D 是一个正整数. 我们希望 $W(z)$ 的输出 $\hat{a}(k-D) = a(k-D)$. 这种盲均衡器需要一个代价函数, 通过最小化代价函数来更新 $W(z)$ 的权系数. 已有的盲均衡算法在更新 $W(z)$ 的权系数时需要较多的计算量, 且不易于硬件实现, 这就限制了其在高速通信(如硬盘读写和光纤通信等)中的应用. 针对已有盲均衡器不易于在高速通信系统中应用的问题, 本文提出了一种新的盲均衡算法, 称为快速盲均衡算法. 新算法主要的运算为比较运算, 只用到了少量的乘、加运算, 所以计算量远小于已有的盲均衡器算法且易于硬件实现. 作者希望其能成为解决高速通信中码间干扰问题的一种有效的算法. 本文的算法与已有算法最大的不同就在于, 它不是通过 $y(k)$ 来估计 $W(z)$ 而是通过 $y(k)$ 来直接估计 $H(z)$. 新算法的基本思想可以用一个确定楼层事件来解释. 假设一个人站在一栋楼的某一层上, 这栋楼的每一层都是一样的, 他分辨不出自己到底站在哪一层上. 但是他只要这样做就可以知道他的位置: 先从他所在的楼层向下走, 一直走到一楼; 他可以这样判断他到没到一楼, 一楼和其他楼层不一样, 它没有向下的楼梯. 记录自己下了几层楼到达一楼, 这样他就可以确定他原

先所在的楼层了.实际上,确定楼层事件0就是要找到一个可以确定的参考点,再从这个参考点出发,得到所要的答案.本算法的核心就是通过信道输入信号 $a(k)$ 的一些先验的统计知识,并充分运用了输入序列 $a(k)$ 与输出观测序列 $y(k)$ 之间的关系找到一个可以确定的参考点.

2 问题描述

考虑图 1 描述的信道盲均衡问题,为了简单起见,我们只考虑彼此互不相关的二电平数据传输.将本算法扩展到多电平传输在原理上没有什么困难.假定输入信号 $a(k) \in \{1, -1\}$ 且 $\text{Prob}\{a(k) = +1\} = \text{Prob}\{a(k) = -1\} = 0.5$. 信道传递函数 $H(z)$ 是线性时不变的.

$$H(z) = \sum_{i=0}^L h_i z^{-i}. \text{接收机的输入信号 } y(k) \text{ 为}$$

$$y(k) = \sum_{i=0}^L h_i a(k-i) + n(k) \quad (1)$$

我们定义 $a_k = [a(k), a(k-1), \dots, a(k-L)]^T$, 向量 a_k 的维数为 $L+1$. 由于 $a(k) \in \{+1, -1\}$, a_k 就有 2^{L+1} 个可能取值. 例如,当 $L=1$, a_k 的可能取值是 $[-1, -1]^T; [-1, +1]^T; [+1, -1]^T; [+1, +1]^T$ 四种. 为了书写方便忽略信道噪声 $n(k)$, 式 (1) 写成矩阵形式为

$$AH = Y \quad (2)$$

其中 $A = [(a_0)^T, (a_1)^T, \dots, (a_n)^T]^T$, n 是输入序列 $\{a(k)\}$ 的长度. 在这里我们定义符号 T 代表转置. $H = [h_0, h_1, \dots, h_L]^T$ 是传递函数向量; $Y = [y(0), y(1), \dots, y(n)]^T$ 是接收向量.

式(2)可以扩展为:

$$\begin{bmatrix} a(0) & a(-1) & \dots & a(-L) \\ a(1) & a(0) & \dots & a(-L+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a(n) & a(n-1) & \dots & a(n-L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ \vdots \\ h_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(n) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)是一个欠定方程,它有 n 个方程, $n+2L+2$ 个未知数,因此不能用普通方法求解.

3 基本理论

在这一节中,我们给出了与本文算法相关的几个引理与定理,证明中用到以下三个实际中可以接受的假设:

(A1): 如果 $a_i \neq a_j$ 则 $a_i^* H \neq a_j^* H$ ($0 \leq i \leq n; 0 \leq j \leq n$).

(A2): $\sum_{i=0}^L h_i > 0, h_0 > 0$.

(A3): 输入信号长度 $n \gg L$.

引理 1 在忽略噪声的情况下有:

如果 $a_i \neq a_j$, 那么 $y(i) \neq y(j)$ ($0 \leq i \leq n; 0 \leq j \leq n$) (4)

如果 $a_i = a_j$, 那么 $y(i) = y(j)$ ($0 \leq i \leq n; 0 \leq j \leq n$) (5)

基于假设 (A1) 及 $y(i) = a_i^* H, y(j) = a_j^* H$, 该引理显然成立.

当然,任何通信系统都存在噪声干扰,但在大多数高速有线通信中,例如光纤通信,硬盘读写等,其噪声干扰相对较小.

在考虑小噪声干扰的情况下,引理 1 中的式(4), (5) 可改为 (4c) 和 (5c)

如果 $a_i \neq a_j$, 那么 $|y(i) - y(j)| > E$ ($0 \leq i \leq n; 0 \leq j \leq n$) (4c)

如果 $a_i = a_j$, 那么 $|y(i) - y(j)| < E$ ($0 \leq i \leq n; 0 \leq j \leq n$) (5c)

其中 E 为一个小的正常数. 本文为了书写方便,在以下论述中均不考虑噪声的影响. 如果要考虑噪声的影响,则可参照式 (4), (5) 到式 (4c) 和 (5c) 的改动方式即可.

引理 2 a_k 与 a_{k+1} 有 L 个元素错位相等.

观察式 (3), 我们发现矩阵 A 有一个特殊的性质:

$$a_k = [a(k), a(k-1), \dots, a(k-L)]^T,$$

$$a_{k+1} = [a(k+1), a(k), \dots, a(k-L+1)]^T$$

比较 a_k 与 a_{k+1} , 显然它们之间有 L 个元素错位相等.

定理 1 如果 $y(k) = y(k+1) > 0$, 那么 $a_k = a_{k+1} = [1, 1, \dots, 1]^T$.

证明 如果 $y(k) = y(k+1)$, 根据式 (5), 则有 $a_k = a_{k+1}$. 再根据引理 2, 我们得到, $a(k+1) = a(k) = a(k-1) = \dots = a(k-L+1) = a(k-L)$. 由于输入信号 $\{a(k)\} \in \{1, -1\}$, 所以有 $a(k+1) = a(k) = \dots = a(k-L) = +1$ 或 -1 . 通过 $\sum_{i=0}^L h_i > 0$ 和 $y(k) = a_k^* H > 0$, 则有 $a_k = a_{k+1} = [1, 1, \dots, 1]^T$.

在确定楼层事件0中,参考点是一楼,找到参考点的办法是找到一个没有向下去的楼梯的楼层. 定理 1 实际上也给出了盲均衡问题的一个参考点,即 $a_k = a_{k+1} = [1, 1, \dots, 1]^T$, 找到这个参考点的办法是找到 $y(k) = y(k+1) > 0$.

定理 2 如果 $y(k) = y(k+1) > 0$ 且 $y(k+1) \neq y(k+2)$, 那么 $a_{k+2} = [-1, 1, 1, \dots, 1]^T$.

证明 通过定理 1, 有 $a_k = a_{k+1} = [1, 1, \dots, 1]^T$. 再通过引理 2, 可知 a_{k+1} 与 a_{k+2} 有 L 个元素错位相等, 必有 $a_{k+2} = [a(k+2), 1, \dots, 1]^T$. 如果 $a(k+2) = +1$, 那么 $y(k+2) = a_{k+2}^* H = y(k+1)$, 这与条件 $y(k+1) \neq y(k+2)$ 相矛盾. 所以 $a(k+2) = -1$ 且 $a_{k+2} = [-1, 1, 1, \dots, 1]^T$.

定理 3 如果 $a_i = [1, a^*]^T, a_j = [-1, a^*]^T$, 其中 a^* 的维数为 L , 那么 $y(i) > y(j)$.

证明 根据假设 (A2), $h_0 > 0$, 及 $y(i) = a_i^* H, y(j) = a_j^* H$, 定理显然成立.

定理 4 A_k 是一个非奇异阵且其行列式为 $\det(A_k) = 2^{L+1}$.

证明 我们定义一个 $(L+1) \times (L+1)$ 的矩阵 A_k

$$A_k = \begin{bmatrix} a(k) & a(k-1) & \dots & a(k-L) \\ a(k+1) & a(k) & \dots & a(k-L+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a(k+L) & a(k+L-1) & \dots & a(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_k \\ a_{k+1} \\ \vdots \\ a_{k+L} \end{bmatrix} \quad (6)$$

它的第一行为 $a_k = [1, 1, \dots, 1]^T$ 且 $a(k+1) = -1$, 则

$$A_k = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & , & 1 \\ -1 & 1 & 1 & , & 1 \\ a(k+2) & -1 & 1 & , & 1 \\ s & s & s & s & s \\ a(k+L) & a(k+L-1) & , & -1 & 1 \end{bmatrix} \xrightarrow[\text{rowL- row(L+1)}]{\begin{matrix} \text{row1- row2} \\ \text{row2- row3} \\ s \\ \text{rowL- row(L+1)} \end{matrix}} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & , & 0 \\ s & 2 & 0 & , & 0 \\ s & s & 2 & , & 0 \\ s & s & s & w & s \\ s & s & , & s & 2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式(7)可知,通过初等变换,矩阵 A_k 可变换为一个下三角矩阵,其对角线元素均为 2,则可得 $\det(A_k) = 2^{L+1}$,因此定理得证.

4 快速盲均衡算法

在这节中将介绍快速盲均衡算法.本算法是基于第三节给出的引理,定理得到的.我们定义 $Y_k^T = [y(k_i), y(k_i+1), \dots, y(k_i+L)]$, 其中 Y_k^T 的维数为 $L+1$, $y(k_i)$ 为接收序列在时刻 k_i 的值.

解的过程如下:

第一步:找到时刻 k_1 ,使得 $y(k_1-1) = y(k_1) > 0$ 且 $y(k_1) \times y(k_1+1)$. 根据定理 1~2,可以得到 $a_{k_1-1} = a_{k_1} = [1, 1, \dots, 1]$, $a_{k_1+1} = [-1, 1, 1, \dots, 1]$.

第二步:找到时刻 k_2 ,使得 $Y_{k_1}^T = Y_{k_2}^T$ 且 $y(k_1+2) \times y(k_2+2)$. 根据定理 3,如果 $y(k_1+2) > y(k_2+2)$,那么 $a(k_1+2) = 1$,否则 $a(k_1+2) = -1$.

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ y(2) \\ y(3) \\ y(4) \\ y(5) \\ y(6) \\ y(7) \\ y(8) \\ y(9) \\ y(10) \\ y(11) \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a(0) & a(-1) & a(-2) \\ a(1) & a(0) & a(-1) \\ a(2) & a(1) & a(0) \\ a(3) & a(2) & a(1) \\ a(4) & a(3) & a(2) \\ a(5) & a(4) & a(3) \\ a(6) & a(5) & a(4) \\ a(7) & a(6) & a(5) \\ a(8) & a(7) & a(6) \\ a(9) & a(8) & a(7) \\ a(10) & a(9) & a(8) \\ a(11) & a(10) & a(9) \\ s & s & s \end{bmatrix} \# \begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 \\ -1 & +1 & +1 \\ -1 & -1 & +1 \\ +1 & -1 & -1 \\ -1 & +1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 \\ -1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 \\ s & s & s \end{bmatrix} \# \begin{bmatrix} 11 & 0 \\ 0 & 8 \\ 0 & 6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11 & 2 \\ 2 & 14 \\ 2 & 14 \\ 0 & 14 \\ -1 & 12 \\ -1 & 12 \\ -1 & 12 \\ 0 & 14 \\ 0 & 14 \\ 0 & 14 \\ 0 & 14 \\ 0 & 14 \\ s \end{bmatrix}$$

当然,在盲均衡算法中,矩阵 A , 向量 H 是未知的.我们需要通过接收向量 Y 来求解 A 和 H . 解的过程如下:

第一步:找到时刻 $k_1 = 2$, $y(k_1-1) = y(k_1) = 214 > 0$ 且 $y(k_1) \times y(k_1+1)$. 根据定理 1~2 得到 $a_{k_1-1} = a_{k_1} = [1, 1, 1]$, $a_{k_1+1} = [-1, 1, 1]$.

第二步:找到时刻 $k_2 = 9$, $Y_{k_1}^T = Y_{k_2}^T = [214, 014]$, 且 $y(k_1+2) = -112$, $y(k_2+2) = 018$, $y(k_1+2) \times y(k_2+2)$. 根据定理 3 及 $y(k_1+2) < y(k_2+2)$, 得 $a(k_1+2) = -1$.

这样, A_{k_1} 为 $\begin{bmatrix} +1 & +1 & +1 \\ -1 & +1 & +1 \\ -1 & -1 & +1 \end{bmatrix}$. 传递函数向量 H 可以通

过下式解出: $H = (A_{k_1})^{-1} \# Y_{k_1}^T$.

得到 H 后,我们就可以用最大似然估计 (MLSE) 或直接反馈

s

第 L 步:找到时刻 k_L ,使得 $Y_{k_1}^T = Y_{k_L}^T$ 且 $y(k_1+L) \times y(k_L+L)$. 如果 $y(k_1+L) > y(k_L+L)$,那么 $a(k_1+L) = 1$,否则 $a(k_1+L) = -1$.

这样, A_{k_i} 就是已知的了. 根据定理 4, A_{k_i} 是一个可逆阵. 传递函数向量 H 可通过下式解出: $H = (A_{k_i})^{-1} \# Y_{k_i}^T$. 得到 H 后,我们就可以用最大似然估计 (maximum likelihood sequence estimation 简称 MLSE) 或直接反馈均衡 (decision feedback equalization 简称 DFE) 来解决码间干扰问题.

下面举一个简单的例子来说明本文的算法.

本例子中忽略了信道噪声的影响. 设 $L = 2$, 式(1)变为 $y(k) = \sum_{i=0}^2 h_i a(k-i)$. 假设输入信号序列 $a(-2), a(-1), a(0), a(1), \dots$ 为 $-1, +1, +1, +1, +1, -1, -1, +1, -1, +1, +1, +1, -1, +1, \dots$. 传递函数向量 H 为 $h_0 = 1, h_1 = 0.8, h_2 = 0.6$. 因此,接收向量序列 Y 为

均衡 (DFE) 来解决码间干扰问题.

5 总结

综上所述,本文提出的新方法只在求解 $(A_{k_i})^{-1} \# Y_{k_i}^T$ 时用了少量的乘法和加法,其余的都为比较运算,因此其计算量远小于通常的盲均衡算法且易于用简单硬件实现.

显然,新方法是全局收敛的.它不存在局部极小点问题.

本文基于解决/确定楼层事件0的思想来解决信道盲均衡问题,其思想非常简单,同时也很有意义.希望这种找参考点的思想能够对/简单0的盲问题的求解起到帮助.

参考文献:

- [1] Choi Y S, Hwang H, Song D I. Adaptive blind equalization coupled with carrier recovery for HDTV modem[J]. IEEE Trans on Consumer Elec

- tron., 1993, 2(39): 386- 391.
- [2] Godard D N. Self-recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems[J]. IEEE Trans on Commun., 1980, 11(28): 1867- 1875.
- [3] Sato Y. A method of self-recovering equalization for multilevel amplitude modulation systems[J]. IEEE Trans on Commun., 1975, 6(23): 679- 682.
- [4] Grellier O, Comon P, Mourrain B, Trebuchet P. Analytical blind channel identification[J]. IEEE Trans on Signal Processing. 2002, 9(50): 2196- 2207.
- [5] Ding Z, Luo Z Q. A fast linear programming algorithm for blind equalization[J]. IEEE Trans on Commun., 2000, 9(48): 1432- 1436.
- [6] Fijakow I, Manlove C E, Johnson C R. Adaptive fractionally spaced blind CMA equalization: Excess MSE[J]. IEEE Trans on Signal Processing. 1998, 1(46): 227- 231.
- [7] Dogancay K, Kennedy R A. Least squares approach to blind channel equalization[J]. IEEE Trans on Commun., 1999, 11(47): 1678- 1687.
- [8] 吴建华, 刘泽民. 基于严格 G 性价值函数的 DF 结构的盲均衡方案[J]. 电子学报, 1995, 1(23): 21- 27.

作者简介:

刘文龙 男, 1973 年 11 月出生于辽宁大连市.

李兴斯 男, 1942 年 12 月出生于辽宁本溪市.