

# 水声通信中变步长神经网络盲均衡算法研究

肖 瑛, 李振兴, 刘国枝, 张林波

(哈尔滨工程大学水声工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 在水声通信领域多途引起的码间干扰可以用均衡消减。盲均衡不需要训练序列, 这将有效的节省通信带宽, 提高通信效率及通信性能。实际中的通信信道不可能是完全线性的, 神经网络作为一种非线性动态系统, 具有大规模并行处理及高度的鲁棒性特征, 将其应用于水声信道盲均衡切实可行。文中对变步长 BP 算法的前馈神经网络进行了理论和算法分析, 并通过计算机对其实现水声信道盲均衡进行了仿真。仿真结果表明采用变步长 BP 算法比采用传统 BP 算法的神经网络盲均衡器收敛速度快, 均衡性能明显提高。

关键词: 神经网络; 水声信道; 盲均衡

中图分类号: TN911.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2005)-03-0129-03

## Blind equalization algorithm using variable step-size neural network

XIAO Ying, LI Zhen-xing, LIU Guo-zhi, ZHANG Lin-bo

(School of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In underwater acoustic communication, intersymbol interference caused by multipath effects can be mitigated using equalization. Blind equalization without training sequence is a bandwidth efficient way to solve this problem. In fact, communication channels are not completely linear. Neural network is a nonlinear dynamic system, which can be realized with large-scale parallel processing and has good robustness. Forward feedback neural network (FNN) using a variable step size BP algorithm is used to implement underwater acoustic channel equalization. Results of computer simulation indicate that, by using the proposed algorithm, higher convergence rate and better performance are obtained compared to the traditional BP algorithm.

Key words: neural network; underwater acoustic channel; blind equalization

## 1 引 言

采用横向滤波器作为盲均衡器, 可以用 LMS 或 RLS 算法对均衡器权系数进行调节。不过横向滤波器结构只能对最小相位信道进行均衡, 无法实现对非最小相位信道的均衡。

神经网络是一种动态非线性系统, 用神经网络实现盲均衡既可以均衡最小相位信道, 也可以均衡非

最小相位信道, 包括非线性信道。水声信道具有随机空变、时变、通信带宽窄、高背景噪声、多途等特性, 所以用神经网络实现水声信道盲均衡是值得研究的内容。

以前馈神经网络(FNN)<sup>[1]</sup>作为均衡器, 可以用 BP 算法<sup>[2]</sup>对网络连接权重进行调整, 实现对水声信道的盲均衡。但是由于代价函数的非凸性, 传统 BP 算法采用最速梯度下降算法, 并采用固定步长来逼近代价函数的最小值, 这样就不能保证代价函数的单调下降, 同时, 还可能陷入局部极小值<sup>[3]</sup>。为了提高网络的稳定性, 避免陷入局部极小值, 文中给出了一种改进的算法, 即变步长 BP 算法。

文章第二节解释了盲均衡的基本原理,第三节对神经网络用于盲均衡及变步长 BP 算法进行了阐述,第四节给出了计算机仿真结果,第五节给出结论。

## 2 盲均衡基本原理

设  $x(k)$  为发送信号序列,  $h(k)$  为信道响应函数,  $n(k)$  为零均值加性高斯白噪声,  $z(k)$  为均衡器的输入,  $\tilde{x}(k)$  为均衡器的输出,  $\hat{x}(k)$  为对输入序列  $x(k)$  的估值。盲均衡的目的就是根据观测到的接收序列  $z(k)$  恢复发送信号序列  $x(k)$ 。

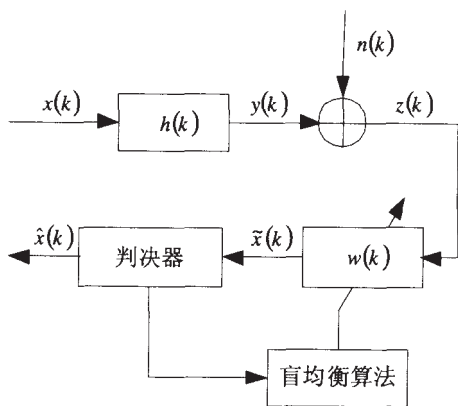


图1 盲均衡系统模型  
Fig.1 Blind equalization system model

实现均衡就是要构造合适的均衡器和选择适当的均衡算法使式(1)成立。设  $s(k)$  为信道和均衡器的联合冲击响应,则有:

$$\tilde{x}(k) = x(k-D)e^{j\phi} \quad (1)$$

$$s(k) = h(k) * w(k) = \sum_{j=1}^{\infty} h(k-j)w(j) \quad (2)$$

综合式(1)、(2)得到:

$$\tilde{x}(k) = \sum_{j=1}^{\infty} s(j)x(k-j) = x(k-D)e^{j\phi} \quad (3)$$

这样可以很容易得出盲均衡器的“置零条件”<sup>[4]</sup>:

$$S = [0, \dots, 0, e^{j\phi}, 0, \dots, 0]^T \quad (4)$$

恢复序列  $\tilde{x}(k)$  会存在常数时延  $D$  和常量相移,但这并不影响信号恢复的质量。

这里,不加证明地给出盲均衡的充要条件<sup>[5]</sup>:

$$(1) \quad E\{|\tilde{x}(k)|^2\} = E\{|x(k)|^2\} \quad (5)$$

$$(2) \quad |K(\tilde{x})| = |K(x)| \quad (6)$$

即  $\tilde{x}(k)$  和  $x(k)$  具有相同的方差并且峰度的绝对值相等。根据盲均衡的“置零条件”和充要条件,就可以构

造均衡器结构和定义相应的代价函数,并选择适当的算法使代价函数达到最小(或最大)来实现盲均衡。

## 3 神经网络盲均衡及改进算法

Cybenco<sup>[6]</sup>已经证明:用一个隐层的前馈神经网络可以以任意精确度逼近任意的连续函数,所以本文采用三层 FNN 结构,其中  $w_{ij}(k)$  ( $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ ) 为输入层与隐层单元的连接权重,  $w_j(k)$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ) 为隐层单元与输出层单元的连接权重,并设隐层单元的输入为  $u_j(k)$ , 隐层单元输出为  $v_j(k)$ , 输出层单元的输入为  $I(k)$ 。

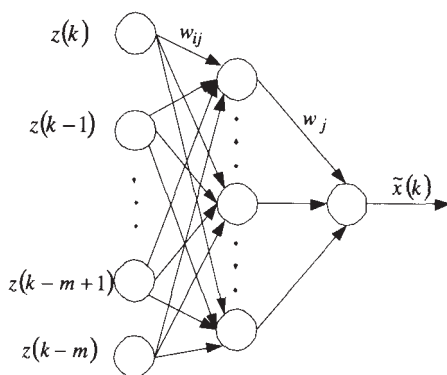


图2 三层前馈神经网络结构图  
Fig2 Tri-level FNN structure

这样网络的状态方程为:

$$u_j(k) = \sum_{j=1}^n w_{ij}(k)z(k-j) \quad (7)$$

$$v_j(k) = f[u_j(k)] \quad (8)$$

$$I(k) = \sum_{j=1}^n w_j(k)v_j(k) \quad (9)$$

$$\tilde{x}(k) = f[I(k)] \quad (10)$$

传统 BP 算法对网络权重的调节采用最速梯度下降算法,并用固定步长来逼近代价函数的最小值,不能保证代价函数的单调下降,同时,还可能会陷入局部极小值的缺陷。文中给出改进的变步长 BP 算法,并根据 CMA 算法<sup>[7]</sup>设定代价函数及网络传递函数分别为:

$$J_D = \frac{1}{2} [|\tilde{x}(k)|^2 - R_{CM}]^2 \quad (11)$$

其中:

$$R_{CM} = \frac{E(|\tilde{x}(k)|^4)}{E(|\tilde{x}(k)|^2)^2} \quad (12)$$

$$f(x) = \beta \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (13)$$

则:

$$f'(x) = 4\beta \frac{1}{(e^x + e^{-x})^2} \quad (14)$$

为了保证传递函数的单调性, 要求传递函数的导函数恒大于零, 这就要求调节参数  $\beta$  大于零。若信号幅度大, 则选用较大的  $\beta$ , 反之, 选择较小的  $\beta$ 。

变步长 BP 算法的实现方法: 先设定一较小的步长, 若一次迭代后  $J_D$  增大, 则将步长乘以一个小于 1 的常数  $a$  沿原方向重新计算下一个迭代点, 若一次迭代后  $J_D$  减小, 则将步长乘以一个大于 1 的常数  $b$ 。设  $\mu$  为迭代步长, 则有:

$$\mu = \mu a \quad a < 1 \text{ 当 } \Delta J_D > 0 \quad (15)$$

$$\mu = \mu b \quad b > 1 \text{ 当 } \Delta J_D < 0 \quad (16)$$

根据所设, 网络权值的迭代公式为:

$$w(k+1) = w(k) - \mu(k) \frac{\partial J_D}{\partial w(k)} \quad (17)$$

$$\frac{\partial J_D}{\partial w(k)} = 2 \{ \tilde{x}^2(k) - R_{CM} \} \tilde{x}(k) \frac{\partial \tilde{x}(k)}{\partial w(k)} \quad (18)$$

对于输出层:

$$\frac{\partial \tilde{x}(k)}{\partial w_j(k)} = f'[I(k)] v_j(k) \quad (19)$$

将式(19)代入式(17):

$$w_j(k+1) = w_j(k) + \mu(k) H(k) v_j(k) \quad (20)$$

式中,  $\mu(k)$  为迭代步长,  $H(k) = -2[\tilde{x}^2(k) - R_{CM}] \tilde{x}(k) f'[I(k)]$

对于隐层:

$$\frac{\partial \tilde{x}(k)}{\partial w_{ij}(k)} = f'[I(k)] \frac{\partial I(k)}{\partial w_{ij}(k)} \quad (21)$$

而:

$$\frac{\partial I(k)}{\partial w_{ij}(k)} = w_j(k) f'[u_j(k)] z(k-i) \quad (22)$$

将式(21)、(22)代入式(17)得到:

$$w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) + \mu(k) H_j(k) z(k-i) \quad (23)$$

式中  $H_j(k) = f'[u_j(k)] w_j(k) H(k)$ 。

依据上述迭代公式, 就可以用神经网络来进行盲均衡了。

### 4 计算机仿真

一般来说, 仿真发送信号采用最简单二进制等概率序列, 针对水声信道特性, 调制方式采用 QPSK, 加上零均值带限高斯白噪声, 信道模型<sup>[8]</sup>为:

$$H(z) = 1 - 0.67z^{-15} + 0.55z^{-19} \quad (24)$$

传递函数调整参数  $\beta=1.0$ , 步长调整参数分别为  $a=1.4, b=0.6$ , 神经网络模型为 [24, 18, 1] 结构。

从图 3 中可以看出变步长 BP 算法收敛速度快, 在 2000 次迭代后基本收敛, 而传统 BP 算法则

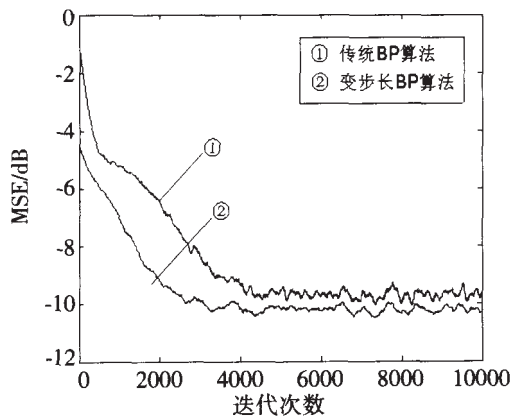


图 3 传统 BP 算法和变步长 BP 算法 MSE 曲线

Fig.3 Comparison of traditional BP algorithm and variable step-size BP algorithm

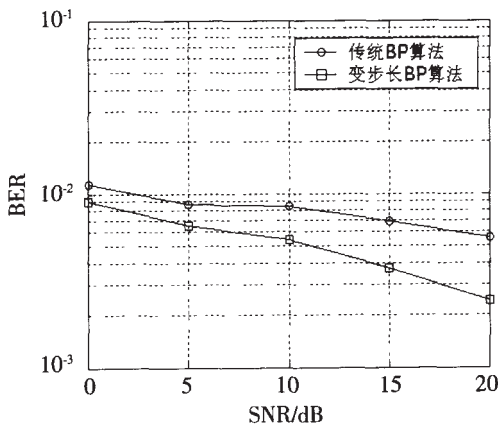


图 4 误码率曲线

Fig.4 Comparison of BER

到 3500 次迭代后才呈现稳定趋势。从图 4 误码率曲线中可以看出, 变步长 BP 算法的均衡性能明显优于传统 BP 算法。

### 5 结论

计算机仿真结果表明人工神经网络用于水声信道盲均衡具有独特的优势, 通过对传统 BP 算法加以变步长的改进, 使神经网络具有了更好的稳定性, 且网络的收敛速度快。

采用变步长 BP 算法的神经网络可以用于线性和非线性信道的盲均衡。但是由于加入变步长调节, 计算量稍有增加。在今后的研究中, 可以着眼于寻找凸性的代价函数和提高计算速度上。

### 参 考 文 献

[1] Cheloo You, Daesik Hong. Nonlinear blind equalization

长度方向,所以沿长度方向的自由场范围大大增加,接近水池的右边界,而在宽度和高度方向,自由场范围则较小。进一步的仿真计算表明:随着指向性角度的增加,长度方向自由场范围减小,高度和宽度方向自由场范围有所扩大;当指向性角度大于 $\pm 90^\circ$ 以后,自由场范围与无指向性点源时相似。

## 4 结 论

本文所建立的以虚源方法为基础的消声水池声场模型,可以处理点源与指向性声源、一次反射与二次反射、吸声系数随入射角变化等问题,为水池中的声学测量、消声水池的建设和改造提供一定的理论参考依据,对消声水池尺寸的选择和吸声材料参数的选择非常重要。通过对不同条件下消声水池声场的分析计算,可得到如下结论:

(1) 消声水池的尺寸对其自由场有决定性的影响。多种情况下的仿真均表明:使用无指向性声源,消声水池的自由场区受限于长宽高三个尺寸中的最小尺寸,若增加最小尺寸,则消声水池的自由场区域有所扩大。

(2) 指向性声源比无指向性点源在某一方向上可产生更大的自由场。声源沿长度方向的指向性,减少了六面体中五个面的反射,有利于自由场区的形成。

(3) 水池自由场区域大小对吸声系数十分敏

感,因为吸声系数的微小变化将导致反射系数产生较大变化,因此吸声系数严格控制在一定指标之上,对于保证水池的吸声性能十分重要。吸声系数随入射角的减小而降低,以及一次反射和二次反射效果的同时计入,都将减小自由场区域,特别是吸声系数随入射角的减小而降低,对自由场区的影响很大。

## 参 考 文 献

- [1] 郑士杰,袁文俊,缪荣兴,等. 水声计量测试技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 1995. 155-156.  
ZHENG Shijie, YUAN Wenjun, MIAO Rongxing, et al. Acoustic Measurement Techniques [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1995. 155-156.
- [2] 唐海清, 缪荣兴, 李君清. 高压消声水池松木尖劈吸声性能研究[J]. 声学与电子工程, 2001, 62(2):23-27.  
TANG Haiqing, MIAO Rongxing, LI Junqing. The absorbing characteristics of pine absorber at the high hydrostatic pressure anechoic tank [J]. Acoustic and Electronic Engineering, 2001, 62(2):23-27.
- [3] 奚刚, 赵涵. 消声水池声场特性的测量[J]. 声学与电子工程, 2002, 67(3):43-46.  
XI Gang, ZHAO Han. Measuring the acoustic field for anechoic tank [J]. Acoustic and Electronic Engineering, 2002, 67(3):43-46.
- [4] Corsaro R D, Klunder J D, Jarzynski J. Filled rubber materials system: application to echo absorption in water-filled tanks [J]. J Acoust Soc Am, 1980, 68(2):655-664.

## (上接第 131 页)

- schemes using complex valued multilayer feedforward neural networks [J]. IEEE Trans on Neural Network, 1998, 19(6):1442-1455.
- [2] Rumhart D E, McClelland J. Parallel distributed processing [M]. Cambridge MA:MIT Press, 1988.322-328.
  - [3] Solis FJ, Wets J B. Minimization by random search techniques [J]. Mathematics of Operation Research, 1981, 6:19-30.
  - [4] Shalui O. New criteria for blind deconvolution of non-minimum phase system (channels)[J]. IEEE Trans, 1990, 36(2):312-321.
  - [5] 张贤达, 保铮. 通信信号处理[M]. 北京:国防工业出版社, 2000. 229-232.

- ZHAN Xian da, BAO Zheng. Communication Signal processing[M]. 2000. 229-232.
- [6] Cybeako G. Approximations by superposition of a sigmoidal function[J]. Math Contr Syst Signals, 1989, 2: 303-314.
  - [7] Godard D N. Self-recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems [J]. IEEE Trans Commun, 1980, 28(11):1867-1875.
  - [8] 范敏毅. 水声信道的仿真与应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2000. 45-56.  
FAN Minyi. A study on simulation & application of underwater sound channel [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2000. 45-46.