

一种组合神经网络非线性判决反馈均衡器^{*}

王军锋 张 斌 宋国乡

(西安电子科技大学数学系 西安710071)

A New Nonlinear Adaptive Equalizer Based on Combined Neural Networks

WANG Jun-Feng ZHANG Bin SONG Guo-Xiang

(School of Science, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract A new nonlinear decision feedback adaptive equalizer based on Adaline neural network and radial-basis-function neural network is presented. Its structure and algorithm are also investigated. For a typical linear and non-linear channel models, computer simulation shows that its convergence speed is faster and its stable mean square error is less.

Keywords Combined neural network, Radial basis function, Decision feedback, Nonlinear equalizer

1 引言

数字通信系统的典型模型如图1所示,发送序列 $s(n)$ 经信道传输后因发生失真及噪声 $v(n)$ 的影响而成为畸变信号 $x(n)$,为此需用均衡器对其进行均衡以恢复发送序列。目前,自适应均衡已成为数字通信中一种非常重要的技术^[1],自适应均衡器的构成也是多种多样,其中最简单的是线性横向均衡器(LTE)和判决反馈均衡器(DFE),它们都比较适用于线性信道。如果信道呈现非线性特性,两者的性能特别是LTE的均衡能力会大大下降,而利用径向基函数网络(RBFN)等构成的非线性均衡器的性能要好于DFE^[2]。其原因在于均衡从本质上可以看成非线性分类问题,而神经网络一般都具有较好的非线性映射能力。虽然目前利用神经网络来进行信道均衡的方法很多^[2~5],但是对组合神经网络用于均衡的研究还比较少。考虑到实际中信道的线性与非线性特性往往同时存在,因此本文提出将Adaline与RBF网络相结合来共同补偿信号的线性与非线性失真,同时利用判决反馈来引导均衡器的正确工作,从而使均衡器不仅收敛较快,而且收敛后具有更小的稳态均方误差。

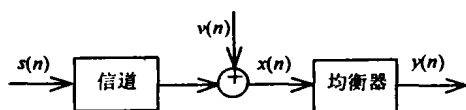


图1 数字通信系统模型

2 新的判决反馈均衡器的结构与算法

数字通信的非线性信道可以看成线性失真 L 和非线性失真 N 级联而成(见图2),因而对信道的补偿也应由非线性补偿器 N^{-1} 和线性补偿器 L^{-1} 来共同完成,两者的级联就构成了一个非线性均衡器。通常,数字信号的线性失真和非线性失真是同时存在的,为了补偿信道的线性与非线性失真,我们试图将Adaline网络与RBF网络相结合以发挥两者的优点来共同实现线性均衡和非线性均衡。另外,对于码间干扰较严

重并具有轻微非线性失真的信道,判决反馈结构的均衡器是受人青睐的选择,其研究也备受关注^[6]。基于上述考虑,我们构造了图3所示的非线性均衡器,其输入由两部分组成:一部分为畸变信号矢量 $x^l(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-L+1)]^T$,即前馈信号 $x(n)$ 的 L 个延迟,另一部分为信号矢量 $x^b(n) = [x(n-1), x(n-2), \dots, x(n-M)]^T$,即判决反馈信号 $x(n)$ 的 M 个延迟。输入信号经线性Adaline网络以及非线性的径向基函数网络作用后得到输出信号 $y(n)$,经判决后再反馈回来引导均衡器的工作。常用的径向基函数为高斯函数

$$\varphi(x) = \exp(-x^2/\sigma^2) \quad (1)$$

其中方差 σ 是常数,它影响着函数的图形形状。

为了使径向基函数的图形形状不至于太尖或太平, σ 可取为径向基函数各中心间的最大距离^[2]。根据以上网络的结构可知,均衡器的输出信号为

$$y(n) = \sum_{i=0}^{L-1} w_i^l x(n-i) + \sum_{j=1}^M w_j^b x(n-j) + \sum_{k=1}^N w_k \varphi(\|x(n) - c_k\|) \quad (2)$$

其中 w_i^l, w_j^b 以及 w_k 是均衡器的系数,即神经网络的权值。 $x(n) = [x^l(n), x^b(n)]^T$ 是整个网络的输入信号矢量, c_k 是径向基函数的中心, $\|\cdot\|$ 是欧几里得范数。将网络的期望输出响应信号 $d(n)$ 作为导师信号,它与输出信号 $y(n)$ 形成的误差信号为 $e(n) = d(n) - y(n)$ 。采用均方误差 $E(e^2(n))$ 最小准则来调整均衡器系数可得到如下权系数的迭代公式:

$$w_i^l(n+1) = w_i^l(n) + \mu_w e(n) x(n-i), 0 \leq i \leq L-1 \quad (3)$$

$$w_j^b(n+1) = w_j^b(n) + \mu_w e(n) x(n-j), 1 \leq j \leq M \quad (4)$$

$$w_k(n+1) = w_k(n) + \mu_w e(n) \varphi(\|x(n) - c_k\|), 1 \leq k \leq N \quad (5)$$

同时对径向基函数的中心 c_k 按随机梯度法来调整^[3],则有以下迭代公式

$$c_{k,l}(n+1) = c_{k,l}(n) + \mu_c e(n) \varphi(\|x_l(n) - c_{k,l}(n)\|), 1 \leq k \leq N, 1 \leq l \leq L+M \quad (6)$$

式中 $c_{k,l}(n), x_l(n)$ 分别是 c_k 和 $x(n)$ 中第 l 个分量。这样我们可以将新的自适应均衡算法的主要步骤归纳如下:

- (1) 初始化均衡器的系数 w_i^l, w_j^b 以及 w_k ;
- (2) 根据式(2)计算均衡器的输出 $y(n)$;
- (3) 计算误差信号并根据式(3)、(4)和(5)调整均衡器的

^{*} 陕西省自然科学基金资助(2000SL02)。王军锋 副教授,博士生,从事小波分析、神经网络及自适应信号处理等方面的研究。张 斌 讲师,博士生,从事小波理论及图像处理等方面的研究。宋国乡 教授,博导,从事小波理论与应用、有限元、微分方程数值解等方面的研究。

系数 w_i^f, w_i^b 以及 w_k ;

(4)根据式(6)更新中心矢量。

如果我们记 $w(n)=[w_0^f, \dots, w_{L-1}^f, w_1^b, \dots, w_M^b, w_1, \dots, w_N]^T$, $\varphi_k(n)=\varphi(\|x(n)-c_k\|)$, 而 $x'(n)=[x(n), \dots, x(n-L+1), z(n-1), \dots, z(n-M), \varphi_1(n), \dots, \varphi_N(n)]^T$, 则 $y(n)=w^T x'$, 于是输出关于矢量 $x'(n)$ 是线性关系, 即均方误差 $E(e^2(n))$ 关于权系数是二次函数, 从而就具有唯一的极小值点。这样我们就可以考虑进一步提高均衡器的收敛速度, 比如对方差 σ 和中心 c_k 按随机梯度法来调整, 而将权系数用递归最小二乘法(RLS)来调整, 此时会涉及一些初值的选取等诸多问题, 限于篇幅, 我们以后再进一步讨论。

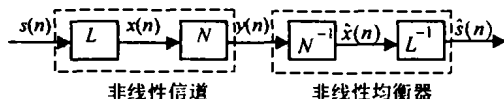


图2 非线性信道均衡模型图

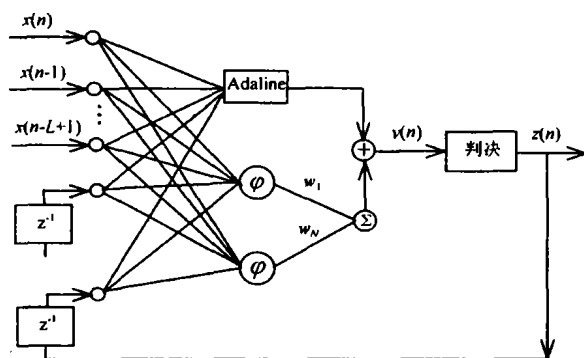


图3 新的判决反馈均衡器的结构

3 计算机仿真

为了比较本文提出的均衡器与文[2]提出的 RBFN 均衡器以及 DFE 的收敛性能, 我们在仿真中分别采用线性信道和非线性信道, 其中线性信道的输出为

$$x(n)=0.3482s(n)+0.8704s(n-1)+0.3482s(n-2)+v(n) \quad (7)$$

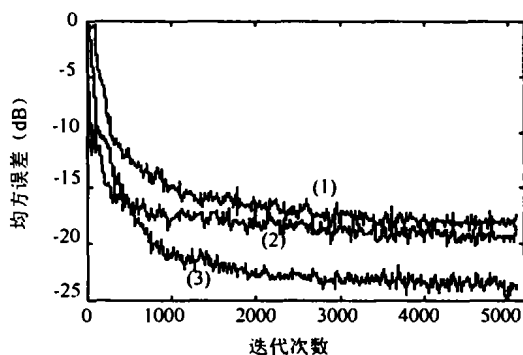


图4 线性信道三种均衡算法的学习曲线图

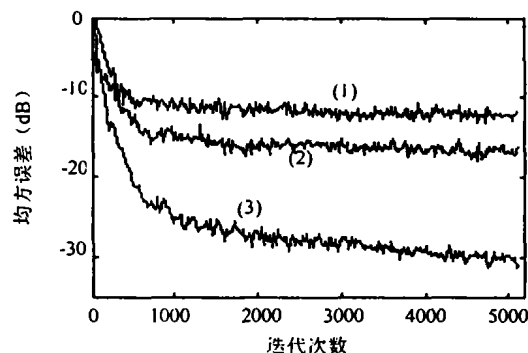


图5 非线性信道三种均衡算法的学习曲线图

非线性信道的输出由下式给出

$$x(n)=r(n)+0.2r^2(n)+0.15r^3(n) \quad (8)$$

$$r(n)=0.5s(n)+s(n-1) \quad (9)$$

其中 $s(n)$ 为发送的 2-PAM 信号序列, $v(n)$ 为高斯白噪声, 信噪比为 20dB, $L=2, M=1, N=30$ 。

图4和图5中的曲线(1)、(2)、(3)分别是 DFE 算法、基于 RBFN 的均衡算法和本文算法的学习曲线, 从中可以看出: 对于线性信道, DFE 算法的性能还可以; 对于非线性程度较高的信道, DFE 算法性能就较差, 此时基于 RBFN 的均衡算法要好一些, 而无论是线性还是非线性信道, 本文的算法都具有很好的收敛性能。

结论 研究基于神经网络的自适应均衡器有非常重要的意义。本文在研究已有均衡器结构和算法的基础上, 提出了一种组合神经网络的判决反馈均衡器及其算法。仿真结果表明对有轻度失真的非线性信道, 该算法具有较快的收敛速度, 并且收敛后的稳态误差较小, 如何将该网络应用于自适应信号处理的其它领域还有待进一步研究。

参考文献

- 1 Proakis J G. Digital communications. McGraw-Hill, New York, 3rd Ed., 1995
- 2 Chen S, Gibson G J, et al. Reconstruction of binary signals using an adaptive radial-basis-function equalizer. Signal Processing, 1991, 22(1): 77~93
- 3 Cha I, Kassam S A. Channel equalization using adaptive complex radial basis function networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1995, 13(1): 122~131
- 4 Ong S, Yon C, et al. A decision feedback recurrent neural equalizer as a infinite response filters. IEEE Trans SP, 1997, 45(11): 2851~2858
- 5 In G-H, Kang K-M. Performance of a hybrid decision feedback equalizer structure for CAP-based DSL system. IEEE Trans SP, 2001, 49(8): 1768~1785
- 6 吴晓富, 孙松康. 双判决反馈均衡的改进算法研究. 通信学报, 2001, 22(5): 97~101