



中国计算机学会学术著作丛书

天津市自然科学学术著作出版资助项目

天津市科协资助出版

神经网络盲均衡 理论、算法与应用

张立毅 等著



清华大学出版社

014021945

TP183

129



中国计算机学会学刊

天津市自然科学学术著作出版资助项目

天津市科协资助出版

神经网络盲均衡 理论、算法与应用

张立毅 等著



TP183
129



北航

C1705854

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书共分8章,系统地介绍了神经网络盲均衡算法的基本理论及算法形式。首先,分析了盲均衡算法的基本原理、均衡准则、评价指标以及与神经网络的结合机理;其次,系统研究了前馈神经网络、反馈神经网络、进化神经网络、模糊神经网络和小波神经网络盲均衡算法的基本原理,推导了算法迭代公式,并进行了计算机仿真;最后,采用 Zigzag 编码和前馈神经网络实现了二维医学图像的盲均衡。

本书既注重结构的完整性和内容的连续性,也强调了理论推导的循序性和语言描述的精练性,还力求从简到繁、由浅入深、循序渐进、通俗易懂。

本书可供信息与通信工程学科的研究生以及从事电子与通信技术的广大科技人员学习和参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

神经网络盲均衡理论、算法与应用 / 张立毅等著. —北京:清华大学出版社, 2013

(中国计算机学会学术著作丛书)

ISBN 978-7-302-31011-2

I. ①神… II. ①张… III. ①人工神经网络—盲均衡算法 IV. ①TP183

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第304163号

责任编辑:汪汉友

封面设计:傅瑞学

责任校对:梁毅

责任印制:杨艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:12

字 数:298千字

版 次:2013年12月第1版

印 次:2013年12月第1次印刷

印 数:1~1000

定 价:39.00元

产品编号:049991-01

前 言

盲均衡技术作为一种不借助训练序列,仅利用接收序列本身的先验信息来均衡信道特性、使其输出序列尽量逼近发送序列的新兴自适应均衡技术,可以有效地克服码间干扰,提高通信质量。神经网络作为一门集神经科学、信息科学、计算机科学于一体的交叉边缘学科,具有大规模并行、分布式存储与处理、自组织、自适应、自学习和高度的容错能力。神经网络与盲均衡算法相结合,可以提高收敛性能,改善均衡效果,是目前通信、信号与信息处理等学科的一个重要前沿热点研究课题,具有重要的理论意义和实用价值。

本书第一作者及其所指导的博士和硕士研究生由孙云山、张晓琴、白煜、鲁瑞、牛晓薇、程海青、贾枫美、贾艳玲、李沅、康艳旗、刘永等组成的科研团队自2000年开始,在山西省自然科学基金项目“移动通信盲均衡器研究”(20011035)、中国博士后科学基金项目“模糊神经网络在盲均衡技术中的应用研究”(20060390170)、山西省自然科学基金项目“基于神经网络盲均衡技术的研究”(20051038)和天津市高等学校科技发展基金项目“基于进化神经网络盲均衡算法的研究”(20060610)、“基于 Zigzag 变换的医学图像盲恢复算法的研究”(20110709)等课题的资助下,将神经网络与盲均衡算法有机结合,系统地研究了基于神经网络,尤其是新型神经网络的盲均衡算法,一些研究成果已在国内外重要学术期刊及国际国内会议上发表。本书作为这些研究成果的总结与提炼,基本反映了目前国内外神经网络盲均衡算法方面最新的研究动态及学科前沿情况。

本书共分8章。第1章为绪论,介绍了盲均衡技术的研究意义及应用领域,综述了神经网络盲均衡算法的分类及研究现状;第2章为神经网络盲均衡算法的理论,介绍了盲均衡的概念、结构、算法形式及均衡准则,阐述了神经网络盲均衡算法的基本原理和学习方法,分析了盲均衡算法的评价指标;第3章为前馈神经网络盲均衡算法的研究,研究基于三层、四层、五层前馈神经网络盲均衡算法和基于动量项、时变动量项盲均衡算法以及时变步长神经网络盲均衡算法;第4章为反馈神经网络盲均衡算法的研究,研究基于双线性反馈神经网络、对角递归神经网络、准对角递归神经网络盲均衡算法以及基于均方误差非线性函数的时变步长对角递归神经网络和准对角递归神经网络盲均衡算法;第5章为模糊神经网络盲均衡算法的研究,研究基于模糊神经网络滤波器、模糊神经网络控制器和模糊神经网络分类器的盲均衡算法;第6章为进化神经网络盲均衡算法的研究,研究基于遗传算法优化神经网络权值和结构的盲均衡算法;第7章为小波神经网络盲均衡算法的研究,研究前馈小波神经网络和反馈小波神经网络盲均衡算法;第8章为神经网络盲均衡算法在医学图像处理中的应用,重点研究在医学CT图像恢复中的应用情况。

在本书编写过程中,得到了天津大学博士研究生导师滕建辅教授、北京理工大学博士研究生导师沙定国教授、太原理工大学博士研究生导师王华奎教授等的大力支持和帮助,也参阅和引用了部分国内外学者的相关文献,在此一并致以诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中难免会出现一些疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者
2012年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 盲均衡技术的研究意义	1
1.2 盲均衡技术的应用	2
1.2.1 在数字电视中的应用	2
1.2.2 在 CATV 系统中的应用	2
1.2.3 在智能天线中的应用	3
1.2.4 在软件无线电中的应用	3
1.2.5 在图像盲恢复中的应用	3
1.2.6 在射频识别中的应用	4
1.3 神经网络盲均衡算法的研究进展	4
1.3.1 前馈神经网络盲均衡算法	4
1.3.2 反馈神经网络盲均衡算法	6
1.3.3 模糊神经网络盲均衡算法	7
1.3.4 进化神经网络盲均衡算法	8
1.3.5 小波神经网络盲均衡算法	9
1.4 本书研究背景及结构安排	9
1.4.1 本书研究背景	9
1.4.2 本书结构安排	10
第 2 章 神经网络盲均衡算法的理论	11
2.1 盲均衡的基本原理	11
2.1.1 盲均衡的概念	11
2.1.2 盲均衡器的结构	11
2.1.3 盲均衡采用的基本算法	12
2.1.4 盲均衡的均衡准则	14
2.2 神经网络的基本理论	17
2.2.1 人工神经网络的概念	17
2.2.2 人工神经网络的发展	18
2.2.3 人工神经网络的特点	18
2.2.4 人工神经网络的结构及分类	19
2.3 神经网络盲均衡算法的基本原理	20
2.3.1 基于神经网络滤波器的盲均衡算法的原理	20
2.3.2 基于神经网络控制器的盲均衡算法的原理	21
2.3.3 基于神经网络分类器的盲均衡算法的原理	21

2.4	神经网络盲均衡算法的学习方法	22
2.4.1	BP 算法	22
2.4.2	改进型 BP 算法	23
2.5	神经网络盲均衡算法的评价指标	27
2.5.1	收敛速度	27
2.5.2	运算复杂度	27
2.5.3	误码特性	27
2.5.4	跟踪时变信道的能力	28
2.5.5	抗干扰能力	28
2.5.6	代价函数的凸性	28
2.5.7	稳态剩余误差	29
2.6	本章小结	32
第 3 章	前馈神经网络盲均衡算法的研究	33
3.1	前馈神经网络的基本原理	33
3.1.1	前馈神经网络的概念	33
3.1.2	前馈神经网络的结构	33
3.1.3	前馈神经网络的特点	33
3.2	三层前馈神经网络盲均衡算法	34
3.2.1	三层前馈神经网络的模型	34
3.2.2	实数条件下三层前馈神经网络盲均衡算法	34
3.2.3	复数条件下三层前馈神经网络盲均衡算法	36
3.3	多层前馈神经网络盲均衡算法	41
3.3.1	多层前馈神经网络的概念	41
3.3.2	四层前馈神经网络盲均衡算法	41
3.3.3	五层前馈神经网络盲均衡算法	45
3.4	动量项前馈神经网络盲均衡算法	52
3.4.1	算法的基本原理	52
3.4.2	算法形式的推导	53
3.4.3	计算机仿真	54
3.5	时变动量项前馈神经网络盲均衡算法	56
3.5.1	算法的基本原理	56
3.5.2	算法形式的推导	57
3.5.3	计算机仿真	58
3.6	变步长前馈神经网络盲均衡算法	59
3.6.1	算法的基本原理	59
3.6.2	算法形式的推导	60
3.6.3	计算机仿真	60
3.7	本章小结	62

第 4 章 反馈神经网络盲均衡算法的研究	63
4.1 反馈神经网络的基本原理	63
4.1.1 反馈神经网络的概念	63
4.1.2 反馈神经网络的结构	63
4.1.3 反馈神经网络的特点	63
4.2 基于双线性反馈神经网络的盲均衡算法	64
4.2.1 双线性反馈神经网络的基本原理	64
4.2.2 实数条件下双线性反馈神经网络盲均衡算法	65
4.2.3 复数条件下双线性反馈神经网络盲均衡算法	66
4.3 对角递归神经网络盲均衡算法	69
4.3.1 对角递归神经网络的模型	69
4.3.2 算法形式的推导	70
4.3.3 计算机仿真	71
4.4 准对角递归神经网络盲均衡算法	73
4.4.1 准对角递归神经网络的模型	73
4.4.2 算法形式的推导	74
4.4.3 计算机仿真	76
4.5 变步长对角递归神经网络盲均衡算法	78
4.5.1 算法的基本原理	78
4.5.2 算法形式的推导	78
4.5.3 计算机仿真	78
4.6 变步长准对角递归神经网络盲均衡算法	80
4.6.1 算法的基本原理	80
4.6.2 算法形式的推导	81
4.6.3 计算机仿真	81
4.7 本章小结	84
第 5 章 模糊神经网络盲均衡算法的研究	85
5.1 模糊神经网络的基本原理	85
5.1.1 模糊神经网络的概念	85
5.1.2 模糊神经网络的结构	85
5.1.3 模糊隶属函数的选取	86
5.1.4 模糊神经网络的学习算法	87
5.1.5 模糊神经网络的特点	87
5.2 模糊神经网络滤波器盲均衡算法	88
5.2.1 算法的基本原理	88
5.2.2 算法形式的推导	88
5.2.3 计算机仿真	91
5.3 模糊神经网络控制器盲均衡算法	92
5.3.1 算法的基本原理	92

5.3.2	算法形式的推导	92
5.3.3	计算机仿真	95
5.4	模糊神经网络分类器盲均衡算法	96
5.4.1	算法的基本原理	96
5.4.2	算法形式的推导	96
5.4.3	计算机仿真	99
5.5	本章小结	101
第 6 章	进化神经网络盲均衡算法的研究	102
6.1	进化神经网络的基本原理	102
6.1.1	遗传算法的概念	102
6.1.2	遗传算法的发展	103
6.1.3	遗传算法的参数	104
6.1.4	遗传算法的基本流程	108
6.1.5	遗传算法的特点	108
6.1.6	遗传算法与神经网络的结合机理	109
6.2	GA 优化神经网络权值盲均衡算法	109
6.2.1	算法的基本原理	109
6.2.2	二进制编码 GA 优化神经网络权值盲均衡算法	110
6.2.3	实数编码 GA 优化神经网络权值盲均衡算法	114
6.3	GA 优化神经网络结构盲均衡算法	117
6.3.1	算法的基本原理	117
6.3.2	算法形式的推导	117
6.3.3	计算机仿真	119
6.4	本章小结	122
第 7 章	小波神经网络盲均衡算法的研究	123
7.1	小波神经网络的基本原理	123
7.1.1	小波神经网络的概念	123
7.1.2	小波神经网络的结构	124
7.1.3	小波神经网络的特点	124
7.2	前馈小波神经网络盲均衡算法	124
7.2.1	算法的基本原理	124
7.2.2	实数条件下前馈小波神经网络盲均衡算法	125
7.2.3	复数条件下前馈小波神经网络盲均衡算法	128
7.3	反馈小波神经网络盲均衡算法	134
7.3.1	算法的基本原理	134
7.3.2	实数条件下反馈小波神经网络盲均衡算法	134
7.3.3	复数条件下反馈小波神经网络盲均衡算法	137
7.4	本章小结	143

第 8 章 神经网络盲均衡算法在医学图像处理中的应用	144
8.1 图像盲均衡的概念	144
8.1.1 医学 CT 图像的成像机理及退化过程	144
8.1.2 医学 CT 图像盲均衡的基本原理	145
8.1.3 医学图像盲均衡的定量衡量指标	146
8.2 基于 Zigzag 编码的医学 CT 图像神经网络盲均衡算法	147
8.2.1 算法的基本原理	147
8.2.2 算法迭代公式推导	148
8.2.3 算法收敛性能分析	149
8.2.4 计算机仿真	151
8.3 双 Zigzag 编码的医学 CT 图像神经网络盲均衡算法	154
8.3.1 算法的基本原理	154
8.3.2 算法迭代公式推导	155
8.3.3 计算机仿真	158
8.4 本章小结	160
附录 A 复值三层前馈神经网络盲均衡算法隐层权值迭代公式的推导	161
附录 B 复值双线性反馈神经网络盲均衡算法迭代公式的推导	163
附录 C 模糊隶属函数的类型	167
附录 D 动态递归模糊神经网络盲均衡算法迭代公式的推导	170
参考文献	174

第1章 绪 论

本章提要

本章分析了盲均衡的研究意义和应用领域,综述了神经网络盲均衡算法的分类及研究现状,指出了本书的研究背景和所做的主要工作。

1.1 盲均衡技术的研究意义

自1975年日本学者 Y. Sato 教授^[1]首次提出盲均衡(当时称为自恢复均衡, Self-recovering Equalization)的概念以来,由于能够有效地克服码间干扰(Inter-symbol Interference, ISI),减小误码率,改善接收效果,提高通信质量,目前已逐步成为数字通信技术中的关键技术之一,也是通信与信号处理学科的一个前沿热点研究课题。

盲均衡(Blind Equalization)是在克服和改善自适应均衡(Adaptive Equalization)缺陷的基础上发展起来的,它不需要发送训练序列,仅仅利用接收序列本身的先验信息,便可均衡信道特性,使均衡器的输出序列尽量逼近发送序列。

自适应均衡是在数据传输之前,首先发送接收端已知的训练序列,接收机测量出该序列通过信道后产生的变化或误差,并依据该误差信息对均衡器参数进行调整,最终使均衡器正好补偿信道特性,从而使接收机能够从均衡器输出序列中得到几乎无错的发送信号,保证数据的可靠传输,该过程称为自动均衡(Automatic Equalization),此时的均衡器被称为工作在训练模式。当训练结束时,均衡器参数的调整达到收敛,判决信号可靠性较高,误码率较小。训练过程结束后,数据开始传输,此时发送信号是未知的,为了动态跟踪信道特性可能发生的变化,接收机将均衡器输出的判决信号作为参考信号,用来测量信道变化产生的误差,对均衡器输出的信号继续进行调整,此时被称为判决引导均衡(Decision-directed Equalization)。根据自适应滤波理论,均衡器在判决引导模式下能正常工作的条件是输入信号的眼图预先张开到一定程度,以保证均衡器可靠收敛。如果这个条件不满足,就要由发送端再发送一个接收端已知的训练序列对均衡器进行训练,使之收敛。因而训练过程也被称为均衡器的学习过程,对一般通信系统来讲是不可缺少的阶段。

均衡技术的发展和应用极大地提高了通信系统的性能,正如 R. D. Gitlin 等^[2]所述“数据通信技术的变革可以追溯到20世纪60年代末自动和自适应均衡技术的发现”。但是,随着数字通信技术向宽带、高速、大容量方向的发展,自适应均衡技术日益暴露出其自身的不足和缺陷,主要有以下几点^[3]。

(1) 由于训练序列不传输有用信息,因而降低了通信系统的信息传输速率。如在全球移动通信(Global System for Mobile Communication, GSM)系统中,每148个符号中就有26个供训练用的符号,导致18%的容量损失^[4];在高频通信系统中,用于传输训练序列的时间甚至会占去总传输量的50%^[5]。

(2) 对于一个快速时变信道,必须频繁地发送训练序列,以便不断地更新信道估计,跟踪信道变化。

(3) 在广播型或点对多点通信网中,如果某一个分支信道暂时失效后要恢复工作,就必须重新均衡该分支接收机。这时要么它得不到训练信号,要么要求中心站中断与其他分支信道的通信,而给该信道发送训练序列,要么在中心站的传送信号中一直插有训练信号。数字 HDTV 就是广播型通信的典型例子。

(4) 由于信道上的干扰或其他因素的影响,有可能使接收机有时无法跟踪上,从而出现通信中断。为了重新建立通信,就需要发送端再发送训练序列,这就要求系统增加反馈信道,以传送“请求训练信号”,使得系统复杂,难以实现。

(5) 在一些特殊应用场合,接收机无法得到训练序列。如信息截获、侦察系统、图像重建等。

因此,盲均衡能够有效地克服自适应均衡的缺陷,对于信道的经常性衰落、严重的非线性及时变特性、多径传播等的影响,以及接收机无法跟踪上信道特性而出现的通信中断,都能够自适应均衡、调整参数、跟踪信道特性,完成对信号的最佳估计。

1.2 盲均衡技术的应用

目前,盲均衡技术已广泛应用于通信、雷达、声纳、控制工程、地震勘探、生物医学工程等领域。尤其是在通信领域,可以说是渗透到了各个行业之中^[6,7]。

1.2.1 在数字电视中的应用

全数字化高清晰度电视(High Definition Television, HDTV)已成为广播电视的普及趋势,美国、日本等均已制定了多种数字化广播电视的传输方案,如宽带正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)传输方案、残留边带调制(Vestigial Sideband, VSB)传输方案、正交频分复用调制(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)传输方案等。目前形成了3个国际标准,即欧洲 DVB 组织提出的以 COFDM 为核心技术的 DVB-T 标准,美国大联盟组织提出的以 8VSB 为核心技术的 ATSC 标准,日本提出的以 BST-OFDM 为核心技术的 ISDB-T 标准。它们与现行模拟广播电视的最大区别在于全部传输数字信息,包括图像、伴音、附加信息、前向纠错、同步信息等。这些数字信息在传输过程中,由于信道的经常性衰落、多径传播等的影响,都会产生码间干扰。为了消除干扰,减小误码率,大多采用了盲均衡技术。如美国的 DigiCipher 和 CC-DigiCipher 系统^[8]均采用了盲均衡加横向滤波器方案,由4组256抽头横向滤波器组成复信道均衡器,采用32QAM/16QAM调制,传输率为19.2Mbps。杨勇^[9]基于ATSC数字电视接收机,设计了一种双模盲均衡器。

1.2.2 在 CATV 系统中的应用

1995年国际电信联盟远程通信标准化组织(International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector, ITU-T)J.83建议书《电视、声音和数据业务有线分配的数字多节目系统》(Digital Multi-programme Systems For Television, Sound And

Data Services For Cable Distribution)是国际电信联盟制定的第一个有关数字有线电视系统的标准,反映了数字视频传输系统的实用化水平。由于ITU标准的权威性及其反映的技术可行性,各国在制订数字视频传输系统技术方案时都必须与J.83建议书相兼容。该标准提出了数字视频传输系统的4种技术方案。其中,前三种方案(方案A,B,C)的调制方式为QAM方式。在QAM方式中,采用了本地载波恢复与盲均衡,使其实时性较好,且64QAM专用芯片已经商业化^[10]。

1.2.3 在智能天线中的应用

智能天线(Smart Antenna)是一个由 N 个天线单元组成的阵列天线,每个单元有 M 套加权器,可以形成 M 个不同方向的波束。在实际使用时,通过调节权值矩阵,可以改变阵列天线的方向图,从而使得波束随着用户走,抑制了干扰,提高了信噪比。

智能天线技术在实现过程中要采用多种不同的算法,主要有自适应算法(如最小均方算法和递归最小二乘算法)和盲均衡算法(使用最多的是恒模算法)^[11]。如日本ATR光电通信研究所研制的基于波束空间处理方式的多波束智能天线,其阵元布局为间距半波长的16阵元平面阵,射频工作频率为1.545GHz。阵元组件在接收信号后,首先模数变换,然后进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),形成正交波束,再采用恒模算法(当同信道干扰较大时)或最大比值合并分集算法(当噪声较大时),最后利用FPGA实现实时天线配置,完成智能处理。天线数字信号处理部分由10片FPGA完成,整块电路板大小为 $23.3 \times 34.0 \text{ cm}^2$ ^[12]。

1.2.4 在软件无线电中的应用

软件无线电(Software Radio)是指构建一个通用的、可重复编程的硬件平台,使其工作频段、调制解调方式、业务种类、数据速率与格式、控制协议等都可以进行重构和控制,选用不同的软件模块就可以实现不同类型和功能的无线电台。其核心思想是在尽可能靠近天线的地方,使用宽带D/A和A/D转换器,并利用软件来定义无线功能^[13]。

软件无线电中,数字信号处理模块为其核心部分,主要用于实时处理变换后的数字信号,并用软件来实现大量的无线电功能,如编解码、调制解调、滤波、同步、盲均衡、检测、数据加密、传输纠错、跳扩频及解扩和解跳、通信环境评估、信道选择等,它可以灵活扩展,以满足不同无线通信系统对数字信号处理的运算速度和运算量的要求。其中,盲均衡的作用是用以补偿信道的非理想特性,消除码间干扰^[14]。

1.2.5 在图像盲恢复中的应用

图像盲恢复(Blind Image Restoration)是在未知图像退化过程的前提下,仅利用退化图像来消除点扩展函数的影响,以恢复原始图像的一种技术,目前广泛应用于天文成像、医疗诊断、军事公安等领域^[15,16]。

在图像盲恢复算法中,刘涛等^[17]率先将一维盲均衡算法扩展应用到二维图像处理中,将图像信号的传输等效为一个单输入单输出线性时不变系统,然后采用盲均衡算法进行图像恢复。孙云山等^[18-25]采用行列变换、正交变换、Zigzag编码等方法将二维医学图像转换为一维信号,提出了多种图像盲均衡算法,计算机仿真验证了其有效性。

1.2.6 在射频识别中的应用

射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)技术是 20 世纪 90 年代兴起的一种新型的非接触式自动识别技术,通过无线射频方式在读写器和射频标签之间进行非接触双向数据传输,以达到目标识别和数据交换的目的。由于具有非接触、读识速度快、无磨损、不受环境影响、寿命长、便于使用等特点。目前,RFID 技术已在工业自动化、商业自动化、物流管理、交通运输控制管理等众多领域得到广泛应用^[26]。

但在射频信号接收和传输过程中,由于带限发射和多径效应等的影响,产生了码间干扰,严重影响检测和识别的正确率。宋伟伟^[27]针对信道的码间干扰问题提出了恒模(Constant Modulus Algorithm, CMA)盲均衡算法,张立毅等^[28]提出了一种基于时变步长神经网络盲均衡算法,白煜^[29]将 Bussgang 盲均衡算法引入高性能 UHF RFID 系统,并针对 Rayleigh 衰落信道与 Rician 衰落信道进行了计算机仿真,验证了该方法能有效降低系统误码率。

1.3 神经网络盲均衡算法的研究进展

基于神经网络盲均衡算法是利用神经网络大规模并行、分布式存储与处理、自组织、自适应、自学习和高度的容错能力等特点来逼近信道特性,恢复发送信号。目前,神经网络盲均衡算法有多种分类方法。按照神经网络盲均衡算法的基本原理,主要有代价函数法和能量函数法^[30];按照神经网络与盲均衡的结合机理,主要有基于神经网络滤波器的盲均衡算法、基于神经网络分类器的盲均衡算法和基于神经网络控制器的盲均衡算法^[31];按照神经网络的不同结构,主要有前馈神经网络盲均衡算法、反馈神经网络盲均衡算法、小波神经网络盲均衡算法、模糊神经网络盲均衡算法和进化神经网络盲均衡算法等。

1.3.1 前馈神经网络盲均衡算法

前馈神经网络(Feed-Forward Neural Network, FNN)一般由输入层、输出层和隐层组成,各神经元只接收前一层的输出作为自己的输入,并且将其输出给下一层,整个网络中没有反馈。每一个神经元都可以有任意多个输入,但只允许有一个输出。具有结构简单、计算量小等优点。

1991 年, N. Benvenuto 等^[32]针对卫星移动通信系统提出了一种复值多层前馈神经网络的盲均衡器,用多层前馈神经网络代替传统的横向滤波器,但它只适用于多普勒信号。Cheolwoo You 等^[33]于 1998 年针对 QAM 信号提出了其改进算法(简称 FNN 算法),其代价函数为

$$J(n) = \tilde{x}(n) [\beta \operatorname{sgn}(|\operatorname{dec}(\tilde{x}(n))|^2) - |\tilde{x}(n)|^2] \quad (1.1)$$

传递函数为

$$f(x) = f(\tilde{x}_R(n)) + j f(\tilde{x}_I(n)) \quad (1.2)$$

$$f(x) = x + \alpha \sin \pi x \quad (1.3)$$

式中, $\tilde{x}(n)$ 为均衡器的输出信号; β 为待定参数; $\tilde{x}_R(n)$ 和 $\tilde{x}_I(n)$ 分别为 $\tilde{x}(n)$ 的实部和虚部; $\alpha > 0$, 为比例因子。

S. Mo 等^[34]于 1994 年提出采用前馈神经网络和高阶累积量的盲均衡算法,利用输出信号的四阶谱对信道进行辨识,然后采用神经网络的非线性构造出该信道的逆信道。该方案可用于线性信道或非线性信道,克服了信道阶次不确定所带来的影响,对加性噪声也具有一定的容错性,但收敛速度较慢,只能用于 PAM 信号,且文中没有对代价函数的凸性进行讨论,不能保证收敛到全局最优。

梁启联等^[35]提出了基于多层神经网络与高阶累积量的盲均衡算法,他们将 Rossario 算法与 Solis 的随机算法相结合,前者能用相对较少的迭代次数找到局部最小点,加快收敛速度,而后者能保证单向收敛到全局最小,其代价函数为

$$J(n) = \frac{1}{2}[y(n) - \tilde{x}(n)]^2 \quad (1.4)$$

式中, $y(n)$ 为接收信号,即盲均衡器的输入信号。

2003 年, Zhang Liyi 等^[36]采用三层前馈神经网络结构和传统恒模盲均衡算法 CMA 的代价函数,为

$$J(n) = \frac{1}{2}[|\tilde{x}(n)|^2 - R_2]^2 \quad (1.5)$$

传递函数以双曲正切函数为基础予以变形,为

$$f(x) = x + \alpha \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (1.6)$$

式中, R_2 与恒模盲均衡算法定义一致,为

$$R_2 = \frac{E[|x(n)|^4]}{E[|x(n)|^2]^2} \quad (1.7)$$

在该传递函数中,通过改变比例因子 α 的值,可以适用于不同幅度信号的均衡。对于幅度间隔较大的信号, α 取较大的值,幅度间隔较小的信号取较小的值,这样有利于对输出信号进行分类。经计算机仿真表明,算法的收敛速度有所提高。

同年,张立毅^[37]在分析盲均衡算法步长因子对收敛性能影响的基础上,提出了变步长神经网络盲均衡算法,并采用误差信号峰度作为步长控制因子,见式(1.8)

$$\mu(n) = \alpha |K[e(n)]| \quad (1.8)$$

$$K[e(n)] = E[|e(n)|^4] - 2E^2[|e(n)|^2] - |E[e^2(n)]|^2 \quad (1.9)$$

式中, α 为比例因子,用于控制步长 $\mu(n)$ 的大小; $K[e(n)]$ 为误差信号 $e(n)$ 的峰度。

该算法在均衡开始阶段使用较大的步长,加快收敛速度,在接近收敛时逐渐减小步长,降低稳态剩余误差,有效地解决了收敛速度和收敛精度之间的矛盾。

2005 年,肖瑛等^[38]提出了一种水声通信中变步长神经网络盲均衡算法,其方法是先设定一个较小的步长值,若一次迭代后 $J(n)$ 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 $J(n)$ 减小,则将步长乘以一个大于 1 的常数 b ,即迭代步长的变化为

$$\mu(n) = \begin{cases} a\mu, & a < 1 \text{ 且 } \Delta J(n) > 0 \\ b\mu, & b > 1 \text{ 且 } \Delta J(n) < 0 \end{cases} \quad (1.10)$$

神经网络结构选取三层前馈神经网络。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。

2005 年,程海青等^[39]在分析恒模盲均衡算法代价函数特点的基础上,根据前馈神经网

络的特点构造出一个新的代价函数

$$J(n) = \frac{1}{2} [|\hat{x}(n)|^2 - R_2]^2 + \frac{\alpha}{2} [|\hat{x}(n)|^2 - |\tilde{x}(n)|^2]^2 \quad (1.11)$$

式中, $\frac{1}{2} [|\hat{x}(n)|^2 - R_2]^2$ 为传统 CMA 算法代价函数, $\frac{\alpha}{2} [|\hat{x}(n)|^2 - |\tilde{x}(n)|^2]^2$ 为均方误差函数, $\hat{x}(n)$ 为判决器输出的恢复信号, 其中 α 用来调节误差函数在整个代价函数中的比重。传递函数选用式(1.3)。

该方法使传统恒模盲均衡算法的代价函数与神经网络的误差函数在权值更新过程中同时减小, 加快了收敛速度, 减小了稳态剩余误差, 降低了误码率, 从而达到了较好的均衡效果。但代价函数中出现了比例因子 α , 只能由试验确定。

2006 年, 贾燕玲^[40] 分别采用 Sigmoid 函数和箕舌线作为步长控制因子, 见式(1.12)和式(1.13), 得到了两种变步长神经网络盲均衡算法。

$$\mu(n) = \beta [1 - e^{-\alpha E[e^2(n)]}] \quad (1.12)$$

$$\mu(n) = a \left[1 - \frac{1}{be^2(n) + 1} \right] \quad (1.13)$$

式中, α 为待定参数, 用于控制步长变化的快慢; β 为比例因子, 是控制 $\mu(n)$ 取值范围的常数; a 为幅值调整系数; b 为箕舌线波形控制系数。

同年, 张晓琴等^[41] 研究了三层前馈神经网络盲均衡算法在 QAM 等复数系统中的应用, 代价函数选用传统恒模盲均衡算法的代价函数, 见式(1.5), 传递函数为

$$f(x) = x + E[e^2(n)] \sin \pi x \quad (1.14)$$

式中, $e(n) = \hat{x}(n) - \tilde{x}(n)$ 为误差函数。

经计算机仿真表明, 算法降低了误码率和稳态剩余误差。

2006 年和 2007 年, Zhang Liyi^[42,43] 和程海青^[44] 等还分析了动量因子对盲均衡算法性能的影响, 分别提出了基于动量项前馈神经网络盲均衡算法和基于可变动量因子的神经网络盲均衡算法, 计算机仿真验证了所提算法的有效性。

2007 年, 康艳旗^[45] 研究了四层和五层前馈神经网络盲均衡算法, 与三层前馈神经网络盲均衡算法相比, 收敛精度提高, 但收敛速度减慢, 运算复杂度增加。

1.3.2 反馈神经网络盲均衡算法

反馈神经网络(即递归神经网络)(Feed-Back Neural network, FBN)中各神经元之间的信息传递关系不再是从一层到另一层, 而是各神经元之间均存在着联系, 每个神经元都是处理单元, 同时可接收输入并向外界输出。由于引入了反馈机制, 所以是一个非线性动力系统。具有规模小、收敛快等特点。

1994 年, G. Kechriotis 等^[46] 成功地将递归神经网络用于盲均衡中, 提出了一种实时递归算法。利用信号的高阶统计特性构造代价函数, 通过使代价函数最小来达到调整网络权值的目的。其代价函数为

$$J(n) = \sum_{i=1}^4 \alpha_i e_i^2(n) = \sum_{i=1}^4 \alpha_i \{E[\tilde{x}^i(n)] - E[y^i(n)]\}^2 \quad (1.15)$$

式中, $\alpha_i > 0$, 为比例常数, 定义了相应误差的权值。

该算法与传统 BP 算法相比, 极大地改善了盲均衡器的收敛速度, 但易陷入局部最优,

并且代价函数中参数过多,使得算法的计算复杂度较高。1997年,梁启联等^[47]提出了改进算法,使计算量大大减小。新的代价函数为

$$J(n) = \sum_{i=1}^2 \alpha_i e_i^j(n) = \sum_{i=1}^2 \alpha_i \left\{ E[\tilde{x}^i(n)] - \frac{E[y^{2i}(n)]}{E[y^j(n)]} \right\}^i \quad (1.16)$$

1996年,廖日平等^[48]提出的优化反馈神经网络盲均衡算法,利用二阶和四阶累积矩推导出一种基于高阶累积矩线性最优盲均衡代价函数,为

$$\begin{aligned} J(n) = & \alpha_1 \sum_{k=0}^q \left[\sum_{j=r_1}^{r_2} w_j(n) C_{24}(j, k) \right]^2 + \alpha_2 \sum_{k=q+1}^{-r_1} \left[\sum_{j=r_1}^{r_2} w_j(n) C_4(j+k) \right]^2 \\ & + \alpha_3 \sum_{k=-r_2}^{-1} \left[\sum_{j=r_1}^{r_2} w_j(n) C_4(j+k) \right]^2 + \alpha_4 [\tilde{x}^2(n) - R'_2]^2 \end{aligned} \quad (1.17)$$

式中, α_i ($i=1, 2, 3, 4$) 为比例因子; $w_j(n)$ 为权系数; r_1, r_2 为神经网络的阶数; $0 \leq n \leq q$, $R'_2 = E[x^2(n)]$; C_2, C_4 为接收信号的二阶和四阶累积量; C_{24} 定义为

$$C_{24}(j, k) = \sum_{n=0}^q [C_4(n+j)C_2(k-n) - C_2(n+j)C_4(k-n)], \quad -q \leq k \leq 2q \quad (1.18)$$

该算法采用两层反馈神经网络完成对线性均衡器权值的优化,其中第一层神经网络完成误差信号的计算,第二层神经网络输出为线性均衡器的权值,完成求和积分。具有收敛速度快,对非平稳信号适应性好,对初始权值不敏感等特点。但由于采用高阶累积量,运算量较大。

2003年,鲁瑞^[49]在双线性反馈神经网络自适应均衡算法的基础上,将传统的恒模盲均衡算法与反馈神经网络相结合提出了一种新的基于双线性反馈神经网络盲均衡算法。其代价函数和传递函数分别见式(1.5)和式(1.6),加快了收敛速度,减小了稳态剩余误差,同时增强了相位恢复能力。

2006年和2007年,贾枫美等^[50-52]将对角递归神经网络应用于盲均衡算法中,提出了基于对角递归神经网络和准对角递归神经网络盲均衡算法,其代价函数和传递函数也分别见式(1.5)和式(1.6),同三层前馈神经网络盲均衡算相比,收敛速度加快,误码率降低,但稳态剩余误差基本相近。

1.3.3 模糊神经网络盲均衡算法

模糊神经网络(Fuzzy Neural Network, FNN)是模糊信息处理技术和人工神经网络技术有机结合的一种新型神经网络模型,神经网络是模拟人脑的硬件,模糊技术是模拟人脑的软件。具有集学习、联想、识别、自适应和模糊信息处理于一体的特点。

1993年, Wang Lixin 等^[53]提出了应用于非线性信道均衡的自适应模糊均衡器,参数调整采用 LMS 和 RLS 算法实现,其构建步骤是首先在均衡器的输入空间定义模糊集,模糊集的隶属函数包含整个输入空间,然后构造一套模糊的 If-Then 规则,在模糊规则的基础上构建模糊自适应均衡器,最后使用 LMS 和 RLS 算法更新均衡器的参数。

1997年, Chin-Teng Lin 等^[54]提出一种基于神经网络学习能力和模糊 If-Then 规则结构的新的自适应模糊神经网络均衡器(Adaptive Neural Fuzzy Filter, ANFF),其本质是一个前馈多层连接网络,利用模糊神经网络的模糊规则解决神经网络内部的“黑箱”问题。其特点

一是把先验知识与 ANFF 相结合,二是能够自动找到最佳结构和参数,适合在线工作。同年,Ki Yong Lee 等^[55]提出一种基于广义概率下降算法神经网络均衡器,利用模糊判决学习规则解决了由噪声引起的判决范围重叠问题。

1999 年,Ramain Pichevar 等^[56]利用模糊规则来调整人工神经网络均衡的学习速率和反向传播网络的动量,使均衡器收敛速度加快。他们认为传统的方法如线性横向均衡器只能均衡普通信道,非线性信道只能用神经网络均衡器,该算法结合反向传播网络和模糊规则,在处理非线性问题的同时,利用模糊规则进行参数的调整,从而加快了收敛速度。

2002 年,Prasanna Kumar Sahu 等^[57]提出一种计算量小的模糊神经网络均衡器。其性能近似于最大后验概率(Maximum a Posterior Probability, MAP)均衡器,但计算复杂度却显著降低,并能采用有师聚类算法进行训练。

2003 年,Rafael Ferrari 等^[58]提出模糊误差预测均衡器,这是无师非线性均衡,其性能接近贝叶斯(Bayes)均衡器,适用于实时处理。

2004 年,祖家奎等^[59]提出了非单点模糊逻辑均衡器,参数优化算法采用最速梯度下降法,参数的初始选择对均衡器有很大的影响。文中采用聚类算法选择初始参数,有效地加快了均衡器的收敛速度,但存在稳定性问题。

2005 年,Ching-Hung Lee 等^[60]提出使用周期性模糊神经网络均衡器对非线性时变信道进行均衡。周期性模糊神经网络是以学习能力和模糊规则结构为基础的,在给定有限信息的情况下,使用周期性模糊神经网络来估计周期信号,使用反馈学习算法来加快学习速度。对于时变信道的均衡,该方法结构较简单。同年,Zhang Liyi 等^[61]分析模糊神经网络与盲均衡算法的结合机理,提出了基于模糊神经网络滤波器、控制器和分类器的盲均衡算法。白煜^[62]将模糊神经网络取代前馈神经网络,得到了几种基于模糊神经网络的盲均衡算法。孙云山^[63-66]将模糊神经网络构造为分类器,得到了几种模糊分类器的盲均衡算法。张晓琴^[67,68]将模糊神经网络构造为控制器,用于控制神经网络盲均衡器的迭代步长,获得了较好的收敛效果。

2006 年,Song Heng 等^[69]提出一种基于不唯一模糊规则神经网络判决反馈均衡算法。该算法中神经网络采用判决反馈结构,利用最陡梯度下降法进行训练。具有较强的抗干扰能力和非线性分类能力,仿真表明与其他非线性信道均衡方法相比,误码率较小。

1.3.4 进化神经网络盲均衡算法

进化神经网络(Evolutionary Neural Networks, ENN)是进化算法(Evolutionary Algorithm, EA)与神经网络互补而成的一种新型神经网络模型,是将进化算法的按自然进化法则、群体优化搜索的优越性与神经网络的权值学习、结构优化有机结合,得到的鲁棒适应性很强的神经网络。这是近年来一个新的研究热点,但将进化神经网络用于通信信道均衡却起步较晚。

2003 年,陈金召等^[70]首次将遗传算法引入盲均衡,分析了如何用遗传算法求解基于高阶累积量盲均衡问题,其代价函数为

$$J(n) = \frac{|C_4(\tilde{x}(n))|}{|C_2(\tilde{x}(n))|^2} \quad (1.19)$$

式中, $C_2(\tilde{x}(n))$ 和 $C_4(\tilde{x}(n))$ 为均衡器输出信号的二阶和四阶累积量。