



天津市科协资助出版

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

高阶谱盲均衡理论、 算法与应用

张立毅 等著

清华大学出版社



天津市科协资助出版

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

高阶谱盲均衡理论、 算法与应用

张立毅 等著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书共分7章,系统地介绍了高阶谱盲均衡算法的基本理论及算法形式。书中首先分析了盲均衡算法的基本原理、均衡准则、评价指标以及与高阶谱的结合机理;其次系统地研究了基于Bussgang、归一化累积量、倒谱和过采样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Bussgang盲均衡算法实现了二维医学图像的盲恢复。

在编写过程中,既注重结构的完整性和内容的连续性,又强调理论推导的循序性和语言描述的精练性,同时力求从简到繁,由浅入深,循序渐进,通俗易懂。

本书可以作为信息与通信工程学科研究生的教材,也可以供从事电子与通信技术的广大科技人员参考。

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

高阶谱盲均衡理论、算法与应用/张立毅等著. —北京:清华大学出版社,2016

(中国计算机学会学术著作丛书)

ISBN 978-7-302-43052-0

I. ①高… II. ①张… III. ①高阶谱—盲均衡算法—研究 IV. ①TN911.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第033959号

责任编辑:汪汉友

封面设计:常雪影

责任校对:李建庄

责任印制:刘海龙

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

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印装者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:9.5 插 页:1 字 数:234千字

版 次:2016年4月第1版 印 次:2016年4月第1次印刷

印 数:1~1000

定 价:49.00元

产品编号:064614-01

前 言

盲均衡技术作为一种不借助于训练序列、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。将高阶谱与盲均衡有机结合,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。

本书是作者及其博士和硕士研究生张晓琴、孙云山、张雄、赵宝峰、李灯熬、郭晓宇、郭建华、陈振江、胡永生、张经宇等自 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)、山西省自然科学基金项目“基于循环平稳理论盲均衡技术的研究”(2007021016)、天津市应用基础及前沿技术研究计划项目“医学 MRI 图像三维重建综合问题研究”(13JCYBJC15600)、国家自然科学基金项目“盲均衡技术在医学 CT 图像复原中的应用研究”(61340034)等课题的资助下,将高阶谱理论与盲均衡算法有机结合,系统地研究了基于高阶谱的盲均衡算法,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高阶谱盲均衡算法方面的最新的研究动态及学科前沿。

本书共分 7 章。第 1 章为绪论,介绍盲均衡的研究意义和应用领域,综述了高阶谱盲均衡算法的分类及研究现状;第 2 章为高阶谱盲均衡算法的基本理论,介绍高阶谱的基本理论,阐述了盲均衡的基本概念及均衡准则,分析了高阶谱与盲均衡算法的结合机理以及盲均衡算法的评价指标;第 3 章为 Busgang 盲均衡算法的研究,在分析 Busgang 盲均衡算法基本原理和典型算法的基础上,研究了基于误差信号峰度、均衡器输出信号峰度和误差信号非线性函数的变步长盲均衡算法;第 4 章为归一化累积量盲均衡算法的研究,研究了基于四二阶、六二阶、三二阶和五二阶归一化累积量盲均衡算法;第 5 章为倒谱盲均衡算法的研究,研究了倒双谱、倒三谱和倒四谱盲均衡算法;第 6 章为过采样盲均衡算法的研究,分析了过采样盲均衡算法的基本原理,研究了基于 $T/4$ 分数间隔采样的四二阶、六二阶和三二阶归一化累积量盲均衡算法;第 7 章为高阶谱盲均衡算法在医学图像处理中的应用,研究了基于行列变换、复值变换和变步长恒模盲均衡算法在医学 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
2016 年 2 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 高阶谱盲均衡算法的研究进展	4
1.3.1 Bussgang 盲均衡算法	4
1.3.2 归一化累积量盲均衡算法	5
1.3.3 倒谱盲均衡算法	6
1.3.4 过采样盲均衡算法	6
1.4 本书研究背景及结构安排	7
1.4.1 本书研究背景	7
1.4.2 本书结构安排	7
参考文献	8
第 2 章 高阶谱盲均衡算法的基本理论	14
2.1 高阶统计量的基本知识	14
2.1.1 高阶矩和高阶累积量	14
2.1.2 高阶谱	22
2.1.3 倒谱	25
2.1.4 过采样	28
2.2 盲均衡的概念及均衡准则	29
2.2.1 盲均衡的概念	29
2.2.2 盲均衡的均衡准则	29
2.3 高阶谱盲均衡算法的基本原理	33
2.3.1 直接法高阶谱盲均衡算法的原理	33
2.3.2 间接法高阶谱盲均衡算法的原理	33
2.4 高阶谱盲均衡算法的评价指标	33
2.4.1 收敛速度	33
2.4.2 运算复杂度	34
2.4.3 误码特性	34

2.4.4	跟踪时变信道的能力	34
2.4.5	抗干扰能力	34
2.4.6	稳态剩余误差	34
2.5	本章小结	34
	参考文献	35
第3章	Bussgang 盲均衡算法的研究	37
3.1	Bussgang 盲均衡算法的基本原理	37
3.1.1	Bussgang 盲均衡算法的原理框图	37
3.1.2	无记忆非线性估计函数的分析	38
3.2	典型 Bussgang 盲均衡算法	39
3.2.1	DD 算法	39
3.2.2	Sato 算法	39
3.2.3	BGR 算法	40
3.2.4	BG 算法	40
3.2.5	Godard 算法	40
3.2.6	Stop-and-Go 算法	42
3.3	变步长 Bussgang 盲均衡算法的设计思想	43
3.4	基于误差信号峰度的变步长恒模盲均衡算法	43
3.4.1	算法形式	43
3.4.2	算法性能分析	43
3.4.3	计算机仿真结果	44
3.5	基于均衡器输出信号峰度的变步长恒模盲均衡算法	49
3.5.1	算法形式	49
3.5.2	算法性能分析	49
3.5.3	计算机仿真结果	49
3.6	基于误差信号非线性函数的变步长恒模盲均衡算法	52
3.6.1	算法形式	52
3.6.2	算法性能分析	53
3.6.3	计算机仿真结果	54
3.7	几种典型的步长控制因子分析	56
3.7.1	基于 MSE 的步长控制因子	56
3.7.2	基于剩余误差自相关函数的步长控制因子	59
3.7.3	基于 MSE 改进型 Sigmoid 函数形式的步长控制因子	60
3.8	本章小结	60
	参考文献	61
第4章	归一化累积量盲均衡算法的研究	64
4.1	归一化累积量盲均衡算法的基本原理	64
4.2	四二阶归一化累积量盲均衡算法	65
4.2.1	均衡准则	65

4.2.2	算法形式	65
4.2.3	计算机仿真结果	67
4.3	六二阶归一化累积量盲均衡算法	68
4.3.1	均衡准则	68
4.3.2	算法形式	69
4.3.3	计算机仿真结果	71
4.4	三二阶归一化累积量盲均衡算法	72
4.4.1	均衡准则	72
4.4.2	对称—反对称变换	73
4.4.3	算法形式	76
4.4.4	计算机仿真结果	77
4.5	五二阶归一化累积量盲均衡算法	79
4.5.1	均衡准则	79
4.5.2	算法形式	80
4.5.3	计算机仿真结果	81
4.6	本章小结	83
	参考文献	83
第5章	倒谱盲均衡算法的研究	85
5.1	倒谱盲均衡算法的基本原理	85
5.2	倒双谱盲均衡算法	86
5.2.1	传输函数的推导	86
5.2.2	盲均衡器结构形式	89
5.2.3	计算机仿真	89
5.3	倒三谱盲均衡算法	90
5.3.1	传输函数的推导	90
5.3.2	盲均衡器结构形式	92
5.4	倒四谱盲均衡算法	92
5.4.1	传输函数的推导	92
5.4.2	盲均衡器结构形式	96
5.4.3	计算机仿真结果	96
5.5	本章小结	97
	参考文献	97
第6章	过采样盲均衡算法的研究	98
6.1	过采样盲均衡算法的基本原理	98
6.1.1	过采样的意义	98
6.1.2	过采样盲均衡算法的原理	100
6.2	$T/4$ 分数间隔采样的双模式盲均衡算法	102
6.2.1	算法原理	102
6.2.2	双模切换盲均衡原理	103

6.2.3	计算机仿真结果	104
6.3	$T/4$ 分数间隔采样的四二阶归一化累积量盲均衡算法	105
6.3.1	算法原理	105
6.3.2	计算机仿真结果	105
6.4	$T/4$ 分数间隔采样的六二阶归一化累积量盲均衡算法	107
6.4.1	算法原理	107
6.4.2	计算机仿真结果	108
6.5	$T/4$ 分数间隔采样的三二阶归一化累积量盲均衡算法	109
6.5.1	算法原理	109
6.5.2	计算机仿真结果	110
6.6	本章小结	112
	参考文献	112
第 7 章	高阶谱盲均衡算法在医学图像处理中的应用	113
7.1	图像盲均衡的概念	113
7.1.1	医学 CT 图像的成像机理及退化过程	113
7.1.2	医学 CT 图像盲均衡的基本原理	114
7.1.3	医学图像盲均衡的定量衡量指标	115
7.2	基于行列变换的恒模医学 CT 图像盲均衡算法	116
7.2.1	算法原理	116
7.2.2	算法形式	118
7.2.3	算法收敛性能分析	118
7.2.4	计算机仿真结果	121
7.3	基于变步长的恒模医学 CT 图像盲均衡算法	123
7.3.1	基于误差信号峰度的变步长恒模医学 CT 图像盲均衡算法	123
7.3.2	基于均方误差的变步长恒模医学 CT 图像盲均衡算法	125
7.4	基于复值变换的恒模医学 CT 图像盲均衡算法	128
7.4.1	算法原理	128
7.4.2	算法形式	130
7.4.3	算法收敛性能分析	131
7.4.4	计算机仿真结果	134
7.5	本章小结	137
	参考文献	137
附录 A	奇数阶归一化累积量盲均衡准则的推导	138
附录 B	PAM 信号五二阶归一化累积量盲均衡算法迭代公式的推导	139
附录 C	QAM 信号五二阶归一化累积量盲均衡算法迭代公式的推导	140

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,综述了高阶谱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^[1]

自 1975 年日本学者 SATO Y 教授^[2]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 GITLIN R D 等^[3]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^[4]:

(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^[5];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%^[6]。

(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。数字高清晰度电视(High Definition Television, 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、声呐、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^[7,8]。

1.2.1 在数字电视中的应用

全数字化高清晰度电视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。目前已经形成了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^[9]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,传输速率为19.2Mbps。杨勇^[10]基于ATSC标准的数字电视接收机,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四种技术方案,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^[11]。针对数字有线电视 QAM 调制形式,王雷等^[12]在加权多模盲均衡算法的基础上,引入 Sigmoid 函数的变形,提出一种加权值随均方误差自适应变化的盲均衡新算法。孟玲玲等^[13]提出分数间隔修正构造函数盲均衡算法,具有较好的均衡性能。

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)^[14]。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 阵元平面方阵,射频工作频率为 1.545GHz。阵元组件在接收信号后,首先进行模数变换,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 $23.3\text{cm} \times 34.0\text{cm}$ ^[15]。谭胜^[16]也采用最小二乘恒模盲均衡算法设计了智能天线收发信机。

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 变换器,并利用软件来定义无线功能^[17]。

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,盲均衡的作用是由于补偿信道的非理想特性,消除码间干扰^[18-20]。

1.2.5 在图像盲恢复中的应用

图像盲恢复(Blind Image Restoration)算法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^[21,22]。

在图像盲恢复算法中,刘涛等^[23]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^[24-32]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^[33]。

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^[34]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^[35]提出了一种基于时变步长神经网络盲均衡算法,白煜^[36]将 Bussgang 盲均衡算法引入高性能 UHF RFID 系统,并针对 Reyleigh 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 高阶谱盲均衡算法的研究进展

高阶谱盲均衡算法从原理上可以分为直接法和间接法两种^[37]。从现有算法形式上,可以分为 Bussgang 盲均衡算法、归一化累积量盲均衡算法、倒谱盲均衡算法、循环平稳盲均衡算法等。

1.3.1 Bussgang 盲均衡算法

Bussgang 盲均衡算法早期形式是判决引导算法(Direct Decision,DD),该算法采用判决结果作为目标输出,具有最佳的收敛性能,但初始码间干扰 ISI 大于 0.1 时算法不收敛^[38]。1975 年 SATO Y^[2]提出了适用于 PAM 系统的 Sato 算法。BENVENISTE A 等^[39]在研究 Sato 算法的基础上,于 1980 年提出了 BGR 算法,把 Sato 算法推广到 QAM 系统。1980 年,GODARD D N^[40]又提出了 Godard 算法,它通过调节均衡器的抽头增益使得代价函数最小,其代价函数由传输信号的高阶统计特性来构造。当代价函数中的阶 p 为 2 时,Godard 算法变为恒模(Constant Modulus Algorithm,CMA)算法^[41]。1990 年,SHALVI O 和 WEINSTEIN E^[42]创立了 SW 理论,证明在系统输入、输出平均功率相等的约束条件下,系统输入、输出的峰度相等是系统为理想系统的充要条件。该理论揭示了系统输入、输出之间的一般规律,即输出信号的峰度总是小于输入信号的峰度。1987 年 PICCHI G 等^[43]提出 Stop-and-Go 算法,该算法结合了判决法和 Sato 算法的优点,具有计算简单,收敛速度快,稳态剩余误差小等特点,但代价函数中出现了待定参数,它由实验确定,不易得到它的最佳值,使其应用范围受到一定限制。

恒模盲均衡算法也称为常数模盲均衡算法,具有韧性好,代价函数仅与接收信号的幅值有关而与相位无关等优点,但存在着收敛速度慢、稳态剩余误差较大且无法纠正相位旋转等不足^[8],使其应用受到一定限制。因此,众多学者从不同方面对其进行了改进。

为了解决算法的相位旋转问题,1995 年,韩国学者 KIL N O 和 YONG O C^[44]提出了修

正型常数模算法(Modified Constant Modulus Algorithm, MCMA),将相位信息引入代价函数,实现了均衡过程中相位错误的纠正。1997年,徐金标等^[45]将CMA算法中的代价函数修改为实部和虚部两部分,使得代价函数中包含了传输序列的幅度信息和相位信息,解决了相位纠偏问题。近年来,学者们针对不同的应用对象,提出了多种多模盲均衡算法(Multi-Modulus Algorithm, MMA)^[46-48],解决了相位旋转问题。

为了提高算法的收敛速度,减小稳态剩余误差。有的学者研究了步长因子对算法收敛性能的影响,步长因子大,收敛速度快,但收敛后稳态剩余误差大;步长因子小,收敛速度慢,但收敛后稳态剩余误差小。为了解决收敛速度和收敛精度之间的相互制约,可在算法初期采用大的步长,接近收敛时采用小的步长。因此,提出了多种步长控制因子,如张立毅等^[49-51]提出了误差信号峰度、均衡器输出信号峰度和误差信号非线性函数作为步长控制因子的盲均衡算法。张雄等^[52,53]提出了基于均方误差、误差信号自相关函数的变步长盲均衡算法。赵宝峰^[54]、郭晓宇^[55]和黄蕾等^[56]分别提出了基于MSE变换、均衡器输出信号功率、剩余误差信号的峰度、统计测度等变步长盲均衡算法。NASSAR A M等^[57]提出了基于指数权步长递归最小二乘算法的恒模混合算法,等等。有的学者研究了基于双判决切换机制的双模式盲均衡算法,如徐金标等^[58]提出了一种模判决盲均衡算法和点判决多模盲均衡算法,其收敛速度得到明显改善。LI Chisheng等^[59]提出在算法启动阶段采用多模算法,在“眼图”张开后切换到DD算法,降低了稳态剩余误差。CHEN S^[60]将软判决思想引入DD算法,获得了更快的收敛速度。阮秀凯等^[61]将代价函数与星座匹配误差函数相结合,提出了适用于高阶QAM的盲均衡算法,并基于星座特征常量的近似计算得到了Bussgang指数拓展多模算法^[62]。

2008年,许军等^[38]在分析研究Bussgang盲均衡算法的基础上,提出了一些新的Bussgang类盲均衡算法统一形式的代价函数,既涵盖了DD算法、Sato算法、CMA算法和MMA算法,也可用于指导设计新类型的Bussgang盲均衡算法。

1.3.2 归一化累积量盲均衡算法

GADZOW J A^[63]于1996年首次提出归一化累积量的概念,并证明系统输入、输出归一化累积量幅度相等是实现盲均衡的充要条件。由于累积量阶次的选择是任意的,因而该充要条件不是一个而是一簇。Gadzow理论意味着同时利用两种高阶累积量就可以解决盲均衡问题。

由于数字通信中的信号一般是对称分布的,而对称分布随机过程的奇次阶累积量恒等于零^[64],所以早期一般采用偶次归一化累积量来进行处理。1991年,PORAT B等^[65]首次提出两种直接利用信号的二阶和四阶累积量针对QAM信号进行盲均衡的算法,其中第一种算法基于线性方程组的最小二乘解,第二种算法基于代价函数的非线性优化。但由于其运算量较大,未得到广泛应用。1993年,ZHENG F C^[66,67]发现了3个线性方程组,分别揭示了信号的二阶、三阶和四阶累积量与均衡器系数之间的线性关系,并针对PAM系统提出一种利用二阶和四阶累积量的盲均衡算法。1995年,TUGNAIT J K^[68]针对非因果自回归(Autoregressive, AR)系统辨识提出了两种辨识算法。1998年,何晓薇等^[69]以SW理论为基础,利用二阶、四阶累积量对归一化累积量进行了定义,并提出了新的盲解卷积准则。DOULAYE D等^[70]提出了六二阶归一化累积量盲均衡准则及其算法。

针对奇次阶高阶累积量为零无法采用归一化累积量的不足,ZHENG F C^[66]提出了一种 e 为底数的对数对称—反对称变换的盲均衡算法。即在信号传输之前,首先将对称信号进行对称—反对称变换变为非对称信号,然后在接收端再进行反对称—对称的变换。这样传输信号不再为对称信号,而迭加噪声仍具有对称分布,使得三阶累积量盲均衡算法具有更大的抗干扰能力。1997年,赵成林^[71]提出一种 e 为底数的指数变换规则。2003年,张晓琴^[72]提出一种新的以2为底数的指数变换规则。2005年,张思玉^[73]又提出一种新的指数变换规则。在此基础上,张立毅等^[74-77]提出了基于三二阶、五二阶的归一化累积量盲均衡算法。

1.3.3 倒谱盲均衡算法

由于高阶倒谱不但具有倒谱的许多优良性质,如衰减速度快,可用于辨识系统冲激响应的最小相位和最大相位部分,而且它和高阶累积量一样对高斯有色观测噪声不敏感,因而在盲均衡中得到了广泛关注。但由于计算复杂度较高,使其应用受到一定限制^[78]。自1988年PAN R等^[79]提出利用观测信号的高阶倒谱进行非最小相位系统辨识算法以来,HATZINAKOS D等^[80,81]提出基于倒三谱(四阶倒谱)的盲均衡算法,该算法能保证全局收敛,但运算量较大。此后相继出现了一些其他的高阶倒谱算法,如BROOKS D H等^[82]利用三阶互倒谱进行非最小相位的同步恢复,PETROPULU A P等^[83]从高阶倒谱的部分信息来恢复信号,以及BROOKS D H等^[84]利用高阶互谱的复倒谱来进行多信道的盲均衡方法等。1996年,赵成林等^[85]提出一种适用于多电平通信系统的、基于系统输出三阶倒谱的非最小相位信道盲均衡新算法。1997年陈滨宁和张贤达^[86]设计了基于高阶倒谱的自适应FIR系统辨识算法,适用于参数和阶次都时变的通信系统。2005年和2006年,李灯熬等^[87,88]推导了倒三谱、倒三谱盲均衡算法的传输函数。

此外,王峰等^[89]还针对Busgang盲均衡算法收敛速度慢的缺陷,采用倒三谱对Busgang类盲均衡算法进行初始化,通过对恒模盲均衡算法(CMA)、符号误差常数模算法(SECMA)、多模算法(MMA)、Stop-and-Go算法等的仿真,验证了方法的有效性。

1.3.4 过采样盲均衡算法

前几部分讨论的盲均衡算法中,对接收信号的采样速率为码元速率 $1/T$ (T 为码元间隔或波特间隔),这类均衡器一般称为码率均衡器(Symbol Rate Equalizer)、波特率均衡器(Baud Rate Equalizer)、比特间隔均衡器(Baud Spaced Equalizer, BSE)等,其特点是结构简单、存在非期望的局部收敛点,对于具有深谱零点的信道会造成严重的噪声放大,收敛速度慢甚至发散^[90],以及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^[91]。因此,提出了过采样(Over Sampling)盲均衡算法,它采用不低于Nyquist速率的采样速率对输入信号进行采样,在总功率不变的条件下,由信号采样量化理论可知,若输入信号的最小幅度大于量化器的量化阶梯,且输入信号的幅度随机分布,则量化噪声的总功率是一个常数,与采样频率无关^[92]。过采样会使量化噪声功率谱分布在更宽的频带范围内,这样就使得通过滤波器后的噪声降低,信噪比提高,避免了因欠采样引起的频谱混叠,接收信号频谱中含有信道的频率特性函数,因而均衡器可以有效补偿信道畸变。

1996年,TUGNAIT J^[93]研究了用过采样对数字通信中的有限脉冲响应信道FIR进行

盲估计和均衡问题。2001年,陈芳炯等^[94]在证明了内插信号具有周期平稳性的基础上,证明了过采样使得信道输出具有周期平稳性。2003年,万喆等^[95]利用通信信号过采样后所具有的循环平稳性,给出了一种新的基于二阶统计量的算法来完成对非最小相位系统的辨识和估计,利用了一组特征矩阵所包含的信息来进行估计,使估计性能得到了提高。2004年,王永川等^[96]通过对接收信号进行过采样,给出了单输入单输出(Single Input Single Output, SISO)系统的等效单输入多输出(Single Input Multiple Output, SIMO)系统模型,并提出了一种新的基于二阶统计量的盲辨识与均衡算法,该算法只需要接收信号的二阶统计量即可辨识与均衡信道。2006年,陈芳炯等^[97]通过对信道输出的过采样建立了特殊的多信道模型,提出一种新的针对单输入单输出 IIR 信道的盲均衡算法,并构造出不同时延的迫零均衡器。2007年,赵菊敏等^[98]通过过采样技术,提出了新的盲均衡算法。2008年,郭建华等^[99]提出基于循环平稳二阶统计量的 SUB-CMOE 盲均衡算法,通过对信道输出信号进行过采样,建立单输入多输出的信道模型。2009年,杨培奇^[100]等基于过采样技术,提出一种通信信道的盲辨识与均衡算法,将信道分解成多个子信道,充分利用了未知信道的信息,提高了系统辨识的精度。同年,郭业才等^[101]基于 $T/2$ 分数间隔,提出一种双模式盲均衡算法,获得了较快的收敛速度、较小的稳态剩余误差和清晰紧凑的眼图。2013年,赵秋明等^[102]提出了四种变步长 $T/2$ 分数间隔盲均衡算法,进一步提高了收敛速度。2012年到2014年,张晓琴等^[103-106]先后研究了基于三二阶、四二阶和六二阶的 $T/4$ 分数间隔固定步长和变步长盲均衡算法,并针对 QAM 信号进行了仿真验证。

1.4 本书研究背景及结构安排

1.4.1 本书研究背景

盲均衡问世 40 年来,随着数字通信技术的不断发展和广泛应用逐步成为热点研究课题。国外著名刊物《IEEE Transactions on Communication》《IEEE Transactions on Signal Process》《IEEE Transactions on Information Theory》《Signal Processing》等每年甚至每期均有盲均衡最新研究进展的报道。我国的许多高校和研究机构也在从事该课题的研究,国家自然科学基金、863 项目等也对该类研究进行了大量的投入和资助。尤其是新的优化理论的出现,为盲均衡研究注入了新的活力。

本书作者及其研究团队自 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)、山西省自然科学基金项目“基于循环平稳理论盲均衡技术的研究”(2007021016)、天津市应用基础及前沿技术研究计划项目“医学 MRI 图像三维重建综合问题研究”(13JCYBJC15600)、国家自然科学基金项目“盲均衡技术在医学 CT 图像复原中的应用研究”(61340034)等课题的资助下,将高阶谱与盲均衡算法有机结合,研究了基于 Busgang、归一化累积量、倒谱和过采样等盲均衡算法,提出了多种收敛性能好的算法形式。这对于补偿信道的非理想特性,改善接收效果,提高通信质量具有重要的理论意义和实用价值。本书是这些研究成果的总结与提炼。

1.4.2 本书结构安排

本书共分为 7 章。

第1章 绪论:分析了研究盲均衡的意义和应用领域,综述了高阶谱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。

第2章 高阶谱盲均衡算法的基本理论:介绍了高阶谱的基本理论,阐述了盲均衡的基本概念及均衡准则,分析了置零准则、峰度准则和归一化准则的特点及应用场合,研究了高阶谱与盲均衡算法的结合机理,综述了盲均衡算法的评价指标。

第3章 Busgang 盲均衡算法的研究:在分析 Busgang 盲均衡算法的基本原理和典型算法形式的基础上,研究了变步长盲均衡算法,推导了算法迭代公式,进行了计算机仿真,验证了算法的有效性。

第4章 归一化累积量盲均衡算法的研究:分析了归一化累积量盲均衡算法的基本原理,综述了四二阶和六二阶归一化累积量盲均衡算法,研究了基于对称—反对称变换的三二阶和五二阶归一化累积量盲均衡算法,计算机仿真验证了算法的有效性。

第5章 倒谱盲均衡算法的研究:在阐述倒谱盲均衡算法的基本原理和倒三谱盲均衡器的基础上,推导了二阶和四阶倒谱盲均衡器的传输函数,分析了盲均衡器的实现形式。

第6章 过采样盲均衡算法的研究:分析了过采样盲均衡算法的基本原理及收敛性能,研究了基于 $T/4$ 分数间隔过采样的双模式盲均衡算法、四二阶、六二阶和三二阶归一化累积量盲均衡算法,引入了变步长方法,计算机仿真验证了算法的有效性。

第7章 高阶谱盲均衡算法在医学图像处理中的应用:在分析医学 CT 图像成像机理、退化过程和图像盲均衡算法基本原理、定量衡量指标的基础上,研究了基于行列变换和复值变换的恒模医学 CT 图像盲均衡算法,推导了算法迭代公式,并进行了计算机仿真。

参考文献

- [1] 张立毅. 神经网络盲均衡理论、算法与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2013.
- [2] SATO Y. A Method of Self-recovering Equalization for Multiple Amplitude Modulation Schemes[J]. IEEE Transaction on Communications,1975,23: 679-682.
- [3] GITLIN R D, HAYES J F, WEINTEIN S B. Data Communications Principles[M]. New York: Plenum Press,1992.
- [4] 张立毅,张雄,王华奎,等. 盲均衡技术及其发展[J]. 太原理工大学学报,2002,33(6): 619-623.
- [5] 徐异凌. 基于二阶统计的盲信道辨识算法的仿真及性能比较[D]. 成都:电子科技大学通信与信息工程学院,2002.
- [6] COX D. 910MHz Urban Mobile Radio-Propagation: Multi-path Characteristics in New York City[J]. IEEE Transaction on Communication,1973,21(11): 1188-1194.
- [7] 张立毅,张晓琴,王华奎,等. 盲均衡技术——数字广播电视的核心技术[J]. 中国有线电视,2002,133(17): 6-8.
- [8] 张立毅,鲁瑞,王华奎,等. 盲均衡技术及其应用[J]. 中国有线电视,2003,141(1): 36-38.
- [9] 朱小富,梁慧君,姚庆栋. 自适应均衡技术[J]. 广播与电视技术,1995,22(10): 43-50.
- [10] 杨勇. 基于 ATSC 数字电视接收机判决反馈均衡器的研究[D]. 上海:上海交通大学电子信息与电气工程学院,2008.
- [11] 吴曙光. CATV 综合网中的数字视频传输[J]. 光通信研究,1997,(1): 18-22.
- [12] 王雷,吴长奇. 一种改进的加权多模盲均衡算法[J]. 电视技术,2012,36(13): 100-102.
- [13] 孟玲玲,王晓东,李仅伟. 基于 QAM 调制信号的修正构造函数盲均衡算法[J]. 电视技术,2011,35

(13): 73-75.

- [14] 张玲玉,赵颖,王艳丽. 恒模算法在智能天线盲波束形成中的应用[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版),2004,(2): 200-202.
- [15] 李小强,胡健栋. 未来移动通信系统中的智能天线技术[J]. 移动通信,1999,(1): 44-52.
- [16] 谭胜. 智能天线收发信机的实现方案研究[D]. 南京: 南京邮电大学通信与信息工程学院,2013.
- [17] MITOLA J. Software Radios[J]. IEEE communications magazine,1995,(5): 23-25.
- [18] 王晓虎,刘金银. 中频软件无线电系统的 FPGA 实现方案[J]. 电讯技术,2002,(1): 59-63.
- [19] 钱平. 软件无线电调制自动识别技术的研究[D]. 无锡: 江南大学通信与控制工程学院,2013.
- [20] 彭华. 软件无线电中的盲接收技术研究[D]. 郑州: 中国人民解放军信息工程大学信息工程学院,2013.
- [21] 孙云山. 盲均衡技术在医学 CT 图像盲恢复算法中的应用研究[D]. 天津: 天津大学电子信息工程学院,2012.
- [22] 孙云山,张立毅,段继忠,等. 图像盲恢复算法的研究[J]. 数学实践与认识,2011,41(7): 109-113.
- [23] 刘涛,郭军. 盲图像恢复中的二维盲均衡研究[J]. 电子与信息学报,2006,28(6): 1013-1015.
- [24] 孙云山,张立毅,段继忠. 医学 CT 图像恒模盲均衡算法性能研究[J]. 天津大学学报,2011,44(12): 1057-1062.
- [25] SUN Yunshan,ZHANG Liyi,ZHANG Jinyu,et al. Feed-forward Neural Network Medical CT Image Blind Equalization Algorithm based on Zigzag Transform[J]. Journal of Computational Information Systems,2011,7(16): 5683-5689.
- [26] 孙云山,张立毅,段继忠. 基于行列变换的恒模医学 CT 图像盲均衡算法[J]. 电路与系统学报,2011,16(5): 60-65.
- [27] 孙云山,张立毅,段继忠. 均方误差控制步长恒模医学 CT 图像盲均衡算法[J]. 计算机工程与应用,2011,47(31): 164-166,248.
- [28] 孙云山,张立毅,段继忠,等. 时变步长恒模医学 CT 图像盲均衡算法[J]. 计算机工程,2011,37(22): 193-195.
- [29] 孙云山,张立毅,段继忠. 约束恒模医学 CT 图像盲均衡算法[J]. 计算机应用,2011,31(6): 1575-1577.
- [30] 孙云山,张立毅,张锦,等. 改进恒模盲均衡在医学 CT 图像盲恢复中的应用[J]. 仪器仪表学报,2012,33(4): 878-884.
- [31] SUN Yunshan,ZHANG Liyi,ZHANG Haiyan. Frequency domain minimum error probability medical CT image blind equalization algorithm[J]. Computer Model New Technology,2014,18(4): 296-299.
- [32] ZHANG Liyi,SUN Yunshan,ZHANG Jingyu,et al. Medical CT Image Blind Equalization Algorithm Based on Orthogonal Transform[J]. Journal of Computational Information Systems,2011,7(10): 3455-3461.
- [33] 张立毅,张满毅,白煜. 射频识别的技术特征分析[J]. 山西电子技术,2008,(2): 5-6,24.
- [34] 宋伟伟. RFID 系统中盲信号处理技术研究[D]. 长沙: 湖南大学电子与信息工程学院,2010.
- [35] 张立毅,白煜,刘婷,等. 射频识别中盲均衡算法的研究[J]. 计算机工程与设计,2009,30(7): 1732-1734.
- [36] 白煜. 超高频射频识别(UHF RFID)系统抗干扰策略的研究[D]. 天津: 天津大学电子信息工程学院,2009.
- [37] 张立毅,张晓琴,王华奎,等. 基于高阶谱理论的盲均衡算法分析[J]. 电子与信息学报,2003,25(4A): 10-16.
- [38] 许军,汪芙平,王赞基. 一族新 Bussgang 类盲均衡算法[J]. 电子与信息学报,2008,30(10):