

无线通信前沿技术丛书

李少谦 周亮 主编



“十二五”
国家重点
出版规划丛书

该书由国家自然科学基金 (No. 60972029)、国家重大专项项目
(2010ZX03002-010-02) 联合资助

无线通信中 迭代均衡技术

● 李强 雷霞 罗显平 © 编著

Turbo Equalization Techniques
in Wireless Communication Systems



国防工业出版社

National Defense Industry Press

无线通信前沿技术丛书/李少谦 周亮 主编

该书由国家自然科学基金(No. 60972029)、国家重大专项项目(2010ZX03002-010-02)联合资助

无线通信中迭代均衡技术

Turbo Equalization Techniques in Wireless Communication Systems

李强 雷霞 罗显平 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

序 言

近年来,对高速无线通信业务的需求呈快速增长趋势,然而,在高速无线数据传输系统中,还有很多问题需要解决。例如,当比特传输率较高时,信道的发散问题将会非常突出,从而导致严重的符号间干扰(ISI),信道均衡是抑制 ISI 的关键技术之一;为实现更高的带宽效率,需要采用 16QAM 甚至 64QAM 等高阶调制,也可采用连续相位调制(CPM),前者由于星座点之间的距离很近,对抗符号间干扰能力较差,后者由于引入了符号间相关性,符号间干扰严重,这对均衡技术也提出了更高的要求。

将均衡器和信道译码器一起使用,可以进一步改善系统的误码性能。强有力的纠错码,如 Turbo 码和 LDPC 码,已经证明了具有非常接近香农限的性能。如果对均衡器和译码器联合进行最大似然信号处理,如 MAP 或 MLSE 检测,可以获得最优的误码性能。可是,它们的复杂度太高,几乎不可能实际实现。

自 20 世纪 90 年代初发明 Turbo 码以来,迭代信号检测的思想在现代信号处理中占据了非常重要的位置。迭代均衡最早由 Douillard 等在 1995 年提出,他最初建议是在一个串行级联卷积编码 BPSK 系统中,通过软输入/软输出译码器和软输入/软输出均衡器之间信息的反复交换,进行迭代信号处理,而不是传统的译码器和均衡器单独工作。试验证明,通过这样的迭代处理,ISI 得到了有效地抑制。

本书是系统介绍迭代均衡原理及其应用技术的专著。作者是从事该技术研究的青年研究工作者,根据近年来的研究成果,介绍了迭代均衡原理及各种均衡算法;详细研究了发射信号设计、性能分析方法;对无线移动信道模型下迭代均衡算法的误码性能及其复杂度进行了深入研究。本书通俗易懂,对有志于从事迭代均衡技术及其应用研究的人员来说,本书有助于引导其快速进入该研究领域;也适合于从事无线移动通信技术研究和应用的各类技术人员了解迭代均衡技术。

本书的出版将促进迭代均衡技术在面向未来的新一代移动通信中的应用。

李少谦
2010 年 12 月

前 言

许多无线通信系统都会面临在具有符号间干扰 (ISI) 的信道上进行信息传输的问题。均衡技术是抑制 ISI 的重要措施之一。传统的均衡方法包括基于 MAP/MLSE 的优化算法及具有相对低复杂度的 ZF、MMSE 等线性算法。

结合纠错码的应用,均衡接收机的性能可以大幅度提升。自从 20 世纪 90 年代 Turbo 码出现之后,人们开始重新思考迭代信号处理的应用问题。目前,迭代算法已广泛应用于包括纠错码在内的很多信号处理中,如迭代均衡、迭代多用户信号检测、迭代信道估计等。

近 10 年来,国内外对迭代均衡技术进行了大量的研究。本书参考了这些研究成果,并结合作者近几年的研究成果,全面总结了迭代均衡的最新研究成果。本书内容共 7 章,主要包括:迭代均衡技术的起源、现状与应用、时域迭代均衡算法、频域迭代均衡技术、盲迭代均衡算法、空时系统中的迭代均衡技术、非线性调制系统中的迭代均衡、MIMO 系统中的迭代均衡以及基于能量扩展变换的迭代均衡算法等,充分反映了迭代均衡技术在现代无线通信核心传输技术中的应用问题。

本书由电子科技大学抗干扰通信技术国防重点实验室主任李少谦与周亮教授主编,李强副教授编写第 1 章~第 3 章,雷霞副教授编写第 4 章和第 5 章,罗显平高工编写第 6 章和第 7 章。

本书编写过程中参考了众多的国内、外参考文献,在本书各相关章节均列出,在此对参考文献的作者深表谢意。

首先要感谢香港科技大学缪伟豪教授,是他引领作者进入迭代信号处理的研究领域;还要感谢实验室相关的同事们的大力支持。

此外,还要感谢电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室的李少谦教授为本书作序,正是实验室良好的科研氛围支持作者完成了本书的撰写。

由于作者水平有限,错误、遗漏之处在所难免,恳请专家和读者批评指正。

编著者
2010 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 时域 Turbo 均衡算法	3
1.2 频域 Turbo 均衡算法	4
1.3 信道不匹配时的 Turbo 均衡算法	5
1.4 Turbo 均衡算法的性能分析	6
参考文献	6
第 2 章 时域 Turbo 均衡	10
2.1 系统模型	10
2.2 性能优化的时域均衡算法	11
2.2.1 基于 MAP 算法的时域均衡器	12
2.2.2 基于 MLSE 算法的时域均衡器	14
2.2.3 基于 SPA 算法的时域均衡器	15
2.3 低复杂度时域均衡算法	19
2.3.1 线性均衡器	19
2.3.2 DFE 均衡算法	22
2.3.3 减少格型状态数的均衡算法	22
2.4 时域 Turbo 均衡算法	23
2.4.1 基于 MAP 的 Turbo 均衡算法	23
2.4.2 软干扰抵消 Turbo 均衡算法	36
2.4.3 基于径向基函数的 Turbo 均衡算法	38
2.4.4 并行级联迭代均衡算法	42
2.4.5 I/Q 分离的迭代均衡算法	45
参考文献	47
第 3 章 频域 Turbo 均衡	49
3.1 系统模型	50
3.2 线性均衡器	52
3.2.1 ZF 均衡算法	52
3.2.2 MMSE 均衡算法	52

3.3	DFE 均衡算法	53
3.3.1	时域反馈的 DFE 均衡算法	53
3.3.2	频域反馈的 DFE 均衡算法	54
3.4	频域 Turbo 均衡算法	59
3.4.1	频域 Turbo 线性均衡	59
3.4.2	Turbo 判决反馈均衡	61
3.4.3	并行级联迭代频域均衡算法	65
3.4.4	频域 Turbo 均衡算法的性能	70
	参考文献	78
第 4 章	盲迭代均衡算法	80
4.1	概述	80
4.2	基于贝叶斯估计的盲迭代均衡算法	80
4.2.1	系统描述	80
4.2.2	吉布斯采样器	81
4.2.3	盲贝叶斯均衡	82
4.2.4	盲迭代均衡	85
4.2.5	性能仿真结果	86
4.3	基于次梯度预测的盲迭代均衡算法	88
4.3.1	基本概念	88
4.3.2	l_2 范数作为盲均衡的凸代价函数	90
4.3.3	次梯度算法	91
4.3.4	基于次梯度映射的盲迭代均衡算法	94
4.3.5	性能仿真	97
4.4	时变发散信道上盲迭代线性均衡算法	98
4.4.1	信道和信号模型	98
4.4.2	盲迭代线性均衡	99
4.4.3	仿真结果	102
4.5	基于快速最小二乘信道估计和软反馈的盲迭代均衡算法	104
4.5.1	基于 SFE 的迭代均衡	104
4.5.2	盲迭代均衡	105
4.5.3	仿真结果	106
	参考文献	107
第 5 章	空时系统中的 Turbo 均衡	109
5.1	无线 MIMO 传输技术的基本原理与特点	109
5.2	无线通信中的 Turbo - MIMO 传输技术	112

5.3	MIMO 信号检测技术	113
5.4	MIMO 系统的时域迭代均衡	114
5.4.1	基于 MAP 的 MIMO 时域迭代均衡	114
5.4.2	基于 SIC - MMSE 的 MIMO 时域迭代均衡	117
5.5	MIMO 系统的频域迭代均衡	119
5.5.1	基于 MAP 的 MIMO 频域迭代均衡	121
5.5.2	基于 SIC - MMSE 的 MIMO 频域迭代均衡	123
5.5.3	其他检测算法	127
	参考文献	129
第 6 章	部分响应系统中的 Turbo 均衡	131
6.1	CPM 调制原理	131
6.2	CPM 的相干解调算法	133
6.2.1	SNR - Based 的分支度量计算	133
6.2.2	MF - Based 的分支度量计算	133
6.2.3	迭代 CPM 解调与译码算法	134
6.2.4	部分响应 CPM 迭代解调与译码算法	136
6.3	CPM 的非相干解调算法	138
6.3.1	非相干信号模型	138
6.3.2	MAP 解调算法	139
6.3.3	迭代树搜索算法	140
6.3.4	迭代非相干解调与译码算法的性能	141
6.4	双迭代均衡算法	142
6.4.1	信号模型	143
6.4.2	CPM 的双迭代均衡	144
6.4.3	双迭代均衡算法的性能	148
	参考文献	150
第 7 章	基于能量扩展变换的迭代均衡	152
7.1	概述	152
7.2	基于 EST 的迭代均衡算法	152
7.2.1	系统描述	152
7.2.2	能量扩展变换	154
7.2.3	性能分析	156
7.2.4	性能仿真	166
7.3	优化的均衡滤波器设计	169
7.3.1	基于 EST 的改善均衡算法	169

7.3.2	性能仿真	173
7.4	双选信道上基于 EST 的信号均衡	175
7.4.1	推广的 EST 调制方案	176
7.4.2	系统优化	178
7.4.3	性能仿真	180
7.5	MIMO 衰落信道下基于 EST 的迭代均衡算法	181
7.5.1	基于 EST 的 MIMO 信号均衡方案	181
7.5.2	平滑衰落信道上性能分析	184
7.5.3	瑞利衰落信道下的渐进属性	188
7.5.4	频率选择性信道上性能分析	189
7.5.5	性能仿真	191
	参考文献	194

第1章 绪 论

传统的分组码和卷积码都具有严格的代数结构,因而具有适中的编译码复杂度。然而,也正是由于这种规则的结构导致其实际性能远差于香农预测的随机编码界。直到1993年,Berrou^[1]等人在当年的国际通信会议(ICC)上提出了Turbo码的概念,这才彻底否定了截止速率可能就是实际信道容量这一长期以来困扰编码理论界的疑问,成为了编码技术发展的一个重要里程碑。

由于Turbo码优良的性能,它很快成为了信息论和编码理论界研究的热点。正是由于对Turbo码的深入研究,人们才发现Turbo码和1962年Gallager^[2]提出的低密度校验(Low Density Parity Check, LDPC)码有许多相似之处,两者在编码端都采用了随机编码的方式,在译码端都采用迭代译码方式。Gallager当时之所以没有发现LDPC码这一特性,主要原因在于当时的计算机仿真能力有限,无法对码字较长的LDPC码进行仿真实现,而且由于硬件水平的限制,使得学术界当时也错误地认为LDPC码译码算法过于复杂,无法在实际系统中应用而一度被忽视。直到1996年,Mackay和Neal^[3]首先揭示并证明采用BP迭代译码算法,LDPC码具有逼近香农限的性能,从此LDPC码的研究跨入了一个新的阶段。

在Turbo码引入和LDPC码再发现之后不久,人们认识到迭代译码方法还适合于其他很多应用,可以作为先进接收机设计的通用方法。典型现代通信接收机都是由多个信号处理子系统级联而成,但每个子系统是独立进行优化的。这些子系统包括自适应天线阵列、均衡器、多用户检测器、信道译码器、信源译码器以及信道估计器等。在传统接收机中,各个子系统之间的接口是硬判决信息,而任何时候进行硬判决都会丢失信息。此外,链路处理的第一个阶段也没有利用后续处理模块获得的有用信息。实际上,链路中各个阶段的接口可以借鉴Turbo码译码策略而获得很大的改善。文献[4]中,作者用“Turbo处理”描述迭代反馈译码和检测的一般方法。

“Turbo处理”中的每一个子系统均采用软输入/软输出(Soft-in Soft-out, SISO)算法实现。软判决值,典型形式是对数似然比(Log-Likelihood Ratio, LLR),传递到下一个处理子系统进行处理。链路中的最后一个子系统的软输出值再反馈到第一个子系统作为下一次迭代的先验信息。这样可以继续多次迭代,和Turbo一样,每次迭代获得的增益也是递减的。目前,Turbo原理已在无线通信中得到了广泛应用,如用于信道译码联合信源译码^[5]、符号检测、均衡以及多用户检测等。

Turbo均衡^[6](Turbo Equalization, TEQ)原理类似于Turbo译码器原理,只是其外信息是由串行而不是并行级联分量码中提取。信道均衡器和译码器在迭代中都不能传递硬判决信息,只是在迭代结束后对信息进行硬判决输出。之所以能采用迭代工作方式,是因为一个发散信道的信道脉冲响应类似于卷积编码器的脉冲响应,因此发散信道通常又称为

内部编码器^[7-8]。因此,TEQ 已经被成功应用于减小由部分响应调制解调器或者发散信道引入的符号间干扰(Inter-Symbol Interference, ISI)的影响,它能够获得接近于在非发散信道的性能^[7-8]。该方法还具有减小信道估计误差影响的潜力。

典型 TEQ 的设计码率都小于 1/2。然而,文献[7-9]表明采用更高的编码率可以保较高的有效吞吐量,并可以获得接近容量的性能。这些文献评估了采用二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)调制,码率 $R_c = 3/4$ 和 $R_c = 5/6$ 的 Turbo BCH 码、卷积码和卷积 Turbo 码分别在一个发散的 5 径高斯信道上和一个等权重符号间隔 5 径瑞利(Rayleigh)衰落信道上的性能。为满足实际应用,这些 Turbo 均衡策略都结合了一个迭代信道估计器。仿真结果表明,对所有研究的编码率,同时考虑到不同结构的实现复杂度,利用卷积 Turbo 码的迭代均衡策略是最稳健的系统。文献[10]和文献[11]提供了一个实际的 Turbo 均衡无线视频电话设计,用于全球移动通信(Global System for Mobile, GSM)系统中。

文献[12]也提出了一种 TEQ 策略,它采用了一种基于径向基函数(Radial Basis Function, RBF)^[13-15]的均衡器,而不是 Douillard^[6]等人建议的经典基于格型的均衡器。文献[13]表明在一个发散衰落信道的输出端,即使没有噪声,相位星座点也可能变得线性不可分离,这时,只有非线性接收机,如基于 RBF 的 TEQ,才能实现没有错误平层。文献[12]还提出了一种简化复杂度的新颖 TEQ 技术,该技术中,当且仅当在译码符号具有很高错误概率的迭代中,符号均衡才被激活,否则迭代提前结束,因为这时可以作出可靠判决了。这项技术对 BPSK 和 16QAM 基于 RBF 的 Turbo 均衡在发散瑞利衰落信道上相对于各自完全复杂度的 RBF 迭代均衡可以分别节约 37% 和 54% 的运算量。

在文献[16]中,作者把基于 16QAM 的格型编码调制(Trellis Coded Modulation, TCM)、Turbo 格型编码调制(Turbo Trellis Coded Modulation, TTCM)、比特交织编码调制(Bit Interleaved Coded Modulation, BICM)和比特交织编码调制—迭代检测(Bit Interleaved Coded Modulation-Iterative Detection, BICM-ID)与基于 RBF 的 TEQ 技术相结合,作为简化复杂度的基于 RBF 的 TEQ 策略的基准,其中复杂度简化是通过同相和正交支路(I/Q)单独采用 TEQ 技术实现的。该思想源自文献[17],它是基于这样一个事实,即如果分别独立考虑 I 路和 Q 路,信道输出状态的数量将大大减少。例如,在 2 径信道上传输的 16QAM 信号,信道输出端将有 $16^2 = 256$ 种状态,另一方面,假设对 I/Q 两路独立进行均衡,其状态数仅为 $4^2 \times 2 = 32$ 种。

当然,上述例子的复杂度分析有点简单化。因为在复数脉冲响应信道上传输复数信号时,输入的 I/Q 两路对输出的实部和虚部都有影响,这样就不能简单的单独处理 I 路和 Q 路。然而利用文献[17]的解决方法,如果采用迭代 TEQ 技术,I/Q 两路还是可以独立处理的。换句话说,I/Q 两路的“串话(crosstalk)”是可以估计和补偿的。事实上,即使在第一次迭代 TEQ 中不考虑“串话”,相关的串话错误也可以在后续的迭代 TEQ 中得以消除。当然在 Q 路信号的处理会比传统的 TEQ 方法需要稍微更多一些的迭代次数,但 TEQ 内部迭代的复杂度要更低一些。这种复杂度简化方法被广泛地应用于多种迭代接收机中,如用于简化空时格型编码系统的 I/Q 迭代检测的复杂度^[7,8]。

文献[16]还采用了最小均方(Least Mean Square, LMS)算法进行信道估计,结果表明信道估计误差和 I/Q 串话的影响基本上都可以被 TEQ 消除。低复杂度的基于径向基函

数 I/Q 独立迭代均衡的编码调制的另外一个优点就是不仅和完全复杂度的 RBF-TEQ 编码调制具有类似的性能,而且复杂度得以大大减低。其中最好的策略还是 RBF-I/Q-TEQ-TTCM,它获得了 16.78dB 的编码增益。文献[19]还报告了在发散无线信道上基于径向基函数的空时格码设计方法,它也是和 Turbo 均衡相关的研究主题。

1.1 时域 Turbo 均衡算法

自从 Douillard 提出 Turbo 均衡概念后,Bauch^[20]和 Anastasopoulos^[21]等人又进行更深入的研究。所有这些系统无一例外都利用了优化的均衡与译码技术,文献[6]和文献[20]采用了 Viterbi 算法输出软信息,甚至文献[20]还采用了更为复杂的 BCJR 算法^[22]。

基于最大后验概率(Maximum A Posteriori Probability, MAP)/最大似然(Maximum Likelihood, ML)的均衡通常会受限于很大的计算负担,尤其在记忆长度较长的信道和采用高阶星座图时,复杂度更难以承受。而 Turbo 均衡还要求对每个数据块执行多次均衡和译码,因此,可实现性问题进一步加剧。这样,Turbo 均衡的一个主要研究问题就是如何降低它的实现复杂度。Ariyavisitakul 和 Li^[23]提出了一种联合编码均衡方法,他们没有采用优化的均衡结构,而是利用了判决反馈均衡器(Decision Feedback Equalizer, DFE)均衡器和一个卷积编码器,并且 DFE 利用了其前馈滤波器的软输出信息和 Viterbi 译码器的硬判决结果作为反馈信号。Wang 和 Poor^[24]建议了一个类 Turbo 均衡系统作为码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)多用户检测器的一部分。该迭代策略使用了一个线性均衡(Linear Equalizer, LE)和 MAP 译码器,LE 的滤波参数对每个符号更新一次。文献[25]中,作者利用一个基于线性滤波的软干扰抵消(Soft Interference Cancelling, SIC)器代替了 Turbo 均衡中的 MAP 均衡器,滤波器的系数由 LMS 算法更新,使得实现复杂度大大降低。该思想被 Raphaelli^[26]等人进一步改进,其滤波器系数由 LMS 算法匹配 MAP 均衡器输出而获得。为适应不同的 SNRs 和各种星座图,MAP 均衡器的一种线性估计需要存为一张表,供接收机均衡使用。

上述这些简化 MAP 均衡器复杂度的方法都是采用低复杂度的线性均衡器或 DFE 均衡器来代替复杂的 MAP/ML 均衡算法,但是性能损失非常严重。为改善这些算法的性能,文献[27]和文献[28]提出了一种基于软反馈干扰抑制技术结合 LE 的迭代均衡算法,它比优化的均衡算法仅差 1.2dB。文献[29]把软判决反馈均衡技术用于多输入/多输出(MIMO)系统,其算法复杂度仅与恢复的符号数成多项式关系,而与星座图大小成线性关系,但性能与 ML 性能是可比的。Roy^[30]等人提出了一种软输入/软输出卡尔曼均衡器,用于频率选择性衰落信道上的 MIMO 系统中的 Turbo 均衡,其 4 次迭代后的性能与无迭代 MAP 算法的性能损失不到 1.5dB,但其复杂度比 MAP 算法大大简化。文献[31]还研究了结合卡尔曼均衡算法和信道估计的 Turbo 均衡的性能。此外,有些研究人员还把遗传算法(Genetic Algorithm, GA)用于多天正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)系统的迭代均衡^[32],不仅算法复杂度低于优化的 MAP 算法,还能获得近似最大似然的性能。

另一类降低 MAP 均衡算法复杂度的方法是减少格型状态的数量^[33]。文献[34]提出了一种基于判决反馈策略的有限延迟后验概率(A Posteriori Probability, APP)算法,以较

低的复杂度实现了接近 APP 的性能,但不同的 ISI 结构需要不同的判决反馈策略。在 MIMO 系统中,优化的 Turbo 均衡的复杂度问题更为突出,因此,Guo^[35]等人利用 FIR 滤波器先把 MIMO 信道解耦合为几个并行信道,从而降低了均衡的复杂度。Wong^[36]等人把序列译码的 M 算法用于空时 Turbo 均衡后,使得均衡复杂度与格型大小无关,而仅与 M 的大小成线性关系。

不管是软判决反馈均衡或软反馈干扰抵消均衡算法,还是卡尔曼(Kalman)均衡算法以及上述降低状态的迭代均衡算法,虽然复杂度均比优化的均衡算法得以很大简化,但性能只能是近似 MAP/ML 均衡算法的性能。因此,有些研究人员建议利用 ISI 信道本身的特点来简化 MAP/ML 均衡算法,而不牺牲性能。例如,文献[37]利用宽带无线信道的稀疏特性,借鉴 LDPC 码的置信传播译码算法进行迭代均衡,既保证了 ML 的均衡性能,又降低了均衡复杂度。但这类算法要求 ISI 信道构成的因子图中的圈必须大于 4,否则性能急剧恶化。文献[38]针对一类特殊的稀疏信道,提出了一种并行格 Viterbi 均衡算法,使总的格型状态数大大减少,但该算法要求整个 ISI 信道可以拆分成几个独立并行的子信道。如果信道脉冲响应是最小相位的,一些降低状态的次优均衡算法也能获得很好的性能^[39,40],但实际信道往往需要被一个预滤波器转变为最小相位的,关键问题是如何找到一种预滤波算法,既能保证性能稳定,又能有普遍适用性。

文献[41]还研究了一种并行级联时域迭代均衡结构及其算法,即发射机采用并行级联传输策略,数据在 ISI 信道上传输一次,同样的数据经过交织后再在同一信道上发送一次,在接收机采用 Turbo 接收算法。该迭代策略在接收机具有理想信道状态信息情况下,性能增益主要来自于带宽扩展,但在非理想信道估计时,该系统能获得额外的性能增益。

1.2 频域 Turbo 均衡算法

未来宽带无线接入系统将支持数十甚至数百兆比特每秒以上的数据速率,因此,在设备成本和带宽限制等约束条件下,为满足在恶劣无线传输环境中无线业务的传输质量需求,选择一种合适的无线空中接口技术是十分重要的。OFDM^[42]技术是未来宽带无线通信系统的候选技术之一,它解决了宽带系统中多径延迟过大而带来的均衡复杂度不可接受的问题。但 OFDM 技术本身过大的峰值平均功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)将严重限制其应用^[43]。文献[44]表明单载波频域均衡(Single Carrier Frequency-Domain Equalization, SC-FDE)具有和 OFDM 相同的性能和实现复杂度,却避免了 OFDM 的 PAPR 问题,因此它是未来宽带通信系统的另一种候选。

由于 SM-FDE 的上述优点,人们对优化的频域均衡器(Frequency Domain Equalizer, FDE)接收机结构进行了大量研究。文献[44]和文献[45]提出了一种时域反馈的 FDE,研究结果表明它比线性 FDE 有较大的性能改善。文献[46]至文献[48]提出了一种块迭代频域反馈均衡器,该结构以相对较低的复杂度获得了接近匹配滤波界的性能。然而这些技术在均衡过程中都没有考虑信道译码和信道估计。在文献[49]至文献[51]中, Turbo 频域均衡被研究了,但都假设了理想的信道信息,其中文献[51]研究了基于干扰抵消的 Turbo 频域均衡算法。文献[52]研究了从译码器反馈的时域或频域软信息的 Turbo 均衡算法。单载波频域均衡结合 MIMO 信号检测的迭代检测算法在文献[53]中进行了研

究。Pancaldi^[54]等人还研究了空时分组编码系统中的迭代频域均衡算法。

文献[55]提出了一种并行级联迭代频域均衡器结构及其迭代算法。在发射机添加适当的循环前缀,接收机每个滤波器均在频域进行设计和处理,一个滤波器的输出经过离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)后作为另一个滤波器的判决反馈输入,这种结构具有很低的复杂度,同时在静态信道和瑞利信道上都得到了很大的性能增益。

1.3 信道不匹配时的 Turbo 均衡算法

已有的大多数关于 Turbo 均衡算法的研究都是假设信道信息是已知的。实际上,接收机是不知道信息状态信息的,这就需要进行信道估计,根据估计算法的不同,估计误差也有所区别。文献[56]提出了一种联合信道估计的迭代均衡算法,并根据对信道估计误差的方差的分析计算推导出了一个确定反馈软信息是否能改善信道估计质量的准则,结果表明从译码器的反馈软信息不一定都能改善信道估计质量,但若改善,将会大大提高迭代检测的性能。文献[57]基于软干扰抵消原理提出了 MIMO 系统的 Turbo 均衡算法,并分析了信道估计误差对迭代算法的影响。Sellami^[58]等人从理论上分析了信道估计误差和先验信息误差对 MAP 迭代均衡和译码器的影响,给出了闭合表达式。文献[59]在考虑了信道估计误差情况下,提出了一种受约束的最小方差滤波算法,用于软输入/软输出块迭代均衡器。结果表明,如果考虑信道估计误差,迭代均衡的性能比不考虑估计误差时将有很大的性能改善,但增加的额外复杂度与块长成 4 次方上升。至于信道估计误差对 Turbo 空时分组编码 CDMA 系统的性能影响在文献[60]中进行了研究,研究结果显示了在适中或高信道估计质量情况下,基于最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)的 Turbo 均衡算法能获得很好的性能。

除了需要对信道衰落进行估计外,大多数均衡算法还需要信道信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)的信息。在文献[61]中,作者分析了信噪比估计误差对 Log-MAP 迭代均衡器的性能影响,结论是基于 Log-MAP 算法的 Turbo 均衡器在高损失信道上对 SNR 不匹配非常敏感。基于此结论, Talakoubs^[61]等人提出了一种迭代在线 SNR 估计算法,用于改善 Log-MAP 迭代检测的性能。该算法是利用 Max-Log-MAP 对 SNR 误差不敏感的特性,在第一次迭代时采用 Max-Log-MAP 算法,其硬判决结果用于估计信道 SNR,该估计值再被用于后续帧处理的 Log-MAP 算法。文献[41]还研究了并行级联策略下 ISI 译码的 SNR 不匹配的问题。

上述这些关于 Turbo 均衡在信道不匹配情况下的研究,或者作者只研究了信道估计误差对性能的影响,或者他们提出的抑制信道估计误差的技术措施在某些情况下并不有效。因此,文献[63]和文献[64]建议了两种新的对 SNR 估计误差稳健的切换迭代均衡算法,这些算法无论在中、低损失信道上还是在高损失信道都具有优化的性能,同时解决了传统优化迭代均衡算法对 SNR 估计误差敏感的问题。其中,文献[64]还采用了文献[65]建议的一种新的基于可靠性值的 SNR 估计算法。

此外,文献[66]还基于文献[55]提出的并行级联频域均衡结构及其迭代均衡算法,分析了分别在 SNR 过估计和欠估计的情况下,系统在静态信道和瑞利(Rayleigh)衰落信道上的性能。

1.4 Turbo 均衡算法的性能分析

一般来说,对迭代检测系统进行精确的性能分析是非常复杂的,目前,对迭代译码和迭代处理系统的性能分析基本都是基于半分析半仿真方法进行的。

自从 Brink^[67] 首先提出外信息转移 (EXtrinsic Information Transfer, EXIT) 图分析方法后,近年来,它已成为分析迭代系统收敛性的一种简单而有效的工具^[68]。文献[69]就利用 EXIT 方法较为准确地预测了 Turbo 频域均衡算法的性能,基于 SIC-MMSE 迭代均衡算法在卫星信道上的性能也被 C. E. Burnet^[70] 等人进行分析。2006 年, Roumy^[71] 等人分析了信道估计误差和先验信息错误对 Log-MAP 迭代均衡算法性能的影响,所给出的分析表达式非常好的拟合了算法的性能。此外,文献[72]还针对多用户迭代均衡系统,分析了迭代算法的性能和收敛性行为。

参考文献

- [1] Berrou C, Glavieux A, Thitimajshima P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo code 1. IEEE Int. Conf. on Commun., 1993, 2:1064 – 1070.
- [2] Gallager R G. Low density parity check codes. IRE Trans. Inform. Theory, 1962, IT-8; 21 – 28.
- [3] Mackay D J C, Neal R M. Near Shannon limit performance of low density parity check codes. IEEE Electronics Letter, 1997, 33(6): 457 – 458.
- [4] Lodge J, Gertsman. Joint detection and decoding by Turbo processing for fading channel communications. In Proc. Int. Symp. On Turbo codes and related topics, 1997, 88 – 95.
- [5] Bystrom M, Kaiser S, Kopansky A. Soft source decoding with applications. IEEE Trans. on Circuits and Systems for video technology, 2001, 11(10): 1108 – 1120.
- [6] Douillard C, Picart A, Jezequel M, et al. Iterative correction of intersymbol interference: Turbo-equalization. Europe Trans. on Communications, 1995, 6(5):507 – 511.
- [7] Hanzo L, Liew B Y T H. Turbo coding, Turbo Equalization and Space-Time Coding. New York: Wiley, IEEE Press. [Online]. Available: <http://www-mobile.ecs.soton.ac.uk,2002>.
- [8] Hanzo L, Wong C, Yee M. Adaptive Wireless Transceivers. New York: Wiley/IEEE. [Online]. Available: <http://www-mobile.ecs.soton.ac.uk,2002>.
- [9] Yeap B L, Liew T H, Hamorsky J, et al. Comparative study of convolutional coded as well as convolutional-based and block-based Turbo coded Turbo equalizers. IEEE Trans. on wireless communications, 2002, 1(4): 266 – 273.
- [10] Hanzo L, Cherriman P, Streit J. Wireless video communications: From second to third generation systems, WLANs, and beyond. New York: IEEE press. [Online]. Available: <http://www-mobile.ecs.soton.ac.uk,2001>.
- [11] Cherriman P, Yeap B L, Hanzo L. The performance of H.263-based video telephone over Turbo-equalised GSM/GPRS. IEEE Trans. on Circuits Syst. Video Technol., 2002, 12(10): 909 – 916.
- [12] Yee M S, Yeap B L, Hanzo L. Radial basis function assisted Turbo equalization. IEEE Trans. on Commun., 2003, 51(4): 664 – 675.
- [13] Maunder R G, Kliewer J, Ng S X, et al. A wireless video scheme employing the joint iterative decoding of trellis-based vector quantization and trellis-coded modulation. IEEE Trans. on wireless Commun., to appear.
- [14] Yee M, Liew T, Hanzo L. Burst-by-burst adaptive Turbo coded radial basis function-assisted feedback equalization. IEEE Trans. on Commun., 2001, 49(11): 1935 – 1945.
- [15] Yee M, Hanzo L. A wideband radial basis function decision feedback equalizer assisted burst-by-burst adaptive modem.

- IEEE Trans. on Commun. , 2002, 50(5) : 690 – 697.
- [16] Ng S X, Yee M S, Hanzo L. Coded modulation assisted radial basis function aided Turbo equalization for dispersive Rayleigh fading channels. IEEE Trans. on wireless Commun. , 2004, 3(6) : 2198 – 2206.
 - [17] Yeap B L, Wong C H, Hanzo L. Reduced complexity in-phase/quadrature phase m-QAM Turbo equalization using iterative channel estimation. IEEE Trans. on wireless Commun. , 2003, 2(1) : 2 – 10.
 - [18] Yeap B L, Hanzo L. Reduced complexity L/Q Turbo detection for space-time trellis-coded systems. IEEE Trans. on vehicular Technol. , 2004, 53(4) : 1278 – 1286.
 - [19] Yee M S, Yeap B L, Hanzo L. RBF-based decision feedback aided Turbo equalization of convolutional space-time trellis-coded systems. IEEE Electronics Letter, 2001, 37(21) : 1298 – 1299.
 - [20] Bauch G, Franz V. A comparison of soft-in/soft-out algorithms for Turbo detection'. In Proc. Int. Conf. Telecomm. , 1998, 259 – 263.
 - [21] Anastasopoulos A, Chugg K. Iterative equalization/decoding for TCM for frequency-selective fading channels. In Conf. Rec. 31th Asilomar Conf. Signals, Systems & Computers, 1997, 1 : 177 – 181.
 - [22] Bahl L R, et al. Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol error rate. IEEE Trans. on Inform. Theory, 1974, IT-20(2) : 284 – 287.
 - [23] Ariyavisitakul S, Li Y. Joint coding and decision feedback equalization for broadband wireless channels. IEEE J. Select. Areas in Commun. , 1998, 16(9) : 1670 – 1678.
 - [24] Wang X, Poor H. Iterative (Turbo) soft interference cancellation and decoding for coded CDMA. IEEE Trans. on Commun. , 1999, 47(7) : 1046 – 1061.
 - [25] Glavieux A, Laot C, Labat J. Turbo equalization over a frequency selective channel. In Proc. Int. Symp. on Turbo Codes, 1997, 96 – 102.
 - [26] Raphaeli D, Saguy A. Linear equalizer for Turbo equalization; A new optimization criterion for determining the equalizer taps. In Proc. 2nd Int. Symp. on Turbo Codes, 2000, 371 – 374.
 - [27] Vogelbruch F, Hear S. Low complexity Turbo equalization based on soft feedback interference cancellation. IEEE Commun. Letter, 2005, 9(7) : 586 – 588.
 - [28] Lopes R R, Barry J R. The soft feedback equalizer for Turbo equalization of highly dispersive channels. IEEE Trans. on Commun. , 2006, 54(5) : 783 – 788.
 - [29] Liu Shoumin, Tian Zhi. Near optimum soft decision equalization for frequency selective MIMO channels. IEEE Trans. on signal processing, 2004, 52(3) : 721 – 733.
 - [30] Roy S, Duman T M. Soft input soft output Kalman equalizer for MIMO frequency selective fading channels. IEEE Trans. on wireless Commun. , 2007, 6(2) : 506 – 514.
 - [31] Li X, Wong T F. Turbo equalization with nonlinear Kalman filtering for time-varying frequency selective fading channels. IEEE Trans. on wireless Commun. , 2007, 6(2) : 691 – 700.
 - [32] Jiang M, Akhtman J, Hanzo L. Near optimum nonlinear soft detection for multiple-antenna assisted OFDM. IEEE WCNC06, 4 : 1989 – 1993.
 - [33] Berthet A, Visor R, Tortelier P. Sub-optimal Turbo detection for coded 8-PSK signals over ISI channels with application to EDGE advanced mobile system. In Proc. , In Proc. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2000, 1 : 151 – 157.
 - [34] Jaekyun M, Rad F R. Turbo equalization via constrained-delay APP estimation with decision feedback. IEEE Trans. on Commun. , 2005, 53(12) : 2102 – 2113.
 - [35] Guo Y F, Berard C L. Decoupling method for low-complexity Turbo equalization of frequency selective MIMO wireless systems. IEEE WCNC'05, 2005, 1 : 420 – 425.
 - [36] Wong K K Y, McLane P J. Low complexity space-time Turbo equalizer with the soft-output M-algorithm for frequency-selective channels. IEEE Int. Conf. on Commun. , 2005, 4 : 2251 – 2255.
 - [37] Colavolpe G, Germini G. On the application of factor graphs and the sum-product algorithm to ISI channels. IEEE Trans. on Commun. , 2005, 53(5) : 818 – 825.

- [38] McGinty N C, Kennedy R A, Hoehner P. Parallel trellis viterbi algorithm for sparse channels. *IEEE Commun. Letter*, 1998, 2(5): 143 – 145.
- [39] Hallen A D, Heegard C. Delayed decision-feedback sequence estimation. *IEEE Trans. on Commun.*, 1989, 37(5): 428 – 436.
- [40] Eyuboglu M V, Qureshi S U. Reduced-state sequence estimation with set partitioning and decision feedback. *IEEE Trans. on Commun.*, 1988, 36(1): 13 – 20.
- [41] Balachandran K, Anderson J B. Mismatched decoding of intersymbol interference using a parallel concatenated scheme. *IEEE J. Select. Areas in Commun.*, 1998, 16(2): 255 – 259.
- [42] Bingham J A C. Multicarrier modulation for data transmission; An idea whose time has come. *IEEE Commun. Mag.*, 1990, 28(5): 5 – 14.
- [43] Patterson K G, Taroth V. On the existence and construction of good codes with low peak-to-average power ratios. *IEEE Trans. on Inf. Theory*, 2000, 46(6): 1974 – 1987.
- [44] Falconer D, Ariyavisitakul S L, Seeyar A B, et al. Frequency domain equalization for single-carrier broadband wireless systems. *IEEE Commun. Mag.*, 2002, 40(4): 58 – 66.
- [45] Benvenuto N, Tomasin S. On the comparison between OFDM and single carrier modulation with a DFE using frequency domain feedforward filter. *IEEE Trans. on Commun.*, 2002, 50(6): 747 – 955.
- [46] Benvenuto N, Tomasin S. Block iterative DFE for single carrier modulation. *IEEE Electron. Letter*, 2002, 38(19): 1144 – 1145.
- [47] Benvenuto N, Tomasin S. Iterative design and detection of a DFE in the frequency domain. *IEEE Trans. On Commun.*, 2005, 53(11): 1867 – 1875.
- [48] Dinis R, Gusmao A, Esteves N. On broadband block transmission over strongly frequency selective fading channels. In *Proc. Wireless'03*, (Calgary, Canada), July 2003.
- [49] Tucher M, Hagerauer J. Linear time and frequency domain equalization. In *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference*, 2001, 2: 1449 – 1453.
- [50] Kansanen K, Matsumoto T. A computationally efficient MIMO Turbo equalizer. In *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference Spring*, 2003, 1: 277 – 281.
- [51] Yee M S, Sandell M, Sun Y. Comparison study of single carrier and multi-carrier modulation using iterative based receiver for MIMO system. In *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference Spring*, 2004, 3: 1275 – 1279.
- [52] Ng B, Lam C H, Falconer D. Turbo frequency domain equalization for single – carrier broadband wireless systems. *IEEE Trans. on wireless Commun.*, 2007, 6(2): 759 – 767.
- [53] Visoz R, Berthet A Q, Chtourou S. Frequency domain block Turbo equalization for single-carrier transmission over MIMO broadband wireless channel. *IEEE Trans. on Commun.*, 2006, 54(12): 2144 – 2149.
- [54] Pancaldi F, Viterba G M. Frequency domain equalization for space-time block coded systems. *IEEE Trans. on wireless Commun.*, 2005, 4(6): 2907 – 2916.
- [55] Li Qiang, Li Shaoqian. Parallel Concatenated Frequency-Domain Decision – Feedback Equalization Scheme. *IEEE WICOM conference*, 2007, 625 – 628.
- [56] Tuchler M, Otnes R, Schmidbauer A. Performance of soft iterative channel estimation in Turbo equalization. *IEEE Int. Conf. on Commun.*, 2002, 3: 1858 – 1862.
- [57] Abe T, Matsumoto T. Space-time Turbo equalization in frequency selective MIMO channels. *IEEE Trans. on vehicular Technol.*, 2003, 52(3): 469 – 475.
- [58] Sellami N, Roumy A, Fijalkow I. The impact of both a priori information and channel estimation errors on the MAP equalizer performance. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2006, 54(7): 2716 – 2724.
- [59] Dangl M A, Sgraja C, Lindner J. Block Turbo equalization for imperfect channel state information. *IEEE ISIT05*, 2005, 2016 – 2020.
- [60] Chandika K, Wavegedara B, Bhargava V K. Effect of channel estimation errors on Turbo equalization in ST block-coded CDMA downlink. *IEEE the first Int. Conf. in Industrial and Information Systems*, 2006, 350 – 355.

- [61] Talakoub S, Shanrava B. Turbo equalization with iterative online SNR estimation. *IEEE WCNC'05*, 2005, 2: 1097 – 1102.
- [62] Khalighl M A. Effect of mismatched SNR on the performance of Log-MAP Turbo detector. *IEEE Trans. on vehicular Technol.*, 2003, 52(5): 1386 – 1397.
- [63] 李强, 李少谦. 基于一种新的 SNR 估计方法的切换迭代均衡. *电子学报*, 2007, 35(6A): 184 – 188.
- [64] Li Qiang, Mow W H, Li Shaoqian, Zhang Zhongpei. Improved Turbo equalization schemes robust to SNR estimation errors. *IEICE TRANSACTIONS on Communication*, 2007, E90 – B(6): 1454 – 1459.
- [65] 李强, 李少谦. 迭代均衡系统中的一种 SNR 估计算法. *电子与信息学报*, 2008, 30(4): 836 – 839.
- [66] 李强, 李少谦. 并行级联频域判决反馈 (DFE) 均衡策略及不匹配译码. *电子与信息学报*, 2008, 30(10): 2392 – 2396.
- [67] Brink S T. Convergence behavior of iteratively decoded parallel concatenated codes. *IEEE Trans. on Commun.*, 2001, 49(10): 1727 – 1737.
- [68] Tuchler M, Kotter R, Singer A C. Turbo equalization: Principles and new results. *IEEE Trans. on Commun.*, 2002, 50(5): 754 – 767.
- [69] Sabbaghian M, Falconer D. An analytical approach for finite block length performance analysis of turbo frequency-domain equalization. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2003, to be published.
- [70] Burnet C E, Cowley W G. Performance analysis of turbo equalization for nonlinear channels. *Proceeding of International symposium on Info. Theory*, 2005, 2026 – 2030.
- [71] Sellami N, Roumy A, Fijalkow I. The impact of both a prior information and channel estimation errors on MAP equalizer performance. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2006, 54(7): 2716 – 2724.
- [72] Ramon V, Herzet C, Vandendorpe L. A semi-analytical method for predicting the performance and convergence behavior of a multiuser turbo equalizer/demapper. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2007, 55(3): 1104 – 1117.