

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学 号: 200330006

UDC _____

厦 门 大 学
硕 士 学 位 论 文
基于脉动阵列的盲均衡多用户检测器的
设计研究

**Design of Blind Equalizer and Multi-user Detection Based on
Systolic Array**

林 志 谋

指导教师姓名: 卢贵主 副教授

专业名称: 无线电物理

论文提交日期: 2006年5月 日

论文答辩时间: 2006年5月 日

学位授予日期: 2006年 月 日

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2006年5月

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文而产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

CDMA 已经成为 IMT-2000 的主流空中接口解决方案,随着无线通信市场需求的迅猛增长,人们在工程实践中希望尽量提高 CDMA 通信系统的数据传送速率和系统用户容量,但是在高速 CDMA 无线接入系统中,由于受传输带宽的限制,码间干扰不再象低速的 CDMA 系统中可以忽略;由于 CDMA 系统的用户码之间的非严格正交等固有缺陷,使各个用户信号之间存在一定的相关性,这就是多址干扰(MAI)。码间干扰和多址干扰成为限制 CDMA 系统容量的两个主要因素。如果不对多址干扰及码间干扰加以适当补偿的话,接收信号就会有高的误码率。盲均衡技术和多用户检测技术正是解决这一问题的理想方法。

盲均衡是一种新兴的自适应均衡技术,它不需要参考输入的训练序列来维持正常工作,仅依据接收序列本身的先验信息来均衡信道特性。因此,在数据通信系统中不必发送训练序列,可以提高信道效率,同时盲均衡技术还可以获得更好的均衡性能。盲均衡技术优越的性能使它受到更加广泛的关注,并在许多领域中得到应用。本文系统地分析研究和归纳总结了盲均衡的基本理论,诸如算法形式、性能指标等。重点分析了 Bussgang 类盲均衡算法中的 B-G 盲均衡算法。

多用户检测能够消除多址干扰,提高系统的容量,是第三代移动通信的关键技术之一。但是现在很多多用户检测算法的复杂度很高,在实际系统中应用还存在很多困难,因此具有复杂度低、性能优良的多用户检测算法是研究的主攻方向。本文采用了一种脉动阵列多用户检测器,它采用脉动阵列结构,能够自适应地调整横向滤波器的抽头系数,与其他检测器比较,它具有较好的性能。

本文提出了一种性能较好的基于脉动阵列的盲均衡多用户检测器的实现方案,它能够同时消除码间干扰和多址干扰,通过对仿真结果的分析证明该检测器具有较好的误码性能。我们还把它与先进的 FPGA 技术结合起来,完成了硬件实现的研究。

关键字: 盲均衡算法; 多用户检测; FPGA

Abstract

CDMA has become the air interface mainstream solution of the IMT-2000. With the booming of wireless communication market, it is expected in the CDMA engineering to improve the data transfer rate as well as the system capacity, But in the high-rate wireless access CDMA system, the intersymbol interference (ISI) can not be neglected as it often do in the low-rate CDMA system. The ISI with the multiple access interference (MAI) which arises from mutual interference among all the (nonorthogonal) active users of the system, constitutes the major impediment to the overall system performance. Without proper compensation for MAI and ISI, Bit Error Rate (BER) is generated highly. Blind equalization and multiuser detection, which are studied in this dissertation, can be used to solve the problem.

Blind equalization is a self-adaptive equalization technology. It doesn't need referring to a training sequence to maintain normal work, only utilizes the prior information of transmitted signals to equalize the channel character. So in the digital communication system a training sequence isn't transmitted, which can raise the channel's efficiency. However blind equalization may get much better equalization ability at the same time. The super performance of blind equalization makes it be noticed widely and be used in many fields. This paper systematically analyses and summarizes the basic theory of blind equalization such as algorithm form, performance parameter, B-G algorithm of Bussgang algorithms is the emphasis.

Multiuser detection can eliminate MAI essentially and improve system performance, MUD is one of the key technologies in 3G mobile communication system. But due to the high complexity of MUD algorithm, it is very difficult to exploit this technology in practical system, the main research work may focus on how to present a high performance, low complexity algorithm in recently years. In this paper, we use a multiuser detection based on systolic array, this systolic architecture adaptively reconfigures the tap coefficient of the transversal filter, through comparing it with other detection, the conclusion is drawn that the detector has high performance.

In this paper, a new algorithm which is named as blind equalization and multiuser detection based on systolic array is proposed, it can reduce the ISI and MAI together, and the effect of the detection in symbol error rate has been tested by means of computer simulations. With the combination of the detection and FPGA technology, a study of hardware realization of it is completed.

Key words: Blind Equalization Algorithm; Multiuser Detection; FPGA

| | |
|---------------------------------------|-----------|
| 第一章 绪论 | 1 |
| §1.1 研究的目的及意义..... | 1 |
| §1.2 国内外研究现状..... | 2 |
| §1.3 论文的结构和内容..... | 4 |
| 第二章 CDMA 信道模型 | 6 |
| §2.1 多址干扰和码间干扰..... | 6 |
| §2.2 克服多址干扰和码间干扰的方法..... | 6 |
| §2.3 信道模型..... | 8 |
| 第三章 盲均衡算法及其实现 | 11 |
| §3.1 盲均衡技术..... | 11 |
| §3.1.1 传统的自适应均衡和盲均衡..... | 11 |
| §3.1.2 盲均衡技术的原理..... | 13 |
| §3.1.3 Bussgang 盲均衡算法..... | 15 |
| §3.1.4 一种改进的 Bussgang 盲均衡算法及性能分析..... | 17 |
| §3.2 总体设计分析..... | 19 |
| §3.3 算法的具体实现..... | 20 |
| §3.3.1 前馈滤波器模块..... | 21 |
| §3.3.2 反馈滤波器模块..... | 22 |
| §3.3.3 误差控制模块..... | 22 |
| §3.3.4 抽头系数调整模块..... | 23 |
| §3.3.5 顶层电路的实现及性能分析..... | 24 |
| §3.4 盲均衡器实现方案的误差分析..... | 26 |
| 第四章 脉动阵列多用户检测器及其实现 | 27 |
| §4.1 脉动阵列多用户检测器..... | 27 |
| §4.1.1 脉动阵列多用户检测器的结构..... | 27 |
| §4.1.2 脉动阵列多用户检测器性能分析..... | 30 |

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| §4.2 总体设计分析 | 32 |
| §4.3 算法的具体实现 | 33 |
| §4.3.1 基于短时能量和短时过零率的 VAD 及其实现 | 33 |
| §4.3.2 一种改进开平方算法及其实现 | 38 |
| §4.3.3 脉动阵列两用户检测器的 FPGA 实现 | 42 |
| 第五章 基于脉动阵列的盲均衡多用户检测器 | 46 |
| §5.1 基于脉动阵列的盲均衡多用户检测器 | 46 |
| §5.1.1 基于脉动阵列的盲均衡多用户检测器的结构 | 46 |
| §5.1.2 仿真结果以及分析 | 46 |
| §5.2 基于脉动阵列的盲均衡多用户检测器实现的探讨 | 47 |
| §5.3 总结 | 49 |
| §5.3.1 本文所做的工作 | 49 |
| §5.3.2 本文尚未解决的问题 | 50 |
| §5.3.3 展望 | 50 |
| 参考文献 | 52 |
| 致 谢 | 55 |
| 攻读硕士期间发表的论文 | 56 |
| 附录 | 57 |
| §附录 A: 算法 Matlab 仿真的部分源代码 | 57 |
| §附录 B: 设计综合后的 RTL Schematic | 61 |

Catalog

| | |
|---|-----------|
| Chapter 1 Preface | 错误！未定义书签。 |
| §1.1 Research purpose and meaning | 错误！未定义书签。 |
| §1.2 Research status in the world | 错误！未定义书签。 |
| §1.3 Paper structure and contents | 错误！未定义书签。 |
| Chapter 2 CDMA Channel Model | 错误！未定义书签。 |
| §2.1 MAI and ISI | 错误！未定义书签。 |
| §2.2 The method to combat both MAI and ISI | 错误！未定义书签。 |
| §2.3 Channel Model | 错误！未定义书签。 |
| Chapter 3 Blind equalizer algorithm and implementation | 错误！未定义书签。 |
| §3.1 Blind Equalizer | 错误！未定义书签。 |
| §3.1.1 Conventional equalizer and blind equalizer | 错误！未定义书签。 |
| §3.1.2 Theory of blind equalizer | 错误！未定义书签。 |
| §3.1.3 Bussgang blind equalizer algorithm | 错误！未定义书签。 |
| §3.1.4 A revised Bussgang blind equalizer and performance analyze | 错误！未定 |
| 义书签。 | |
| §3.2 Design and analyze | 错误！未定义书签。 |
| §3.3 Implementation of blind equalizer | 错误！未定义书签。 |
| §3.3.1 Feedforward filter Module | 错误！未定义书签。 |
| §3.3.2 Feedback filter Module | 错误！未定义书签。 |
| §3.3.3 Error Control Module | 错误！未定义书签。 |
| §3.3.4 Tap coefficient adjustment Module | 错误！未定义书签。 |
| §3.3.5 Implementaiton and Performance analyze | 错误！未定义书签。 |
| §3.4 Error analyze | 错误！未定义书签。 |
| Chapter 4 Multiuser detection implementation | 错误！未定义书签。 |
| §4.1 Multiuser Detection based on systolic array | 错误！未定义书签。 |
| §4.1.1 Structure of multiuser detection based on systolic array | 错误！未定义书 |
| 签。 | |

| | |
|---|------------------|
| §4.1.2 Performance analyze | 错误！未定义书签。 |
| §4.2 Design and analyze | 错误！未定义书签。 |
| §4.3 Implementation..... | 错误！未定义书签。 |
| §4.3.1 Voice activity detection implementation | 错误！未定义书签。 |
| §4.3.2 A revised square root algorithm implementation | 错误！未定义书签。 |
| §4.3.3 Multiuser detection implementation..... | 错误！未定义书签。 |
| Chapter 5 Blind Equalizer and MUD based on systolic array | 错误！未定义书签。 |
| §5.1 Blind Equalizer and MUD based on systolic array ... | 错误！未定义书签。 |
| §5.1.1 Structure of BE-MUD | 错误！未定义书签。 |
| §5.1.2 Performance analyze | 错误！未定义书签。 |
| §5.2 Research of Blind Equalizer and MUD based on systolic array | 错误！未定义书签。 |
| §5.3 Summary | 错误！未定义书签。 |
| §5.3.1 Conclusion..... | 错误！未定义书签。 |
| §5.3.2 Further research..... | 错误！未定义书签。 |
| §5.3.3 Expectation..... | 错误！未定义书签。 |
| Reference literature..... | 错误！未定义书签。 |
| Acknowledgments | 错误！未定义书签。 |
| Published paper | 错误！未定义书签。 |
| Appendix | 错误！未定义书签。 |
| §Appendix A: Matlab simulation source codes(Part) | 错误！未定义书签。 |
| §Appendix B: RTL schematic of design | 错误！未定义书签。 |

第一章 绪论

近年来，无线和移动通信技术取得了飞速发展，这促使人们在数字信号处理领域对其中的某些相关技术进行深入而广泛的研究，因为采用先进的数字信号处理技术可以较好地提高无线通信系统的性能和容量。在通信信号处理研究的最新进展中，盲均衡与多用户检测技术是倍受瞩目的关键技术。本文主要讨论通信系统中的盲均衡技术以及多用户检测技术和它们的联合检测方案。

§1.1 研究的目的及意义

随着通信市场容量的突飞猛进和通信技术的日新月异，人们已不再满足于低速率的语音无线通信，高速率的 1-10Mb/s 的数据接入 CDMA 系统的设计已引起普遍重视。在分析和设计低速率 CDMA 系统时，由于无线信道的多径效应而常常忽略码间干扰 (ISI)，但对高速 CDMA 系统，受无线信道带宽的限制，码间干扰不可再忽略。

由于 CDMA 系统的用户码(扩频码)之间的非严格正交等固有缺陷，使各个用户信号之间存在一定的相关性，这就是多址干扰(MAI)存在的根源。由个别用户产生的 MAI 固然很小，可是随着用户数的增加或信号功率的增大，MAI 就成为 CDMA 通信系统的一个主要干扰。

这样 MAI 和 ISI 就成了限制 CDMA 系统容量提高的两个主要因素。特别地，对于多址干扰还存在“远近效应”的问题。“远近效应”严重影响系统性能。由于移动用户的位置不断变化以及深衰落的存在，基站接收到的各用户信号功率可能相差很大，强信号对弱信号有明显抑制，弱信号的接收性能很差甚至无法通信。因此，增加系统容量，缓解多址干扰和码间干扰成为一个引人注目的课题。为了克服 MAI 和 ISI，人们提出了许多减少干扰的方法。传统的检测技术完全按照经典直接序列扩频理论对每个用户的信号分别进行扩频码匹配处理，因而抗 MAI 干扰能力较差。多用户检测(Multi-User detection, MUD)是一种抗多址干扰有效的方法。多用户检测技术在传统检测技术的基础上，充分利用造成 MAI 干扰的所有用户信号信息对单个用户的信号进行检测，从而具有优良的抗干扰性能，解决了远近效应问题，降低了系统对功率控制精度的要求，因此可以更加有效地利用上行链路频谱资源，显著提高系统容量。多用户检测包括早期提出的线性多用户检测，近期提出的自适应多用户检测，以及现今处于研究热点的盲多用户检测。ISI 不仅是高速率 CDMA 系统所面

临的问题，而且它存在于各种通信系统中，为了解决 ISI 的问题，我们必须在接收端设计能够补偿或减小接收信号码间干扰的接收机，即均衡器。包括线性均衡器、自适应均衡器、盲均衡器等。

第三代移动通信，简单地说就是提供覆盖全球的宽带多媒体服务的新一代移动通信系统，它是建立在 ITU IMT-2000 建议基础上、工作在 2GHz 频段、最高速率可达 2Mbit/s 的宽带移动通信系统，其基本要求是：在室内、步行及车载三种环境下，支持语音和各种多媒体数据业务，实现高质量、高频谱利用率、低成本的无线传输以及全球兼容的核心网络，其中高速移动环境支持 144Kbps，步行慢速移动环境支持 384Kbps，在室内支持 2Mbps 的数据传输速率。它能提供更大的系统容量和更高的数据传输率以及更好的通信质量。在工程中要实现这些功能，就会产生更多的多址干扰和码间干扰，以至影响后者的实现，为了缓和二者的矛盾，需要采取各种措施来减少或消除这些干扰，采用多用户检测技术和盲均衡技术或者它们的联合检测方案，是一种比较新颖的解决方法。

§1.2 国内外研究现状

盲均衡是指均衡器能够不借助训练序列，而仅仅利用所接收到的信号序列即可对信道进行均衡。换言之，其本身完全不用训练序列。就可以自启动收敛并防止失锁情况的发生，且能使滤波器的输出与要恢复的输入信号相等。盲均衡从根本上避免了训练序列的使用，收敛范围大，应用范围广，克服了传统自适应均衡的缺点，从而降低了对信道和信号的要求。因此，盲均衡现已越来越受到重视。传统自适应均衡器的设计目标是使均衡后的输出序列逼近输入的码元序列，而盲均衡的设计目标则是使均衡后输出序列的统计量逼近。

Sato^[1]于 1975 年提出了一种针对 PAM 信号的盲均衡算法，开创了盲均衡算法研究的先河，D.N.Godard 在^[2]中提出了一种典型的 CMA(Constant Modulus Algorithm)算法。此后，很多学者又提出了一些改进的算法，例如 Binvensite 和 Goursat 的 B-G 算法^[3]，Picchi 的 Stop-and-Go(SG)算法^[4]等。这些算法都是在代价函数达到全局最小点时才能实现最优的均衡效果，但这些算法的代价函数都是非凸性的，因此可能会陷入局部最小点，即不能获得最优解，Z.Ding 验证了 CMA 算法的病态收敛性^[5]。这些算法都采用了非线性无记忆函数来产生误差信号用以控制均衡器抽头系数的调整，选择一种合适的误差控制函数以获得更好的均衡性能是一个值得研究的课题。到目前为止，盲均衡算法可分为四大类：

- ① Bussgang 类型盲均衡算法；
- ② 基于高阶统计量的盲均衡算法；

- ③ 循环平稳信号盲均衡算法;
- ④ 基于神经网络和模糊理论的盲均衡算法。

盲均衡算法发展到现在可以说是种类繁多,各算法实现的原理、采用的方法以及性能指标也大相径庭。衡量一种算法的性能主要有以下几方面^[6]:

- ①收敛速度如何,在盲均衡中这决定该算法能否用于实时系统中。
- ②能否获得最优解,在盲均衡中即代价函数能否收敛到全局最小点,也就是代价函数的U性。
- ③均衡器收敛到最优解后的剩余误差,这决定了均衡器收敛后系统的误码率。
- ④算法对计算量的要求,实现起来的难易程度。

上述各种算法各具有优缺点,一种性能的提高往往通过牺牲另一性能为代价,因此在实际应用时需要根据实际情况权衡利弊,选择合适的算法。盲均衡器研究主要有以下几个研究方向:对 Bussgang 类盲均衡器^[7],需进一步研究具有凹特性代价函数的盲均衡算法。以保证均衡器收敛到全局最小点,且收敛速度快,运算量小,易于硬件实现;对基于高阶矩的盲均衡算法,主要应寻找运算量更小的算法,使其走向实用化;对非线性盲均衡器,要进一步研究存在噪声干扰的神经网络盲均衡器的性能,并应着手研究适用于盲均衡器的神经网络新模型。

在研究各种盲均衡算法的同时,人们也对一些算法的硬件实现作了探讨,如文献 8 在 Xilinx 公司的 Virtex2 3000 的芯片实现了一种有载波恢复的盲均衡器,文献 9 也在 FPGA 上面实现了一种 FI-CMA 算法。盲均衡器在实际工程中的应用研究取得了一些成果。

1979 年和 1983 年, K.S. Schneider 和 R. Kohno 各提出了多用户检测(MUD)的思想^[10/11],即利用其它用户的已知信息消除 MAI,实现无 MAI 的多用户接收,并指出了一些研究方向,这是多用户检测的最早的文献。1986 年 S.Verdu 提出了最佳多用户检测技术^[12],但由于其运算复杂度随用户数指数增长(2^k),实际上几乎是无法实现的。因此人们开始研究各种次优多用户检测,期望能在保证一定性能的前提下将复杂度降低到工程可以接受的程度。主要的次优多用户检测器可以分为线性多用户检测器和非线性多用户检测器。

线性 MUD 是指先对匹配滤波器的输出进行一次线性变换,然后再判决。具有代表性的是解相关 MUD、最小均方误差(MMSE) MUD^[13/14]和基于多项式展开(PE)的 MUD。解相关 MUD 用小区内用户扩频码序列的自相关逆矩阵对匹配滤波器的输出进行线性变换,其优点是完全克服了 MAI 和远近效应,复杂度降为与用户数呈线性关系,并且不用估计用户的功率。但是解相关 MUD 对噪声有放大效应,对于信噪比较低的环境,它并不适用。它的更大缺点

是逆矩阵运算的复杂度高，现在的器件还承受不了。非线性 MUD 的基本思想是在接收端重构各个用户的 MAI，并让它们和包含 MAI 的混合接收信号相减，使得 MAI 刚好抵消。在原理和结构上，非线性 MUD 与克服码间干扰 (ISI) 所用的判决反馈均衡器类似，故又称为判决反馈抵消器。常用的有两种：串行干扰抵消 SIC 和并行干扰抵消 PIC。其他方案还有序列检测^[15]、分组检测^[16]、基于神经网络的检测^[17]、一种利用 Taguchi 方法的多用户检测^[18]。

但是，上述的 MUD 技术有其局限性。一方面，因为不知道相邻小区干扰用户的地址码，它们不能够消除其它小区的 MAI 干扰对本小区的影响。另一方面，它们要知道本小区各个用户的地址码以及对时延、功率、信道参数等系统参量的准确估计，实现复杂度高，一般只在基站使用，即只适用于上行链路的检测。针对上述情况，盲 (blind) MUD 和半盲 (semi-blind) MUD 技术成为 MUD 研究的前沿课题。所谓“盲”是指不知道干扰用户的地址码，适用于移动台；所谓“半盲”是指对干扰用户的地址码，小区内的已知而小区外的未知，适用于基站，如 Wang X. 推出了一种基于将接收信号投影至信号和噪声子空间的盲多用户检测器^[19]。目前对多用户检测技术的研究热点是如何在实际的 CDMA 系统中设计实现。文献 20 介绍了一种基于 FPGA 的并行干扰抵消接收机，文献 21 采用 TI 公司的 C6701DSP 芯片设计了 PIC 多用户检测器，DSP 仿真表明对单个用户可以达到 800Kbps，对 32 个用户，可以达到 50Kbps。

一般地，盲均衡器只能消除码间干扰，而多用户检测器只能消除多址干扰。为了能够同时消除码间干扰和多址干扰，人们提出了一些联合检测算法，如文献[22]提出了一种盲自适应联合多用户检测与均衡的检测方法，结合了块矩阵的 RLS 算法和子空间跟踪技术，有较好的稳态性能，能够同时消除 MAI 和 ISI。文献 23 提出了一种基于 CMA 算法的盲自适应多用户检测器。它由两级组成，第一级结构利用期望用户的信息，消除部分 MAI 和 ISI，第二级结构利用 CMA 算法，消除剩下的 MAI 和 ISI。

以上都是国外的研究情况，关于联合检测算法实现的研究还比较少，因此开展对能够消除多址干扰和码间干扰的联合检测器实现技术的研究是非常紧迫和必需的。

§1.3 论文的结构和内容

CDMA 作为实现高速率无线通信系统的关键技术之一，有其优越性，但也存在一些为题。CDMA 系统的用户码(扩频码)之间的非严格正交会导致多址干扰，由个别用户产生的多址干扰固然很小，可是随着用户数的增加或信号功率的增大，多址干扰就成为 CDMA 通信系统的一个主要干扰。在分析和设计低速率 CDMA 系统时，由于无线信道的多径效应而

常忽略码间干扰，但对高速 CDMA 系统，受无线信道带宽的限制，码间干扰不可再忽略。实际上，由于信道的畸变，码间干扰一般存在于所有的通信系统中。如果不对多址干扰及码间干扰加以适当补偿的话，接收信号就会含有很高的误码串。盲均衡技术和多用户检测技术正是解决这一问题的理想方法。盲方法从根本上避免了训练序列的使用，可以自启动收敛并防止失锁情况，克服了传统自适应方法的缺点，从而可以很好地应用于通信系统中，多用户检测技术是消除或者减弱多址干扰的有效手段，可以增大小区覆盖范围，改善系统性能，提高系统容量。本文结合盲均衡与盲多用户检测的研究新进展，实现了基于脉动阵列的盲均衡多用户检测器。主要内容是按如下安排的：

第二章介绍了 CDMA 系统中存在的多址干扰和码间干扰，以及它们对 CDMA 系统的影响，并且介绍了克服多址干扰和码间干扰的几种方法，给出了 CDMA 系统的信道模型，并且从理论上分析了如何克服多址干扰和码间干扰。

第三章介绍了盲均衡技术的原理以及一种改进的盲均衡算法，用 Matlab 对它的性能进行了仿真，介绍了采用的 B-G 盲均衡器的基本结构，并且用 FPGA 实现了它的各个功能模块，给出了相应的资源占用情况，最后对实现过程中的误差进行了分析。

第四章介绍了脉动阵列多用户检测器，对它的性能进行了仿真，介绍了脉动阵列多用户检测器基本结构，实现了一种基于短时能量和短时过零率的语音激活检测模块和一种改进的不恢复余数的开平方运算模块，再介绍顶层电路的实现方案。

第五章提出了一种基于脉动阵列的盲均衡多用户检测器，它能够同时消除多址干扰和码间干扰，介绍了它的基本结构，用 Matlab 仿真该系统并分析了它的性能，并对它的具体实现进行了探讨，然后总结了本文所做的工作及其他相关问题，并对未来的研究方向作了展望。

第二章 CDMA 信道模型

CDMA 虽已成为第三代移动通信的主流技术，但要真正满足其预定规划，还有许多关键技术需要解决。其中一个关键点就是克服 CDMA 系统多址干扰和码间干扰的负面影响。

§2.1 多址干扰和码间干扰

CDMA 系统由于各用户使用相同的通信频率而成为自干扰系统，表现为不同用户之间的多址干扰。如果所有用户的扩频码序列严格正交并且通过同步平坦衰落信道，系统中将不会存在多址干扰，此时系统达到其性能上界。但由于并发用户接入系统的随机性，理论上已经证明不可能设计出在任意时延下都正交的扩频码组。同时由于信道的多径衰落特性以及定时精度的影响，即便发送时扩频序列满足严格正交性，到达接收端的混合接收信号中各用户信号的正交性也已遭到破坏（如采用 Walsh 码扩频的下行链路）^[24]。这说明，实际 CDMA 系统中多址干扰将始终存在。同时，由于无线信道中存在反射、衍射、散射，移动用户相对基站的运动产生多普勒频移，从而信道存在时变多径衰落，这将导致接收信号中还存在码间干扰，数据传输率越高，码间干扰越严重。

CDMA 系统中传统的信号检测方法将多址干扰视为高斯噪声来处理，这种忽略多址干扰存在的方法会带来两方面的问题：

(1) 系统容量大为下降。当系统中并发用户较少时，由于伪随机码良好的互相关性多址干扰将不会太严重。但随着并发用户的增加，多址干扰的功率增加得更快，致使系统误码性能逐渐下降。尤其是第三代系统中大容量(用户数)的要求和多天线发射分集的采用，将会导致 CDMA 系统容量由于多址干扰而严重受限。

(2) “远近效应”严重影响系统性能。由于信号的路径损耗与用户距基站的距离的三次方成正比，显然基站接收到的各用户的功率将可能相差很大，距离基站近的功率大的发送信号完全有可能淹没距离远的发送信号将进一步加剧“远近效应”，导致弱信号检测的失败。此外信道时变多径衰落将进一步加剧“远近效应”。

§2.2 克服多址干扰和码间干扰的方法

多址干扰是由于扩频码之间非理想正交而产生，码间干扰是由于信道畸变而产生，为

了克服多址干扰与码间干扰造成的负面影响，可以采用如下的一些方法^[25]：

(1) 扩频码的设计：期望设计出具有高的自相关同时具有低的互相关特性的扩频码。理想情况下如果扩频码间完全正交，则不存在多址干扰。在码同步条件下，完全正交的扩频码是可以设计出来的，比如 Walsh 码。但实际上由于用户接入系统的随机性以及信道的弥散特性，信号的到达是随机的，而理论上已经证明不可能设计出对任意时偏都满足正交性的扩频码集，因此只能寻求次优的扩频码。

(2) 功率控制：通过调整移动台的发射功率使得各用户以大致相同的功率到达接收端从而克服远近效应，如在 IS-95 和第三代移动通信标准中都采用了功率控制技术，但只能尽可能减少多址干扰的影响，而不能从根本上消除多址干扰。另外，功率控制的缺点还包括：占用信道传递功率控制信息、存在算法收敛速度、性能与用户移动速度有关和系统复杂度等。

(3) 前向纠错编码：利用编码的附加冗余度可以纠正因为信道畸变而产生的错误比特判决，这是提高通信质量的一个重要手段。显然这种方法对多址干扰引起的错误同样有效。

(4) 分区、智能天线：采用具有一定方向性的分区或者智能天线，在时、频、码域基础上再引入空域。当干扰信号与期望信号不在同一个扇区或者具有不同的方向角时，通过空间域滤波而滤除干扰，从而提高系统性能。把一个小区划分为若干个独立的扇区，利用扇区设计来达到隔离扇区间的多用户干扰。而智能天线则是采用更多更窄的动态波跟踪一个用户，基本上从空间上完成隔离和消除多址干扰。

(5) 多用户检测：从本质上来看，多址干扰不同于普通高斯噪声，它具有特定的结构：用户间的信号是确定信号且是可以预测的，具有高斯白噪声所不具有的有限符号集特性和循环平稳性、恒模性，在天线阵列接收情况下还存在空间结构特性以及编码结构等特点，所以这些都使我们有可能将各个用户的有用信号分离出来。多用户检测技术就是一种利用全部或者部分用户的相关信息以去除多址干扰，提高系统性能的技术。通过多用户检测还可以实现一箭三雕的作用，既可以抗多址干扰，又可以抵抗远近效应和多址干扰。

(6) 信道估计和均衡^[24]：接收信号中包含有信道信息，在使用 MUD 技术时一般都需要信道信息以实现干扰抑制与联合检测。第三代移动通信系统支持快速移动用户，移动台相对基站的快速移动将产生大的多普勒频移，从而信道也是时变的，此时可靠的信道估计技术成为 MUD 技术的前提。估计出信道特性后，可以根据估计来调整均衡器的系数，进而消除符号间干扰。均衡器系数的调整算法很多，可以利用来自发送端的训练系列来调整初始系数即非盲均衡算法，也可以在没有训练系列仅通过接收系列调整均衡器的系数即盲均衡算法。

比较上述几种方法可以看出，盲均衡和多用户检测技术是抑制多址干扰和码间干扰最有效的方法，因此盲均衡和多用户检测技术一直是 CDMA 技术中的一个热门研究领域。

§2.3 信道模型

假设在采用线性数据调制和解调的 CDMA 系统中^[26]，同一个频率及同一个时隙内，有 K 个用户传输有限长度的数据，CDMA 系统信道模型如图所示：

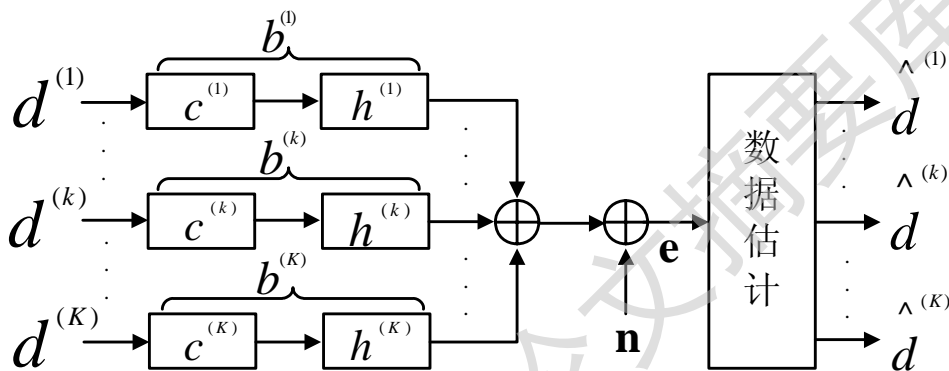


图 2-1 CDMA 系统信道模型

第 k 个用户发送的经过线性数字调制后长度为 N 的数据用 $c^{(k)}$ 表示，数据符号间隔为 T_s ：

$$\mathbf{d}^{(k)} = (d_1^{(k)}, d_2^{(k)} \dots d_N^{(k)})^T, \quad k = 1 \sim K \quad (2-3-1)$$

相应于该用户的扩频码序列由长度为 Q 的矢量 $c^{(k)}$ 表示，码片间隔为 T_c ，并且 $T_c = T_s/Q$ ：

$$\mathbf{c}^{(k)} = (c_1^{(k)}, c_2^{(k)} \dots c_Q^{(k)})^T, \quad k = 1 \sim K \quad (2-3-2)$$

其信道冲激响应用长度为 W 的 $h^{(k)}$ 表示：

$$\mathbf{h}^{(k)} = (h_1^{(k)}, h_2^{(k)} \dots h_W^{(k)})^T, \quad k = 1 \sim K \quad (2-3-3)$$

在码片间隔 T_c 内它由 W 个抽头构成。简单起见，假设信道在发送数据符号系列 $c^{(k)}$ 期间是时不变的，不过可以通过在发送期间更新 $h^{(k)}$ 来把它推广到时变信道的情况。例如可以在每符号间隔 T_s 内更新 $h^{(k)}$ 。当 W 大于 1 时出现码间干扰，当信道失真或非正交扩频系列或两者兼而有之的时候，就会出现多址干扰。序列矩阵 $c^{(k)}$ 和一个向量 $h^{(k)}$ 的卷积可以得到用户 k 总的信道冲激响应：

$$\mathbf{b}^{(k)} = (b_1^{(k)}, b_2^{(k)} \dots b_{Q+W-1}^{(k)})^T = \mathbf{c}^{(k)} * \mathbf{h}^{(k)}, \quad k = 1 \sim K \quad (2-3-4)$$

接收机接收到的总信号 \mathbf{e} 为 K 个序列的集合，每个序列的长度为 $NQ+W-1$ ，假设同时到达，

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库