

学校编号: 10384

分类号_____密级_____

学号: 200131005

UDC_____

学 位 论 文

DS-CDMA 系统的多用户检测技术研究

The Research Of Multiple User Detection

Technology In The DS-CDMA System

庄 雪 峰

指导教师姓名: 席 斌 副 教 授

申请学位级别: 硕 士

专 业 名 称: 控制理论与控制工程

论文提交日期: 2004 年 5 月

论文答辩时间: 2004 年 月

学位授予单位: 厦 门 大 学

学位授予日期: 2004 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2004 年 5 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，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

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘 要

码分多址 (CDMA) 技术的通信系统是一种自干扰受限系统, 每个用户唯一的扩频码为用户实现了在时间和频率上的共享, 但由于各种原因使得扩频码不能完全正交, 由此产生多址干扰 (MAI); 高速信息速率通信中的严重码间干扰 (ISI); 还有用户距离基站的远近带来的远近效应 (Near-Far Effect) 问题。这些因素严重限制着通信系统性能和容量, 因此如何使用先进的信号处理技术来抑制这些不利因素成为 CDMA 通信系统中的关键技术, 而多用户检测技术能够有效解决这些问题。

文章首先分析了 DS-CDMA 通信系统中码分的原理和多址干扰问题的产生。接着从接收信号的数学模型出发, 讨论了最基本的解决这些干扰的方法以及这些方法各自的特点。然后在这个基础上讨论天线阵列的空分技术, 详细给出了几种自适应的算法, 能够有效解决多用户检测中计算复杂的问题, 天线阵列的分集也能够明显提高系统增益。考虑到无线信道变化的复杂性, 提出了一种改进的盲自适应算法, 能够基本解决在检测中的不能收敛或者收敛慢的问题。第五章讨论自适应阵列的多用户检测, 分析比较了各种最小二乘多目标算法, 同时也给出了有训练序列和最小均方准则情况下的多目标解扩重扩恒模算法, 结果表明这些方法能够有效利用天线阵列提高路径、空间分集。文章最后一章则重点研究高速信息速率情况下的多用户检测结构, 在传统反馈判决多用户检测的基础上, 研究了几种较为复杂的前馈反馈结构, 以及在天线阵列接收模型下的检测情况。大大提高了系统检测的增益, 有效解决高速情况下的码间干扰问题。

关键词: 码分多址; 多用户检测; 天线阵列

Abstract

Code Division Multiple Access (CDMA) communication system is a self-interference limited system. Users can share the common frequency and time of channel with the unique spread spectrum code of each. Otherwise, the multiple-access interference (MAI) will exist due to not orthogonality absolutely. The Inter-Symbol-Interference also exists seriously in the high data-rate communication system. Besides, the diversity of distance of each user to the base station will bring Near-Far effect. All these problems will affect the performance and capacity of the communication system. Therefore, how to use advanced signal processing technology to solve these problems becomes the key in the modern CDMA communication systems. The technology of Multiple-user detection (MUD) is the effective technique.

In the first, the article introduces the theory of CDMA and the MAI and discusses some ways to solve the problems of interference based on the math model of system, also lists the features of these detection ways. In succession, the article discusses the diversity technology in the antenna array, and introduces some ways of adaptive algorithm, which can decrease the computational complexity efficiently. Considering the complexity of wireless communication channel, we present an advanced blind adaptive Multi-user detector, which can converge faster and have less Mean Square error. The chapter 5 presents the MUD, which detects with the adaptive antenna array, analyses several Least Squares Multi-Target algorithm. Besides we also research the Least Squares De-spread Re-spread Multi-Target Constant Modulus Algorithm when the detector has training sequences. All the results can testify that the antenna array can improve the gain of path and space diversity. The last chapter of the paper lays emphasis on the high data rate detection. We present some complex feedforward/feedback detection structures based on the traditional feedback detector when there have antenna array or not. The final results also show that the technology can decrease the ISI efficiently at the cost of improving the complexity a little.

Key Words: Code Division Multiple Access; Multiple User Detection; Antenna Array

目 录

第一章 绪 论	1
1. 1 CDMA技术介绍	1
1. 2 CDMA技术的主要特点	2
1. 3 CDMA系统中影响因素	4
1. 4 论文结构.....	6
第二章 DS-CDMA系统的原理及其模型.....	8
2. 1 引 言	8
2. 2 DS-CDMA通信原理.....	8
2. 3 CDMA系统模型及其检测技术分析	10
2.3.1 CDMA系统模型	10
2.3.2 CDMA系统检测技术的分析	13
第三章 多用户检测技术研究基础.....	15
3. 1 引言	15
3. 2 CDMA系统的数学模型	15
3. 3 匹配滤波及检测分析.....	16
3. 4 多用户检测技术.....	18
3.4.1 传统检测方法.....	18
3.4.2 最优多用户检测	20
3.4.3 线性解相关检测	21
3.4.4 最小均方误差检测 (MMSE)	22
3.4.5 连续抵消干扰检测 (Successive Cancellation detection)	24
3.4.6 判决反馈多用户检测(Decision Feedback Multiuser Detection)	25
3. 5 各种多用户检测算法的性能比较.....	26
3. 6 基本检测方法的误码性能比较.....	27
3. 7 本章小结.....	28
第四章 天线阵列的自适应多用户检测	29
4. 1 引言	29
4. 2 盲自适应多用户检测的原理.....	29

4. 3	天线阵列的空时信号模型.....	31
4. 4	空时多用户检测的迭代算法.....	34
4. 5	自适应MMSE和改进盲自适应算法.....	36
4. 6	仿真结果.....	42
4. 7	本章小结.....	45
第五章 自适应天线阵列在多用户检测技术中的应用		46
5. 1	引言.....	46
5. 2	自适应天线技术及其抗干扰原理.....	46
5.2.1	自适应天线技术的原理.....	46
5.2.2	自适应天线的抗干扰原理.....	48
5. 3	最小二乘恒模算法 (LS-CMA)	50
5. 4	最小二乘解扩重扩多目标阵列 (LS-DRMTA)	52
5. 5	最小二乘解扩重扩多目标恒模算法(LS-DRMTCMA).....	54
5. 6	多用户检测的自适应阵列算法.....	56
5. 7	最小均方误差的自适应阵列.....	56
5. 8	本章小结.....	58
第六章 前馈-反馈结构的多用户检测		59
6. 1	引言.....	59
6. 2	接收信号模型.....	59
6. 3	前馈反馈检测结构.....	60
6. 4	权系数的计算.....	62
6. 5	天线阵列接收结构中的前馈反馈算法.....	68
6. 6	仿真结果.....	70
6. 7	本章小结.....	71
总	结.....	72
致	谢.....	74
参 考 文 献.....		75

CONTENTS

1	INTUODUCTION	1
1. 1	Introduction of CDMA	1
1. 2	Characteristic of CDMA.....	2
1. 3	Unfavorable Factor In CDMA System	4
1. 4	Overview of the Paper.....	6
2	Theory And Model Of The DS-CDMA System	8
2. 1	Introduction	8
2. 2	Communication Theory Of The DS-CDMA System	8
2. 3	Model And Detection In The CDMA.....	10
2.3.1	Model Of CDMA	10
2.3.2	Detection Of CDMA	13
3	Basis Of Multiple-User Detection	15
3. 1	Introduction	15
3. 2	Mathematics Model Of CDMA.....	15
3. 3	Matched Filter And Detection	16
3. 4	Multiple User Detection	18
3.4.1	Basis Method Of Detection	18
3.4.2	Optimum Detector	20
3.4.3	Decorrelation Linear Detector.....	21
3.4.4	MMSE Linear Detector	22
3.4.5	Successive Cancellation detection.....	24
3.4.6	Decision Feedback Multiuser Detection.....	25
3. 5	Comparison Of Requirements For Detectors	26
3. 6	Comparison Of Performance Of Detectors	27
3. 7	Brief Summary	28
4	Adaptive Detection In Antenna Array	29
4. 1	Introduction	29
4. 2	Theory Of Blind Adaptive Detector.....	29

4. 3 Space Time Model	31
4. 4 Iteration Algorithm	34
4. 5 Adaptive MMSE And Advanced Blind Adaptive Algorithm	36
4. 6 Simulation Results.....	42
4. 7 Brief Summary	45
5 Adaptive Antenna Array.....	46
5. 1 Introduction	46
5. 2 Theory Of Adaptive Array	46
5.2.1 Analysis Of Antenna Array.....	46
5.2.2 Anti-interference Of Array	48
5. 3 Least Squares Constant Modulus Algorithm.....	50
5. 4 Least Squares De-spread Re-spread Multitarget Array	52
5. 5 Least Squares De-spread Re-spread Multitarget Constant Modulus Algorithm	54
5. 6 Multiple User Detector With Adaptive Array.....	56
5. 7 Least Mean Squares Detector	56
5. 8 Brief Summary	58
6 Feed-Forward/Feed-Back Architectures Detector	59
6. 1 Introduction	59
6. 2 Model Of System	59
6. 3 Feed-Forward/Feed-Back Architectures.....	60
6. 4 Weight Coefficient	62
6. 5 Feed-Forward/Feed-Back Architectures In Array	68
6. 6 Simulation Results.....	70
6. 7 Brief Summary	71
SUMMARY	72
ACKNOWLEDGE	74
REFERENCES	75

第一章 绪论

随着个人计算机和智能信息通信网络技术的发展,人们正在向信息化社会迈进,人们期望能够不受时间、空间的限制,及时可靠地进行相互间多种形式的信息交流,而移动通信则可以满足以上各种要求。1978年贝尔实验室的科学家们在美国芝加哥试验成功了世界上第一个蜂窝移动通信系统,并于1983年正式投入商用。这是移动通信发展史上的重大发明,但移动电话日后风靡全球,达到如此普及的程度,是发明者始料不及的。我国1987年开通移动通信业务,当时权威们预测到2000年全国将发展的用户量,竟然只相当于今天全国一天的新增量。到2001年底,全球移动电话用户已超过了4亿户,全球移动电话现在每天在以新增25万户的速度“爆炸式”增长。1997年7月18日,中国移动用户超过1000万,从0到1000万,移动电话仅用了10年,而中国固定电话完成这一历程用了110年。因此移动通信技术已经成为研究的最前沿的技术。

移动通信技术的迅猛发展对人类社会产生了深刻的影响,改变了人们的交流方式。移动通信的实用化,大大降低了通信者之间的地点限制,成为个人通信系统中最重要的环节之一,CDMA技术作为未来移动通信系统发展的必然趋势,在国内外学术界和产业界已经得到了广泛的发展。CDMA系统是一个干扰受限系统,表现为不同用户之间的多址干扰,因此如何进一步提高CDMA系统的性能一直是学术界研究的热点,多址干扰抑制技术和智能天线能够有效降低乃至消除多址干扰,因此近来得到广泛研究。本章讨论了CDMA技术特点、CDMA系统中的影响因素,然后介绍全文结构。

1.1 CDMA 技术介绍

码分多址(CDMA)扩频技术是将待传送的信息数据用伪随机码(PN码)调制,实现频谱扩展后再传输,接收端则采用同样的PN码进行相关处理及解调,恢复原始信息数据。扩频技术具有伪随机码调制和相关处理两大特点。正是这两大特点,使扩频通信有许多优良特性,如抗干扰性强、抗

多径干扰、可以实现码分多址等。无线通信多在地形、地物都比较复杂的环境和条件下进行，因而往往需要解决自然和人为的干扰、多径干扰及实现多址联接等许多复杂的技术问题。可以说，目前还没有一种通信技术像扩频通信技术那样能同时解决这样复杂的技术问题，所以现代的各种无线通信网，如：分组地面无线通信网、地面移动无线通信网、分组卫星通信网、室内无线通信网等新的组网方式中，无不采用扩频通信技术。

1. 2 CDMA 技术的主要特点

1、抗干扰能力强

由于扩频通信利用扩展频谱技术，在接收端对干扰信号频谱能量加以扩散，对有用信号频谱能量压缩集中，因此在输出端可提高信噪比。扩频通信系统扩展的频谱越宽，处理增益越高，抗干扰性能越好。例如：处理增益为 30dB，除去系统损耗 2dB 外，接收机还能在干扰信号比有用信号强 18dB 的条件下，仍有不小于 10dB 的工作信噪比，即有 10dB 的余量用于信号解调，进行正常通信。此外，对于单频及多频载波信号的干扰、其它伪随机调制信号的干扰，以及脉冲正弦信号的干扰等，扩频系统都有抑制干扰提高信噪比的作用。特别是对抗敌方人为干扰方面，效果很突出。简单地说，如果信号频带扩展 10 倍，干扰方面需要在更宽的频带上去进行干扰，分散了干扰功率。在总功率不变的条件下，其干扰强度只有原来的 1/10。而要保持原有的干扰强度，则必需加大 10 倍的功率，这在实际战场条件下，有时是难以实现的。另外，由于在接收端采用了扩频码序列进行相关检测。因此如果不能检测出有用信号的码序列，即使采用同类型信号进行干扰，干扰对系统性能影响也不大。抗干扰能力强是扩频通信最突出的优点之一。

2、抗多径干扰

多径干扰同与发射信号独立的加性噪声不一样，它是发射信号在传播过程中，遇到各种反射体(如电离层、对流层、高山、高大建筑物或建筑群等)引起反射或折射，形成对直接到达接收机的发射信号的干扰。这是所有无线通信，如卫星通信、微波通信、移动通信、短波通信等所面临的

十分突出的问题。由于反射或折射是多方向、多途径、与直接到达接收机的发射信号是完全相关的,会使接收机的接收信号产生严重的失真、波形展宽、波形重叠和畸变,造成通信系统解调器输出产生大量差错,以至不能正常通信。因此,长期以来,抗多径干扰问题始终是一个难以解决的问题。一般的方法是排除干扰或变害为利。前者是设法把最强的有用信号分离出来,而排除其它路径来的干扰信号,这就是采用分集技术的基本思想。后者是设法把不同路径来的不同延迟的信号在接收端从时间上对齐相加,合并成更强的有用信号,这就是采用梳状滤波器的基本思想。这两种基本方法在扩频通信中都是容易实现的。我们可以利用扩频码序列之间的相关特性,在接收端用相关技术从多径信号中提取和分离出最强的有用信号,或把多个路径来的同一码序列的波形相加合成。可见常规通信技术难以对付的多径干扰,采用扩频技术却能得到圆满的解决。

另外,在跳频通信系统中,由于用多个频率的信号传送同一信息,实际上还起到了频率分集的作用。因此,在目前民用数字蜂窝移动通信及部分军用通信设备中,经常采用简单的跳频技术作为抗多径干扰的一种手段。

3、可以实现码分多址(CDMA)

扩频通信所以能得到迅速发展,其中一个主要特点是可以进行选址通信。扩频通信提高了抗干扰性能,但付出了占用频带宽的代价。如果让许多用户共用这一频带,则可大大提高频带利用率。由于在扩频通信中存在扩频码序列的扩频调制,充分利用各种不同码型的扩频码序列之间优良的自相关特性和互相关特性,在接收端利用相关检测技术进行解扩,则在分配给不同用户不同码型的情况下可以区分不同用户的信号,提取出有用信号。这样,在一宽频带上许多对用户可以同时通话。它与利用频带分割或时间分割的方法实现多址通信的概念类似,即利用不同的码型进行分割,所以称为扩频 CDMA。这种扩频 CDMA 方式,虽然要占用较宽的频带,但按平均到每个用户占用的频带来计算,其频带利用率是很高的。除此之外,采用扩频 CDMA,还有利于组网、进行选呼、增加保密性和解决新用户随机入网等问题。

4、扩频 CDMA 数字蜂窝系统的容量大

目前, 各国模拟蜂窝移动通信已有很大发展, 但仍满足不了需求。解决移动通信的容量问题成为当务之急。采用扩频 CDMA 技术是一种十分有效的途径。采用扩频 CDMA 技术, 会使通信容量有更大幅度的增加。由于每个用户被分配一个伪码, 因而相邻小区可共用一个频带, 不需要频率重用。扣除邻小区的干扰, 大约可增加容量两倍多。如果数字化以后应用语声插空技术(DSI), 又可增加容量约 3 倍。另外, 在一个小区中采用 3 个 120° 的定向天线, 还可增加容量 3 倍左右。总计可增加容量近 20 倍。而且 CDMA 系统容量受限于干扰, 也就是说只要使得干扰足够小, 系统容量可以无限增加。可见, 应用扩频 CDMA 有巨大的增加容量的潜力。这正是许多知名学者倡导采用扩频 CDMA 的主要原因。

5、软切换和更软切换

在 CDMA 系统中, 由于所有的小区(或扇区)都可以用相同的频率, 小区(或扇区)之间是以不同的 PN 码片区分。当移动用户终端在相邻的小区(或扇区)之间移动时, 同时与两个基站保持连接, 因此可以获得分集增益, 可以大大减小在小区边缘掉话概率, 保证了通话质量。

6、频率分配及其管理简单

在模拟通信和其他技术例如 TDMA、FDMA 系统中, 由于不同用户在不同时间使用不同的频率, 因此需要动态频率分配, 管理也很复杂。但在 CDMA 系统中所有用户共同使用一个频率, 因此频率的分配和管理都很简单。

7、良好的保密功能

CDMA 数字通信技术采用扩频技术把用户信号扩展到很宽的频谱上, 从而使得用户信号在整个频谱上能量很小, 可以完全隐蔽于噪声、干扰中, 不易被发现。另外用户的扩频码各不相同, 在接收端只有具有完全相同的码型和相位的用户才能接收到信号。而对于其他用户则是一种噪声。一般扩频码很长, 很难被窃听解密。

1.3 CDMA 系统中影响因素

假设所有用户使用正交的扩频序列且信号通过同步的平坦的慢衰落

加性高斯噪声信道,接收端用对应的扩频码解扩后,则用户之间没有干扰,此时为 CDMA 系统性能的上界。但在实际中不能使信号同步到达接收端,而且信道极为复杂,一般为时变多径、频率选择性衰落信道。即使能够保证扩频码的正交,也会存在用户间干扰。另外同一用户的信号经过多径信道的传播到达接收端时,由于不同信道的特性,经历不同信道的信号的幅度和相位产生了不同的衰落、畸变,这样接收端信号会发生相干抵消,不能正确检测出发射的信号。这些干扰表现为以下方面:

1. 多径衰落,由于信号经过不同的路径到达接收端,而且接收天线的位置、方向、极化方向不同,使得接收信号的幅值、相位变化很大,因此接收到的信号会有很大程度的衰落。为了保证信号的强度,只能增加发射功率,这样就会直接影响系统的容量。
2. 时延扩展,也是由于不同路径的传播时延,当时延大于检测脉冲符号宽度的百分之十时,检测会存在严重的码间干扰,这样会限制数据速率。
3. 多址干扰,由于用户之间不能满足完全正交的特性,它使得系统容量受到限制,随着同一时间接入系统的用户数量的增加,多址干扰的功率也增加,误码率将增加,因此,CDMA 系统的容量受到用户数量、也即是多址干扰的影响,根据多址干扰近似为高斯噪声,同时有 K 个用户通信,采用 N 个码片的 PN 扩频码,则第 k 个用户接收端的等效信噪比可以近似表示为[1]:

$$E_k / N_0 = \frac{1}{\left(\frac{2}{3N} \sum_{i=1}^K P_i / P_k + \frac{N_0}{T_b P_k} \right)} \quad i \neq k. \quad 1.1$$

其中 P_i, N_0, N, T_b 分别是各用户的信号功率、噪声功率密度谱、扩频因子和符号时间宽度,系统容量就是要在式 1.1 大于等于某一固定值时取最大可能的正整数 K 。

4. “远近效应”会严重影响系统的性能。由于移动用户所在的位置和各路径的衰落处于动态的变化中,即使各用户到基站的距离相等,基站接收到各用户的功率相差很大。这样距离近、且存在很好路径的用户会对其

他用户产生严重的干扰，导致容量减小，“功率控制”则可以基本解决“远近效应”问题，尤其是第三代通信以后采用的闭环功率控制可以根据路径的变化动态调节用户的发射功率，使得各用户到达接收端的信号功率基本相同，这样功率强的用户就不会闭塞功率低的用户。但是实际中总会或多或少存在一些“远近效应”，因此完全依靠功率控制是不能完全避免“远近效应”的，另外多址干扰在实际通信信道中有着极其复杂的结构，因此多用户检测技术（Multi-user Detection, 简称 MUD），尤其是天线阵列和智能天线的接收基本可以把多径信道中的信号最优合并，形成分集，增加系统增益。系统性能和容量会有大幅度增加，这样频率的利用率也可以提高，缓解频率资源有限的问题。

1.4 论文结构

本文主要介绍了直接码分多址（DS-CDMA）移动通信系统中的多用户检测技术。

第一章简要介绍了移动通信的发展及其 CDMA 系统的特点，各种干扰对系统性能的影响及其主要解决手段。

第二章讲述 CDMA 系统的基本原理和系统模型描述及其检测技术的分析，通过对 CDMA 系统模型的分析，定性地指出多址干扰形成的原因，及其统计特性和检测的基本思想。

第三章讨论多用户检测的研究基础，对多用户检测的基本思想、原理和方法进行了概括，分析了几种典型的多用户检测技术，并给出了在加性高斯白噪声检测系统的误码性能指标，及各种检测技术特点分析、比较。

第四章给出了多种自适应算法，重点研究了在天线阵列中的空时模型及其盲自适应算法，还给出一种改进的盲自适应算法，可以解决在复杂无线通信环境中的自适应算法收敛性能差的问题。

第五章分析研究了自适应阵列中多用户检测技术，先论述了天线阵列的抗干扰原理和基本的天线阵列结构，在多目标算法的基础上重点讨论了多目标解扩重扩恒模算法。为了较好地实现系统检测良好的收敛性能，研

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