

学校编码: 10384
学号: 23320071152192

分类号___密级___
UDC___

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

DFT-SOFDM 水声通信系统关键技术研究及 DSP 实现

Research on the Key Techniques of DFT-SOFDM

Underwater Acoustic Communication System and the

Implementation Based on DSP

张永怀

指导教师姓名: 孙海信 副教授

专 业 名 称: 通信与信息系统

论文提交日期: 2010 年 5 月

论文答辩时间: 2010 年 月

学位授予日期: 2010 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2010 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人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其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（）课题（组）的研究成果，获得（）课题（组）经费或实验室的资助，在（）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

长的传输时延、多普勒扩散、频率选择性衰落以及有限的可用带宽等诸多因素,决定了水声通信信道的复杂性。然而 20 世纪以来,由于军用和民用的需求,水下通信技术开始被广泛研究。当今社会对高速率的传输系统的需求也日益迫切。多载波调制技术被认为是高速水下通信的一种备选方案,其中最常用的是正交频分复用(OFDM)技术。但是,OFDM 技术本身有一些缺陷,其中之一就是具有较高的峰值平均功率比。

本文研究了一种适用于在水声信道中使用的 DFT 扩展正交频分复用(DFT-SOFDM)技术,它不仅具备传统的 OFDM 的优势,而且具有更低的峰值平均功率比。本文着重研究 DFT-SOFDM 的关键技术及其 DSP 实现。计算机仿真结果表明,DFT-SOFDM 技术具备低的峰值平均功率比和良好的误码性能。该仿真系统也在厦门大学实验水池进行了实验,实验结果验证了 DFT-SOFDM 技术可以应用在水声通信环境中,并可以获得高速率、高可靠性的性能。

本文的主要工作总结如下:

① 基于对水声信道和 OFDM 水声通信系统的研究,构建了 DFT-SOFDM 水声通信系统。论文在叙述 DFT-SOFDM 技术的基础上,深入研究其时域表示和系统性能;此外还研究了该系统的多址接入技术。

② 本文研究了传统信道估计方法在 DFT-SOFDM 水声通信系统的应用,包括导频图案、导频序列和信道估计算法。另外,研究了 DFT-SOFDM 系统的分集合并算法,信噪比估计算法和自适应均衡,验证其用于提高 DFT-SOFDM 系统的性能。

③ 基于水声信道快速时变的特性,本文提出并研究了基于独特字的 DFT-SOFDM 水声通信系统;结合使用维纳内插和自适应均衡技术,实现在快时变信道下的可靠通信。

④ 在不同的信道模型下对本文研究的 DFT-SOFDM 通信系统及其各种算法进行了计算机仿真和分析,并进行水池实验。

⑤ 完成了基于 DSP 处理器的 DFT-SOFDM 水声通信系统收发平台。

关键字: 水声通信; DFT 扩展正交频分复用; 独特字

Abstract

The complexity of underwater acoustic communication channel is driven by the ocean environment characteristics, including large delay, Doppler-spreads, frequency-selective fading and limited bandwidth. However, since the 20th century, underwater communication has been widely studied and there is a pressing demand for higher data rate systems. Multi-carrier modulation is an alternative high data rate communication system in underwater acoustic channels, and the most popular method is orthogonal frequency division multiplexing (OFDM). However, the OFDM system suffers a number of drawbacks, one of which is high peak-to-average power ratio.

This paper presents a design of DFT-spread OFDM system (DFT-SOFDM) and applies it to underwater acoustic channels. DFT-SOFDM not only combines all the advantages of a conventional OFDM system, but also has a lower peak-to-average power ratio. This paper researches the key techniques of DFT-SOFDM and implements the system based on DSP. Computer Simulation results show that the DFT-SOFDM technology possesses low PAPR and good bit-error-rate performance. The system has been tested in real underwater acoustic channels—the experimental pool in Xiamen University. The experimental results show that the DFT-SOFDM system can be used in underwater acoustic channels and it could achieve high data rate and good performance.

The main contents are summarized as follows:

① The DFT-SOFDM underwater acoustic communication system was build based on the research on underwater acoustic channels and OFDM underwater acoustic communication system. We first give a detailed overview of the DFT-SOFDM system and analyze its time domain representation and performance. We also investigate the multiple access technology of DFT-SOFDM system.

② The conventional channel estimation methods used in DFT-SOFDM underwater acoustic communication system has been investigated. Pilot schedule, pilot sequence and the channel estimation algorithms have been taken into account.

We investigated diversity combining algorithms, signal to noise ratio estimation algorithms and adaptive equalization algorithms to improve the performance of the DFT-SOFDM system.

③ To overcome the fast changing of the underwater acoustic channel, we propose and investigate the DFT-SOFDM system based on a unique word, which can improve the performance of the underwater communications system when combining with the wiener interpolation and adaptive equalization.

④ The performance of the DFT-SOFDM system and all of the algorithms we investigate are simulated by computer using different channel models and experiments are completed in water pool.

⑤ The DFT-SOFDM underwater acoustic communication system is implemented based on DSP.

Key words: Underwater Acoustic Communication; DFT-SOFDM; Unique Word.

目录

摘要.....	I
ABSTRACT	II
第一章 绪论.....	1
1.1. 引言	1
1.2. 水声通信的发展.....	1
1.3. OFDM基本介绍.....	3
1.4. 本文研究意义	4
1.5. 本文的主要研究内容	5
第二章 水声信道及多载波水声通信的国内外发展现状.....	6
2.1. 水声信道.....	6
2.1.1. 海洋环境噪声	6
2.1.2. 传播损耗	6
2.1.3. 多径衰落	9
2.1.4. 多普勒效应	11
2.1.5. 结论	11
2.2. 多载波水声通信研究现状.....	12
2.2.1. 国外现状	13
2.2.2. 国内现状	13
2.3. 本章小结.....	14
第三章 DFT-SOFDM水声通信系统.....	15
3.1. OFDM水声通信系统基本模型.....	15
3.1.1. 符号映射	16
3.1.2. 保护间隔	17
3.1.3. 成型滤波器	20
3.2. DFT-SOFDM水声通信系统基本模型	22
3.3. DFT-SOFDM的性能	24
3.3.1. DFT扩展矩阵	24
3.3.2. PAPR分析	25
3.3.3. 误码性能	27
3.4. SC-FDMA	28
3.4.1. SC-FDMA子载波映射方式	29
3.4.2. SC-FDMA时域表示	30
3.4.3. SC-FDMA的性能	34
3.4.4. SC-FDMA和OFDMA的比较.....	35
3.5. 本章小结.....	36
第四章 DFT-SOFDM水声通信系统关键技术研究	38

4.1. 传统的信道估计	38
4.1.1. 导频图案	39
4.1.2. 导频序列	42
4.1.3. 信道估计算法	44
4.1.4. 仿真结果	47
4.2. 分集合并技术	49
4.2.1. 等增益合并	49
4.2.2. 恢复正交性合并	49
4.2.3. 仿真结果	49
4.3. 信噪比估计	50
4.3.1. 基于空载波的信噪比估计	51
4.3.2. 基于两个连续估计符号的信噪比估计	52
4.3.3. 基于单个估计符号的信噪比估计	54
4.3.4. 仿真结果	55
4.4. 自适应均衡	57
4.5. 基于独特字的信道估计	58
4.5.1. 基于UW的DFT-SOFDM系统.....	59
4.5.2. 基于UW的信道估计	61
4.5.3. 维纳内插方法	62
4.5.4. 仿真结果	64
4.6. 本章小结	69
第五章 实验结果	70
5.1. 水池实验	70
5.1.1. 信噪比估计	71
5.1.2. DFT-SOFDM实验 1.....	73
5.1.3. DFT-SOFDM实验 2.....	75
5.1.4. 基于UW的DFT-SOFDM.....	78
5.1.5. SC-FDMA	82
5.2. 本章小结	86
第六章 DSP实现	87
6.1. DSP硬件平台简介	87
6.1.1. 系统平台原理结构	88
6.1.2. TMS320C6713	88
6.1.3. McASP	89
6.1.4. SDRAM	90
6.1.5. AIC23	90
6.1.6. UART.....	92
6.2. 软件实现	92
6.2.1. 上位机软件	93
6.2.2. DSP的处理软件	95
6.3. 水池实验结果	96
6.4. 分析与探讨	98

6.5. 本章小结.....	99
第七章 总结与展望	100
7.1. 本文的主要工作内容	100
7.2. 未来工作的展望.....	101
参考文献	102
致谢.....	108

厦门大学博硕士论文摘要库

ABSTRACT	I
ABSTRACT	II
CHAPTER 1 PREFACE.....	1
1.1. INTRODUCTION	1
1.2. THE DEVELOPMENT OF UNDERWATER ACOUSTIC COMMUNICATION	1
1.3. BASIC INTRODUCTION OF OFDM	3
1.4. THE SIGNIFICANCE OF THE PAPER.....	4
1.5. THE MAIN CONTENT OF THE PAPER.....	5
CHAPTER 2 THE UNDERWATER ACOUSTIC CHANNELS AND THE RESEARCH STATUS ON MULTI-CARRIER UNDERWATER ACOUSTIC COMMUNICATION AT HOME AND ABROAD	6
2.1. UNDERWATER ACOUSTIC CHANNELS	6
2.1.1. Ocean Ambient Noise.....	6
2.1.2. Transmission Loss.....	6
2.1.3. Multipath Propagation.....	9
2.1.4. Doppler Effect	11
2.1.5. Conclusion.....	11
2.2. RESEARCH STATUS ON MULTI-CARRIER UNDERWATER ACOUSTIC COMMUNICATION	12
2.2.1. The Status Abroad.....	13
2.2.2. The Status at Home.....	13
2.3. SUMMARY	14
CHAPTER 3 DFT-SOFDM UNDERWATER ACOUSTIC COMMUNICATION SYSTEM	15
3.1. BASIC MODEL OF OFDM UNDERWATER ACOUSTIC COMMUNICATION SYSTEM	15
3.1.1. Mapping	16
3.1.2. Guard Interval	17
3.1.3. Shaping Filter	20
3.2. BASIC MODEL OF DFT-SOFDM UNDERWATER ACOUSTIC COMMUNICATION SYSTEM	22
3.3. THE PERFORMANCE OF DFT-SOFDM.....	24
3.3.1. DFT Spreading Matrix.....	24
3.3.2. PAPR Analysis	25

3.3.3. BER Performance	27
3.4. SC-FDMA	28
3.4.1. Subcarrier Mapping of SC-FDMA	29
3.4.2. Time Domain Representation of SC-FDMA.....	30
3.4.3. Performance of SC-FDMA	34
3.4.4. The Comparison of SC-FDMA and OFDMA	35
3.5. SUMMARY	36
CHAPTER 4 RESEARCH ON KEY TECHNIQUES OF DFT-SOFDM	
UNDERWATER ACOUSTIC COMMUNICATION SYSTEM	38
4.1. CONVENTIONAL CHANNEL ESTIMATION	38
4.1.1. Pilot Schedule.....	39
4.1.2. Pilot Sequence	42
4.1.3. Algorithms of Channel Estimation	44
4.1.4. Simulation Results.....	47
4.2. DIVERSITY AND COMBINING	49
4.2.1. Equal Gain Combining.....	49
4.2.2. Orthogonality Restoring Combining	49
4.2.3. Simulation Results.....	49
4.3. SIGNAL TO NOISE RATIO ESTIMATION.....	50
4.3.1. SNR Estimation Based on Null-carrier.....	51
4.3.2. SNR Estimation Based on Two Continuous Estimation Symbols	52
4.3.3. SNR Estimation Based on an Estimation Symbol	54
4.3.4. Simulation Results.....	55
4.4. ADAPTIVE EQUALIZATION.....	57
4.5. CHANNEL ESTIMATION BASED ON UNIQUE WORD.....	58
4.5.1. DFT-SOFDM System Based on UW.....	59
4.5.2. Channel Estimation Based on UW	61
4.5.3. Wiener Interpolation	62
4.5.4. Simulation Results.....	64
4.6. SUMMARY	69
CHAPTER 5 EXPERIMENT RESULTS	70
5.1. WATER POOL EXPERIMENT.....	70
5.1.1. SNR Estimation.....	71
5.1.2. DFT-SOFDM Experiment 1	73
5.1.3. DFT-SOFDM Experiment 2	75
5.1.4. DFT-SOFDM System Based on UW.....	78
5.1.5. SC-FDMA	82
5.2. SUMMARY	86
CHAPTER 6 IMPLEMENT BASED ON DSP	87
6.1. INTRODUCTION OF THE DSP HARDWARE.....	87

6.1.1. Principle and Structure of the System Platform	88
6.1.2. TMS320C6713	88
6.1.3. McASP	89
6.1.4. SDRAM	90
6.1.5. AIC23	90
6.1.6. UART	92
6.2. SOFTWARE IMPLEMENT	92
6.2.1. Upper Computer Software	93
6.2.2. DSP Process Software	95
6.3. WATER POOL EXPERIMENT RESULTS	96
6.4. ANALYSIS AND DISCUSS	98
6.5. SUMMARY	99
CHAPTER 7 SUMMARY AND PROSPECT	100
7.1. SUMMARY OF THIS PAPER	100
7.2. PROSPECTIVE OF THE FUTURE RESEARCH	101
REFERENCES	102
ACKNOWLEDGEMENT	108

第一章 绪论

1.1. 引言

海洋拥有丰富的资源和广阔的空间，在人类活动中占有越来越重要的地位。随着人类对海洋的开发，水声通信技术也引起了全世界的关注，它的应用也不再局限于最初的军事领域，而是拓展到各种民用领域。在军事应用方面，水下武器系统的日益智能化，要求对其进行指挥控制通讯，如：潜艇之间、母舰与潜艇或其它水下无人作战平台之间的通信，对水下航行器实施监测和导航，以及对水雷的远程声遥控等。在民用方面，如水下语音通信、工业用海岸遥测、水下机器人和海上平台的遥控指令传送、海底勘探数据与图像的传输，环境系统中的污染监测数据，水文站的采集数据等等，无不使对水下通信的需求大为增加。

我国大约 300 万平方公里的“海洋国土”大部分都处于浅海区域，这些区域含有丰富的海洋资源并具有重要的军事战略地位。无论是从军事上还是从民用上来看，浅海域水下通信技术的研究都有着特别重要的意义。

在近 20 年间，随着其它通信技术的飞速发展，水声通信技术取得了长足的进步。各种通信技术，如扩频(Spread Spectrum)技术、相位相干(Phase Coherent)技术、自适应均衡(Adaptive Equalization)技术、正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术等都在水声通信系统中得到了广泛的研究。由于水声信道传输速率低、带宽窄的特点，提高水声通信系统的传输速率和频带利用率，已经成为现代水声通信系统面临的挑战之一；此外，由于水声信道的时变性和频率选择性衰落等特性，对水声通信系统进行实时的信道均衡，是现代水声通行技术面临的又一难题。在多种应用于水声通信的新技术中，OFDM 技术无疑已经成为近年来水声通信领域的研究热点之一^[1]。

1.2. 水声通信的发展

水声通信的历史可以追溯到 1914 年研制成功的水声电报系统，该系统被用于英国海军的巡洋舰上^[2]。1945 年，美国研制出第一套运行良好的水下电话系统，用于潜艇间的通信^[3]。早期的水声通信多使用模拟频率调制技术，如 WHOI (Woods

Hole Oceanographic Institution)在 50 年代末研制的调频水声通信系统, 实现了水底到水面船只的通信^[4]。70 年代以来随着电子技术和信息科学突飞猛进的发展, 新一代的水声通信系统也开始采用数字调制技术。

长期以来, 频移键控(Frequency Shift Keying, FSK)调制方式被认为是水声通信中克服多径传播的最佳调制方式。在实际应用中, 常常通过这种方式的非相干检测方法避免传输过程中的多径和相位起伏的问题^[5]。这种方法的优点在于具有较高的可靠性和潜在的频率分集增益, 特别适用于远距离传输低比特率的导航控制和命令信息。但是, 这种方法需要较宽的频带宽度, 频带利用率很低, 并要求有较高的信噪比。当存在多普勒频移时, 还必须设置一定的频率富裕度, 这样就不能充分利用有限的水声信道带宽。另外, 频移键控调制虽然回避了载波相位恢复的问题, 但并没有解决多途引起的符号间干扰问题。一些系统采用在连续的码元间插入一定的间隔来消除符号间干扰, 但这又造成通信速率的降低。

相干通信技术已成为目前水声通信领域中极为活跃的研究方向之一。而水声信道的复杂性又使得这一研究领域面临着众多的理论和技术上的难题。相干通信技术首先应用在深水垂直信道、近距离水平信道等多径效应影响较小和较为稳定的水声信道之中^[6]。从 20 世纪 90 年代至今, 水声通信领域的研究重点转向对高速相干调制通信技术的研究, 各种基于相移键控(Phase Shift Keying, PSK)调制的通信系统相继出现^{[7][8][9]}。文献 [10]和文献[11]归纳了上个世纪八十年代到九十年代, 世界上各个研究小组在非相干解调和相干解调的水声通信系统的研究成果。

近年来, 中、远程浅海水平信道中的相干解调技术也取得了令人瞩目的成果, 其中包括直接序列扩展频谱(Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS)技术^[12], 该技术对于抑制海面反射的干扰有显著的效果。而这一方法的缺点是频带利用率较低, 在频带严重受限的水下声信道中信息传输速率不是很高。文献[13]提到一个差分相移键控(Differential Phase Shift Keying, DPSK)系统, 它采用 DSSS 技术抑制长度为 1 公里深度为 10 米海洋信道内的强多途, 数据率为 600bps, 扩展带宽为 10kHz。

另一显著的成果则是基于判决反馈均衡技术的相位相干通信^[14]。在文献[14]中, 作者利用均衡与同步参数估计联合处理的方式, 以及多进制相移键控(M-ary Phase Shift Keying, MPSK)技术实现了海洋水声信道中的远程传输。并且该方法取得了良好的实验结果, 在远程(110 海里)深海环境中, 实现了 333 bps 的可靠传输,

在远程(48 海里)浅海环境实现了 500 bps 的传输速率。

20 世纪 90 年代中后期以来,全世界范围内展开了对水声通信新技术的研究,主要包括水下多载波调制技术、码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)扩频技术、空间分集技术以及水下通信网络技术等,取得了一些令人鼓舞的初步成果。文献[10]、[11]、[15]和[16]回顾了最近几十年来水声通信技术和水声网络的发展,并分析了水声通信发展所面临的挑战。

1.3. OFDM 基本介绍

多载波调制是用于克服水声信道长时延特性的一种方法,它通过增加符号周期来降低符号间的干扰(Inter-Symbol Interference, ISI)^[17]。其中,在水声环境中,运用最普遍的多载波调制方式是 OFDM。Weinstein 和 Ebert^[18]提出时间受限的多载波系统,这就是我们现在所谓的 OFDM。在 1985, Cimini 第一次在无线通信中使用 OFDM^[19]。

OFDM 系统是宽带单载波通信系统的一个可选择的替代者,因为 OFDM 系统存在诸多的优点^[20]:

① 把高速数据流通过串并转换使得每个子载波上的数据符号持续时间相对增加,从而可以有效地减少水声信道的时间弥散带来的 ISI。

② OFDM 系统由于各个子载波之间存在正交性,允许子信道的频谱相互重叠,因此与常规的频分复用系统相比,可以最大限度地利用频谱资源,这对于带宽有限的水声通信系统提高传输效率是一个很好的解决方案。

③ 各个子信道之间的正交调制和解调可以通过 IDFT 和 DFT 方法来实现,依靠现在的大规模集成电路技术与 DSP 技术,IFFT 和 FFT 是很容易实现的。

④ 通过将有用的信道分成若干个子信道,OFDM 系统可以在频域内进行均衡,降低了均衡器的复杂度。

⑤ 在 OFDM 系统中,可以通过动态分配子信道的方法,充分利用信噪比较高的子信道,将频率选择性信道转换为非频率选择性信道,以提高系统的性能^[21]。

⑥ OFDM 使用保护间隔来避免 ISI。保护间隔通常使用循环前缀(Cyclic Prefix, CP)来维持子载波之间的正交性。然而,当时延扩展太长时,如果一味地增加保护间隔的长度,将会使系统的传输效率降低。当符号周期小于时延扩展时,可以

在独立的子载波上使用最大似然序列检测 (Maximum Likelihood Sequence Detection , MLSD) [22]。

1.4. 本文研究意义

与单载波相比, OFDM 系统存在一些缺陷, 其中之一就是较高的峰值平均功率比(high peak-to-average power ratio, PAPR)。因为 OFDM 系统的发送信号是由许多独立的数据信号的重叠的结果[23][24], 如果多个信号相位一致时, 得到的叠加信号的瞬时功率就会远远大于信号的平均功率。

为了无损失地发送信号, OFDM 系统要求一个具有高线性度和大范围的功率放大器, 而这种功放往往非常昂贵。此外, 经过硬件的削峰和放大, 会导致发送信号的非线性失真, 进而产生带内的失真和带外的频谱泄露[25]。带内的失真将会导致 OFDM 系统性能的下降, 而带外的泄漏将会影响相邻的传输频带[26]。

现在已经提出的多种降低 OFDM 系统的 PAPR 的方法, 其中包括削波法, 预编码法, 部分传输序列法和选择映射法等[27][28][29][30]。这些方法都存在一些特定的缺点, 如很高的计算复杂度、存储空间过大、信号失真等。综合考虑各种因素, 离散傅立叶变换扩展 (Discrete Fourier Transform Spread)作为一种很好的降低 OFDM 系统 PAPR 的方法[31]开始被人们广泛研究。

离散傅立叶变换扩展正交频分复用(DFT-SOFDM)系统最早在文献[32]中被提出。在这个系统中, 数据信号通过 DFT 被扩展到多个子载波中, 然后进行传统的 OFDM 的处理过程。文献[33]分析了使用离散傅立叶变换矩阵作为正交扩频技术来降低 PAPR 的原理。此外, 相对于传统的 OFDM 系统, DFT-SOFDM 系统中的 DFT 扩展还可以获得频率选择性信道上的分集增益, 而且它还具备了单载波系统的优势, 如: 比较固定的信号幅度, 简单的时钟和频率同步[34]。正因为如此, 它已经被选定为 3G 系统长期演进的上行链路的技术。在文献[35]和[31]中, Nisar 等人分析了 DFT-SOFDM 系统的误码性能, 并且得到了这个系统在多种信道下的性能公式。

低的 PAPR 和频率分集特性是选择 DFT-SOFDM 代替传统的 OFDM 系统作为高速水声通信技术的两个最重要的原因。第一个优点可以改进发射机的功率效率, 第二个优点则可以克服水声信道频域选择性衰落的特点, 帮助接收机获取更多的

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.

厦门大学博硕士论文摘要库