

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 22220051302386

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于 ARM+DSP 的 OFDM
水下图像传输系统的研究与实现

Research and Implementation of OFDM Underwater Image
Transmission System based on ARM and DSP

何平征

指导教师姓名: 许 茹 教授

专 业 名 称: 电路与系统

论文提交日期: 2008 年 6 月

论文答辩时间: 2008 年 6 月

学位授予日期: 2008 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2008 年 6 月

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产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1、保密（ ），在 年解密后适用本授权书。

2、不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：_____

日期： 年 月 日

导师签名：_____

日期： 年 月 日

摘 要

正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 技术是一种多载波传输技术,它的基本思想是在频域内将给定信道划分成几个相互正交的子信道,每个子信道使用一个子载波进行调制,各子载波并行传输。该技术可以有效提高频谱利用率,能够对抗多径效应产生的频率选择性衰弱和载波间干扰,在时变、频变、多径干扰严重的水声信道中具有较强的优势。

随着计算机和多媒体通信技术的发展,嵌入式系统在各个领域的应用不断深入。其中,基于 ARM 技术知识产权 (IP) 核的微处理器依靠其高性能、低功耗和易扩展的特点,在工业控制、无线通信、消费电子等多个领域得到广泛的应用;随着嵌入式系统复杂度的提高,操作系统已成为嵌入式系统不可缺少的一部分。其中,嵌入式 Linux 凭借免费开源、功能强大、成熟稳定等特点,目前已成为主要的嵌入式操作系统之一。

数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP) 具有很强的数字信号处理能力,可以满足各种高实时要求,但其寻址范围小, I/O 功能较差。ARM+DSP 双处理器的结构可以充分利用 ARM 和 DSP 各自的优势实现协同工作。

本论文的主要工作是研究和实现一个基于 OFDM 技术的由 ARM+DSP 硬件平台实现的能够完成水下声信道图像传输的系统。主要研究内容包括 OFDM 系统的基本原理、ARM+DSP 底层硬件的驱动和控制, Linux 操作系统的移植、MiniGUI 人机界面的设计、相关应用程序的编写以及在 TMS320VC5502 上初步实现 OFDM 的调制解调,以期对今后水下图像传输系统的实现能具有较大的参考价值。

关键字: OFDM; 嵌入式系统; DSP

Abstract

Orthogonal Frequency Division Multiplexing is a special technology of multicarrier transmission, in which the channel is splitted into several orthogonal channels at different frequencies. The data stream is modulated over a number of sub-carriers and transmitted parallel. The benefits of OFDM are high spectral efficiency, low crosstalk between subcarriers and robustness against frequency selective fading. It has an advantage over the underwater acoustic channel, which is time-varying, frequency-dependent with a serious multi-path interference.

With the development of computer and multimedia communication technology, embedded system is further applied in various fields. Advanced RISC Machine (ARM) is the industry's leading provider of 32-bit embedded RISC microprocessors. Because of their high performance and power saving feature, ARM CPUs are widely used in a number of embedded designs, such as industrial control, wireless communication and consumer electronics. As the increase of the system complexity, embedded operating system has become an indispensable part of the embedded system. Apart from the fact that it's freely distributed, embedded Linux is increasingly being used owing to its functionality, adaptability and robustness.

Digital Signal Processor(DSP) is a microprocessor designed specifically for digital signal processing work. It has a powerful capability in real-time computing, but limited addressing range and weaker IO function. A dual-processor system combing ARM with DSP can make full use of their advantages.

The paper researches an underwater acoustic image transmission system based on OFDM technology, and implements it with ARM+DSP hardware platform. The main research contents include: basic principle of OFDM system, bottom hardware driver of ARM and DSP, Linux OS transplant, design of human-computer interface with MiniGUI and related program for its wider application. Besides, OFDM modulation and demodulation are implemented by using TMS320VC5502. This paper has reference value for the further realization of underwater image transmission system.

Key Words: OFDM; Embedded System; DSP

目 录

第一章 引言	1
1.1 水下图像传输的意义	1
1.2 OFDM 概述	1
1.2.1 OFDM 的发展历史	1
1.2.2 OFDM 系统的基本原理	2
1.2.3 OFDM 系统的实现	4
1.3 本文的研究目标及主要研究内容	5
第二章 系统简介	7
2.1 嵌入式系统概述	7
2.1.1 嵌入式系统硬件	7
2.1.2 嵌入式系统软件	9
2.2 系统的功能	11
2.3 系统的结构组成	12
2.3.1 系统的硬件结构组成	12
2.3.2 系统的软件结构组成	12
第三章 ARM+DSP 硬件平台	14
3.1 ARM 模块单元	14
3.1.1 ARM 处理器 S3C2410	14
3.1.2 存储器电路	15
3.1.3 外围电路	16
3.2 DSP 模块单元	17
3.2.1 DSP 处理器 TMS320VC5502	17
3.2.2 存储器电路	18
3.2.3 电源和时钟	19
3.2.4 定时器和中断管理	20
3.2.5 ADC/DAC 及信号调理电路	20
第四章 嵌入式 Linux 系统的构建	22
4.1 嵌入式 Linux 系统组件	22
4.2 系统构建过程	22
4.2.1 交叉编译环境的建立	22
4.2.2 Linux 内核移植	23
4.2.3 设备驱动程序移植	24
4.2.4 根文件系统的构建	25
4.2.5 bootloader	25
4.3 图形用户界面	26
4.3.1 MiniGUI 简介	26
4.3.2 MiniGUI 的移植	27
4.3.3 输入引擎的配置	29

第五章 图像传输系统的软件设计	31
5.1 ARM 和 DSP 间的通信实现	31
5.1.1 串行通信.....	31
5.1.2 Linux 下的串口操作.....	31
5.1.3 DSP 串口模块设计.....	34
5.1.4 通信协议的设计.....	35
5.2 MiniGUI 下的应用程序设计	36
5.2.1 MiniGUI 的窗口和消息.....	36
5.2.2 用户界面设计.....	37
5.3 图像格式与文件读写	42
5.3.1 BMP 图像格式.....	42
5.3.2 图像文件读写.....	43
第六章 OFDM 系统的 DSP 实现	45
6.1 概述	45
6.1.1 仿真调试环境的建立.....	45
6.1.2 DSP 软件总体结构.....	45
6.2 快速傅立叶变换 (FFT) 的实现	46
6.2.1 FFT 算法原理.....	46
6.2.2 定点 FFT 中的有限字长效应.....	48
6.2.3 编程实现.....	49
6.2.4 仿真结果验证.....	50
6.3 OFDM 基带实现	52
6.3.1 交织.....	52
6.3.2 DQPSK 编码、映射.....	52
6.3.3 IFFT/FFT 及预处理.....	54
6.3.4 循环前缀.....	56
6.3.5 DQPSK 反映射、解码.....	56
6.4 同步方法	57
6.5 DSP 脱机实现	59
第七章 OFDM 水声图像传输系统实验结果	60
7.1 理想信道下的实验	60
7.1.1 实验结果.....	60
7.1.2 实验结果分析.....	62
7.2 水声信道下的实验	62
7.2.1 实验结果.....	62
7.2.2 实验结果分析.....	65
第八章 总结和展望	66
[参考文献]	67
致 谢.....	69

Contents

Chapter 1: Forward	1
1.1 Significance of Underwater Image Transmission	1
1.2 OFDM Introduction	1
1.2.1 Development History	1
1.2.2 Basic Principle	2
1.2.3 Implementation	4
1.3 Target and Contens of the Research	5
Chapter 2: System Overview	7
2.1 Introduction of Embedded System	7
2.1.1 Hardware	7
2.1.2 Software	9
2.2 System Function	11
2.3 System Architecture	12
2.3.1 Hardware Structure	12
2.3.2 Software Structure	12
Chapter 3: ARM+DSP Hardware Platform	14
3.1 ARM Module	14
3.1.1 ARM Processor S3C2410	14
3.1.2 Memory Circuit.....	15
3.1.3 Peripheral Circuit.....	16
3.2 DSP Module	17
3.2.1 DSP TMS320VC5502.....	17
3.2.2 Memory Circuit.....	18
3.2.3 Power and Clock.....	19
3.2.4 Timer and Interrupts.....	20
3.2.5 ADC/DAC and Signal Conditioning.....	20
Chapter 4: Building Embedded Linux System	22
4.1 Components of Embedded Linux System	22
4.2 Implementation Methodology	22
4.2.1 Cross-Platform Development Environment.....	22
4.2.2 Porting Linux Kernel	23
4.2.3 Device Driver Preparation	24
4.2.4 Root Filesystem Setup	25
4.2.5 Bootloader.....	25
4.3 Graphic User Interface	26
4.3.1 Brief Introduction to MiniGUI.....	26
4.3.2 Porting MiniGUI.....	27
4.3.3 Configuring Input Engine	29

Chapter 5: Software Design of Image Transmission System.....	31
5.1 Communication between ARM and DSP.....	31
5.1.1 Serial Communication	31
5.1.2 Accesing Serial Ports under Linux.....	31
5.1.3 DSP Serial interface	34
5.1.4 Communication protocol	35
5.2 Application Design in MiniGUI.....	36
5.2.1 Window and Message Mechanism.....	36
5.2.2 GUI Design	37
5.3 Image Format and File	42
5.3.1 BMP Format.....	42
5.3.2 Image File Accessing	43
Chapter 6: DSP Implementation of OFDM System	45
6.1 Overview	45
6.1.1 Simulation and Debugging Environment.....	45
6.1.2 DSP Software Architechure	45
6.2 Fast Fourier Transform(FFT).....	46
6.2.1 Principle of FFT Algorithm	46
6.2.2 Finite Word-length Effect	48
6.2.3 Programming Realization	49
6.2.4 Functional Verification.....	50
6.3 Baseband OFDM System	52
6.3.1 Interweave.....	52
6.3.2 DQPSK Code Mapping.....	52
6.3.3 IFFT/FFT Preprocessing.....	54
6.3.4 Cyclic Prefix	56
6.3.5 DQPSK Decode Mapping.....	56
6.4 Synchronization.....	57
6.5 DSP Self-starting	59
Chapter 7: Experiment for UWA Image Transmission.....	60
7.1 Experiment with Ideal Channel.....	60
7.1.1 Result	60
7.1.2 Analysis.....	62
7.2 Experiment with Underwater Acoustic Channel	62
7.2.1 Result	62
7.2.2 Analysis.....	65
Chapter 8: Summary and Prospect.....	66
References	67
Acknowledgement.....	69

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 引言

1.1 水下图像传输的意义

近年来，随着海洋探索和开发的不断深入，无论是在军用还是民用领域，人们对水下信息（如语音、图像）传输的需求日益迫切。

图像可传输的内容丰富，可作为水下机器人的“眼睛”、水下自动作业系统的远程监控设备，此外语音通信中难以表达的图文资料，借图像传播可收到“一目了然”的信息^[1]。

然而，水声信道是一个带宽受限的时变多径衰落信道，它存在环境噪声高、带宽窄、可使用载波频率低、传输时延大、严重的多途效应等，为了克服这些问题，我们尝试将 OFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing，正交频分复用）技术应用于恶劣的水下环境，构建水下无线多载波通信系统。一系列的理论和实验结果表明，这是一个充满着诱惑力的、具有乐观前景的研究课题。

1.2 OFDM 概述

1.2.1 OFDM 的发展历史

OFDM 是一种多载波传输技术，它的基本思想是在频域内将给定信道划分成几个相互正交的子信道，每个子信道使用一个子载波进行调制，各子载波并行传输。该技术可以有效提高频谱利用率，能够有效地对抗多径效应产生的频率选择性衰落和载波间干扰。

OFDM 最早起源于 20 世纪 50 年代中期，在 60 年代就已经形成了使用并行数据传输和频分复用的概念。1970 年 1 月，OFDM 的相关专利被首次公开发表。自 20 世纪 80 年代以来，OFDM 已经在数字音频广播（DAB）、数字视频广播（DVB）、无线本地局域网（WLAN）和非对称式数字用户线（ADSL）等技术中得到应用。

1.2.2 OFDM 系统的基本原理

传统的多载波通信采用的频分复用技术中，由于前端滤波器有限的滚降特性，为了防止信道间干扰（ICI），子频带之间要留有保护间隔，这就导致频带资源的浪费。解决的方法之一，就是允许相邻频带间存在交叠，通过保证各个子频带上信号的正交性来消除 ICI 影响。通过矩形脉冲成形技术，令子频带间隔等于每个子频带上符号周期的倒数^[2]，从而保证信号的正交性，这正是 OFDM 的基本处理方式。

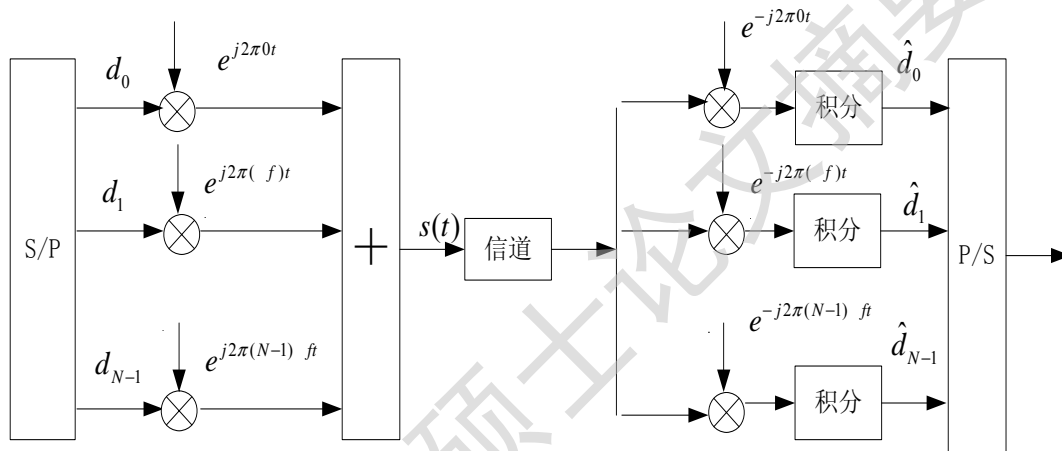


图 1-1 多载波系统的基本结构

图 1-1 是一个多载波系统的基本结构，子载波数为 N ，载波间隔为 Δf ，若 OFDM 采用矩形脉冲成形技术，则符号周期 $T = 1/\Delta f$ 。对时域信号

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{j2\pi n \Delta f t}$$

以 T/N 的速率进行抽样，则得到离散信号

$$s_k = s(kT/N) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{j\frac{2\pi nk}{N}} \quad (0 \leq k \leq N-1)$$

由上式可以发现，调制输出事实上等效于对输入信号作离散傅立叶逆变换 (IDFT)。反之，

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} s_k e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \quad (0 \leq n \leq N-1)$$

即解调输出等效于对接收信号作离散傅立叶变换 (DFT)。这个正交调制和解调的过程通常可采用傅立叶变换的快速算法 FFT 及 IFFT 来完成^[3]，易于硬件实现。

OFDM 系统可简化为图 1-2 中的模型，IFFT 变换后，生成的数据被加上了循环前缀（Cyclic prefix, CP），其作用说明如下。

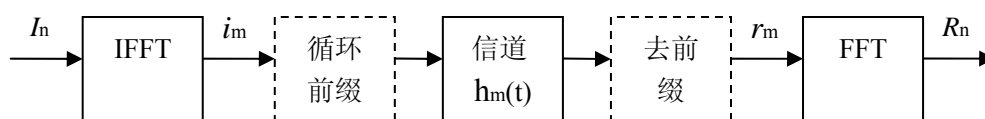


图 1-2 OFDM 简化模型

假设信道的时域响应 $h_m(t)$ 在一个 FFT 帧时间 T_f 内保持不变，将其离散化后取 L 个值，即

$$h_m(t) = h_m, \quad t_0 \leq t \leq t_0 + T_f, \quad m = 0, 1, \dots, L-1$$

若不考虑循环前缀和信道噪声，则接收信号

$$R_n = \sum_{m=0}^{N-1} r_m e^{-j2\pi mn/N}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

其中， $r_m = \sum_{k=0}^{L-1} h_k i_{m-k}$ ，故

$$R_n = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{L-1} h_k i_{m-k} e^{-j2\pi mn/N}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

从上一式子可以看出，接收信号 R_n 取决于 $m' = -(L-1), \dots, 0, \dots, (N-1)$ 时的 $i_{m'}$ 值，信道冲激响应和信号进行线性卷积的结果，导致了两个 FFT 帧之间的干扰。当加入长度至少为 $(L-1)$ 的循环前缀，这里以 $(L-1)$ 为例，

$$i_{m'} = i_{m'+N}, \quad m' = -(L-1), \dots, -1$$

对上式进行分段求和，由于 $e^{-j2\pi mn/N}$ 的周期性，可以直接利用

$$i_m = \frac{1}{N} \sum_{q=0}^{N-1} I_q e^{j2\pi mq/N}, \quad m = 0, 1, \dots, N-1$$

化简为

$$R_n = \sum_{k=0}^{L-1} h_k \sum_{q=0}^{N-1} I_q e^{-j2\pi kq/N} \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} e^{-j2\pi m(n-q)/N}$$

其中 $\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} e^{-j2\pi m(n-q)/N} = \delta(n-q)$ ，故 $R_n = I_n \sum_{k=0}^{L-1} h_k e^{-j2\pi kn/N}$

从上述推导可以看出，循环前缀不但消除了符号间干扰（ISI）的不利影响，而且保持了子载波之间的正交性。

在上述基础上，可以构建一个完整的 OFDM 通信系统，其结构如图 3 所示。二进制信息经过编码后被映射到某个复数空间，映射后对生成的复数符号进行 IDFT 变换，然后对变换后的数据插入循环前缀，经数模转换（DAC）、发送滤波、二次调制后送入信道。接收端除了进行上述处理的逆过程，还须完成同步的实现。

同步是现代数字通信系统中的一个关键技术。OFDM 系统的同步通常包括 3 个部分：定时同步、载波同步和样值同步，图 1-3 中给出了几种同步技术所处的位置。

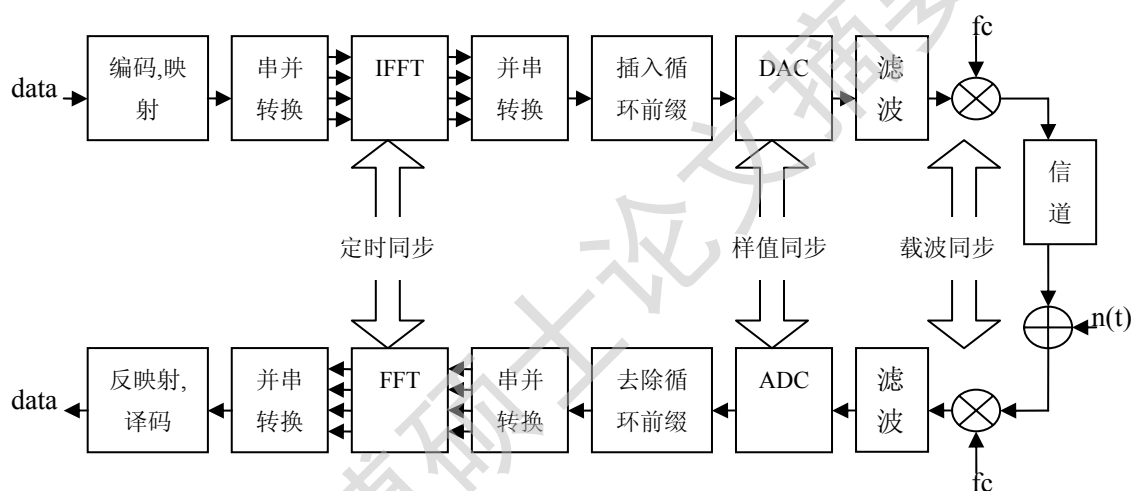


图 1-3 OFDM 通信系统结构原理图

从 OFDM 系统的实现过程可以看出，除了具有较高的频带利用率外，OFDM 的串并转换使各子载波上数据符号的时间长度增加，从而减少了符号间干扰。但它也存在一些缺点，比如易受频率偏差的影响、具有较大的峰值平均功率比等^[4]。这些问题已成为目前 OFDM 系统实现的难点所在。

1.2.3 OFDM 系统的实现

按照软件无线电的观点，上述系统的模拟部分应尽量简单，因此，数字部分的实现需要一个可配置性强的平台，以适应不同系统参数下的基带信号处理。目前，用于 OFDM 技术实现及信号处理的硬件包括专用集成电路（application specific integrated circuit, ASIC）、现场可编程门阵列（field programmable gate array, FPGA）和数字信号处理器（Digital Signal Processor, DSP）等，其中，

FPGA 允许在硬件中实现自定义算法，具有精确同步、快速决策及并行任务同时执行等优点，其处理性能十分出色，但却无法根据需要动态进行系统配置。DSP 在这个方面则弥补了其不足，因此在目前的 OFDM 通信系统中使用较为广泛。

1.3 本文的研究目标及主要研究内容

本文的目标在于构建一个可用于 OFDM 水下图像传输的小型化低功耗嵌入式系统。目前，一般的水下图像传输系统多采用数字信号处理器作为主处理器，虽然具有较快的实时处理速度，但其寻址范围小，I/O 功能较差，此外，由于考虑到实时处理性能，DSP 一般不支持虚拟存储器，无存储保护，其管理功能较弱。这对于一个完整的水下图像传输系统是远远不够的。

为了满足水下图像传输系统在“性能/功耗比”上的要求，本系统采用 ARM+DSP 双处理器构建了一个可工作于半双工模式的图像收发平台，ARM 处理器的优点恰好弥补了 DSP 的缺陷，且由于 ARM 处理器又具有体积小、功耗低的特点，因而适用于水下传输系统。

本文的主要研究内容包括：

- 1) 系统开发平台的资源分配和底层硬件的控制管理；
- 2) 主控端——ARM 处理器上操作系统的移植和用户界面的设计；
- 3) DSP 和上位机间通信机制的实现；
- 4) 图像文件的处理、显示和相关应用程序设计；
- 5) OFDM 调制解调在 DSP 上的实现。

本研究的创新之处在于：结合 ARM+DSP 双处理器各自的优势，采用开源 ARM-Linux 操作系统及 DSP 底层程序资源，构建了一个具有小型化、低功耗、快速运行特点的水下图像传输系统雏型。

各章节内容安排如下：

论文第一章概述了 OFDM 的发展历史及其在水声中的应用，并对 OFDM 的基本原理进行阐述；

第二章概述了嵌入式系统的基本组成，对本研究实现的系统功能和总体结构进行介绍；

第三章将系统分为 ARM 和 DSP 两大模块，介绍了底层硬件及系统资源的分

配情况；

第四章阐述了本系统的软件构建过程，主要包括操作系统和图形用户界面 GUI 的移植；

第五章重点介绍了 ARM 和 DSP 间通信的实现，以及与图像传输相关的应用程序设计。

第六章详细介绍了 OFDM 算法在 DSP 处理器上的实现；

第七章是图像传输实验（含水池实验）及结果；

最后一章是本次毕业设计的总结和对未来研究工作的展望。

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