

学校编码: 10384
学号: 33320141152840

分类号_____密级
UDC

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

0.5T 磁共振关节成像仪四通道接收系统设计

The Design of Four-channel Receiver in 0.5T MRI System
for Joints

郑泽寰

指导教师姓名: 郑振耀 副教授

专业名称: 电子与通信工程

论文提交日期: 2017年6月

论文答辩时间: 2017年5月

学位授予日期: 2017年6月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2017年6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

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

厦门大学博硕士学位论文摘要库

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

厦门大学博硕士学位论文摘要库

中文摘要

磁共振成像仪器以磁共振成像理论和技术为基础,是组织无损成像的重要手段。历经四个主要发展阶段,被广泛应用于科学、医疗等多个领域,关乎国计民生。中国是世界上最重要的磁共振成像仪市场之一,但研发实力仍落后于先进水平。为了改变这一现状,国家加大了对成像仪的研发投入力度。

本论文重点着眼于研制“0.5T 磁共振关节成像仪”的关键部件之一:四通道数字接收机。接收机吸收软件定义无线电架构,采用数字直接下变频接收方案,便于仪器小型化、数字化。其主体由时钟模块、AD6620 子系统、DSP(Digital Signal Processor)子系统和 FPGA(Field-Programmable Gate Array)子系统构成,各子系统间通过各类串行接口交互。综合运用了带通信号采样、数字正交检波、积分梳状滤波等数字信号处理技术。

时钟模块采用可编程时钟芯片加时钟扇出芯片的结构,印制线路板符合电磁兼容性原则。由唯一的有源晶振源输入,可输出多路同相位、不同电平标准的单端时钟和差分时钟。

AD6620 子系统由四个通道组成,主要对自由感应衰减信号进行数字正交检波和多倍率抽取。设计寄存器各项参数,编写读写配置程序,使子系统工作于单通道实数输入、串行输出模式,得到较低速率的同相和正交数字基带信号。

DSP 子系统主要对数字基带信号做第二级抽取滤波,先用 MATLAB 仿真积分梳状滤波器以及补偿滤波器,再设计 DSP 程序实现,最后验证频率响应特性。该子系统分时接收和处理来自四个通道的 AD6620 子系统数据,得到更低速率的同相和正交数字基带信号。

FPGA 子系统的硬件逻辑电路与可编程片上系统相互配合,实现控制系统、配置芯片、接收来自 DSP 的数据等。多通道接收电路使四通道数据被分区存放于存储区,最后上传至上位机。

关键词: 磁共振成像; 数字接收机; 直接下变频

厦门大学博硕士学位论文摘要库

ABSTRACT

MRI (Magnetic Resonance Imaging) instrument, which is based on magnetic resonance imaging theorems and technologies, is significant at tissue lossless imaging field. After four main development phases, it is now widely used in scientific research and medical treatment, beneficial to country's bloom and people's livelihood. Although China is the most important market of MRI instrument, the referenced R&D ability in China still lags behind advanced international level. For the sake of changing this circumstance, China steps up efforts to it.

The four-channel digital receiver, which this dissertation pays attention to, is a key component of the "0.5T MRI system for joints". It is constructed with the SDR (Software Defined Radio) framework, convenient for miniaturization and digitalization. The main body consists of a clock module, an AD6620 subsystem, a DSP (Digital Signal Processor) subsystem and a FPGA (Field-Programmable Gate Array) subsystem. These subsystems above are connected with each other by several serial ports. Some digital signal processing techniques, such as pass-band sampling, digital quadrature detection and CIC (Cascaded Integrator-Comb) filter, are adopted.

The clock module is built of a clock-programmable chip and two clock fanout buffers and the related Printed Circuit Board (PCB) is designed to conform to Electromagnetic Compatibility (EMC). It is drove by a unique oscillator, outputting multi-path single and differential clocks with the same phase but different levels.

The AD6620 subsystem, which is majorly used to detect the Free Induction Decay (FID) signals by digital quadrature detection and then to decimate the obtained digital base-band signals, is made up of four channels. The main work is to decide registers values and code configuration software, making this subsystem run in single channel real and serial output modes and then generateing low rate in-phase and quadrature digital signals.

The DSP subsystem is mainly utilized as a second decimator to further decrease the rate of signals from AD6620. A comprehensive design needs the following steps: simulating CIC filters and compensation filters with MATLAB, coding referenced DSP programs and validating the result of the frequency-response characteristic. This subsystem receipts and processes data from diversity AD6620s by Time Division Multiplexing (TDM), obtaning lower rate in-phase and quadrature digital signals than

before.

Benefiting from the harmonic working of hardware logics and the SOPC (System on a Programmable Chip), the FPGA subsystem is employed to control the whole system, configure chips, receive data from DSP and so on. A multi-channel selector is used to separate data from different channels and store them into corresponding partitions. These data are ultimately uploaded to an upper monitor.

Keywords: Magnetic Resonance Imaging; Digital Receiver; Direct Down Converter

目 录

中文摘要	I
ABSTRACT	III
第一章 绪论	1
1.1 课题背景	1
1.2 磁共振成像基本原理	2
1.3 磁共振成像系统结构	3
1.4 论文结构	5
第二章 数字接收系统原理及方案设计	7
2.1 数字接收机理论基础	7
2.1.1 带通信号采样定理	7
2.1.2 正交检波原理	8
2.1.3 多速率信号处理和 CIC 滤波器原理	10
2.2 数字接收机方案设计	14
2.2.1 数字直接下变频接收方案	14
2.2.2 四通道数字接收系统整体设计	14
第三章 时钟模块的设计	17
3.1 时钟模块的方案设计	17
3.1.1 时钟模块的需求分析	17
3.1.2 时钟模块的芯片选型	18
3.2 时钟模块的硬件设计	22
3.2.1 时钟模块的原理图设计	22
3.2.2 时钟模块的 PCB 设计	25
3.3 5V9885 的参数配置	28
第四章 数字接收系统各子系统设计	33

4.1 AD6620 子系统的软件设计	33
4.1.1 AD6620 的工作原理	33
4.1.2 AD6620 的寄存器配置过程	36
4.1.3 AD6620 的寄存器参数设计	40
4.1.4 AD6620 的配置程序设计	41
4.2 DSP 子系统的软件设计	46
4.2.1 DSP 的芯片选型	46
4.2.2 多速率数字信号处理的 MATLAB 设计	48
4.2.3 多速率数字信号处理的 DSP 软件设计	50
4.3 FPGA 子系统的软件设计	55
4.3.1 FPGA 的芯片选型	55
4.3.2 SOPC 的介绍及使用	56
4.3.3 SOPC 控制功能的实现	57
4.3.4 FPGA 子系统的硬件设计	58
4.4 子系统间通讯的实现	60
4.4.1 AD6620 子系统与 DSP 子系统间通讯的实现	60
4.4.2 DSP 子系统与 FPGA 子系统间通讯的实现	68
4.5 接收系统整体测试	79
第五章 总结和展望	81
5.1 总结	81
5.2 展望	82
[参考文献]	85
攻读硕士期间科研成果	89
致谢	91

CONTENTS

Chinese Abstract	I
English Abstract.....	III
Chapter 1 Preface.....	1
1.1 Research background	1
1.2 Basic principle of MRI.....	2
1.3 Structure of MRI instrument.....	3
1.4 Structure of the thesis	5
Chapter 2 Digital receiver and scheme design	7
2.1 Basic principle of digital receiver	7
2.1.1 Band-pass sampling theorem	7
2.1.2 Principle of quadrature detection	8
2.1.3 Principles of Multi-rate signal processing and CIC filter	10
2.2 Scheme design of digital receiver.....	14
2.2.1 Scheme of digital direct down converter	14
2.2.2 Integration design of 4-channel digital receiver	14
Chapter 3 Clock module design.....	17
3.1 Scheme design of clock module.....	17
3.1.1 Requirement analysis of clock module	17
3.1.2 Chip selection of clock module.....	18
3.2 Hardware design of clock module	21
3.2.1 Schematic design of clock module	22
3.2.2 PCB design of clock module.....	25
3.3 Configuration of 5V9885's parameters.....	28
Chapter 4 Design of digital receiver Subsystems.....	33
4.1 Software design of AD6620 subsystem.....	33
4.1.1 Principle of AD6620	33

4.1.2 Configuration of AD6620's registers	36
4.1.3 Parameters design of AD6620	40
4.1.4 Configuration software design of AD6620	41
4.2 Software design of DSP subsystem	46
4.2.1 Chip selection of DSP	46
4.2.2 MATLAB design of multi-rate digital processing	48
4.2.3 DSP software design of multi-rate digital processing	50
4.3 Software design of FPGA subsystem	55
4.3.1 Chip selection of FPGA	55
4.3.2 SOPC introduction and application	56
4.3.3 Realization of SOPC's control function	57
4.3.4 Hardware design of FPGA subsystem	58
4.4 Realization of communications between subsystems	60
4.4.1 Communication between AD6620 and DSP	60
4.4.2 Communication between DSP and FPGA	68
4.5 Integration testing of digital receiver	79
Chapter 5 Summary and prospect	81
5.1 Summary	81
5.2 Prospect	82
References	85
Scientific achievement in master period	89
Acknowledgements	91

第一章 绪论

1.1 课题背景

核磁共振 (Nuclear Magnetic Resonance, NMR) 是一种原子核中的质子在无线电波的作用下产生的物理现象^[1], 在 1946 年分别由美国哈佛大学的珀赛尔 (E. M. Purcell) 和斯坦福大学的布洛赫 (F. Bloch) 独立发现^{[2][3]}。二人分别独立地观测了质子绕磁场做自旋进动的微观现象, 分别推导出了基于经典力学理论的经典模型和基于量子力学理论的量子模型。

20 世纪 70 年代, Paul C. Lauterbur 和 Peter Mansfield 发明并改进了在静态磁场中添加梯度磁场进行空间编码的方法。1975 年 Ernst 提出多维 NMR 谱方法, 从此核磁共振技术分离出了核磁共振波谱仪和磁共振成像 (Magnetic Resonance Imaging, MRI) 两个应用方向^[4]。

MRI 技术具有实时无损成像和高时空分辨率两大优势, 因而被广泛应用于包括自然科学和医疗诊断在内的多个领域之中。在经历了萌芽起步期 (1961 年~1982 年)、波动发展期 (1983 年~1993 年)、快速增长期 (1994 年~2008 年) 以及平稳发展期 (2009 年至今) 四个阶段后^[6], MRI 设备已成为当今应用最为成功的医学诊断器械之一^[7]。目前, MRI 设备从磁体种类上可分为超导磁体和永磁两大类, 其中超导磁体大多被应用于高场 (一般在 1.5~3T) MRI 设备上, 而永磁体则多数应用于低场 (一般在 0.2~0.5T) MRI 仪器^{[4][5]}。在国际上, 美国等国家将重点放在高场乃至超高场 (大于 3T) MRI 设备的研制; 而中国在早期将重点放在研发永磁型低场设备上, 近些年来则开始加大对超导成像技术的科研投入。

目前, 中国是世界上最重要的 MRI 仪器市场之一, 然而中国的人均拥有 MRI 仪器数量低于国际水平, 中国医用 MRI 技术专利申请量与世界领先水平仍存在一定差距^[8]。研发出拥有自主知识产权的 MRI 仪器是改善民生、提高医疗水平和增强综合国力的重要一环。“十三五”规划 (2016 年~2020 年) 当中提出, 高端装备创新发展工程当前重点之一是重点研制核医学影像设备、超导磁共振成像

系统^[9]，足以体现出国家对于 MRI 研制工作的重视。

本文立足于苏州医工所与厦门大学合作项目“0.5T 磁共振关节成像系统的研制”，针对关节成像仪四通道接收系统进行探究，主要完成对接收系统中的时钟模块和接收系统的软硬件设计，以实现与完善磁共振信号的接收和处理工作。

1.2 磁共振成像基本原理

磁共振成像基于的是核磁共振这一基本物理现象。所谓核磁共振是处于静磁场中的原子核受到与之进动频率相同的电磁波激发而产生能级跃迁，在电磁波撤除后返回低能级并发射电磁波的现象^[10]。对核磁共振现象的解释存在分别由经典力学和量子力学两种理论建立起来的两种模型^[11]，两者具有互补性。

原子核具有固有的自旋特性。在自旋作用下，原子核产生一个磁矩。当处于一个静磁场 B_0 时，其围绕 B_0 旋转进动，其频率为：

$$\omega_0 = \gamma B_0 \quad (1.1)$$

其中，其中 γ 为原子核的旋磁比， ω_0 被称为拉莫频率或进动角频率。当原子核处于稳定状态时，沿着垂直于 B_0 的方向施加一个射频场，选定其频率等于 ω_0 。由于原子核吸收了射频场提供的能量，进而引发能级跃迁。

射频场撤销后，高能态原子核逐步回到基态，并感生出一个射频波。该射频波被称为自由感应衰减（Free Induction Decay, FID）。这便是所谓的弛豫（Relaxation）现象，分为纵向弛豫和横向弛豫，分别用 T_1 和 T_2 两个常数表征^[12]。

由于不同物质的 T_1 和 T_2 存在差异，并且表现 FID 信号包络上，因此通过分析 FID 包络便能分析出物质组分和结构。MRI 便是建立在核磁共振原理上的一套理论和技术。

^1H 核常被作为首选检测的 MRI 信号源^[13]。MRI 成像主要是根据被检测物体内部各体素中 ^1H 的 FID 信号强度从而重建灰度图，这里的 FID 信号强度是由 T_1 、 T_2 以及质子密度 ρ 加权而得。通常操作人员可以通过设计不同的脉冲序列以达到调

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