

学校编码: 10384

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_

学 号: 19820111152844

UDC \_\_\_\_\_

# 厦 门 大 学

## 硕 士 学 位 论 文

### 小型化核磁共振仪器的初步研究

### Preliminary Study on Miniature NMR Instrument

刘 敏

指导教师姓名: 陈 忠 教 授

专 业 名 称: 电子与通信工程

论文提交日期: 2014 年 04 月

论文答辩时间: 2014 年 05 月

学位授予日期: 2014 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

批 阅 人: \_\_\_\_\_

2014 年 05 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( 陈忠教授 )课题组的研究成果,获得( 陈忠教授 )课题组经费的资助,在( 厦门大学核磁共振 )实验室完成。

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

作者姓名：刘敏

论文题目：小型化核磁共振仪器的初步研究

作者简介：刘敏，男，1987年12月出生，2011年9月师从厦门大学陈忠教授，  
于2014年 月获得硕士学位

## 摘 要

随着数字化仪器和计算机技术的引入和应用以及电子技术的持续发展，现代核磁共振（Nuclear Magnetic Resonance, NMR）仪器向着性能更强劲、功能更多样的小型化仪器方向发展。然而，实现核磁共振仪器在性能、功能和小型化之间的良好契合，不仅是工程上的具体问题，而且是仪器技术的研究热点。本研究的目的是为发展功能完备的小型化核磁共振仪器探索道路。

本文主要研究了小型化核磁共振仪器的相关技术和方法，探讨了它们的特点和具体应用条件。在此基础上，本文还开展了“0.5T 磁共振关节成像仪”的部分硬件设计工作。

首先，通过对数字发射机有关技术的研究，总结了主要技术特点和适用性，探讨了有关技术的相关性和相互转换的可能性。在此基础上，本文提出了以AD9857为核心的正交直接上变频数字发射机方案用于构建小型化 NMR 仪器。该方案不仅可以应用于“0.5T 磁共振关节成像仪”数字发射机，而且在增加混频滤波环节后可以扩展为超外差式数字发射机。

其次，通过对带通采样原有定义的解析，揭示了避免频谱混叠对于信号还原的重要性。在此基础上，以不同角度研究了带通采样的有关理论，推导并验证了具有实际操作性的带通采样采样率选择依据。同时，鉴于带通采样具有变频特性，本文还研究了利用带通采样和数字低通滤波直接解调出基带信号的可行性，并给出了采样率具体选择依据。

最后，通过对数字接收机技术的研究，明确了适用于小型 NMR 仪器数字接收机的技术和方法，分析了数字抽取和插值处理对数字信号速率的影响。在实际

要求和具体分析的基础上,通过相关功能单元的详细设计完成了适用于“0.5T 磁共振关节成像仪”直接采样数字正交接收机的硬件设计工作。

**关键词:** 数字化发射机; 带通采样; 数字化接收机

厦门大学博硕士论文摘要库

# **Preliminary study on miniature NMR instrument**

Liu Min

## **Abstract**

With the introduction and application of digital instrument technology and computer technology and the continuous progress of electronic technology, modern nuclear magnetic resonance (NMR) instruments tends to develop the miniature NMR instrument with better system performance and more functions. However, the perfect balance of miniaturization with performance and functions is not only specific issues in engineering, but also the hot topics of instruments technologies. The purpose of this study is to explore the paths of developing miniature NMR instruments with fully functions.

This dissertation mainly studies the relevant technologies and methodologies on miniature NMR instrument, further explores their characteristics and concrete applying conditions. Then, some hardware design works are carried out for "0.5 T MRI system for joints".

Firstly, it includes two works that the studies on the related techniques of digital transmitters. One work is the summary about the characteristics of these technologies and their applicability. The other is the discussion on the correlations of different technologies and the possibility of transformation between them. Based on the studies, a design scheme of quadrature direct up-conversion transmitter based on AD9857 is proposed for the miniature NMR instrument. This scheme not only can be applied to the design of digital transmitter in "0.5 T MRI system for joints" project, but also can be extended to a superheterodyne digital transmitter with adding mixing and filter.

Secondly, an analysis on the original definition of band-pass sampling reveals the importance of avoiding overlapping spectrum for signal recovery. Based on the

conclusion, a new study has been done on the band-pass sampling in different perspectives. And the practical expression of sampling rate was deduced and validated in band-pass sampling. Furthermore, in view of specialty of frequency transformation in band-pass sampling, an assumption has also been demonstrated and validated that baseband signal can be demodulated by band-pass sampling and digital low-pass filter directly.

Finally, some conclusions are reached by studying about the technologies of digital receiver. Some technologies and methods are chosen, which apply to digital receiver for miniature NMR instrument. And the effects are made clear on decimate and interpolation. Moreover, in order to meet actual requirements, various functional units were designed in detail. Then, a hardware design has been finished, which was a direct sampling digital quadrature receiver in "0.5 T MRI system for joints".

**Key Words:** digital transmitter; band-pass sampling; digital receiver

# 目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
<b>第一章 绪 论 .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 核磁共振原理 .....</b>	<b>1</b>
1.1.1 核磁共振波谱分析的基础.....	2
1.1.2 磁共振成像的理论基础.....	3
<b>1.2 核磁共振仪器的结构 .....</b>	<b>6</b>
1.2.1 核磁共振仪器的基本构成.....	6
1.2.2 NMR 波谱仪和 MRI 成像仪的不同 .....	9
<b>1.3 论文结构 .....</b>	<b>10</b>
<b>第二章 数字化发射机理论及方案设计 .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 发射机基本类型和混频原理 .....</b>	<b>11</b>
2.1.1 发射机基本类型.....	11
2.1.2 混频原理及其特点.....	12
<b>2.2 正交调制原理及信号调制的探讨 .....</b>	<b>13</b>
2.2.1 正交调制原理.....	13
2.2.2 信号调制的理论探讨.....	15
<b>2.3 频率源合成技术 .....</b>	<b>16</b>
2.3.1 锁相环频率合成技术和直接模拟频率合成技术.....	16
2.3.2 直接数字频率合成技术.....	17
<b>2.4 数字发射机设计 .....</b>	<b>20</b>
2.4.1 AD9857 芯片介绍.....	20
2.4.2 0.5 T MRI 数字发射机设计.....	22
<b>2.5 本章小结 .....</b>	<b>23</b>
<b>第三章 带通采样理论分析及模型仿真 .....</b>	<b>25</b>



<b>3.1</b>	<b>带通采样的基本理论</b> .....	<b>25</b>
3.1.1	带通采样定理.....	25
3.1.2	带通采样定理的解析.....	26
<b>3.2</b>	<b>带通采样采样率的具体选择</b> .....	<b>27</b>
3.2.1	理论解析.....	27
3.2.2	Simulink 模型仿真.....	29
<b>3.3</b>	<b>利用数字化带通采样直接解调信号</b> .....	<b>31</b>
3.3.1	理论解析.....	31
3.3.2	Simulink 模型仿真.....	33
<b>3.4</b>	<b>带通采样的信噪比损失</b> .....	<b>35</b>
<b>3.5</b>	<b>本章小结</b> .....	<b>36</b>
<b>第四章</b>	<b>数字化接收机设计</b> .....	<b>37</b>
<b>4.1</b>	<b>数字化接收类型</b> .....	<b>37</b>
4.1.1	信号检波方法.....	37
4.1.2	信号下变频类型.....	40
<b>4.2</b>	<b>多速率数字信号处理</b> .....	<b>41</b>
4.2.1	整数倍抽取.....	42
4.2.2	整数倍插值.....	43
<b>4.3</b>	<b>直接采样数字正交接收机的硬件设计</b> .....	<b>44</b>
4.3.1	设计指标及总体设计.....	44
4.3.2	可变增益放大器设计.....	46
4.3.3	ADC 电路设计 .....	48
4.3.4	数字正交下变频及降速设计.....	51
<b>4.4</b>	<b>本章小结</b> .....	<b>54</b>
<b>第五章</b>	<b>总结与展望</b> .....	<b>55</b>
<b>5.1</b>	<b>总结</b> .....	<b>55</b>
<b>5.2</b>	<b>展望</b> .....	<b>56</b>

[参考文献] .....	57
论文和专利 .....	61
致 谢 .....	62

厦门大学博硕士学位论文摘要库

# CONTENTS

<b>Chinese Abstract .....</b>	<b>I</b>
<b>English Abstract.....</b>	<b>III</b>
<b>Chapter 1 Preface.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Basic principles of NMR.....</b>	<b>1</b>
1.1.1 Principles of NMR spectrum analysis.....	2
1.1.2 Principles of MRI.....	3
<b>1.2 Structure of NMR instruments .....</b>	<b>6</b>
1.2.1 Basic structure of NMR instruments.....	6
1.2.2 Differences bwteen NMR spectrometers and MRI Systems .....	9
<b>1.3 Structure of this dissertation .....</b>	<b>10</b>
<b>Chapter 2 Digital transmitter and its scheme design .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 Basic types of transmitter and Mixing .....</b>	<b>11</b>
2.1.1 Basic types of transmitter.....	11
2.1.2 Principles and characteristics of mixing .....	12
<b>2.2 Quadrature modulation and the discussion of modulation.....</b>	<b>13</b>
2.2.1 Principles of quadrature modulation .....	13
2.2.2 Theory discussion of signal modulation .....	15
<b>2.3 Frequency synthesizer .....</b>	<b>16</b>
2.3.1 PLL and DAS.....	16
2.3.2 DDS.....	17
<b>2.4 Design of digital transmitter .....</b>	<b>20</b>
2.4.1 Introduction of AD9857 .....	20
2.4.2 A design scheme of digital transmitter for 0.5 T MRI.....	22
<b>2.5 Conclusions.....</b>	<b>23</b>
<b>Chapter 3 Analysis of band-pass sampling and model simulation .....</b>	<b>25</b>

<b>3.1</b>	<b>Basic principles of band-pass sampling .....</b>	<b>25</b>
3.1.1	Band-pass sampling theorem .....	25
3.1.2	Analysis of band-pass sampling.....	26
<b>3.2</b>	<b>Choice of sampling rate in band-pass sampling.....</b>	<b>27</b>
3.2.1	Theoretical analysis .....	27
3.2.2	Model simulation in Simulink .....	29
<b>3.3</b>	<b>Direct demodulation signal based on band-pass sampling .....</b>	<b>31</b>
3.3.1	Theoretical analysis .....	31
3.3.2	Model simulation in simulink .....	33
<b>3.4</b>	<b>Loss of SNR in band-pass sampling .....</b>	<b>35</b>
<b>3.5</b>	<b>Conclusions.....</b>	<b>36</b>
<b>Chapter 4</b>	<b>Design of digital receiver.....</b>	<b>37</b>
<b>4.1</b>	<b>Basic types of digital receiver.....</b>	<b>37</b>
4.1.1	Demodulation methods.....	37
4.1.2	Types of down converter.....	40
<b>4.2</b>	<b>Multirate digital signal processing theory .....</b>	<b>41</b>
4.2.1	Integer times decimate .....	42
4.2.2	Integer times interpolating .....	43
<b>4.3</b>	<b>Hardware design of a digital quadrature receiver with direct sampling .....</b>	<b>44</b>
4.3.1	Design indicators and overall design .....	44
4.3.2	Design of variable gain amplifier .....	46
4.3.3	Design of analog to digital converter.....	48
4.3.4	Design of digital down converter.....	51
<b>4.4</b>	<b>Conclusions.....</b>	<b>54</b>
<b>Chapter 5</b>	<b>Summary and prospect .....</b>	<b>55</b>
<b>5.1</b>	<b>Summary.....</b>	<b>55</b>
<b>5.2</b>	<b>Prospect.....</b>	<b>56</b>

<b>References .....</b>	<b>57</b>
<b>Publications and patents .....</b>	<b>61</b>
<b>Acknowledgements .....</b>	<b>62</b>

厦门大学博硕士学位论文摘要库

# 第一章 绪 论

## 1.1 核磁共振原理

核磁共振 (Nuclear magnetic resonance, NMR) 现象是非零磁矩的原子核在外部磁场作用下, 核自旋简并能级发生塞曼分裂, 并共振吸收特定频率射频能量的物理过程<sup>[1,2]</sup>。在原子核的微观结构中, 中子不带电, 质子带正电。这使得整个原子核呈现出带电性。在核自旋运动的作用下, 这些带电的原子核就形成自身的核磁矩。该磁矩  $\mu$  与自旋角动量  $p$  成正比, 即  $\mu = \gamma p$ , 其中  $\gamma$  为对应原子核的旋磁比。根据量子力学理论, 核自旋角动量是量化的, 不可连续取值, 其具体取值以自旋量子数  $I$  进行表示<sup>[3]</sup>:

$$|p| = \hbar \sqrt{I(I+1)} \quad (1-1)$$

其中  $\hbar = h/2\pi$ ,  $h$  为普朗克常数。  $I$  会随着原子核的质子数  $Z$  和中子数  $N$  的不同而取不同的值。当质子数  $Z$  和中子数  $N$  都为偶数时, 原子核为非磁性核,  $I$  取零, 不产生自旋角动量, 无法产生 NMR 信号。除此之外, 其他的原子核均能产生 NMR 现象。当  $I = 1/2$  时, 核外电子云呈均匀的球形分布, 原子核所形成的谱线宽度较窄, 最适合应用于 NMR 谱学检测中。

当施加外部主磁场 (简称主磁场) 时, 样品中的核磁矩就会在一段时间内实现沿主磁场方向有序排列, 在宏观上形成可以侦测到的宏观磁矩。随后, 在垂直于主磁场方向、特定频率的射频脉冲激励下, 核磁矩发生翻转, 原子核从低能态跃迁到高能态, 能级发生变化<sup>[4]</sup>。当射频脉冲作用结束后, 核磁矩和外磁场之间存在一定的角度, 从而核磁矩绕主磁场方向进动。其进动角频率 (Larmor 频率) 与翻转角度无关, 是由原子核的旋磁比  $\gamma$  和主磁场的磁感应强度共同决定<sup>[3]</sup>:

$$\omega_0 = \gamma B_0 \quad (1-2)$$

其中  $\omega_0$  是 Larmor 频率又称为共振频率, (1-2) 式称为 Larmor 方程。在核磁矩的不断进动过程中, 跃迁到高能态的原子核逐步回迁到基态, 并辐射出相应的电磁波。通过电子侦测手段, 将探测到的电磁感应信号进行数据处理, 就可以有效地分析物质成分和结构等。

### 1.1.1 核磁共振波谱分析的基础

在原子结构中，除了带正电的原子核外，外围还包含着相对等数量带负电的电子。在形成分子时，由于周围环境的变化和相关作用，有的电子会偏离原有原子核，有的则会形成共用配对，使得整个电子云具有不同而独特的分布。对于抗磁性物质，这些分子内的电子在无磁场作用下，与原子核形成无磁性耦合，总自旋角动量为零。然而，当外部磁场出现时，核外电子云会被极化，产生感应环形电子流，呈现出一个逆向的感应磁矩。并且极化后的电子云会在原子核处产生一个与外部磁场相反的内部磁场，使原子核感受到的有效磁场小于外部磁场  $B_0$ 。对于液体样品，其表达式为：

$$B_{eff} = B_0 - \sigma B_0 = (1 - \sigma) B_0 \quad (1-3)$$

其中  $\sigma$  为磁屏蔽常数，它只与原子核所处的化学环境有关。在这种磁屏蔽的作用下，不同化学环境下原子核的 NMR 共振峰会在频率维度上产生不同程度的位移，形成化学位移。此时，该原子核的 NMR 频率为：

$$f = \frac{1}{2\pi} \gamma (1 - \sigma) B_0 \quad (1-4)$$

其中  $\gamma \sigma B_0 / 2\pi$  为绝对化学位移，是依据单颗原子核来计算的。然而在现实复杂的化学环境中，孤立的原子核并不会存在，因此不可能准确测量绝对化学位移。在通常情况下，NMR 实验只能测量相对化学位移，也就是同一种核自旋在不同化学环境中 NMR 共振频率的相对变化：

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \gamma (\sigma_1 - \sigma_2) B_0 \quad (1-5)$$

因此，当电子侦测系统接收信号时，自由衰减（Free induction decay, FID）信号就已经包含了与不同化学成分、化学结构相对应的化学位移信息。再将 FID 信号进行傅里叶（Fourier）变换处理，所得到的频域谱图就可以清晰地展示出研究人员所需的物质成分和结构等信息。

此外，由于 NMR 信号强度与磁性核的自然丰度成正比例关系，虽然 NMR 检测的主要对象是  $^1\text{H}$ （自然丰度：99.98%）、 $^{31}\text{P}$ （自然丰度：100%）、 $^{19}\text{F}$ （自然丰度：100%）。但是，通过多次累加的实验形式，自然丰度在 1% 以下的  $^{13}\text{C}$ 、 $^{15}\text{N}$  等磁性核也可以进行 NMR 检测。

### 1.1.2 磁共振成像的理论基础

随着 NMR 无损检测技术的日益成熟，人们也不断考虑将该无损检测技术也应用于医学成像中。直至 20 世纪 70 年代，美国的 Lauterbur 和英国的 Mansfield 提出利用梯度磁场进行空间定位的方法，使得磁共振成像（Magnetic resonance imaging, MRI）得以实现<sup>[5-10]</sup>。与 NMR 波谱实验不同，MRI 实验是以  $^1\text{H}$  为检测对象来获得物体内的  $^1\text{H}$  分布图，从而形成 MRI 图像。在空间线性梯度磁场的作用下，物体各个体素的坐标信息就可以与共振频率形成对应联系。同时，各体素的  $^1\text{H}$  NMR 信号强度也将以灰度值的形式呈现在重建后的图像中。通过质子密度  $\rho$ 、自旋—晶格弛豫时间  $T_1$  或自旋—自旋弛豫时间  $T_2$  的不同加权，使得 MRI 图像可以获得多样的信息。

依据(1-2)式可知，当  $^1\text{H}$  处于均匀的外部磁场中且不考虑化学位移等因素时，样品中  $^1\text{H}$  具有相同的 Larmor 频率，无法区分。然而，如果在主磁场的基础上（主磁场方向：Z 正向）分别施加方向为 Z 向、变化率为 X、Y、Z 三个方向向的线性梯度磁场，那么磁体内将形成关于 x、y、z 分布的磁场空间分布：

$$\mathbf{B}_z = \mathbf{B}(x, y, z) = \mathbf{B}_0 + z\mathbf{G}_z + x\mathbf{G}_x + y\mathbf{G}_y \quad (1-6)$$

其中  $\mathbf{G}_z$ 、 $\mathbf{G}_x$  和  $\mathbf{G}_y$  分别为 X、Y、Z 方向的梯度磁场，一般对应于激发层选择、频率编码和相位编码。因此，当不同位置的磁场强度发生线性变化时，各体素中  $^1\text{H}$  的共振频率也相应发生变化，从而实现了物体空间分布信息的获取。

#### 1.1.2.1 层面选择

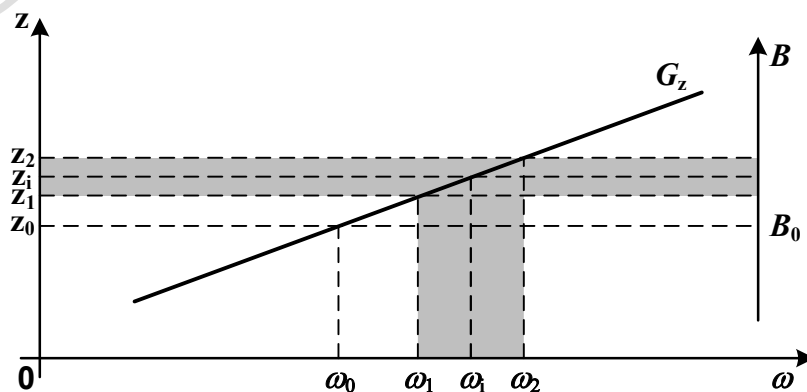


图 1.1 层面选择



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](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库