清 华 大 学

综 合 论 文 训 练

题目：基于压缩感知的频谱感知算法研究

系 别：电子工程系

专 业：电子信息科学与技术

姓 名：沈睿哲

指导教师：王军

2017年5月46日

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文的复印件，允许该论文被查阅和借阅；学校可以公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存该论文。

**(涉密的学位论文在解密后应遵守此规定)**

签 名： 导师签名： 日 期：

中文摘要

随着人类对信息量需求的增大及无线通信技术的发展，无线通信频谱的稀缺已成一迫在眉睫之问题。然而在实际应用中，据官方部门如FCC或Ofcom报导，较大部分频谱未得到应用，频谱的实际利用率极低（甚至低至10%）。

在此情况下，认知雷达技术（CR）应运而生，CR通过对频谱进行感知测量，选取空闲信道进行动态访问实现频谱的高效率利用。而在对于宽带频谱感知，无损恢复所要求的高奈奎斯特采样率一直受着ADC（Analog Digital Converter）硬件性能瓶颈般缓慢的发展深刻制衡。于是研究者便萌生将压缩感知的技术利用于频谱感知中的想法，该技术通过以低于奈奎斯特采样率对信号进行采样（通常为非线性）获得压缩观测值，再通过相应的压缩感知算法进行恢复而获取还原的信号。理论和实践均已证明，若待感知信号在某一正交基域满足稀疏性（实际应用中信号在频域满足稀疏性已是事实，即为傅里叶基上的稀疏信号，之后本文所述“稀疏信号”均指此类信号），则通过压缩感知进行信号的压缩恢复，能几近完美的恢复原信号。

本文首先对频谱感知技术进行了理论研究，之后通过matlab进行对800MHZ宽带信号的压缩感知与恢复的仿真。本文通过比较不同种类压缩采样器（亦称AIC，模信转换器）、利用三种类型的恢复算法并对调控参数（如判决阈值）等进行了仿真并且给出了良好的在亚奈奎斯特采样率下的压缩感知恢复结果。通过变动稀疏度、压缩率、信噪比作出了侦测/虚警概率变化趋势图，并且从信号类型、实际需求、复杂度和侦测性能上综合分析，给出了宽带频谱压缩感知一些一般性的结论，为实际频谱压缩感知提供了帮助。

**关键词**：宽带频谱感知；压缩感知；模信转换器（AIC）；迭代加权最小二乘法；

目 录

[第5章 总结 30](#_Toc452060134)

[插图索引 31](#_Toc452060135)

[表格索引 32](#_Toc452060136)

[参考文献 33](#_Toc452060137)

[致 谢 35](#_Toc452060138)

[声 明 36](#_Toc452060139)

[附录A 书面翻译 37](#_Toc452060140)

# 第1章 引言

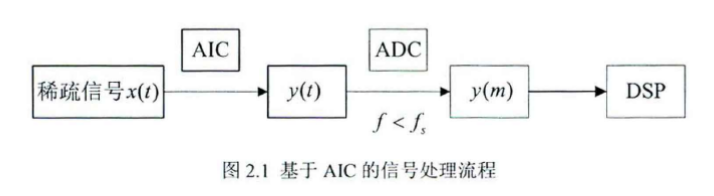
## 1.1 课题研究背景

近年来，随着无线通信的迅速发展、无线频谱资源的稀缺成为了一个紧要的问题。然而根据美国通信委员会（FCC）以及英国通信局（Ofcom）的报道，很大百分比的频谱资源没有被利用（利用率低至10%）。认知雷达（CR）技术应运而生，其通过允许次用户对当前空闲频谱进行访问利用。

在CR技术中，频谱感知技术乃第一步，其通过感测当前频谱中空洞，在不对主用户带来任何干扰干涉情况下用以给次用户访问。

在最近的研究中宽带频谱感知逐渐吸引了研究者的兴趣。一个最直接的感知方法即是通过以奈奎斯特采样率进行采样之后通过插值滤波器/DFT恢复时域/频域信号。而在频谱为宽带情形下最大的问题不在于数字信号处理等数值计算模块，而在于对极高采样率ADC的要求，根据调研，现状是数字信号处理软硬件性能的进步速度都高过ADC采样率性能瓶颈般的提高速度。

于是压缩感知的技术被利用至宽带频谱感知中，用以克服高速ADC代价昂贵的问题。压缩感知本质是通过对信号在一组正交稀疏基上进行投影获取压缩测量量，其数学描述可视作一个观测矩阵与信号矢量的相乘。在一般压缩感知问题中，问题仅仅是观测矩阵的设计（该观测矩阵虚满足正交性、约束等距条件等，通常以随机矩阵实用，会在后文中详尽分析），在矩阵确认之后直接将其与带压缩信息相乘。但在频谱压缩感知中问题并非如此易，因为我们需要在ADC采样之前完成信息的压缩，而不是违背初心：用一个高速ADC采样后再去与观测矩阵相乘——这完全没有减轻ADC的压力。于是AIC（Analog Information Converter）应时而生,其位置处于ADC之前，将信息先通过一类非线性处理之后通过低速ADC采样获得压缩观测值。



通过上图，我等可以理解。故于整个压缩采样过程最精妙之处在于设计合理且巧妙的AIC，即要利用实际可行的硬件对信号进行处理（AIC部分）再通过ADC采样，获得压缩测量量。即是说，要用可行的模拟器件（如乘法器滤波器）加埋低速ADC完成一个等效观测矩阵！

上段所述是关于压缩测量过程，目前对于AIC的设计大致可分为随机调制器和非均匀采样器等类型，关于此器的设计刚处于初级阶段，事实上亦可说对于整个频谱压缩感知实践刚处于初级阶段。就AIC设计而言，目前这需要极之巧妙的设计、高妙的数学分析手段结合可实现的物理器件的条件。本文在之后对于AIC的比较与选取有详尽研究与论述。

除去压缩测量，留低即是压缩恢复过程。关于压缩感知恢复算法已经有较为多的研究，毕竟仅系一纯数学问题。目前常见的几类恢复算法可以分为：贪婪算法，优化算法，混合算法等。其利弊优劣复杂度分析均有在后文中分析、仿真。

在恢复完信号后，我们目的是为了满足认知雷达CR的选取空闲信道的功能，便有一个信道是否空闲的判决过程，本次我们建立的模型采用能量检测法设置阈值进行判决。

## 1.2 研究现状概述

自美籍华人学者陶哲轩（亦是笔者儿时偶像）等人提出压缩感知这一概念来，压缩感知理论研究吸引学术领域关注，而对于频谱压缩感知的实际应用仅处于起步阶段。根据笔者文献调研，本章节主要叙述了几种压缩感知测量与恢复方法的研究现状。

根据上一节，我们知压缩采样部分主要在于实用AIC（Analog Information Converter）的设计，目前常用几类AIC：

1. 非均匀采样器（Nonuniform Sampling）[1]:器如其名，通过对待压缩带限信号进行非均匀采样以获取压缩采样值。其优劣均十分明显，优即实现简单：仅需要控制标准ADC的时钟，无需任何附加硬件。劣即对时钟抖动十分铭感，拥有较低信噪比。
2. 随机解调器（Random Demodulator）[2]：J.A Tropp教授代表之作之一，首次将连续信号用于压缩感知中。随机解调器通过待恢复信号与奈奎斯特频率伪随机信号相乘再按低奈奎斯特频率通过积分器后通过低速ADC采样。其精妙构造使它能完美恢复多谐波稀疏信号；一定程度性能上近似恢复任意实际频域稀疏信号。优点是性能相比于其它AIC（如非均匀采样器）有着较好的SNR性能且稳定性好，劣势在于需要额外硬件支持。目前来说，由于其综合性能与可实现性，这是用得最广泛的一类AIC。
3. 随机卷积器（Random Demodulator）[2]:与随机解调器类似，其区别在于将调制换成卷积，将积分换成滤波，由于性能等各种原因其使用不及RD广泛。
4. 基于多带系统相关等，如并行解调系统、亚线性FFTs，此等在本文中并未涉及，故不作详述。。

其中，基于压缩感知的检测器将压缩感知领域的理论和算法引入空间调制多用户上行检测器的设计，使得检测算法的复杂度进一步降低，尤其是在大规模多天线系统的场景下，能够在较低的复杂度下取得较好的检测效果。目前已有的基于压缩感知技术的检测算法主要有以下几类。

## 1.3 解决的问题及实用价值

当今时代，世界范围内无线通信业务正在持续不断地高速增长，实时的视频通话、高清视频观看、大型文件共享等业务已经走进了寻常百姓的日常生活，这对无线通信系统的要求也在不断提高，能够进行更高速率的传输，支持更多用户并且能够有更高能量效率的通信系统成为了无线通信领域的迫切需求。多入多出系统的提出，提供了一种提高通信系统速率的方法。在LTE标准中，已经加入了对于多天线的支持。

理论上，发射机与接收机配备的天线数量越多，系统的数据速率和链接稳定性将会越高。但随着天线数量的增多，必然会导致接收机算法的复杂度大大提高，并且需要更多的无线通信设备链，导致更多的能量消耗[2]。空间调制技术在多天线的场景下，通过使用较少的无线通信设备链和较少的活跃天线进行数据传输，可以提供较好的能量效率。基于压缩感知的方法，由于其重建算法的复杂度低，能够很好地适应大规模天线的场景，支持更多的用户个数，并能取得较好的检测效果。因此，将压缩感知的方法引入多用户场景下的空间调制通信系统，能够为天线数目增多、用户数量增加的多天线系统提供可行的低复杂度的可靠检测方法，满足对于通信系统速率和能量效率的要求。为未来的无线通信系统提供可行的途径。

本课题研究的内容即为基于压缩感知技术的多用户空间调制系统的上行检测器设计。目前已有一些此场景下的压缩感知检测器设计的文献，但缺少相互之间的对比。本课题研究和实现了几种基于压缩感知的检测器，并通过相互的对比找出各种方法适用的条件。在此基础之上，本课题还提出了一种基于迭代硬阈值方法（NIHT）的压缩感知检测方法，并通过对于多用户空间调制信号结构的利用，提升了算法的性能，相比于已有的基于压缩感知的检测算法具有一定的优势，尤其是在高阶调制的情况下更为显著。本课题的研究内容希望能够对未来可容纳更多用户和更多天线的无线通信系统的设计与实现提供帮助。

参考文献

[1]