

基于压缩感知的双选信道下信道估计方法的研究

作者姓名 李世明

指导教师姓名、职称 葛建华 教授

申请学位类别 工学硕士

学校代码 10701
分 类 号 TN92

学 号 1401120040
密 级 公开

西安电子科技大学

硕士学位论文

基于压缩感知的双选信道下信道估计方法的研究

作者姓名：李世明

一级学科：信息与通信工程

二级学科：通信与信息系统

学位类别：工学硕士

指导教师姓名、职称：葛建华 教授

学 院：通信工程学院

提交日期：2017年4月

Thesis/Dissertation Guide for Postgraduates of XIDIAN UNIVERSITY

A Thesis submitted to
XIDIAN UNIVERSITY
in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Master
in Communication and Information Systems

By
Li Shiming
Supervisor: Ge Jianhua Professor
April 2017

西安电子科技大学 学位论文独创性（或创新性）声明

秉承学校严谨的学风和优良的科学道德，本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果；也不包含为获得西安电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文若有不实之处，本人承担一切法律责任。

本人签名：_____ 日 期：_____

西安电子科技大学 关于论文使用授权的说明

本人完全了解西安电子科技大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属于西安电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅、借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。同时本人保证，获得学位后结合学位论文研究成果撰写的文章，署名单位为西安电子科技大学。

保密的学位论文在_____年解密后适用本授权书。

本人签名：_____ 导师签名：_____

日 期：_____ 日 期：_____

摘要

摘要是学位论文的内容不加注释和评论的简短陈述，简明扼要陈述学位论文的研究目的、内容、方法、成果和结论，重点突出学位论文的创造性成果和观点。摘要包括中文摘要和英文摘要，硕士学位论文中文摘要字数一般为 1000 字左右，博士学位论文中文摘要字数一般为 1500 字左右。英文摘要内容与中文摘要内容保持一致，翻译力求简明精准。摘要的正文下方需注明论文的关键词，关键词一般为 3 ~ 8 个，关键词和关键词之间用逗号并空一格。

中文摘要格式要求为：宋体小四、两端对齐、首行缩进 2 字符，行距为固定值 20 磅，段落间距为段前 0 磅，段后 0 磅。

英文摘要格式要求为：Times New Roman、小四、两端对齐、首行不缩进，行距为固定值 20 磅，段落间距为段前 0 磅，段后 0 磅，段与段之间空一行。

关键词：XXX, XXX, XXX, XXX, XXX

ABSTRACT

The Abstract is a brief description of a thesis or dissertation without notes or comments. It represents concisely the research purpose, content, method, result and conclusion of the thesis or dissertation with emphasis on its innovative findings and perspectives. The Abstract Part consists of both the Chinese abstract and the English abstract. The Chinese abstract should have the length of approximately 1000 Chinese characters for a master thesis and 1500 for a Ph.D. dissertation. The English abstract should be consistent with the Chinese one in content. The keywords of a thesis or dissertation should be listed below the main body of the abstract, separated by commas and a space. The number of the keywords is typically 3 to 5.

The format of the Chinese Abstract is what follows: Song Ti, Small 4, justified, 2 characters indented in the first line, line spacing at a fixed value of 20 pounds, and paragraph spacing section at 0 pound.

The format of the English Abstract is what follows: Times New Roman, Small 4, justified, not indented in the first line, line spacing at a fixed value of 20 pounds, and paragraph spacing section at 0 pound with a blank line between paragraphs.

Keywords: XXX, XXX, XXX, XXX, XXX

插图索引

2.1 多径效应	3
2.2 不同 τ 与 h 对 $ R(f) $ 的影响	4
2.3 频率选择性	4
2.4 时间选择性信道	6
2.5 时延-多普勒域-扩展函数	7
2.6 时频域传递函数	7
2.7 时变脉冲响应	8
2.8 OFDM系统框图	9
2.9 循环前缀示意图	9
2.10 多载波系统框图	10
3.1 p 范数与稀疏性的关系	12
3.2 稀疏向量的压缩感知原理示意图	13
3.3 可稀疏表示向量的压缩感知原理示意图	13
3.4 时频域传递函数	14
4.1 插图示例	15

表格索引

4.1 表格示例	16
----------------	----

符号对照表

符号	符号名称
XXX	XXX
XXX	XXX
XXX	XXX
...	

缩略语对照表

缩略语	英文全称	中文对照
XXX	XXX	XXX
XXX	XXX	XXX
XXX	XXX	XXX
...		

目录

摘要	I
ABSTRACT	III
插图索引	V
表格索引	VII
符号对照表	IX
缩略语对照表.....	XI
第一章 绪论	1
1.1 课题背景	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.3 本文的主要工作及内容安排.....	1
第二章 双选信道与线性时变系统	3
2.1 双选信道	3
2.1.1 频率选择性	3
2.1.2 时间选择性	4
2.1.3 双选信道.....	5
2.2 线性时变系统	5
2.2.1 时延-多普勒域-扩展函数	6
2.2.2 时频域-传递函数	7
2.2.3 时延-时变脉冲响应	8
2.3 正交频分复用系统	8
第三章 压缩感知与基于压缩感知的信道估计	11
3.1 欠定线性系统及稀疏解	11
3.1.1 欠定线性系统	11
3.1.2 正则化	11
3.1.3 稀疏解	11
3.2 压缩感知理论	12
3.3 稀疏解的唯一性.....	13
3.3.1 约束等距条件 (RIP)	13
3.3.2 矩阵相关系数	14
3.4 基于导频的信道估计	14
3.5 使用压缩感知进行双选信道信道估计	14

第四章 改善压缩感知信道估计的方法	15
4.1 过采样技术	15
4.2 改进导频设计	16
4.3 改善基	16
第五章 降低压缩感知信道估计的复杂度	17
5.1 支撑集的稀疏度	17
5.2 改进的OMP算法	17
第六章 总结与展望	21
6.1 研究总结	21
6.2 研究展望	21
致谢	23
作者简介	24

第一章 绪论

1.1 课题背景

学位论文的封面由研究生院按国家规定统一制定印刷，封面内容必须打印，不得手写。

1.2 国内外研究现状

(1) 行间距：固定值 20 磅（题名页除外）。

(2) 字符间距：标准。

(3) 页眉设置：单面页码页眉标题为章节题目，每一章节的起始页必须在单面页码，双面页码页眉标题统一为“西安电子科技大学博/硕士学位论文”，页眉标题居中排列，字体为宋体，字号为五号。页眉文字下添加双横线，双横线宽度为 0.5 磅，距正文距离为：上下各 1 磅，左右各 4 磅。

(4) 页码设置：学位论文的前置部分和主体部分分开设置页码，前置部分的页码用罗马数字标识，字体为 Times New Roman，字号为小五号；主体部分的页码用阿拉伯数字标识，字体为宋体，字号为小五号。页码统一居于页面底端中部，不加任何修饰。

(5) 页面设置：为了便于装订，要求每页纸的四周留有足够的空白边缘，其中页边距为上 3 厘米、下 2 厘米；内侧 2.5 厘米、外侧 2.5 厘米；装订线为 0.5 厘米；页眉 2 厘米，页脚 1.75 厘米。

1.3 本文的主要工作及内容安排

(1) 打印：学位论文必须用 A4 纸页面排版，双面打印；

(2) 装订：依次按照中文题名页、英文题名页、声明、摘要、插图索引、表格索引、符号对照表、缩略语对照表、目录、正文、附录（可选）、参考文献、致谢、作者简介的顺序，用学校统一印制的学位论文封面装订成册。盲审论文必须删除致谢部分的文字内容（致谢标题须保留）以及封面和研究成果中的作者和指导教师姓名，研究成果列表中应体现作者的排序，如第一作者、第一发明人等。

第二章 双选信道与线性时变系统

无线通信系统通过电磁波传输信号。电磁波在空间传播过程中，会发生衰减；在障碍物表面会发生发射、散射、绕射等现象；因为发射端、接收端、障碍物的相对移动，会产生多普勒效应；电磁波的物理特性决定了无线信道的复杂性。

2.1 双选信道

2.1.1 频率选择性

因为传播环境中存在的树木，建筑等障碍物，会对电磁波造成散射，导致在接收端接收到通过不同路径传播过来的波形，称为多径现象。不同路径的传播距离不同，到达接收机的时间有先后，因为发射端发送一个脉冲，在接收端会接收到一系列展宽的脉冲。

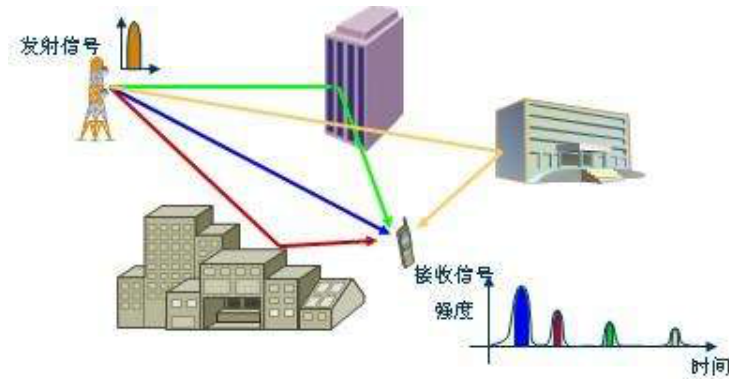


图 2.1 多径效应

假设仅存在两条传播路径，时延分别为 τ_1 和 τ_2 ，发送信号为 $s(t)$ ，则接受信号可表示为

$$r(t) = h_1 s(t - \tau_1) + h_2 s(t - \tau_2) \quad (2-1)$$

式中 $h_p = |h_p| e^{j\phi_p}$ 为路径 p 的复衰减因子。

对接收信号进行傅里叶变换 $R(f) = \int_{-\infty}^{\infty} r(t) e^{-j2\pi ft} dt$ ，则有

$$|R(f)| = |S(f)| \sqrt{|h_1|^2 + |h_2|^2 + 2|h_1||h_2|\cos(2\pi(\tau_1 - \tau_2)f - (\phi_1 - \phi_2))} \quad (2-2)$$

从上图可以看出，多径效应会造成频率选择性，即不同的频率有不同的衰减特

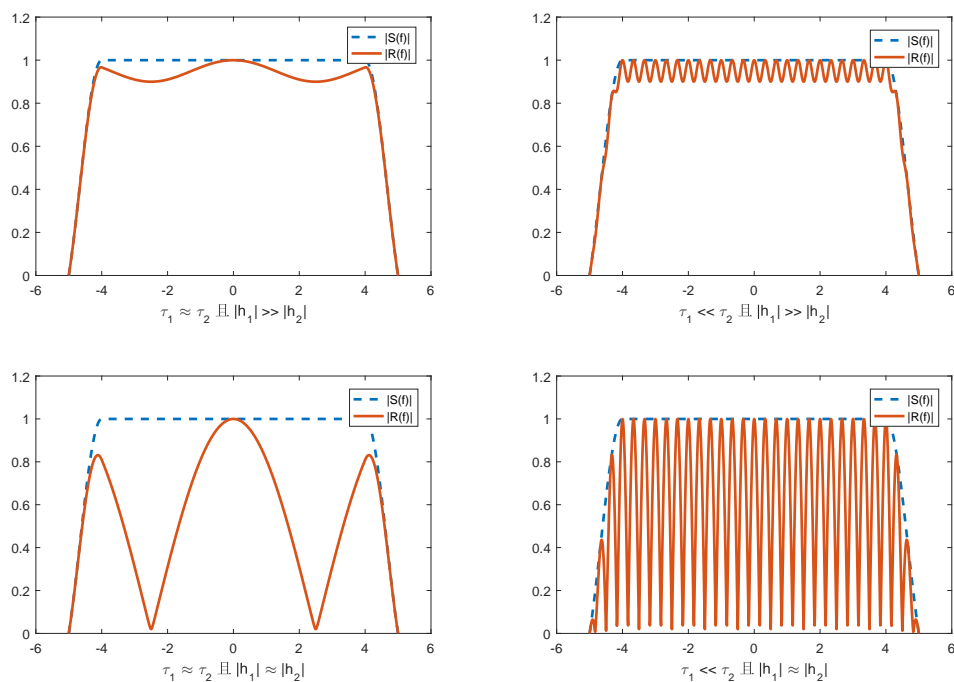


图 2.2 不同 τ 与 h 对 $|R(f)|$ 的影响

性。而且，当不同路径时延较大时且不同路径衰减相差较小时，这种频率选择性会更加明显。下图是一个频率选择性无线信道示意图

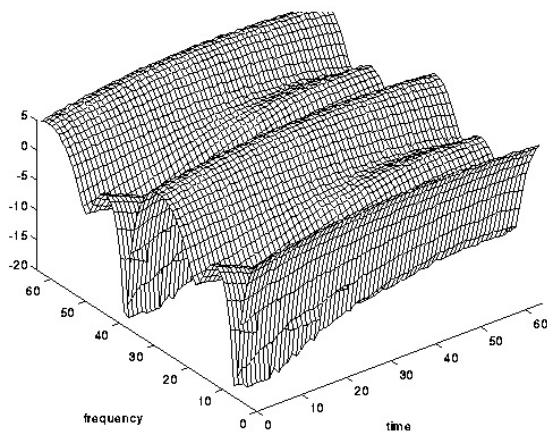


图 2.3 频率选择性

2.1.2 时间选择性

无线系统中，发射器，接受器，散射体具有相对移动时，无线信号会受到多普勒效应的影响，从而产生频率偏移。

假设无散射体存在（即无多径）的情况下，发送信号为频率为 f_c 正弦波，发射

机静止，接收机相对发射机运动，相对速度为 v ，则接收到的正弦波频率为

$$(1 - \frac{vcos(\phi)}{c + vcos(\phi)})f_c \approx (1 - \frac{vcos(\phi)}{c})f_c \quad (2-3)$$

式中， ϕ 为电磁波与接收机移动方向的夹角， c 为光速。实际中，相对移动速度 $v \ll c$ ，所以上式成立。对于一般传输信号 $s(t)$ ，和它的傅里叶变化 $S(f)$ ，则有

$$\begin{cases} r(t) = \frac{h}{\alpha} s(\frac{t}{\alpha}), & \alpha = 1 - \frac{vcos(\phi)}{c} \\ R(f) = hS(\alpha f) \end{cases} \quad (2-4)$$

所以多普勒效应导致时间/频率展缩。实际中，传输信号 $s(t)$ 被调制在频率为 f_c 的载频上，带宽为 B ，则有 $B \ll f_c$ ，因此 $\alpha f = f - \frac{vcos(\phi)}{c}f \approx f - \frac{vcos(\phi)}{c}f_c$ ，因此式(2-4)可改写为

$$\begin{cases} r(t) \approx hs(t)e^{j2\pi\nu t}, & \nu = \frac{vcos(\phi)}{c}f_c \\ R(f) \approx hS(f - \nu) \end{cases} \quad (2-5)$$

所以多普勒效应导致了频移，而且偏移量 ν 正比于速度 v 和载波频率 f_c 。

类比于多径效应，我们可以考虑两条路径具有相同的时延 τ_{00} ，但多普勒频移不同，分别为 ν_1 和 ν_2 ，则频域接收信号为

$$R(f) = [h_1S(f - \nu_1) + h_2S(f - \nu_2)]e^{-j2\pi\tau_0f} \quad (2-6)$$

时域接收信号 $r(t)$ 有

$$|r(t)| = |s(t - \tau_0)|\sqrt{|h_1|^2 + |h_2|^2 + 2|h_1||h_2|\cos(2\pi(\nu_1 - \nu_2)(t - \tau_0) + (\phi_1 - \phi_2))} \quad (2-7)$$

则将式(2-2)中 f 替换为 t ，频域换为时域，图2.2则表示多普勒频移 ν ，信道增益 h 与时域接收信号 $r(t)$ 之间的关系。

因此多普勒频移会造成信道的时间选择性。图2.1.2是一个只具有时间选择性的无线信道。

2.1.3 双选信道

在一些无线通信环境中，同时存在多径效应和相对移动，频率选择性和时间选择性会同时存在，此时无线信道具有双选特性。此时，无线信道的特性如下图所示：

2.2 线性时变系统

对于多径信道，我们可以将无线信道看做线性时不变系统。但对于时变信道，线性时不变系统模型不再适用，线性时变模型更符合实际情况。

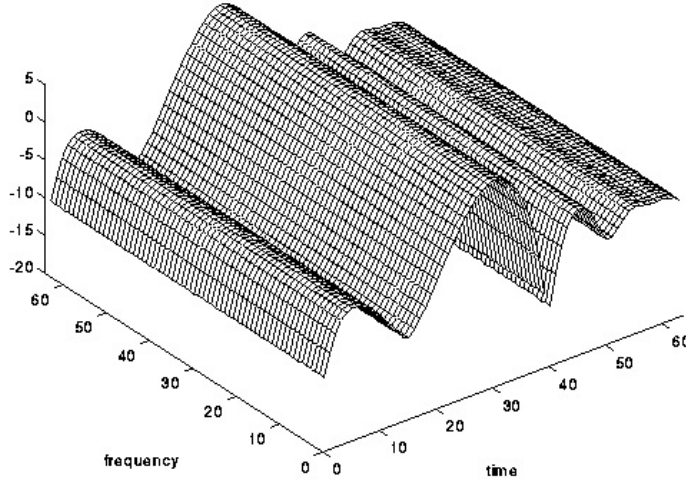


图 2.4 时间选择性信道

2.2.1 时延-多普勒域-扩展函数

假设一个LTV信道 \mathbf{H} 具有 p 条离散传播路径，则时域接收信号 $r(t)$ 为

$$r(t) = \sum_{p=1}^P h_p s(t - \tau_p) e^{j2\pi\nu_p t} \quad (2-8)$$

式中， h_p ， τ_p 和 ν_p 分别为第 p 条路径相关的复衰减系数，时延和多普勒频移。

式(2-8)表示的是理想镜面散射情况(理想点散射体)。实际中散射体都是连续的，即

$$r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_H(\tau, \nu) s(t - \tau) e^{j2\pi\nu t} d\tau d\nu \quad (2-9)$$

式中加权函数 $S_H(\tau, \nu)$ 发送信号在时间和频率的扩展，因此称为LTV信道 \mathbf{H} 的时延-多普勒域-扩展函数。

下图是一个时延-多普勒域-扩展函数示意图

则式(2-8)是式(2-9)的特殊情况，此时有

$$S_H(\tau, \nu) = \sum_{p=1}^P h_p \delta(t - \tau_p) \delta(\nu - \nu_p) \quad (2-10)$$

式(2-9)表示了输入信号 $s(t)$ 与接收信号 $r(t)$ 之间的时域关系，其对偶的频域形式为

$$R(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_H(\tau, \nu) s(f - \nu) e^{-j2\pi\tau(f-\nu)} d\tau d\nu \quad (2-11)$$

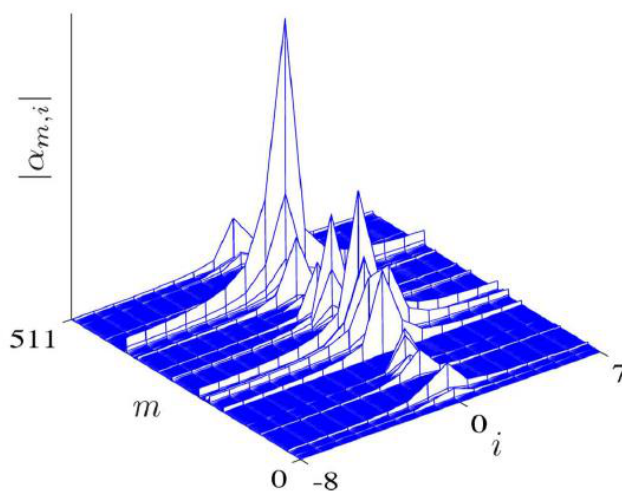


图 2.5 时延-多普勒域-扩展函数

2.2.2 时频域-传递函数

LTV信道的时频选择特性可以由联合时频域(TF)传递函数刻画

$$L_H(t, f) \stackrel{\text{def}}{=} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_H(\tau, \nu) e^{-j2\pi(f\tau - t\nu)} d\tau d\nu \quad (2-12)$$

类比于时不变系统中信道冲击响应 $h(t)$ 和信道频域传递函数 $H(f)$ 之间一维傅里叶变换关系 $H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$ ，时频域传递函数 $L_H(t, f)$ 与时延-多普勒域-扩展函数之间为二维傅里叶变换。

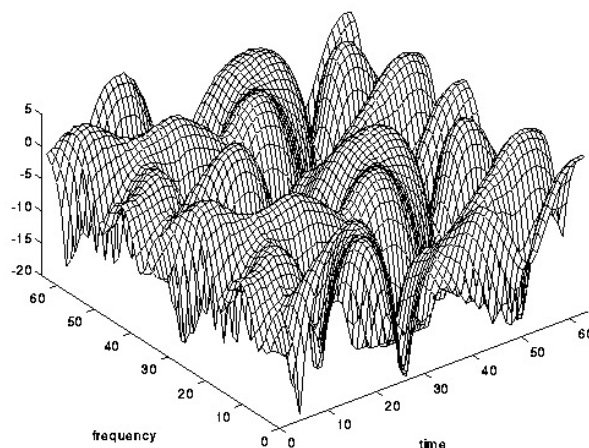


图 2.6 时频域传递函数

同样，类似于时不变系统，通过TF传递函数也可以得到信道的输入/输出关系

$$r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} L_H(t, f) S(f) e^{j2\pi f t} df \quad (2-13)$$

2.2.3 时延-时变脉冲响应

将式(2-9)改写为如下形式

$$r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} S_H(\tau, \nu) e^{j2\pi\nu t} d\nu \right] s(t - \tau) d\tau \quad (2-14)$$

式中, $h(t, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_H(\tau, \nu) e^{j2\pi\nu t} d\nu$ 称为LTV信道的时变脉冲响应。

可知式(2-8)表示的镜面反射对应的时变脉冲响应为

$$h(t, \tau) = \sum_{p=1}^P h_p \delta(\tau - \tau_p(t)) e^{j2\pi\nu_p t} \quad (2-15)$$

下图是一个双选信道时变脉冲响应的示意图

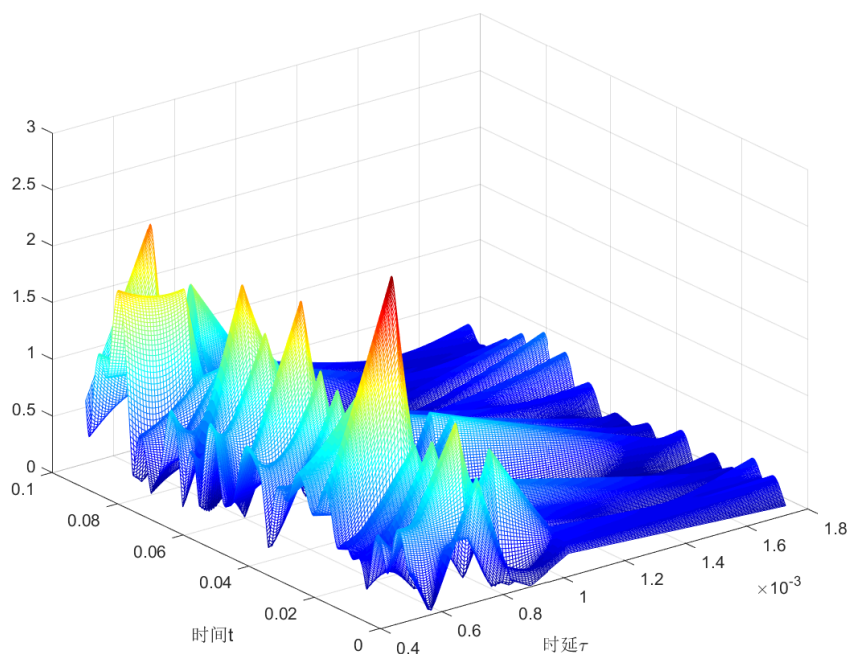


图 2.7 时变脉冲响应

总结以上, 可得LTV系统存在如下关系

$$\begin{aligned} S_H(\tau, \nu) &= \int_{-\infty}^{\infty} h(t, \tau) e^{-j2\pi\nu t} dt \\ L_H(t, f) &= \int_{-\infty}^{\infty} h(t, \tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \end{aligned} \quad (2-16)$$

2.3 正交频分复用系统

多载波的基本思想是将传输比特流分成多个比特流, 调制在不同的子载波上, 每个子载波对应的子信道带宽远远小于系统总带宽。选择子载波个数使得子信道带

宽小于信道的相干带宽，则每个子信道经历的衰落是相对平坦的。

假设多载波系统中相干带宽为 B_c ，子信道带宽为 B_N ，子载波个数为 N ，则各子载波上的叠加信号为

$$s(t) = \sum_{i=1}^N s_i g(t) \cos(2\pi f_i t + \phi_i) \quad (2-17)$$

式中, s_i 为调制符号； $g(t)$ 为脉冲成型滤波器，一般选用升余弦滚降滤波器； f_i 为第 i 个子载波对应的频率；当取 $B_N = B_c$ 时，几乎没有ISI。

正交频分复用（OFDM）在多载波的基础上，使子载波间的频谱重叠，但保持相互正交，进一步提高了频谱利用率。下图是一个OFDM通信系统框图

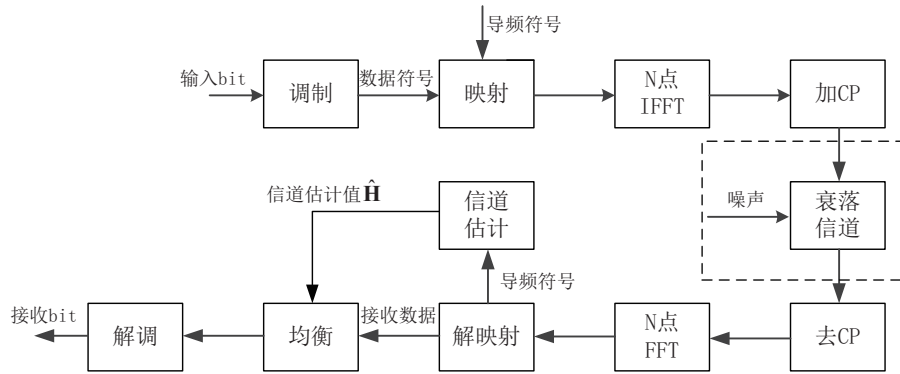


图 2.8 OFDM系统框图

OFDM数字实现一般使用IFFT，插入导频后的频域信号为 $S[k]$ ，IFFT之后的时域信号为

$$s[n] = \sum_{k=0}^{N-1} S[k] e^{j2\pi nk/N} \quad (2-18)$$

假设信道最大多径时延为 τ_{max} ，则要加入长度为 $L_{cp} > \tau_{max}$ 的保护间隔(GI)，避免符号间干扰。保护间隔一般取循环前缀(CP)的形式，即将OFDM符号后面的 L_{cp} 个符号复制到最前面，形成 $L_{cp} + N$ 的新序列 $s_{cp}[n]$ 。

$$+1], \dots, x[N-1]$$

图 2.9 循环前缀示意图

发送信号经过信道后，接收信号可表示为

$$r[n] = \sum_{p=1}^P h[n, p] s_{cp}[n - \tau_p] + w[n] \quad (2-19)$$

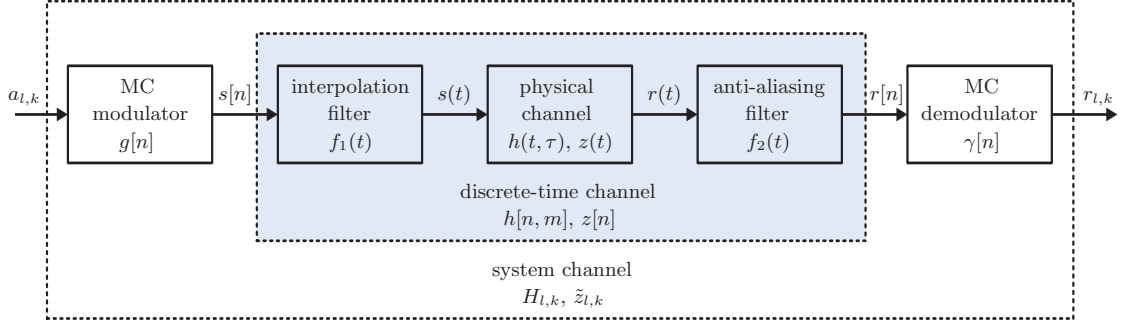


图 2.10 多载波系统框图

第三章 压缩感知与基于压缩感知的信道估计

信号处理中，传统的奈奎斯特（Nyquist）采样理论要求信号的采样频率必须大于等于信道带宽的两倍，采样获取大量数据，同时也包含了大量冗余信息。这极大的限制了高速信号处理发展要求。

2006年，Donoho等发表题为“Compressed Sensing”的文章，标志着压缩感知理论框架正式被提出。对于稀疏信号或者可以稀疏表示的信号，信号本身是可以压缩的，压缩感知理论可以通过远低于奈奎斯特采样定律的采样点，通过合适的重建算法，准确的恢复出原始信号。

其后，压缩感知理论在图像处理，信号处理，通信，人工智能等领域得到了广泛的应用。

3.1 欠定线性系统及稀疏解

3.1.1 欠定线性系统

对于线性方程组 $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ ，当矩阵 $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{n \times m}$ 且 $n < m$ 时，称为欠定线性系统。在系统中，未知数个数大于方程数。由线性代数知，当 \mathbf{b} 不在矩阵 \mathbf{A} 列向量张成的空间中时，方程组无解；否则，有无穷多解。

3.1.2 正则化

对于欠定线性系统，我们只考虑有解的情况。为了能够得到确定的解，可以向线性系统增加条件，最常用的加条件方法就是正则化（regularization），即引入一个对解 \mathbf{x} 进行评价的函数，并期望其值越小越好。因此，欠定线性系统可以转化为如下的优化问题：

$$\begin{aligned} \min_x J(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } \mathbf{b} = \mathbf{Ax} \end{aligned} \quad (3-1)$$

最常用的 $J(\mathbf{x})$ 为 \mathbf{x} 的2范数的平方 $\|\mathbf{x}\|_2^2$ 。对于 $J(\mathbf{x}) = \|\mathbf{x}\|_2^2$ 的优化问题，可以使用拉格朗日数乘法得到确定的唯一解。

$$L(\mathbf{x}) = \|\mathbf{x}\|_2^2 + \lambda^T (\mathbf{b} - \mathbf{Ax}) \quad (3-2)$$

事实上，对于任意的严格凸的函数作为 $J(\bullet)$ ，都能保证解的唯一性。

3.1.3 稀疏解

对于以 l_p -范数作为 $J(\mathbf{x})$ ，相比于 $p > 1$ ， $p \leq 1$ 时具有让解变得稀疏的倾向，即 \mathbf{x}

中非零项更少。这种趋势可以通过以下图直观的看出。

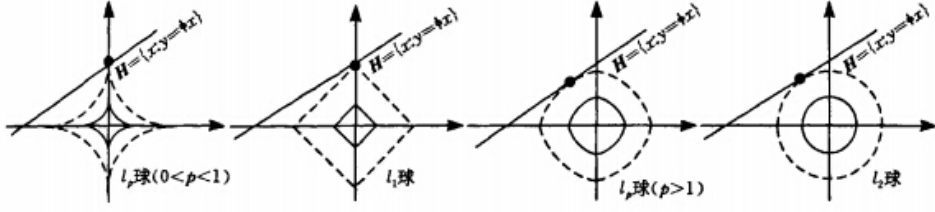


图 3.1 p 范数与稀疏性的关系

从图中中可以直观看出，当 $p \leq 1$ 时解有更大的几率落在坐标轴上，从而导致另一些分量为 0，即解更趋于稀疏性。

在可以产生稀疏解的范数中，极端情况下 $p \rightarrow 0$ 。向量的 l_0 -范数定义为向量中非零值的个数。此时问题表述如下：

$$\begin{aligned} (P_0) : \min_{\mathbf{x}} \|\mathbf{x}\|_0 \\ \text{s.t. } \mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{x} \end{aligned} \quad (3-3)$$

(P_2) 问题的解总是唯一的，但 (P_0) 问题解的唯一性与可验证性并不容易确定。而且 (P_2) 问题可以通过朗格朗日乘数法直接得到，但 (P_0) 问题并没有有效的解法。可以使用穷举法检测 $\binom{m}{n}$ 种组合，但这种组合搜索问题复杂度与 m 成指数关系。事实上，已经证明了一般意义上 (P_0) 问题是 NP 难问题。

3.2 压缩感知理论

考虑一般的信号重建问题。对于某未知信号 $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^N$ ，通过某测量矩阵 $\Phi \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 进行采样，得到未知信号 $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^M$ 的观测值，

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{x} \quad (3-4)$$

\mathbf{y} 也可以看做原始信号 \mathbf{x} 在 Φ 下的线性投影，现在考虑由 \mathbf{y} 重构 \mathbf{x} 。由于 \mathbf{y} 的维数远低于 \mathbf{x} 的维数，因此上式有无穷多个解，即无法准确重构出原始信号。但假设原始信号 \mathbf{x} 是 K 稀疏信号，即 \mathbf{x} 中只有 K 项不为 0，并且 \mathbf{y} 与 Φ 满足一定条件，理论证明，信号 \mathbf{x} 可以由测量值 \mathbf{y} 通过求解最优 l_0 范数问题得到准确重构：

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}} = \arg \min \|\mathbf{x}\|_0 \\ \text{s.t. } \Phi \mathbf{x} = \mathbf{y} \end{aligned} \quad (3-5)$$

式中： $\|\bullet\|_0$ 为向量的 l_0 范数，表示向量 \mathbf{x} 中非零元素的个数。

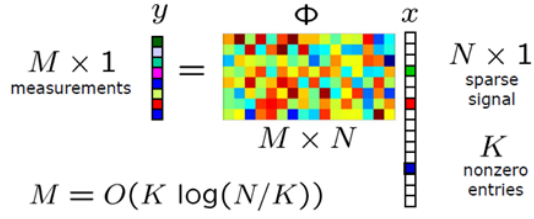


图 3.2 稀疏向量的压缩感知原理示意图

对于非稀疏信号，如果可以在变换域内进行稀疏表示，即 $\mathbf{f} = \Psi \mathbf{x}$ ， \mathbf{x} 为该信号在变换域 Ψ 的稀疏表示。对于测量公式 $\mathbf{y} = \Phi \mathbf{f}$ ，有

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{f} = \Phi \Psi \mathbf{x} = \mathbf{A} \mathbf{x} \quad (3-6)$$

式中： $\mathbf{A} = \Phi \Psi$ 为 $M \times N$ 维矩阵，成为感知矩阵。如下图所示

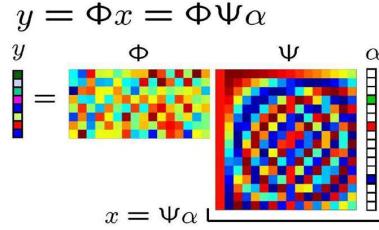


图 3.3 可稀疏表示向量的压缩感知原理示意图

3.3 稀疏解的唯一性

在压缩感知框架下，稀疏信号正确从压缩的样本中重建，测量矩阵需要满足一定条件。目前常用的主要有3种条件：零空间特性、约束等距性和矩阵相干度分析。

3.3.1 约束等距条件（RIP）

RIP定义为对于任意的 $k = 1, 2, 3, \dots, K$ ，定义矩阵 Φ 的等距常量（RIC） δ_K 为满足下式的最小值：

$$(1 - \delta_K) \|\mathbf{a}\|_2^2 \leq \|\mathbf{T} \mathbf{a}\|_2^2 \leq (1 + \delta_K) \|\mathbf{a}\|_2^2 \quad (3-7)$$

式中： \mathbf{a} 为任意矢量， $0 < \delta_K < 1$ 称矩阵 Φ 满足 K 阶 RIP 条件。

对于两个具有相同稀疏度的不同信号， Φ 的 RIP 特性可以保持两者间的距离在观测空间的不变。而随机采样，有很高可能满足条件。但验证矩阵是否满足 RIP 条件，需要尝试所有向量，并不实用。

3.3.2 矩阵相关系数

对于矩阵 \mathbf{T} ，矩阵相关系数 $\mu(\mathbf{T})$ 定义为矩阵中任意两列的相关系数中的最大值：

$$\mu(\mathbf{T}) = \max_{1 \leq i, j \leq N, i \neq j} \frac{|\tau_i^H \tau_j|}{\|\tau_i\| \cdot \|\tau_j\|} \quad (3-8)$$

已有研究表明，矩阵相关系数 $\mu(\mathbf{T})$ 越小，从测量信号恢复出原始信号的概率越大。

3.4 基于导频的信道估计

基于导频的信道估计是目前使用最多的信道估计方式。通过向数据帧中固定位置插入固定的导频，可以在接收端通过导频处的接收符号估计出导频位置的信道响应，然后通过内插等方式得到整个数据帧传输过程中的信道响应估计。

下图是导频插入的几种方式。

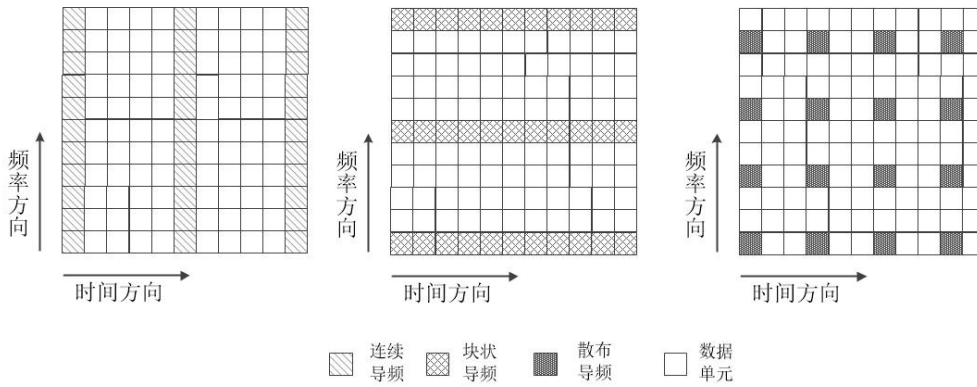


图 3.4 时频域传递函数

连续导频可以估计出不同时间点上所有频率处的信道，从图2.1.1可知频率选择性信道，在同一频率不同时间点上变化很小，因此内插可以相对准确的得到数据帧内所有时频块上的信道估计值。同理可知，对于图2.1.2所示的时间选择性信道，块状导频具有更好的估计性能。

3.5 使用压缩感知进行双选信道信道估计

第四章 改善压缩感知信道估计的方法

图：包括曲线图、示意图、流程图、框图等。图序号一律用阿拉伯数字分章依序编码，如：图 1.3、图 2.11。

每一个图应有简短确切的图名，连同图序号置于图的正下方。图名称、图中的内容字号为五号，中文字体为宋体，英文字体为 Times New Roman，行距一般为单倍行距。图中坐标上标注的符号和缩略词必须与正文保持一致。引用图应在图题右上角标出文献来源；曲线图的纵横坐标必须标注“量、标准规定符号、单位”，这三者只有在不必要标明（如无量纲等）的情况下方可省略。

4.1 过采样技术

图与正文之间一般应空一行。

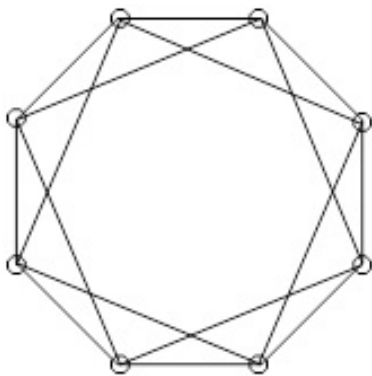


图 4.1 插图示例

公式：正文中的公式、算式、方程式等必须编排序号，序号一律用阿拉伯数字分章依序编码，如：(3-32)、(6-21)。

对于较长的公式，另起行居中横排，只可在符号处（如： $+$ 、 $-$ 、 $*$ 、 $/$ 、 $<>$ 等）转行。公式序号标注于该式所在行（当有续行时，应标注于最后一行）的最右边。连续性的公式在“ $=$ ”处排列整齐。大于 999 的整数或多于三位的小数，一律用半个阿拉伯数字符的小间隔分开；小于 1 的数应将 0 置于小数点之前。公式的行距一般为单倍行距。

4.2 改进导频设计

公式与正文之间一般应空一行。

$$X_{e1}(s, n_1, k_1) = \binom{k_1}{s} \frac{n_1!}{(n_1 - s)!} \sum_{v=0}^{\min(n_1-s, k_1-s)} (-1)^v \binom{k_1-s}{v} \times \frac{(n_1-s)!}{(n_1-s-v)!} (n_1-s-v)^{k_1-s-v} \quad (4-1)$$

表：包括分类项目和数据，一般要求分类项目由左至右横排，数据从上到下竖列。

分类项目横排中必须标明符号或单位，竖列的数据栏中不要出现“同上”、“同左”等词语，一律要填写具体的数字或文字。表序号一律用阿拉伯数字分章依序编码，如：表 2.5、表 10.3。

每一个表格应有简短确切的题名，连同表序号置于表的正上方。表名称、表中的内容居中排列，字号为五号，中文字体为宋体，英文字体为 Times New Roman，行距一般与正文保持一致。表格线统一用单线条，磅值为 0.5 磅。

4.3 改善基

表格与正文之间一般应空一行。

表 4.1 表格示例

电性能参数 \ 馈电方式	探针	环形缝隙	探针和缝隙		缝隙和CPW	
			探针	缝隙	缝隙	CPW
谐振频率	9.5 GHz	8.8 GHz	9.4 GHz	9.8 GHz	9.2 GHz	9.3 GHz
带宽 S ₁₁ < -10 dB)	7.3%	4.5%	6.9%	6.8%	4.9%	5.3%
隔离度 (带内最差)	-16.5 dB	-17 dB	-31 dB		-22 dB	
方向图	不对称	对称	不对称	对称	对称	对称
交叉极化电平	高	低	高	低	低	低

计量单位：学位论文中出现的计量单位一律采用国务院 1984 年 2 月 27 日发布的《中华人民共和国法定计量单位》标准。

第五章 降低压缩感知信道估计的复杂度

我校研究生学位论文包括以下几个部分：

5.1 支撑集的稀疏度

(1) 题目：题目是最恰当、最简明的词语反映论文中最重要的特定内容的逻辑组合，力求简短切题。中文题目（包括副标题和标点符号）一般不超过 20 个字，英文题目一般不超过 10 个实词。

题目位于确定位置的文本框中，文本框格式为水平位置：相对于右侧页边距绝对位置 0.5 厘米；垂直位置：相对于下侧页边距绝对位置 15 厘米；文字环绕方式为浮于文字上方；文本框大小：高度为绝对值 3.2 厘米，宽度为绝对值 15 厘米。文字格式为中文宋体、英文 Times New Roman，二号加粗，居中对齐，左右不缩进，段前段后不留空，行距为固定值 30 磅。

(2) 责任者姓名：包括论文作者姓名、指导教师姓名及职称（博士学位论文、学术型和同等学力硕士学位论文）以及学校、企业导师姓名及职称（专业学位硕士学位论文）。没有企业导师的专业学位类别请将“企业导师姓名及职称”栏目删除。

(3) 申请学位类别：按照学科门类和学位层次填写，如工学博士、工学硕士、工程硕士、工商管理硕士等。

作者姓名、指导教师姓名职称、申请学位类别信息位于确定位置的文本框中，文本框格式为水平位置：相对于右侧页边距绝对位置 3.5 厘米；垂直位置：相对于下侧页边距绝对位置 20 厘米；文字环绕方式为浮于文字上方；文本框大小：高度为绝对值 3.5 厘米，宽度为绝对值 9 厘米。标题字体为黑体四号加粗，具体内容的文字格式为中文宋体、英文 Times New Roman，四号加粗，左对齐，左右不缩进，段前段后不留空，行距为固定值 30 磅。

5.2 改进的OMP算法

题名页包括中文题名页和英文题名页，主要由学校代码、分类号、学号、密级、论文题目、作者姓名、一级学科、二级学科（博士学位论文、学术型和同等学力硕士学位论文）、领域（专业学位硕士学位论文）、学位类别、指导教师姓名、职称（博士学位论文、学术型和同等学力硕士学位论文）、学校、企业导师姓名、职称（专业学位硕士学位论文）、提交日期等部分组成。没有企业导师的专业学位类别请将“企业导师姓名及职称”栏目删除。

- (1) 学校代码：指本单位编号，我校代码是“10701”。
- (2) 分类号：指在《中国图书资料分类法》中的分类号（填写前四位即可）。
- (3) 学号：按照入学时研究生院编制的统一编号填写。
- (4) 密级：密级由导师确定，分为公开和秘密两种。

学校代码和分类号位于确定位置的文本框中，文本框格式为水平位置：相对于右侧页边距绝对位置 0.2 厘米；垂直位置：相对于下侧页边距绝对位置 0.3 厘米；文字环绕方式为浮于文字上方；文本框大小：高度为绝对值 1.1 厘米，宽度为绝对值 4.5 厘米。学号和密级位于确定位置的文本框中，文本框格式为水平位置：相对于右侧页边距绝对位置 10.9 厘米；垂直位置：相对于下侧页边距绝对位置 0.3 厘米；文字环绕方式为浮于文字上方；文本框大小：高度为绝对值 1.1 厘米，宽度为绝对值 4.5 厘米。中文题名页中的学校代码、分类号、学号和密级的字体为宋体，字号为五号加粗，行距为多倍行距 1.2，段落间距为段前 0 磅，段后 0 磅；

学位论文题目位于确定位置的文本框中，文本框格式为水平位置：相对于右侧页边距绝对位置 0 厘米；垂直位置：相对于下侧页边距绝对位置 11 厘米；文字环绕方式为浮于文字上方；文本框大小：高度为绝对值 3.2 厘米，宽度为绝对值 15.5 厘米。字体为宋体，字号为二号加粗，行距为固定值 30 磅，段落间距为段前 0 磅，段后 0 磅；

作者姓名、指导教师姓名职称、一级学科、二级学科、领域、学位类别、提交日期位于确定位置的文本框中，文本框格式为水平位置：相对于右侧页边距绝对位置 4.5 厘米；垂直位置：相对于下侧页边距绝对位置 16 厘米；文字环绕方式为浮于文字上方；文本框大小：高度为绝对值 8.6 厘米，宽度为绝对值 8.5 厘米。标题和具体内容的字体为宋体，标题字号为四号加粗，具体内容的字号为四号不加粗，行距为固定值 32 磅，段落间距为段前 0 磅，段后 0 磅。

英文题名页中的学科填写二级学科（专业学位填写领域或类别），学位论文题目字体为 Times New Roman，字号二号加粗，行距为固定值 30 磅，段落间距为段前 0 磅，段后 0 磅，其他内容的字体为 Times New Roman，字号三号，行距为固定值 30 磅，段落间距为段前 0 磅，段后 0 磅。学位论文题目位于确定位置的文本框中，文本框格式为水平位置：相对于右侧页边距绝对位置 0 厘米；垂直位置：相对于下侧页边距绝对位置 0 厘米；文字环绕方式为浮于文字上方；文本框大小：高度为绝对值 3.5 厘米，宽度为绝对值 15.5 厘米。学科信息文本框格式为水平位置：相对于右侧页边距绝对位置 0 厘米；垂直位置：相对于下侧页边距绝对位置 6 厘米；文字环绕方式为浮于文字上方；文本框大小：高度为绝对值 5.5 厘米，宽度为绝对值 15.5 厘米。作者信息文本框格式为水平位置：相对于右侧页边距绝对位置 0 厘米；垂直位置：相对于下侧页边距绝对位置 18.7 厘米；文字环绕方式为浮于文字上方；文本

框大小：高度为绝对值 4.5 厘米，宽度为绝对值 15.5 厘米。

第六章 总结与展望

我校研究生学位论文包括以下几个部分：

6.1 研究总结

(1) 题目：题目是最恰当、最简明的词语反映论文中最重要的特定内容的逻辑组合，力求简短切题。中文题目（包括副标题和标点符号）一般不超过 20 个字，英文题目一般不超过 10 个实词。

题目位于确定位置的文本框中，文本框格式为水平位置：相对于右侧页边距绝对位置 0.5 厘米；垂直位置：相对于下侧页边距绝对位置 15 厘米；文字环绕方式为浮于文字上方；文本框大小：高度为绝对值 3.2 厘米，宽度为绝对值 15 厘米。文字格式为中文宋体、英文 Times New Roman，二号加粗，居中对齐，左右不缩进，段前段后不留空，行距为固定值 30 磅。

(2) 责任者姓名：包括论文作者姓名、指导教师姓名及职称（博士学位论文、学术型和同等学力硕士学位论文）以及学校、企业导师姓名及职称（专业学位硕士学位论文）。没有企业导师的专业学位类别请将“企业导师姓名及职称”栏目删除。

(3) 申请学位类别：按照学科门类和学位层次填写，如工学博士、工学硕士、工程硕士、工商管理硕士等。

作者姓名、指导教师姓名职称、申请学位类别信息位于确定位置的文本框中，文本框格式为水平位置：相对于右侧页边距绝对位置 3.5 厘米；垂直位置：相对于下侧页边距绝对位置 20 厘米；文字环绕方式为浮于文字上方；文本框大小：高度为绝对值 3.5 厘米，宽度为绝对值 9 厘米。标题字体为黑体四号加粗，具体内容的文字格式为中文宋体、英文 Times New Roman，四号加粗，左对齐，左右不缩进，段前段后不留空，行距为固定值 30 磅。

6.2 研究展望

题名页包括中文题名页和英文题名页，主要由学校代码、分类号、学号、密级、论文题目、作者姓名、一级学科、二级学科（博士学位论文、学术型和同等学力硕士学位论文）、领域（专业学位硕士学位论文）、学位类别、指导教师姓名、职称（博士学位论文、学术型和同等学力硕士学位论文）、学校、企业导师姓名、职称（专业学位硕士学位论文）、提交日期等部分组成。没有企业导师的专业学位类别请将“企业导师姓名及职称”栏目删除。

致谢

本论文是在导师的悉心指导下完成的，从论文的选题到论文的撰写，无不渗透着导师的心血，……值此论文完稿之际，谨对导师的辛勤培育以及谆谆教诲表示最衷心的感谢！

作者简介

1. 基本情况

张三，男，陕西西安人，1982年8月出生，西安电子科技大学XX学院XX专业2008级硕士研究生。

2. 教育背景

2001.08～2005.07，西安电子科技大学，本科，专业：电子信息工程

2008.08～，西安电子科技大学，硕士研究生，专业：电磁场与微波技术

3. 攻读硕士学位期间的研究成果

3.1 发表学术论文

- [1] XXX, XXX, XXX. Rapid development technique for drip irrigation emitters[J].RP Journal,UK.,2003,9(2): 104-110.(SCI: 672CZ, EI: 03187452127)
- [2] XXX, XXX, XXX. 基于快速成型制造的滴管快速制造技术研究[J]. 西安交通大学学报, 2001, 15(9): 935-939. (EI: 02226959521)
- [3] ...

3.2 申请（授权）专利

- [1] XXX, XXX, XXX等. 专利名称: 国别,专利号[P]. 出版日期.
- [2] ...

3.3 参与科研项目及获奖

- [1] XXX项目, 项目名称, 起止时间, 完成情况, 作者贡献.
- [2] XXX, XXX, XXX等. 科研项目名称. 陕西省科技进步三等奖, 获奖日期.
- [3] ...

