**摘 要**

无线通信系统的未来期望是实现高质量、高速率的多媒体和数据业务传输，但是无线环境的多径特性和时变性使得信道特性跟踪复杂。而正交频分复用技术 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing，OFDM)正是一种解决符号间干扰的有效传输手段，因此被作为未来宽带高速无线通信的关键技术。

OFDM技术是一种多载波数字调制技术，该技术的应用始于20世纪60年代，主要用在军事通信中，但因其结构复杂限制了进一步推广。70年代，人们提出采用离散傅立叶变换实现多载波调制，使OFDM技术开始走向实用化。随着DSP芯片技术的发展、插入保护时间段等技术的逐步引入，加之其具有的较高的频谱利用率和良好的抗多径干扰能力，越来越引起人们的高度重视，已成为未来第四代移动通信系统的关键传输技术。但由于OFDM系统对信道估计误差敏感，如何在OFDM系统中快速准确地实现信道估计是十分关键的，本论文将重点针对这个问题进行分析研究。

本文首先介绍了移动通信系统的信道特性以及信道模型，并详细描述了OFDM系统的基本原理、结构以及特点。本文对基于导频的信道估计技术进行了研究。论文首先详尽分析了移动无线通信信道的多径衰落特性，包括时间色散和频率色散现象对系统性能的影响。在介绍了信道特性的基础上，分析了OFDM系统的基本原理，包括研究OFDM基带模型，DFT实现方法及保护间隔和循环前缀的特点。然后针对OFDM系统中的信道估计技术，阐述了基于训练序列，基于块状和梳状插入导频的OFDM信道估计方法。讨论并详细分析了信道估计的常用几种算法：LS算法，(L)MMSE算法，基于SVD分解算法。最后基于MATLAB的仿真平台，在多种情况下(包括基于不同估计方法，不同插入方式，不用环境条件等)，进行OFDM系统信道估计的仿真并进行了性能比较。

**关键词**：无线通信；OFDM；多径衰落；信道估计；导频

**Abstract**

The future wireless mobile communication systems are aim to provide high-quality and high-rate mobile multimedia transmission. However, hostile multipath fading and time varying of radio conditions bring about complexity in channel character tracking. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), which is inherently resistant against inter-symbol interference (ISI), has therefore become the key technology of broadband high-speed wireless communication in future.

OFDM is a kind of multi-carrier digital modulation technique. Application of the technique started in the 1960s，and mainly used in the military communication. But because of its complex structure limited to expand further. In 1970s, people put forward applying DFT to carry out the multi-carrier modulation, making the OFDM technique more practicality. With the development of DSP chip technique, introduction of guard interval, spectral efficiency and robustness against multipath interfering, OFDM modulation has attracted considerable attention from researchers. OFDM has been adopted as the key transmission technique for the future 4th-generation mobile communication systems.

Nevertheless, OFDM system is too vulnerable to channel estimation error. It is of great importance to estimate channel efficiently in OFDM system. And that is what this issue intended to do.

This paper mainly studies about pilot-assisted channel estimation, which is a key technique in OFDM system. At first, we analysis the effect to system by multipath fading characters including time spreading and frequency spreading in mobile channel. And then we will analysis the theory of OFDM system, including the OFDM base-band model, DFT method and the protection of layout and the characteristics of CP, based on the channel character. Then according to the theory of OFDM system channel estimation, we introduce the training-sequence-based, block-based and comb-based pilot insert method of the OFDM channel estimation. Afterwards, we analysis deeply about several Channel estimation algorithm: LS-based, (L)MMSE-based and SVD-based algorithm. Finally, based on the simulation of MATLAB, we simulate OFDM system in different modulations, arithmetic and pilot insert method and compare the result and analyzing the performance.

**Keywords**: Mobile communication; OFDM; Multipath fading; Channel estimation; Pilot

**目录**

[第一章 绪论 1](#_Toc229481144)

[1.1 论文背景 1](#_Toc229481145)

[1.2 OFDM系统的研究历史及现状 1](#_Toc229481146)

[1.3 论文的研究范围及内容安排 4](#_Toc229481147)

[第二章 OFDM技术原理 6](#_Toc229481148)

[2.1 无线多径信道的特性 6](#_Toc229481149)

[2.1.1 时间色散特性 7](#_Toc229481150)

[2.1.2 频率色散特性 8](#_Toc229481151)

[2.1.3 角度色散特性 9](#_Toc229481152)

[2.2 OFDM系统的基本原理 9](#_Toc229481153)

[2.2.1 OFDM基带模型 10](#_Toc229481154)

[2.2.2 DFT实现方法 12](#_Toc229481155)

[2.2.3 保护间隔和循环前缀 13](#_Toc229481156)

[2.3 OFDM系统主要技术 14](#_Toc229481157)

[2.3.1 OFDM同步技朮 14](#_Toc229481158)

[2.3.2 信道估计 14](#_Toc229481159)

[2.3.3 均衡 14](#_Toc229481160)

[2.3.4 降低峰值平均功率比 15](#_Toc229481161)

[2.4 本章小结 15](#_Toc229481162)

[第三章 OFDM系统的信道估计技术 16](#_Toc229481163)

[3.1 OFDM系统的信道估计技术 16](#_Toc229481164)

[3.1.1 基于训练序列的信道估计技术 16](#_Toc229481165)

[3.1.2 盲和半盲信道估计技术 17](#_Toc229481166)

[3.1.3 基于导频符号的信道估计 18](#_Toc229481167)

[3.2 导频符号估计的插入方式 18](#_Toc229481168)

[3.3 基于导频辅助的信道估计方法 19](#_Toc229481169)

[3.3.1 基于LS准则的信道估计算法 19](#_Toc229481170)

[3.3.2 基于MMSE准则的信道估计 20](#_Toc229481171)

[3.3.3 基于LMMSE准则的信道估计 21](#_Toc229481172)

[3.3.4 基于SVD分解的信道估计 21](#_Toc229481173)

[3.4 本章小结 22](#_Toc229481174)

[第四章 OFDM系统信道估计仿真 23](#_Toc229481175)

[4.1 不同情况下的各种信道估计方法比较 24](#_Toc229481176)

[4.2 基于导频符号的信道估计仿真 25](#_Toc229481177)

[4.2.1 不同调制方式下的信道估计仿真 25](#_Toc229481178)

[4.2.2 块状和梳状的导频插入方式的比较 26](#_Toc229481179)

[4.2.3 不同准则的信道估计算法的比较 28](#_Toc229481180)

[4.3 本章小结 29](#_Toc229481181)

[第五章 结论 30](#_Toc229481182)

[5.1 总结 30](#_Toc229481183)

[5.2 展望 30](#_Toc229481184)

[参考文献 32](#_Toc229481185)

[致 谢 34](#_Toc229481186)

[附 录 35](#_Toc229481187)

# 绪论

## 论文背景

近年来，从第一代移动通信系统到第三代移动通信系统，技术的更新换代越来越快，人们对信息量的需求越来越多，宽带化已成为当今通信技术领域的主要发展方向。目前，第三代(3G)移动通信系统已经在世界的许多国家开始了商业应用，至09年1月7日3G牌照亦正式于中国发放3家电信运营商各自开始了3G征程。但由于3G系统的核心网还没有完全脱离第二代移动通信系统的核心网结构，所以普遍认为第三代系统仅仅是从窄带向未来宽带移动通信系统的过渡。因此，人们把目光更多集中在后第四代移动通信系统上，开始研究和开发多媒体无线通信系统。随着多媒体无线通信的发展，频谱数量的需求与供给的矛盾越来越尖锐。第四代移动通信系统将能够提供更大的频宽，把无线通信与互联网、多媒体通信相结合必定是大势所趋。

4G无线通信系统需要克服许多技术挑战[1，3，4]。其中衰落和多径现象是高速率无线数据传输需要克服的重点问题之一。为了解决这些问题，满足未来多媒体通信的要求，国际上提出了多载波正交频分复用(OFDM)的技术作为一种解决方案。采用多种新技术的OFDM具有更高的频谱利用率和良好的抗多径干扰能力，它不仅仅可以增加系统容量，更重要的是它能更好地满足多媒体通信要求，将包括数据、语音、图片甚至是视频等大量信息的多媒体业务通过宽频信道高品质地传送出去。

OFDM系统的主要缺陷之一就在于它对信道估计误差十分敏感，本文针对这一关键性问题，深入研究OFDM系统中的信道估计问题。

## OFDM系统的研究历史及现状

纵观移动通信的发展史，第一代模拟系统仅提供语音服务，不能传输数据，第二代数字移动通信系统的数据传输速率也只有9.6bit/s，最高可达32kbit/s;第三代移动通信系统数据传输速率可达到2Mbit/s;而人们目前所致力研究的第四代移动通信系统可以达到10Mbit/s至20Mbit/s[2]，甚至更高。虽然第三代移动通信可以比现有传输仍有发展的空间，甚至令最大数据传输速率达到 10Mbit/s，但是仍无法满足未来多媒体通信的要求，第四代移动通信系统的提出便是希望能满足提供更大的频宽需求。

正交频分复用(OFDM)技术已被证明是抵抗多径衰落和提高系统容量的有效手段，并被多种无线协议采用。OFDM技术亦成为第四代移动通信的核心技术。

OFDM技术最初是由R.W.Chan在20世纪60年代中期提出，他指出了带限信道中并行数据源利用正交子载波同时发送的基本原理，与传统的频分复用相比，免除了陡峭的带通滤波器，大大提高了频谱利用率[1]。但因其结构复杂限制了其进一步的推广，直到七十年代，人们提出了采用离散傅氏变换（DFT）来实现多载波调制（MC），简化了系统的结构，才使得OFDM技术开始走向实用化；Weinstein等[1]还提出了通过插入一段空白区作为保护间隔来消除符号间干扰，但是这种办法的缺点是不能保证信号经过色散信道后各个子载波间仍然保持正交性。因此另一个较大的突破是在1980年Peled和Ruiz[1}提出了采用循环前缀(CP)的方法来保证信号经过色散信道后仍然保持各子载波间的正交性，这种方法能有效的降低符号间干扰(ISI)和子载波间干扰(ICI)。

正是由于前人杰出贡献以及数字信号处理技术快速发展，到上世纪九十年代中期OFDM技术真正地引起学术界和工业界的重视。它具有对抗多径、频带利用率高、很容易通过频域灌水手段最大化信道容量、均衡器为低复杂度的频域单抽头均衡器等等诸多优点，使其同单载波调制(SCM，Single Carrier Modulation)相比在宽带无线接入方面具有无与伦比的优越性。

进入九十年代以来，对OFDM技术的研究逐渐深入到无线调频信道上的宽带数据传输。而近年来OFDM技术引起了众多专家学者的关注，国内外对OFDM技术的研究主要集中在如下几个方向：信道估计和均衡技术，信道容量分析，降低峰值平均功率比，同步算法和性能分析，包括同步误差分析、时间同步、频偏估计和ICI分析等等。近年来随着人们对于通信数据化、宽带化、个人化和移动化的需求，OFDM技术在固定无线接入领域和移动接入领域得到了越来越广泛的应用，并已经成为第四代移动通信系统和无线宽带接入网的候选技术标准。

OFDM的主要特点：

传统的FDM将带宽分成几个子信道进行信息传输，中间用保护频带来降低干扰。频分复用技术的特点是所有子信道传输的信号以并行的方式工作，每一路信号传输时可不考虑传输时延。传统的FDM的优点是简单、直接。但是频谱的利用率低，子信道之间要留有保护频带，而且在频分路数N较大时多个滤波器的实现使系统复杂化。

传统的FDM频谱 OFDM频谱

图1-1：传统的FDM频谱OFDM与OFDM频谱的区别

OFDM是一种无线环境下的多载波传输技术，也可以被看作是一种多载波数字调制技术或多载波数字复用技术。OFDM系统由于使用无干扰正交载波技术，单个载波间无需保护频带，比传统的FDM系统要求的带宽要小得多，因而，带宽利用率较高。

近些年来，OFDM技术日益普及并引起了广泛的研究热潮，这主要是基于OFDM技术同目前的其他通信技术相比而言的众多优势：

1.抗衰落能力强

OFDM把用户信息通过多个子载波传输，在每个子载波上的信号时间就相应地比同速率的单载波系统上的信号时间长很多倍，使OFDM对脉冲噪声和信道快衰落的抵抗力更强。更能有效地减少了由于无线信道的时间弥散所带来的符号间干扰(ISI)。

2.[频谱利用率](http://www.c114.net/keyword/%C6%B5%C6%D7%C0%FB%D3%C3%C2%CA)很高

OFDM的频谱效率比串行系统几乎高一倍，这在频谱资源有限的无线环境中尤为重要。OFDM信号的相邻子载波相互重叠，从理论上讲其频谱利用率可以接近奎斯特极限。

3.容易实现

各个子信道的正交调制和解调可以采用快速傅里叶反变换和快速傅里叶变换来实现。随着大规模集成电路技术和DSP技术的发展，IFFT与FFT都是非常容易实现的。

4.非对称高速率数据传输

无线数据业务一般存在着非对称性，即下行链路中的数据传输量要大于上行链路中的数据传输量，这就要求物理层支持非对称高速率数据传输，OFDM系统可以通过使用不同数量的子信道来实现上行和下行链路中不同的传输速率。

OFDM也有其缺点。例如对频偏和相位噪声比较敏感；功率峰值与均值比(PAPR)大，导致[射频](http://www.c114.net/keyword/%C9%E4%C6%B5)[放大器](http://www.c114.net/keyword/%B7%C5%B4%F3%C6%F7)的功率效率较低；负载算法和自适应调制技术会增加系统复杂度等。

## 论文的研究范围及内容安排

本论文主要针对宽带无线通信系统，研究高性能的同步和信道估计方法。本文的具体内容安排如下：

第1章 主点介绍论文的选题背景和选题意义信道，OFDM技术的要点和估计技术的发展。

第2章 主要对OFDM系统和无线信道的一些基础知识进行介绍，首先介绍了无线信道的衰落信道。然后对无线多径信道做出分析，之后再重要研究OFDM的基本原理，其中包括分析OFDM基带模型，DFT实现方法及插入保护间隔等，为往后的章节提供理论性的基础。最后论及OFDM系统的关键技术，对各种关键技术进行简单的介绍。

第3章 主要研究OFDM信道估计技术，对OFDM信道估计做出介绍后即对不同的估计方法做出介绍。之后重点研究基于导频符号的信道估计，深入分析其中的不同的插入导频方式，再对基于LS，MMSE和SVD分解三种算法深入研究。

第4章 利用MATLAB进行了计算机仿真各种比较分析，包括不同调制方式下的性能比较，基于导频估计时梳状和块状插入方式的性能比较，以及不同算法下的性能比较，验证理论准确性。

# OFDM技术原理

本章对OFDM技术的原理进行简单介绍，重点是OFDM中关键的基本概念和基本数学模型进行阐述，给出OFDM系统相关数学描述的方程。通过对OFDM系统的数学描述方程的分析，为下章中提出的各种信道估计算法提供理论基础。最后介绍OFDM中的关键技术，为OFDM系统作全面的描述。

## 无线多径信道的特性

与有线信道相比，无线信道中的信号传输所经历的环境要复杂的多，其传输过程中受到发射端和接收端间的复杂地形、移动物体和空气温度湿度以及它们的变化特性的影响，呈现出许多不稳定的传输损伤。无线信道的传播模型可分为大尺度 (Large-scale)传播模型和小尺度 (Small-scale)传播模型[5] ，大尺度传播模型包括：1.表现在大范围(数百或数千米)内信号强度随距离变化的特征;2. 阴影衰落，主要是由于传播环境的地形起伏、建筑等障碍物对电波的阻塞或遮蔽作用引起的，表现为在中等范围(数百波长)内信号电平的中值的慢变特性，又称为慢衰落; 小尺度传播模型主要指多径衰落，它是由于传输环境的多径传输引起的衰落，表现为在小范围(数个波长或数十个波长)内接收信号场强瞬时值的变化特性。一般而言，大尺度衰落表征了接收信号在一定时间内的均值随传播距离和环境的变化而呈现的缓慢变化。而小尺度衰落表征了接收信号在经过短时间或短距离传播后其幅度快速的波动，以致大尺度衰落的影响可以忽略不计。因为，本文将重点介绍小尺度衰落信道的概念，以及三种信道扩展。

无线信道的多径性导致小尺度衰落的产生，它的主要表现为[6]：1.令发射信号在短距离或短时间传播后得到接收信号的强度急剧地变化。2.令在不同多径信号上，存在着时变的多普勒频移引起的随机频率调制。3.令多径传播时引起的时延扩展(回音)。

影响小尺度衰落的因素有很多，其中包括：

1.多径传播由于无线信道中反射和反射物的存在，使得发射信号到达接收机时形成在时间、空间上相互区别的多个无线电波。

2. 移动台的运动速度基站与移动台的相对运动会导致接收信号发生多普勒频移，从而使接收信号的合成信号产生非线性失真。

3.传播环境物体的运动如果无线信道中存在高速的物体，这时会引起时变的多普勒频移。

4.信号的传输带宽如果发射信号的传输带宽比信道的带宽更宽，那么接收信号就会产生失真，但本地接收机信号强度不会衰落很多(即小尺度衰落不占主导地位) 。

无线信号经过无线信道后分别形成了频率选择性衰落、时间选择性衰落和空间选择性衰落，也分别产生了时延扩展、多普勒扩展和角度扩展。这三种扩展分别对应三组相关参数：相干带宽、相干时间和相干距离。

* + 1. 时间色散特性

1.瑞利(Rayleigh)衰落

一般的讲，对于移动通信环境，来自发射机的射频信号经过多径信道的传播到达接收端的信号是由不同传播路径的信号的叠加。如果各径信号的幅值和到达接收天线的方位角随机且独立，则接收信号的包络就服从瑞利分布。这是描述平坦衰落或独立多径分量情况下的包络统计特性。

2.时延扩展(Delay spread)

多径传播对信号的影响可以从时延扩展的角度来考虑。因每条路径长度不同，信号到达时间也就不同，这使得接收端收到的信号轮廓被扩展，这种现象被称为时延扩展。最大时延扩展是指第一个到达接收天线的信号分量与最后到达的信号分量之间的时间差。时延扩展是描述多径信道特性的重要参数之一，它会引起符号间干扰(ISI)。在窄带系统中，传播损害和衰落是影响系统的主要原因;而在宽带系统中，由时延扩展引起的ISI则是影响系统的主要原因。

3.相干带宽(Coherence Bandwidth)[8]

在频域内，与时延扩展相关的另一个重要概念是相干带宽，实际应用中通常用最大时延扩展的倒数来定义相干带宽，即：

(2.1)

从频域角度观察，多径信号的时延扩展可以导致频率选择性衰落，即针对信号中不同的频率成分，无线传输信道会呈现不同的随机响应，由于信号中不同频率分量的衰落是不一致的，所以经过衰落之后，信号波形就会发生畸变。

* + 1. 频率色散特性

1.多普勒频移(Doppler Shift)

当发送端与接收端作相对运动时，接收信号的频率将会发生偏移。具体而言，两者作相向运动时，接收信号的频率将高于发射频率两者作反向运动时，接收信号的频率将低于发射频率，这种现象被称为多普勒效应。多普勒效应会产生多普勒频移，它由两个参数决定，即发送端相对于接收端作的运动方向和运动速度。

2.多普勒扩展(Doppler Spread) [8]

当移动台向入射波方向移动时，多普勒频移为正，即移动台接收到的信号频率会增加；如果背向入射波方向运动，则多普勒频移为负，即移动台接收到的信号频率会减小。由于存在多普勒频移，所以当单一频率信号到达接收端的时候，其频谱不再是位于频率轴±到达接收端的时候，其频谱不再是位于频率轴±处的单纯δ函数，而是分布在处的单纯δ函数，而是分布在内的、存在一定宽度的频谱。内的、存在一定宽度的频谱。其中f0为发送端发射时的频率，为多普勒频移。

3.相干时间 (Coherence Time)

从时域来看，与多普勒频移相关的另一个概念就是相干时间，即：

(2.2)

相干时间是信道冲激响应维持不变的时间间隔的统计平均值。如果基带信号带宽的倒数，一般指符号宽度大于无线信道的相干时间，那么信号的波形就可能会发生变化，造成信号的畸变，产生时间选择性衰落，也成为快衰落；反之，如果符号的宽度小于相干时间，则认为是非时间选择性衰落，即慢衰落。

* + 1. 角度色散特性

由于无线通信中的移动台和基站周围的环境不同，使得多天线系统中不同位置的天线经历的衰落不同，从而产生角度色散，即空间选择性衰落。角度扩展和相干距离是描述空间选择性衰落的两个主要参数。

1.角度扩展(Angle Spread)

角度扩展是用来描述空间选择性衰落的重要参数，它是由移动台或基站周围的本地散射体以及远端散射体引起的，它与角度功率谱有关。角度功率谱是信号功率谱密度在角度上的分布。研究表明，角度功率谱一般为均匀分布、截短高斯分布和截短拉普拉斯分布[7]。

2.相干距离 (Coherence direct)

相干距离是信道冲激响应保证一定相关度的空间间隔。在相干距离内，信号经历的衰落具有很大的相关性。相干距离除了与角度扩展有关外， 与接收波到达的角度也有关系。当天线的到达角相同的情况下，角度扩展越大，不同的天线接收到的信号之间的相关性就越小，信号的空间选择性衰落越严重。

表2-1对无线信道的频率选择性衰落、时间选择性衰落和空间选择性衰落进行了总结。

**表2-1:无线信道特征**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 信道选择性 | 信道扩展 | 相关度量参数 |
| 频率选择性 | 时延扩展 | 相关带宽 |
| 时间选择性 | 多普勒扩展 | 相关时间 |
| 空间选择性 | 角度扩展 | 相关距离 |

## OFDM系统的基本原理

人们采用相干时间或多普勒频移来描述信道的时变特性，采用多径时延扩展或相干带宽来描述信道的多径特性。在小于相干时间的时间范围内，可以将信道看成线性时不变的;如果信道带宽小于相干带宽，则可以认为该信道是非频率选择性信道，其所经历的衰落是平滑衰落，即所有的频率成分所经历的衰落情况相同。这样就可以得到一个简单而又较为符合实际系统的研究模型。

多载波调制的基本思想就是采用多个载波信号，将要传输的数据流分解成多个比特流，每个子数据具有低得多的传输比特流，并且用这些数据流去并行调制多个载波。OFDM就是在此基础之上，使不同的子载波相互正交，因此它具有更高的频谱利用率，其实质就是把高速率的数据流串并变换为低速率的N路并行数据流，然后用它们分别去调制N路相互正交的子载波，再将调制后的信号相加即得发射信号.由于子数据流的速率是原来的l/N，即符号周期扩大为原来的N倍，远大于信道的最大延时扩展，从而具有很强的抗多径衰落和抗脉冲干扰能力。OFDM系统收发机的框图如图2-1所示：

**图2-1： OFDM系统收发机的框图**

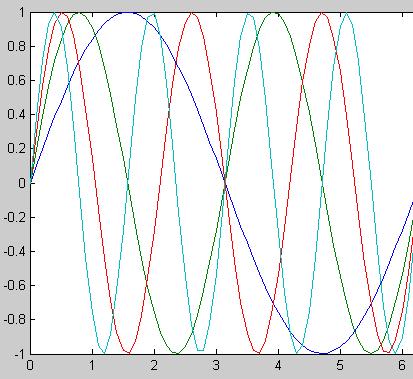
* + 1. OFDM基带模型

一个 OFDM 符号之内包括多个经过调制的子载波的合成信号，其中每个子载波都可以受到相移键控(PSK)或者正交幅度调制(QAM)符号的调制｡如果 N 表示子信道的个数，T 表示OFDM 符号的宽度，(i=0,1,…,N-1)(i=0，1，…，N-1)是分配给每个子信道的数据符号，是第是第0个子载波的载波频率，rect(t)=1，|t|≤ T/2，则从t=开始的OFDM 符号可以表示为[8]：

(2.3)

其中，s(t)的实部和虚部分别对应于OFDM符号的同相和正交分量，在实际中可以分别与相应子载波的cos分量和sin分量相乘，构成最终的OFDM符号。

各相邻子载波的正交性证明如下：



**图2-2：整数倍差周期子载波实例**

从图2-2可以看到，每个子载波的周期相差整数倍的时间,各载波函数满足以下正交函数集条件[11]：

如有n个函数构成一个函数集函数构成一个函数集，当这些函数在区间())内满足

(2.4) (2.4)式中为常数，则称此函数集为在区间())的正交函数集｡

在一个OFDM符号周期内都包含整数倍个周期，而且各个相邻子载波之间相差1个周期。这一特性可以用来解释子载波之间的正交性，对第j个子载波解调，然后在时间长度T内进行积分：

根据式(2.5)可以看到，对第j个子载波进行解调可以恢复出期望符号d，。

而对于其他载波来说，由于在积分间隔内，频率差别(i－j)/T可以产生整数倍个周期，所以其积分结果为零。

* + 1. DFT实现方法

对于N比较大的系统来说，式(2.3)中的OFDM复等效基带信号可以采用离散傅里叶逆变换(IDFT)方法来实现。为了叙述的简洁，可以令式(2.3)中的=0=0，并且忽略矩形函数，对信号s(t)以T/N的速率进行抽样，即令t=kT/N(k=0，1，…，N-1)，可以得到：

**))** (2.6)

此时，可以看到等效为对等效为对进行IDFT运算。同样在接收端，为了恢复出原始的数据符号，可以对，可以对s、进行逆变换，即DFT得到：

(2.7)

根据上述分析可以看到，OFDM系统的调制和解调可以分别由IDFT/DFT来代

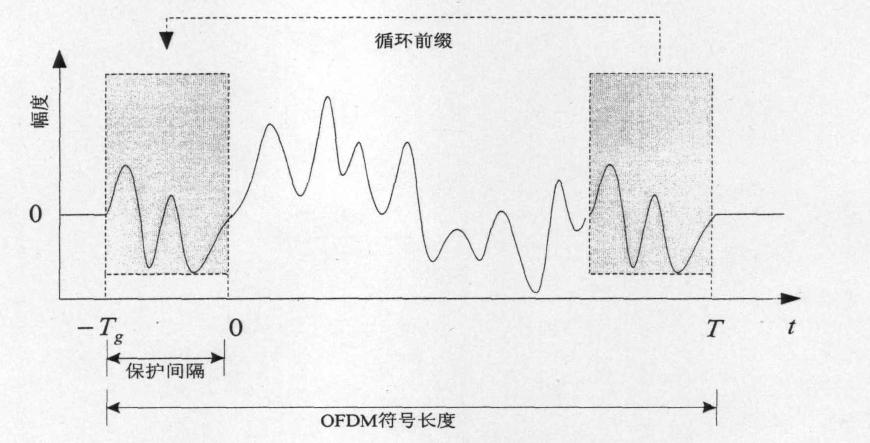
替。随着现代芯DSP芯片的技术的发展 ， OFDM系统的调制和解调得以方便地实现。

* + 1. 保护间隔和循环前缀

OFDM的最大优点是可以有效地对抗多径效应。把输入的数据流串并变换到N个并行的子信道中，使得OFDM数据符号间隔扩大到原始单载波数据符号长度N倍，因此，ISI干扰可以降低为原来l/N。

为了彻底消除多径扩展造成的ISI，一般在每个OFDM符号之前插入长度 大于无线信道的最大时延扩展几的保护间隔，大于无线信道的最大时延扩展几的保护间隔， 如此可确保每个符号的多径分量不会对相邻符号造成干扰。

过去，保护间隔时间内是没有信号输出的，但此时，子载波间的正交性就会因此而受到破坏，因此，系统中引入循环前缀可以令系统在消除ISI干扰的同时保持正交性，防止载波间干扰ICI的引入。具体实施方法是也即把OFDM符号后端的时间长度为n的一段信号如图2-3般移到原OFDM符号前端。



**图2-3 ：OFDM循环前缀的实施方法**

至此可以得出结论，如果OFDM符号周期头几长度大于等于无线信道的最大时延扩展，则可以完全克服符号间干扰ISI的影响｡加入循环前缀后的OFDM符号长度为

(2.8)

虽然循环前缀对系统造成了一定的性能损失，但这与它带来的优点相比较是完全可以接受的。

## OFDM系统主要技术

与下一代移动通信系统有关的OFDM系统的关键技术主要有以下几个方面：

* + 1. OFDM同步技朮

OFDM系统中载波同步误差都会产生ICI，而定时误差会造成ISI，所以OFDM系统在应用中要实现严格的同步，才能在无线衰落信道上表现出现有的良好性能，同步参数的估计是OFDM系统中关键技术的一个重要部分。

* + 1. 信道估计

在OFDM系统中，多导频信道估计器的设计主要包括两个问题：一是导频信息的选择。无线信道是衰落信道，需要不断对信道进行跟踪，因此，导频信息也必须不断地传送;二是复杂度较低和导频跟踪能力良好的信道估计器的设计。在实际设计中，导频信息的选择和最佳估计器的设计是相互关联的，估计器的性能与导频信息的传输方式有关。

* + 1. 均衡

在一般的衰落环境下，OFDM系统中的均衡不是有效改善系统性能的方法，因为均衡的实质是补偿多径信道引起的码间干扰，而OFDM技术本身己经利用了多径信道的分集特性，因此在一般情况下，OFDM系统就不必再做均衡。在高度散射的信道中，信道记忆长度很长，CP长度必须很长，才能够使ISI尽量不出现[12]。但是CP长度过长必然导致能量大量损失，尤其对子载波个数不是很大的系统。这时可以考虑加均衡器使CP的长度适当减小，即通过增加系统的复杂性来换取系统频带利用率的提高。

* + 1. 降低峰值平均功率比

由于OFDM信号时域上表现为万个正交子载波信号的叠加，当这N个信号恰好均以峰值点相加时，OFDM信号也将产生最大峰值，该峰值信号的功率与整个信号的平均功率之比，称为峰值平均功率比(PAPR)。尽管峰值功率出现的概率较低，但为了不失真地传输这些高PAPR的OFDM信号，发送端对高功率放大器 (HPA)的线性度要求很高且发送效率极低，接收端对前端放大器以及习D变换器的线性度要求也很高。因此，高的PAPR使得OFDM系统的性能大大下降甚至直接影响实际应用。为了解决这一问题，人们提出了信号预畸变技术、信号编码技术、选择性映射技术和部分传输序列技术等用来降低OFDM系统峰均比的方法。[13]

## 本章小结

本章主要是讨论了OFDM系统的原理。首先介绍了信号在无线衰落信道中传输时一些特性。之后介绍OFDM原理，并简要介绍了OFDM系统中的关键技术。

# OFDM系统的信道估计技术

在一般通信应用中，接收端可以采用相干解调或差分解调的方式。差分解调的最大好处是不需要利用信道信息，接收机比较简单。但正因为这样，它会比相干解调性能低3dB左右，而且差分解调不能使用多电平调制技术。因此为了获得更好的系统性能，更高的频谱利用率，通常采用相干解调。相干解调依赖于各载波上信号相位和幅度变化信息，因此需要对信道做出估计。本章首先简要介绍不同的估计技术，接着主要针对基于导频的信道估计进行分析和研究。对信道估计系统进行描述，然后介绍了典型的导频插入方式，接着对块状导频和梳状导频的信道估计进行算法的研究，再引入三种常见的信道估计算法，分析他们的特点和性能。

## OFDM系统的信道估计技术

信道估计的目的就是估计出信道的时域与频域响应，对接收到的数据进行校正与恢复，以获得相干检测的性能增益。通常的信道估计根据是否使用辅助数据，

可分为基于导频或训练序列符号的辅助信息信道估计算法和盲信道估计算法两大类。

* + 1. 基于训练序列的信道估计技术

基于训练序列的信道估计方法适用于突发传输方式的系统，通过发送已知的训练序列，在接收端进行初始的信道估计，当发送有用的信息数据，利用初始的信道估计结果进行判决更新，完成实时的信道估计。对于采用OFDM传输的系统，传输信号每帧又分为若干OFDM符号，包括训练符号和传输数据符号，其中训练序列用来估计系统的频率偏移、定时偏移以及信道参数。系统也有两种工作模式：训练模式和数据传输模式。在训练模式，系统周期性的发送训练序列，接收端根据这些参考信号对信道参数进行估计;在数据传输模式，系统利用以上估计得到的参数传输数据。

通常的训练序列由一到两个OFDM符号组成，位于每个数据帧的起始端，其导频位置如下图3-1所示：(x为训练符号，o为要传送的数据)

时 间

xooooooooooo xooooooooooo xxoooooooooo oxxoo

频 xooooooooooo xooooooooooo xxoooooooooo oxxoo

xooooooooooo xooooooooooo xxoooooooooo oxxoo

率 xooooooooooo xooooooooooo xxoooooooooo oxxoo

xooooooooooo xooooooooooo xxoooooooooo oxxoo

**图3-1：训练序列的结构示意图**

OFDM系统中基于训练序列的信道估计算法一般需要注意以下两点：

(l)训练序列是否符合正交性：系统的接收信道为各个频点发送信号的信道衰落和噪声的线性叠加，对于某个特定的接收时刻，来自于其他频点的信号即为干扰，所以采用的训练序列必须满足正交性条件，以消除相邻频点的干扰。

(2)寻找适当的直接判决信道估计算法在数据传输模式跟踪信道的变化。对于采用突发传输方式的系统，训练序列通常在每个数据帧的起始位置发送，然而无线信道往往在一帧内是变化的，因此系统通常采用把译码后的数据当作参考训练序列符号对信道重新估计的方法，从而达到跟踪信道的目的。

* + 1. 盲和半盲信道估计技术

信道盲估计是在对发送数据完全未知的情况下，利用发送数据或接收数据之间的相关性完成对信道响应值的估计，而半盲估计则是部分利用导频或训练序列得到的信息再进行处理。这种估计方法虽不占用带宽，但计算复杂，收敛速度慢，实时性差，而且需要得到较多的数据进行处理，适合于变化较慢的信道[15]。盲和半盲信道估计技术比较复杂，本文主要对基于导频符号的信道估计做出研究，因此暂对盲和半盲信道估计技术不作深入探讨。

* + 1. 基于导频符号的信道估计

基于辅助信息的估计方法是在发送端信号的某些固定位置插入一些已知的导频符号或训练序列，在接收端利用这些导频符号或训练序列按照某些算法进行信道估计。此类估计占用了系统带宽，信道跟踪速度快，容易实现[14]。

基于导频的信道估计通常要考虑三个关键问题：一是导频信号的位置安排即导频图样的选择;二是如何根据接收信号做出准确的导频信道估计，而且信道估计算法复杂度低;三是如何利用估计出的导频信道信息，经过合适的内插算法，得到数据信道的信道估计。导频图样的选择即是对导频插入方式的选择。在设计OFDM系统的导频图样时，既要让导频间隔尽量小，以保证对信道的时变性和频率选择性能够很好的跟踪，同时也要让系统不能因为过多的导频插入而造成很大

的开销。所以在实际系统的设计时，就应权衡各方面问题以求达到最合适的要求。

## 导频符号估计的插入方式

目前来说，导频插入方案可以分为两类：离散导频子载波和连续导频子载波。

其中IEEE802.16e中建议使用二维离散导频子载波，而连续导频又分为两种情况：块状导频分布和梳状导频分布[16]。如图3-2所示，左边为块状导频分布，右边为梳状导频分布，o代表数据符号，x代表导频符号。

xoooooxoooooxooooo xxxxxxxxxxxxxxxxxx

频 xoooooxoooooxooooo oooooooooooooooooo

xoooooxoooooxooooo oooooooooooooooooo

xoooooxoooooxooooo oooooooooooooooooo

率 xoooooxoooooxooooo oooooooooooooooooo

xoooooxoooooxooooo xxxxxxxxxxxxxxxxxx

块状导频 时间 梳状导频

**图3-2：导频插入图样**

在块状导频分布方式中，将连续多个OFDM符号均匀的分成M组，每组中的

第一个OFDM符号发送导频信号，而其余的OFDM符号传输数据信息，这样一次估计将利用所有子信道的信息。即导频符号在时域上均匀间隔，在频域上连续。

该方案的特点是导频符号覆盖了所有的频率，因而导频符号可以有效对抗频率选择性衰落[8]，但是对于快变信道的影响比较敏感。由于不能在所有时刻准确跟踪信道，块状导频比较适合多普勒频移相对较低的慢衰落情况。

梳状导频分布方式是将N个子信道均匀地分为M组，在每一组的第一个子信

道中传输固定的导频信号，称之为导频子信道，而其余的子载波传输信息数据。即导频符号在频域上均匀间隔，在时域上连续。与块状导频分布方式相反， 梳状导频分布由于所有时间都能跟踪信道，因此很适合于快衰落信道中应用，但由于其插入频率的不连续性，梳状导频插入不利于对抗频率选择性衰落。

当在实际应用时，应因应信道的不同特性来选取合适的导频插入方法。这样方能做出更准确和有效的估计。

## 基于导频辅助的信道估计方法

信道估计的方法会有所不同，但可采用的数学最优化准则是相同的，常用的

有最小平方 (Least square，Ls)估计准则和最小均方误差 (Minimum Mean Squared Error， MMSE)估计准则，LS准则的计算最简单，而MMSE准则的性能最好。

* + 1. 基于LS准则的信道估计算法

最小平方(LS)信道估计[17]就是从最小平方的意义上得到的信道估计算法。在不考虑噪声的条件下，估计信道的冲激响应向量：,， 使测量值和模型值之间的加权误差最小[18] 。即令

(3.1)

最小，其中，Y为OFDM符号解调后的输出信号组成的向量，是经过信道估计后得到的输出信号，是经过信道估计后得到的输出信号， ，，F是傅立叶变换矩阵：

(3.2)

其中， 。X是由基带码元映射输出的一帧信号组成的对角矩阵：

(3.3)

令式(3.1)最小，得

(3.4)

得到,，所以有

(3.5)

其中 。

LS算法简单，但由结果可以看出其不涉及到噪声N对信号的影响，从而为估计带来一定误差。为了让估计的精度提高，必须寻找一种更准确的算法，这种算法也应该把噪声考虑进去。

* + 1. 基于MMSE准则的信道估计

最小均方误差MMSE(Minimum Mean-square-Error)估计对于基于导频的OFDM系统信道估计，MMSE估计[19]比LS估计更优。

若信道估计采用均方误差准则，均方误差用表示表示：

(3.6)

线性最小均方误差准则信道估计就是要估计出使满足最小的信道传输函数满足最小的信道传输函数。。由此可以得到[19]：

(3.7)

其中是信道传输函万是信道传输函数与接收信号的互协方差矩阵， 是接收信号的自协方差矩阵， 是信道传输函数的自协方差矩阵是信道传输函数的自协方差矩阵，是噪声的方差是噪声的方差

所以频域信道响应的MMSE估计值为：

(3.8)

文献[19]表明与LS方法相比，MMSE方法有10-15dB的信噪比增益。但由(3.8)可以看出，信道估计要进行矩阵的求逆的求逆，由于在不用的在不用的OFDM符号内不同，它的逆矩阵要在每一个OFDM符号时间内更新，所以计算量较大。

* + 1. 基于LMMSE准则的信道估计

有一种减少计算量的方法[20]， 即为LMMSE算法，就是用来代替,，这样的逆不用重新计算的逆不用重新计算，在各个子信道的调制方式相同(采用相同的码元映像方式)，并且数据符号在星座图上的各点出现的概率相同时，有：

(3.9)

其中，I为单位矩阵，定义平均信噪SNR= ，由式(3.8)则可以得出以下的他简计算公式，为：

(3.10)

其中，是由调制信号的星座图决定的常量，当基带码元映射采用16QAM的星座图时，17/9。

信道估计(L)MMSE算法在进行最优化问题求解时考虑了噪声的影响，所以信道估计的均方误差较小，但相对而言较LS复杂很多，实际应用应权衡好两者利弊。

* + 1. 基于SVD分解的信道估计

前面得到了全阶MMSE估计算法，但是矩阵的运算量仍然很大，由于信道频响的频谱能量主要集中在低频部分，即主要集中在前面P阶，这里的P的选取要略大于信道最大多径时延对应的样值间隔数，因此提出了奇异值分解 (singular Value Decomposition，SVD)算法。[21]

SVD算法可以将式(3.10)做近似处理，从而再进一步减小阶数，简化运算。将信道自相关矩阵进行奇异值分解：

(3.11)

U是一个酋矩阵，A是由的特征值，所组成的对角阵，所组成的对角阵， 由MMSE算法可以进一步简化为：

(3.12)

其中△;为对角阵，其对角线上的元素为

(3.13)

SVD变换以后，信号的能量将集中在P个系数上，这样在低阶范围内进行估计，可以减小复杂度。这种低阶估计实际是基于子空间投影的，子空间越小，能量越集中，估计误差就越小。

SVD算法的好处是获得估计精度和运算复杂度间的很好的折衷。在下章的仿真中将能体现这一奌。

## 本章小结

本章主要是讨论了OFDM系统的信道估计技术。首先分别介绍了各种估计技术，之后重点研究了关于插入导频的估计方式，包括分析了块状和梳状插入导频方式的优劣，又介绍了在插入导频的估计方式利用LS准则，LMMSE准则和基于SVD分解的三种算法。

# OFDM系统信道估计仿真

本章将对之前章节中部分提及的理论以及算法通过计算机进行仿真。并通过各种比较，发现不同方法的优缺点，其中比较包括了不同信道估计方法比较，在基于导频符号的信道估计不同调制方式的信道估计比较，不同插入方式间的比较，以及各种算法之间的比较。

仿真条件及参数：系统结构为一OFDM系统， 按IEEE802·16a标准定义，使用16QAM/BPSK调制， 包含256个子载波， 符号长度为128us，每次发送50或100个OFDM符号， 信道模型Jakes，时为了消除由多径引起的符号间干扰(ISI)，系统引入了循环前缀CP，其长度为OFDM符号的1/8，为16us。最大Doppler频率为200Hz， 功率延迟谱服从负指数分布~exp(-t/trms)，trms=(1/4)\*cp时长，具体仿真框图如图4-1：

**图4-1 ：OFDM仿真框图**

## 不同情况下的各种信道估计方法比较

在以下仿真中，我们尝试在多径和非多径情况下比较插入导频，训练符号和不作估计三种情况，观察它们的BER情况。

仿真参数： 按IEEE802·16a标准定义，使用16QAM调制， 256个子载波， 每次发送50个OFDM符号，利用训练符号估计时训练符号数4行X128个，插入导频时为块状插入，两导频间隔为5，两种估计方法均采用(有的话)LS估计。静态，多径时为4径。

G:\我的文檔\My eBooks\論文\OFDM圖\新建文件夹 (2)\多径情况下插入导频,训练符号及不作估计方式比较.emf

**图4-2：多径衰落情况下插入导频，训练符号及不作估计方式比较**

仿真表明，多径衰落情况下，信道估计的作用得以发挥，但利用训练符号估计的方法不如理想，这是因为训练符号估计的方法难以适应多径情况较严重的信道。可见，训练符号估计的方法单独作为此类信道的办法并不理想，通常应配合其他算法(如Kalman滤波算法，半盲估计算法等)，作提供前导信息之用。

## 基于导频符号的信道估计仿真

以下仿真多针对于利用插入导频符号的方法来进行仿真，首先比较不同调制方式下的信道估计，再而检证块状和梳状导频两种插入方法各自适用的范围，取后对基于导频符号信道估计的不用算法做出比较。

* + 1. 不同调制方式下的信道估计仿真

当前研究较多并被建议用于数字移动通信中的一种QAM信号是十六进制的正交振幅调制(16QAM)信号。16QAM也是OFDM系统中常用的调制方式，因为形状规范，有一定规则，编码效率高。有时也常用4QAM和QPSK两种调制方式，选用调制方式时重点是要考虑其误码率性能，为了比较几种调制方式的误码率性能，选用仿真工具进行仿真分析。

仿真参数： 按IEEE802·16a标准定义，256个子载波， 每次发送50个OFDM符号，插入导频时为块状插入，以LS准则估计，两导频间隔为5。静态，多径时为4径。

H:\Program Files\MATLAB71\work\复件 my matlab\非多径情况下BPSK,4QAM和16QAM调制方式的比较.emf

**图4-3：非多径情况下三种调制方式比较**

H:\Program Files\MATLAB71\work\复件 my matlab\多径情况下BPSK,4QAM和16QAM调制方式的比较.emf

**图4-4：多径情况下三种调制方式比较**

由以上仿真图可见，一般情况下码距越大的调制，误码性能越好，16 QAM调制的误码率性能尚比不上4QAM调制和BPSK调制。但16QAM调制方式下的频带利用率最高。因此，在频带受限系统中，它也是一种很有发展前途的调制方式。4QAM调制方式性介乎于BPSK调制和16QAM调制之间，频带利用率亦然。各项参数均是相同的情况下，信号调制采用4QAM的效果比较佳。

* + 1. 块状和梳状的导频插入方式的比较

为了比较块状和梳状的导频插入方式各在什么环境下有更好性能，等仿真慢衰落和快衰落信道，做出如下仿真：

仿真参数： 按IEEE802·16a标准定义，使用16QAM调制， 256个子载波， 每次发送100个OFDM符号， 梳状和块状插入导频间隔皆为5，内插方式采用了线性内插法，采用估计(有的话)为LS准则估计。信道模型为JAKE。多径时为4径。慢衰落情况下最大多普勒频移为0，快衰落情况最大多多普勒频为200Hz。

G:\我的文檔\My eBooks\論文\OFDM圖\新建文件夹 (2)\慢衰落情況下和梳比較.emf

**图4-5：慢衰落情况下块状及梳状导频插入方式的比较(LS准则)**

G:\我的文檔\My eBooks\論文\OFDM圖\新建文件夹 (2)\快衰落信道时块状和梳状的导频插入方式的比较.emf

**图4-6：快衰落情况下块状及梳状导频插入方式的比较(LS准则)**

从仿真可以看出，在多径情况下，慢衰落信道中，线性内插法的块状的插入方式比线性内插法的梳状方式性能更好，这是由于块状的插入方式能在每个频率点都有导频，更有利于应付多径衰落差生的干扰。而当信道是快衰落信道时，线性内插法的梳状插入方式由于能在每个时间点估计情况，更能适应这类快速变化的信道。在实际中，应该跟据不同情况，了解多径衰落情况和信道变化情况哪个更严重而采取相应的插入方式。

* + 1. 不同准则的信道估计算法的比较

为测试不同准则的信道估计算法的性能，下面给出的信道多径时变信道模型，仿真参数： 使用16QAM调制，256个子载波，每次发送50个OFDM符号，块状插入。导频间隔为5，信道模型为JAKE，4径。最大多普勒频为200Hz。

H:\Program Files\MATLAB71\work\复件 my matlab\多径情况下三种估计算法的比较.emf

**图4-7：多径情况下三种估计算法的比较**

从图可以看出， LS算法的误差性能虽然最差的，但在保证一定误差性能的条件下，它实现复杂度很低，具有很高的实用性。LMMSE估计算法考虑了噪声的影响， 误差性能要比LS好，能做出较精确的对信道参数做出估计。而SVD分解算法性能与LMMSE算法效果相近。

跟据文献[8]，LS算法复杂度最低，LMMSE算法复杂度最高，而SVD分解介乎于两者之间。结合仿真结果可见，SVD分解综合效果较好，能在复杂度较低的情况下取得很好的误差性能。

## 本章小结

本章通过计算机仿真对OFDM系统中的不同估计方法，不同调制方式，不同插入方法式及不同算法间进行比较。首先比较了插入训练符号和插入导频及没有估计情况下的误差性能，体现了信道做出了比较后在误差性能上的优势。之后比较BPSK、4QAM和16QAM三种调制方式对估计的影响。表明了一般情况下码距越大的调制，误码性能越好。然后比较了块状和梳状两种导频插入方式哪个更适合于特定的信道环境，验证了块状插入方式更适合应付多径衰落信道，梳状插入方式更适合应付快衰落信道的理论。最后对LS、LMMSE、SVD分解三种估计性能做出比较和分析，表明LMMSE算法估计误差性能最好，SVD其次，LS算法精度最低。

# 结论

## 总结

信道估计主要研究无线信道对传输信号的影响，是OFDM系统的关键技术之一。本文主要研究无线信道下的OFDM技术及信道估计方法，并利用MATLAB软件进行计算机仿真，得到如下工作总结：

1. 对OFDM技术的要等点和估计技术的发展做出概括性的介绍。

2. 分析了OFDM系统和无线信道的特性，介绍了无线信道的衰落信道。对无线多径信道做出分析，之后再分析了OFDM的基本原理，其中包括分析OFDM基带模型，DFT实现方法及插入保护间隔等。

3. 介绍了OFDM信道估计中的不同估计方法。之后重点研究基于导频符号的信道估计，深入分析其中的不同的插入导频方式，再对基于LS，MMSE和SVD分解三种算法深入研究。

4.利用MATLAB进行了计算机仿真各种比较分析，包括不同调制方式下的性能比较，发现一般情况下码距越大，误码性能越好，但频带利用率则较低;在基于导频估计时梳状和块状插入方式的性能比较中，验证了梳状插入方法在快衰落信道更具优势，而慢衰落信道则较适合块状的插入方法;最后对基于LS，MMSE和SVD分解三种算法下的性能比较，表明LS算法误差性能差但复杂度低，LMMSE则相后，而SVD算法的效果在他们之间。

## 展望

由于时间和精力的限制，与文中内容相关的还有许多问题有待深入研究，作者认为下一步尚待研究的问题有：

1. 由于本文所搭建的OFDM系统在训练符号插入的方法中结构比较简单，

未有把新得到的数据当作参考训练序列符号对信道重新估计，因此未能最大地达到跟踪信道的目的，所以整个方法的误码率比较高，下一步的工作将是利用新数据的信息再进行估计，提高估计方法的误码性能。得出更准确的比较。

2．本文中所讨论的自适应均衡算法MMSE算法性能虽然比算法性能好，但是复杂度高。如何进一步减低此算法的复杂度而又保留其误码率性能较佳将成为需要进一步研究的课题。

3.本文在多径衰落是只用了符合指数衰落数值作为系数，要做出更真实的仿真，下一步工作将会是仿真符合瑞利分布的数值作为多径信道的系数。

4.由于时间较为有限，本文未能深入探讨盲估计和半盲估计方法，下一步工作将是理解好相关理论，并仿真出该方法，做出更多样的比较。

5．本文采用的均衡算法都是在单输入单输出(SISO)的OFDM系统模型下进行分析和仿真的。而未来通信发展趋势必将向着多输入多输出的OFDM系统(MIMO-OFDM)发展，所以针对MIMO-OFDM系统的特性提出简单而有效的信道估计方案也是有待研究的课题。

# 参考文献

1. R. W. Chang, Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission, Bell system Technology, 13(2)：1775-1796, 1996
2. M. Luise and R.Reggiannini. , Carrier frequency recovery in all- digital modems for burst-mode transmissions, IEEE Transaction on Communications, 43(2)：1169-1178,1995
3. Verdu S. , Wireless bandwidth in the making. IEEE Communication Magazine, 38(7)：237-244,2002
4. Jeffrey J.P. , Communications era： IM-T2000 and beyond .10th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC,99).Proceedings：10(1),1,1999
5. 樊昌信、詹道庸等，通信原理 ，第四版，北京：国防工业出版社 ，1995
6. 吴伟陵、牛凯 ，移动通信原理 ，电子工业出版社，2005
7. 杨大成等，移动传播环境，机械工业出版社，2003
8. [佟学俭、罗涛](http://202.116.64.98/dlib/netlinkhandler.asp?lang=gb&DocGroupID=2&FieldID=3&FieldName=Creator&FieldType=1&QueryValue=%D9%A1%D1%A7%BC%F3%A3%AC%C2%DE%CC%CE&Repeatable=True)，OFDM移动通信技术原理与应用，[人民邮电出版社](http://202.116.64.98/dlib/netlinkhandler.asp?lang=gb&DocGroupID=2&FieldID=8&FieldName=Publisher&FieldType=1&QueryValue=%C8%CB%C3%F1%D3%CA%B5%E7%B3%F6%B0%E6%C9%E7&Repeatable=True)，2003
9. Eric Phillip LAWREY BE (Honors), Adaptive Techniques for Multiuser OFDM, 436-450, 2001
10. 李仲令、李少谦 、唐友喜 、武刚，现代无线与移动通信技术，北京：科学出版社，2006
11. 吴大正、杨林耀 、张永瑞 、王松林 、郭宝龙，信号与线性系统分析，高等教育出版社，2005
12. Saberinia, E, A.H. Tewtik. , pulsed and Non-pulsed OFDM Ultra Wideband Wireless Personal Aiea Networks, IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, 2003
13. 龙自强，无线通信OFDM系统中的信道均衡技术研究，汕头大学工学院2007届硕士学位论文，15-22，2007
14. 马新，OFDM中的信道估计与均衡，解放军信息工程大学硕士学位论文，25-27，2003
15. 周瑞，郑建宏 ，基于子空间分解的半盲信道估计，通信技术，08(09)：123-124,2008
16. R.NEGI, J.CIOFFI, Pilot tone selection for channel estimation in a mobile OFDM system. IEEE Transactions on Consumer Electronics,16(8)： 205-216, 1998
17. J-J. Van de Beek, 0.Edfors, M.Sandell, S.K. Wilson, P.O. Borjesson, On Channel Estimation in OFDM systems, in Proc. IEEE 45th VTC, Chicago, USA, 59(17)： 60-68, 1995
18. Louis L.Scharf, Statistical Signal Processing, Addison-Wesley Publishing Company, 179-186, 1991.
19. Jan Jap van de Beek, 0. Edfors, M. Sandal, S.K. Wilson, P.0.Barjesson, On channel estimation in OFDM systems, IEEE 43th Vehicular Technology Conference, IEEE Transactions, 16(3)：763-767, 1995
20. Athaudage, C.R.N. Javalath, A.D.S. ,Enhanced MMSE channel estimation using timing Error statistics for wireless OFDM systems. Broadcasting, IEEE Transactions, 50(4),150-163, 2004
21. O.Edfors, M. Sandell, J-J. Van de Beek, S.K. Wilson ,OFDM channel estimation by Singular value decomposition, In Proc. IEEE 46th vehicular Tech. conference, Atlanta, GA, USA, 9(6)：923-927, 1996