

学校编码：10384

密级

学号：19820071152311

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于期望最大化算法的 OFDM 系统
信道估计

Channel estimation of OFDM system with Expectation
Maximization Algorithm

苏 功 勋

指导教师姓名： 黄文达 教授

专 业 名 称： 电磁场与微波技术

论文提交日期： 2010 年 5 月

论文答辩日期： 2010 年 6 月

2010 年 5 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（）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

摘 要

OFDM 是一种具有诸多优点的通信技术，它正被逐渐应用于各种高速通信系统中，并且它已经被确认为第四代移动通信系统（4G）中的核心技术。OFDM 通信系统具有传输速率快，频谱利用率高，能有效对抗无线信道多径传输和时延扩展的优点，因此在新一代的通信系统中具有非常广泛的应用前景。在移动通信过程中，由于存在多径传输，多普勒效应，以及噪声的影响，信道具有复杂多变的特性，因此，对移动通信信道特性的准确估计也就成了关系到最终通信系统性能的关键因素。通信质量的提高有赖于对无线信道传输特性估计的精确度。作为新一代的通信系统，在 OFDM 中，信道估计自然也是其整个通信过程的一个重要环节。对于信道估计，通常有盲估计和半盲估计两种方式，传统意义上的半盲估计都是基于导频信息和插值技术来对信道进行估计的，它们虽然是传统通信系统的主要信道估计方法，却难以匹配新的通信系统的发展要求。对于 OFDM 通信系统，采用更加高性能的信道估计方法才能使它在新一代通信中充分展示自身的优势。正是基于此，本文探讨了期望最大化（EM）算法在 OFDM 系统信道估计中的应用。我们首先介绍了 OFDM 系统的原理，同时对无线信道的特性进行了分析，并对传统的信道估计方法进行了解进而提出了将 EM 算法应用于 OFDM 通信系统信道估计。通过仿真实验对比显示，相较于传统信道估计方法而言，EM 信道估计算法展示了良好的性能，因此，可以为 OFDM 通信系统的信道估计方法提供一种新的选择。

关键词：OFDM，信道估计，期望最大化算法

Abstract

As a new communication technology with much advantage, OFDM has been used in several new high-speed communication systems, and it has been applied as the core technology in the fourth generation mobile communication system. OFDM system can be fast-rate, high-spectrum-efficiency and can weak the effect of multi-path transmission delay. As that it has wide application prospects. Meanwhile, because of the multi-path transmission, Doppler effect and noises, the wireless communication channel's properties is complex, therefore the accurate estimation of the wireless communication channel is the key point to a good final system performance. The enhancement of the communication quality depends on the accuracy of the transmission property's estimation of the wireless communication channel. Channel estimation has been an important part of OFDM system. Blind estimation and semi-blind estimation has been two traditional ways in channel estimation. The semi-blind channel estimation works with the pilot information and interpolation techniques, however the traditional method can't meet the requirement of new advanced communication system. So the OFDM system should apply some new channel estimation technique to enhance the performance of itself. As that, in this paper we have discussed the application of expectation maximization algorithm in OFDM system. We firstly introduce the OFDM system and analyze the characteristics of the wireless channel, then research the traditional channel estimation method and apply the EM algorithm in OFDM communication system. As simulation results show, compared to the traditional channel estimation method, EM channel estimation algorithm give much better performance, so it can be a new choice for channel estimation in OFDM system.

Key words: OFDM, channel estimation, expectation maximum algorithm

目 录

第一章 绪论	1
1.1 移动通信	1
1.2 第四代移动通信技术	4
1.2.1 4G 系统中的关键技术	5
1.2.2 4G 的主要优势	6
1.3 OFDM 技术	8
1.3.1 OFDM 的发展历程	8
1.3.2 OFDM 系统中的信道估计	11
1.4 本论文的研究内容安排	11
第二章 OFDM 系统的基本原理	13
2.1 OFDM 的基本原理	13
2.2 OFDM 的基本实现过程	15
2.3 OFDM 的 DFT 实现	16
2.4 循环前缀	18
2.5 OFDM 信道估计	19
2.6 本章小结	19
第三章 无线信道	20
3.1 无线信道的容量	20
3.1.1 离散信道的信道容量	21
3.1.2 连续信道的信道容量	22
3.1.3 矢量信道的信道容量	23
3.2 无线信道的大尺度衰落	25
3.2.1 阴影衰落	25
3.3 无线信道的小尺度衰落	26
3.3.1 无线信道的时变性及多普勒频移	27
3.4 多径信道模型	29
3.4.1 瑞利 (Rayleigh) 衰落	30
3.4.2 莱斯 (Ricean) 分布	30
3.5 信道的建模	31
3.5.1 Jakes 模型	31
3.5.2 Clarke 信道模型	32
3.6 本章总结	34
第四章 OFDM 信道估计	35
4.1 信道估计算法	35
4.2 半盲信道估计中的导频	36
4.3 导频处信道估计	38
4.3.1 LS 信道估计	39

4.3.2 MMSE 信道估计	39
4.4 数据点处的信道估计	41
4.4.1 常数内插	41
4.4.2 线性内插	42
4.4.3 变换域滤波算法	42
4.4.4 GAUSS 插值法	43
4.4.5 二维维纳滤波法	44
4.5 本章小结	45
第五章 基于期望最大化 (EM) 算法的信道估计	46
5.1 EM 算法原理	46
5.2 基于 EM 算法的 OFDM 信道估计	47
5.3 实验仿真	49
5.4 本章小结	53
第六章 论文总结	54
参考文献:	55
致谢	59
攻读硕士学位期间的科研成果	60

Content

Chapter 1 Preface.....	1
1.1 Mobile communication	1
1.2 The forth mobile communication technique.....	4
1.2.1 Key technique in 4G system.....	5
1.2.2 The advantages of 4G.....	6
1.3 OFDM	8
1.3.1 The development of OFDM.....	8
1.3.2 Channel estimation in OFDM.....	11
1.4 Structure of thesis	11
Chapter 2 OFDM system.....	13
2.1 Basic principle of OFDM.....	13
2.2 The process of OFDM.....	15
2.3 OFDM's DFT realization	16
2.4 Cyclic prefix.....	18
2.5 Channel estimation of OFDM	19
2.6 Chapter summary	19
Chapter 3 Wireless channel.....	20
3.1 Capacity of wireless channel.....	20
3.1.1 Capacity of discrete channel.....	21
3.1.2 Capacity of continuous channel.....	22
3.1.3 Capacity of vector channel	23
3.2 Large-scale fading of wireless channel.....	25
3.2.1 Shadow fading	25
3.3 Small-scale fading of wireless channel	26
3.3.1 Time-varying of wireless channel.....	27
3.4 Model of multi-path channel	28
3.4.1 Rayleigh fading.....	30
3.4.2 Ricean fading	30
3.5 Modeling of channel.....	31
3.5.1 Jakes channel model.....	31
3.5.2 Clarke channel model.....	32
3.6 Chapter summary	34
Chapter 4 OFDM channel estimation.....	35
4.1 Channel estimation algorithm	35
4.2 Pilot in semi-blind channel estimation	36
4.3 Channel estimation at pilots	38
4.3.1 LS channel estimation	39

4.3.2 MMSE channel estimation	40
4.4 Channel estimation at data points	41
4.4.1 Constant internal interpolation	41
4.4.2 Linear internal interpolation	42
4.4.3 Domain-transform filtering	42
4.4.4 GAUSS interpolation	43
4.4.5 2-D Winer filter	44
4.5 Chapter summary	45
Chapter 5 Channel estimation with EM algorithm	46
5.1 Principle of EM algorithm	46
5.2 Channel estimation with EM algorithm in OFDM	47
5.3 Simulation	49
5.4 Chapter summary	53
Chapter 6 Summary and prospect	54
References	55
Acknowledgement	59
Publications	60

第一章 绪论

在当今信息时代，日新月异的通信技术已成为推动人类社会发展的
重要力量，同时它也是人类社会进步的标志之一。现代化的通信技术不仅
带来了我们整个社会生产效率的提高，同时让我们的生活方式产生了革命
性的变化。通信像一条纽带将我们联系在一个信息世界中，通过这条纽带，
我们得以更加便捷地获取和共享信息，视野得以扩展，知识得以增长，沟
通得以迅捷。信息技术的发展改变着我们认识这个世界的方式。通信技术
一直处于一种持续性发展之中，在通信技术的进步促进了社会发展的同
时，社会的发展也不断地向通信提出了新的要求，促进着通信技术的进一
步发展。时代的进步激励着我们对通信技术进行不断的升华。大容量，高
质量，多样化的通信服务是通信技术革新所要朝向的目标。

移动通信在现代通信服务中占据着重要的地位，因其不受地域约束的
特点，以及随着移动通信终端和服务资费的下降，而越来越被人们选为主
要的通信方式，在通信服务中占据了越来越大的份额。可以预计，移动通
信方式在今后将进一步地占据主导地位，移动通信也将不断地承担新的通
信业务。各种新兴业务要求移动通信系统具有更大的容量，更高的质量和
更好的兼容性，而这些都有赖于我们对移动通信技术的改进和革新^{[1][2]}。

OFDM（正交频分复用）技术作为一项具有传输速率高，抗干扰能力强，频
谱利用率高等诸多优点的通信技术为移动通信的进一步发展提供了一种
很好的选择，而实际上，它已经被确认为第四代移动通信系统（4G）物理
层的核心技术^[6]，因此对 OFDM 技术的进一步深入探讨研究，以提高其性能
将是非常具有价值的。

1.1 移动通信^{[1][2][3]}

如今，移动通信已成为人们的生活中越来越密不可分的一项技术。与

有线通信方式相比，移动通信让我们能够随时随地进行通信，体现了更多的便捷性，它使我们进入了个人通信时代。

1897年，马可尼完成了在一固定点和一艘拖船之间的无线通信实验，距离约为33km。拉开了无线通信研究的序幕。1901年他又研究出可用于较长距离传输无线电波的设备，实现了横跨大西洋——从英格兰到加拿大之间的无线电波传输。20世纪20年代美国所使用的警用通信系统是最早期的移动通信系统，到20世纪40年代出现了公共移动电话系统，但在当时由于受到微电子技术、传输技术频谱利用率低和设备复杂等条件的限制，移动通信一直发展缓慢。一直到20世纪60年代，贝尔实验室提出了蜂窝组网概念，实现了频率复用，才使频谱利用率得以较大提高。1978年年底，贝尔实验室成功研制了高级移动电话系统（AMPS）。与此同时，其它发达国家也相继开发出蜂窝式公用移动通信网，从而诞生了第一代移动通信系统，在第一代移动通信系统中采用的是频分多址和模拟通信技术。

自20世纪80年代初开始，移动通信便进入了一个快步发展的时代。1981年，北欧移动电话系统（NMT）成为全球第一个模拟蜂窝通信系统，之后在1983年美国建立了高级移动电话服务（AMPS）。第一代移动通信系统采用800~900MHz的频段和频分多址技术。但是由于系统采用的是模拟技术，从而系统表现为易受干扰影响，传输速率低，并且容量小，保密性差。

20世纪80年代末，随着欧洲的全球移动通信系统（GSM）和北美的窄带码分多址蜂窝移动通信系统（IS-95）的出现，逐渐形成了第二代数字蜂窝移动通信系统（2G）。其中GSM使用频率为上行890~915MHz，下行935~960MHz，双工间隔为45MHz，载频间隔为1.25MHz，相邻小区可以采用相同的频率，频率复用因子为1。由于采用了数字信号处理技术，与第一代模拟蜂窝系统相比，第二代移动通信系统的抗干扰能力，覆盖区域内的通信质量，系统容量以及安全性都得以大大的提高。

第三代移动通信（3G）的前身是未来公用陆地通信系统（FPLMTS），它是由国际电联于1985年开始研制的，并且于1996年制订了相关标准。IMT-2000（International Mobile Telecommunication）系统也是一种

第三代移动通信系统，它工作在 2GHz 频段，在 2000 年它被正式商用。相对于传统的移动通信，国际电联 ITU 对第三代移动通信的传输技术是有相关技术标准的。首先在通信速率方面，分为高速和低速两种情况，在高速移动环境下，它要求最高速率要能达到 144kb/s，而在非高速移动环境，如室内或步行环境，其最低通信速率要求能够达到 384kb/s，最高要能达到 2Mb/s。第三代移动通信系统以 CDMA 技术为其核心技术，目前主要的三大标准为 WCDMA、CDMA2000 和 TD-SCDMA，其中 TD-SCDMA 是我国自主提出的 3G 标准，于 2000 年 5 月被列为国际 3G 标准之一。与第二代移动通信相比，第三代移动通信的主要进步之一在于其对数据和多媒体等新兴中高速业务的支持，为顺应时代的发展，目前一些发达国际已将投资重点转移到第三代移动通信上来，大力推进 3G 的发展。其中在欧洲北美等大部分国家及部分亚洲国家，WCDMA 和 CDMA2000 皆已实现商用。同时，3G 在我国也已开始了商业运营阶段。

移动通信系统所提供的业务也随着技术的发展而不断升华，其用户数也是一个不断增多的过程。80 年代，笨重的只能提供语音通话功能的“大哥大”被视为奢侈品，只有少数人才用得起。而现在，手机几乎得以普及，成为人们日常的必备用品。第一代移动通信由于资费昂贵且容量有限，较大程度上限制了其发展，另外，第一代移动通信也只提供单一的语音服务。随着微电子和信号处理技术的不断发展，移动通信系统发生了根本性的变化，逐步出现了以 TDMA（GSM 系统）和 CDMA（IS-95）为多址方案第二代移动通信，移动终端价格和通信资费的不断下降，加上移动终端小型化和移动业务的多样化，使得移动通信得到迅猛发展，并大大超过固定通信的发展速度。随着技术的发展，到第三代移动通信，人们对移动通信业务的要求已由简单的语音和短信通信服务扩展到数据业务和多媒体业务。提供多样化的业务服务，是通信系统发展的目标，也是通信技术去的不断进步的推动力。人们对移动通信服务的新要求将促进着移动通信技术的不断发展。

虽然相对于第二代移动通信系统，第三代移动通信系统在技术服务各方面已取得很大的进步，但是 3G 也有其技术上的局限性。对多径干扰的

敏感便是其主要的局限性之一。同时，由于 3G 系统以 CDMA 为多址技术，本身是干扰受限系统，它对高速业务的支持是有局限性的。因为在采用 CDMA 技术的小区中，高速用户的通信会对低速业务用户的通信质量产生干扰，这便限制了 CDMA 系统中高速业务的使用。而这一局限性可以在第四代移动通信系统（4G）中得以解决，第四代移动通信系统以 OFDM（正交频分复用）技术为核心，传输速率更快，抗干扰能力更强，能够提供更高质量的数据、多媒体以及其它新业务，代表着移动通信发展的新方向。

1.2 第四代移动通信技术^{[4][5][6]}

2010 年 4 月 15 日，准 4G 演示网 TD-LTE 在上海世博园开通。在现场的实测中，TD-LTE 的最高下载速率峰值可达到 28Mbps，是目前 TD 3G 网络的 10 倍左右。TD-LTE 是由我国自主研发并投入使用的 3G 标准 TD-SCDMA 的后续演进。目前，TD-LTE 已被国际电联接纳为 4G 候选国际标准之一。据有关专家表示，我国的 TD-LTE 技术入选全球 4G 的胜算为 70%。

2010 年 4 月 21 日，在“2010 无线通信应用（国际）研讨会”上，我国相关管理部门表示，我国 4G 频谱规划正在进行中，并初步确定能够为 4G 分配从 1900MHz 到 2010MHz 共 190M 带宽的频谱资源。

在国际电联（ITU）为 4G 制定了明确目标之后，全球很多国家都加快了对 4G 的研究。爱立信联手加利福尼亚大学，着手研制第四代移动通信系统，爱立信公司预计 4G 将会在 2011 年正式投入运营。对于 4G 的研究，日本和韩国也投入了很大的力量，日本于 2002 年成立了移动 IT 论坛，并吸纳了其国内各主要电气公司的加入，同时日本政府也已经确定了 4G 使用的频谱。韩国情报通信部也将第四代移动通信技术列为政府研究开发课题。

IEEE 于 2002 年底成立了 IEEE802.20 标准化项目并致力于建立一个移动宽带无线接入（MBWA）标准。AT&T 之后演示了被称为 4G 接入网的一个非对称网络，在该网络中，上行信道采用 EDGE 技术，下行信道采用宽带 OFDM 技术。

作为下一代的移动通信技术，4G 已经得到全球很多国家的重视。相信在各个通信发达国家的共同努力下，4G 走向实际应用将离我们越来越近。那么，4G 具有那些特点及技术上的优势，在下文中，我们就第四代移动通信技术的优点及其关键技术作具体阐述。

4G 移动系统网络结构可分为三层：物理层，中间层，应用层。物理层主要完成接入及路由选择的功能，它们由无线和核心网的结合格式完成。中间环境层主要完成 QoS 映射、地址转换和安全性管理等。物理网络层及中间环境层之间的开放性接口使得新的应用和服务的发展相对于传统的移动通信系统来说会更为容易，它能提供无缝高速率的无线服务，并运行多个频带。这一服务能自适应多个无线标准及多模终端能力，跨越多个运营商和服务，提供大范围服务。

1.2.1 4G 系统中的关键技术^{[6][7]}

(1) 正交频分复用技术 (OFDM)

OFDM 作为第四代移动通信系统物理层的核心技术，在 4G 系统中扮演着重要的角色。而 OFDM 技术正是本文将要研究的重点。

(2) 软件无线电技术 (SDR)

软件无线电作为一项通信新概念和技术于 20 世纪 90 年代被提出。它的基本理念是把硬件作为无线通信的基本平台，并把尽可能多的无线和个人通信功能用软件来实现。它的核心观念是构造一个开放性、标准化、模块化的通用数字硬件平台，并通过实时的软件控制来实现各种无线电系统的通信功能，同时使数模转换单元尽可能接近射频天线要求，使得基带移动到中频，对整个系统频带采样。软件无线电可被看做是继模拟通信到数字通信、固定通信到移动通信之后的通信领域的又一重大突破。

(3) 智能天线 (SA) 技术

智能天线能够自适应地根据不同环境和应用要求，动态调整接收和发射功率方向特性，达到性能优化的目的。它是通过对多个天线组阵，对各单元天线馈电信号进行组合处理来实现以上功能的。智能天线可被定义为波束间没有切换的多波束或自适应阵列天线。智能天线成形波束可在空间

域内抑制交互干扰，增强目的信号，达到改善信号质量和增加传输容量的目的。并且，智能天线还能够扩大覆盖范围、提高链路质量和可靠性、提高频谱利用率。在军事领域内，智能天线可以应对复杂电磁环境中的干扰等技术问题。

(4) 多输入多输出 (MIMO) 技术

MIMO 技术也即多输入多输出技术是近来通信领域研究应用的热点技术。它在发送端和接收端采用多天线可为系统提供空间复用增益和空间分集增益。其中，空间复用是在接收端和发射端使用多副天线，利用多径分量，在同一频带内使用多个子信道传送信号，是容量随天线数量增加而增加。空间分集可被分为发射分集和接收分集两类。可使系统获得分集增益已经成为 MIMO 技术的一个重要优势。通过 MIMO 技术，无线信道的频谱利用率能够得到显著提高，信道性能能够得到明显改善，系统的容量和覆盖范围也能得到很大提高。

(5) 核心网基于 IP

与传统的移动通信系统不同的是，4G 系统的核心网是一个基于全 IP 的网络，正因为如此，它能够实现不同网络间的无缝互联。核心网得以与各种具体无线接入方案独立开来，提供端到端的 IP 业务，并能与已有的核心网 (CN) 和公共交换电话网络 (PSTN) 兼容。核心网具有开放的结构，能允许各种空中接口接入核心网，同时核心网可以把业务、控制、和传输等分开。同时，在 4G 通信系统中，将主要采用全分组方式 IPv6 技术。

1.2.2 4G 的主要优势

对于通信的发展历程来说，与 2G 到 3G 的演进式发展相比，4G 可谓是实现了跨越式的发展。它所取得的进步是非常显著的。4G 移动通信系统的主要优点有：

(1) 更快的传输速率

传输速率的显著提高是我们对 4G 系统优越性的最直观的认识。作为目前正在应用的 3G 移动通信系统，它的最高通信速率一般可以达到 2Mbps，

而 4G 通信系统可以达到 20Mbps, 甚至最高可达到 100Mbps 的速率。这种跨越式的发展让我们对未来的高速通信充满了憧憬。

(2) 智能化性能的提高

第四代移动通信将具有更强的智能性, 这不仅体现在通信终端设备的设计和操作方面, 更体现在它所能提供的功能应用和业务方面。在 4G 通信时代, 我们将能享用到超乎往常想象的功能。智能化的应用将为我们的工作和生活带来极大的便利和更加丰富的内容。

(3) 兼容性强

第四代移动通信系统具有很强的兼容性, 它能在现有通信的基础上, 以很少的投资便可实现到 4G 通信系统的过渡。较强的兼容性, 为 4G 系统的正式运用铺平了道路。

(4) 通信更加灵活

语音的传送将只是 4G 移动通信的很小一个部分的功能应用, 对于未来的 4G 通信终端, 我们更应该把它看做是一个小型电脑。并且它在外观和式样的设计上将有很大突破, 在将来, 眼镜、手表、化妆盒、旅游鞋, 以方便和个性为前提, 任何一样能够看到的物品皆有可能成为 4G 终端。4G 通信将能够使人们得以随时随地与信息世界保持高速连通。

(5) 实现更高质量的多媒体通信

与 3G 系统所能实现的各种多媒体通信相比, 4G 移动通信系统将能够实现 3G 尚不能达到的覆盖范围、通信质量、造价上支持的高速数据和高分辨率多媒体服务的需要。第四代移动通信系统能够提供无线多媒体服务, 包括语音、数据、影像等大量信息通过宽频信道进行传送, 因此, 第四代移动通信也被称之为多媒体移动通信。

(6) 较高频谱利用率和抗干扰能力

3G 所采用的核心技术是码分多址接入技术, 而 4G 采用的正交频分复用 (OFDM) 技术。与 3G 通信系统相比, 4G 通信系统具有更高的频谱利用率及更好的抗干扰能力。

(7) 具有更好的功率控制能力

4G 在功率控制方面比 3G 要更加的严格, 从而可以满足高速通信的要

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