

# 基于LTE上行的改进LMMSE信道估计算法

张欣<sup>1</sup>, 彭端<sup>2</sup>, 张子杰<sup>1</sup>, 刘高星<sup>1</sup>

(1. 广东工业大学信息工程学院, 广东广州 510006;

2. 广东工业大学实验教学部, 广东广州 510006)

**摘要:**对于无线通信系统来说,无线信道直接影响着其性能的好坏。然而无线信道具有随机性,为了在接收端准确恢复发射端的发送信号,这就需要对信道进行估计。LTE采用SC-FDMA作为上行多址方式,与OFDM相比,SC-FDMA一个突出的优势就是具有较低的峰均比(PAPR, Peak-to-Average Power Ratio)。文中介绍了SC-FDMA系统中基于导频的信道估计LS算法和LMMSE算法,通过提出一个优化的导频结构以及运用傅里叶变换,得到一种改进的LMMSE算法。仿真结果表明,这种改进的LMMSE算法具有较低的计算复杂度和良好的性能。

**关键词:**SC-FDMA;信道估计;LMMSE算法

**中图分类号:**TP301.6

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2012)06-0097-03

## An Improved LMMSE Channel Estimation Algorithm for LTE Uplink

ZHANG Xin<sup>1</sup>, PENG Duan<sup>2</sup>, ZHANG Zi-jie<sup>1</sup>, LIU Gao-xing<sup>1</sup>

(1. Information Engineering College, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Experimental Center, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The performance of wireless communication systems is affected by the wireless channel, while the wireless channel has randomness, in order to accurately recover the transmitter signal, which requires to estimate the channel. SC-FDMA system is adopted as LTE uplink multiple access scheme. Compared with OFDM, SC-FDMA has lower Peak-to-Average Power Ratio (PAPR). In this paper, An improved LMMSE channel estimation algorithm is proposed based on the Least-Squares (LS) and Linear Minimum Mean-Square Error (LMMSE) channel estimation algorithm using pilot for SC-FDMA system. Simulation results show that the improved LMMSE algorithm has good performance and low computational complexity.

**Key words:** SC-FDMA; channel estimation; LMMSE algorithm

## 0 引言

LTE上行链路采用单载波频分多址(SC-FDMA)方案,SC-FDMA是频域均衡(SC/FDE, Single Carrier/Frequency Domain Equalization)单载波调制的扩展,与OFDM系统相比,SC-FDMA最大的一个优势就是具有较低的峰均比(PAPR)<sup>[1]</sup>。

由于无线信道具有很大的随机性,而无线通信系统的性能又直接受到无线信道的影响,为了能在接收端准确地恢复发射端的发送信号,要知道无线信道的一些信息,这就需要在接收信息时,对信道的参数进行估计<sup>[2]</sup>。因此,信道估计对SC-FDMA传输系统非常

重要。

文中首先介绍了SC-FDMA系统模型,然后分析了两种现有的信道估计算法—LS算法和LMMSE算法,提出一个优化的导频结构以及运用傅里叶变换,得到一种改进的LMMSE算法,最后通过MATLAB得出仿真结果。

## 1 SC-FDMA系统模型简介

图1所示为基于导频辅助下的SC-FDMA系统模型<sup>[3]</sup>。文中就是在该系统模型的基础上研究基于导频的信道估计算法。

设输入一个数据序列为 $a(n)$  ( $n = 0, 1, \dots, M-1$ ),  $a(n)$ 经过 $M$ 点DFT变换之后变为频域信号。

接着,信号通过IDFT变换,输出的单载波信号为:

$$x(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi nk/N}, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

收稿日期:2011-10-31;修回日期:2012-02-02

基金项目:广州市应用基础研究项目(2006J1-C0331);广东工业大学博士基金项目(073016)

作者简介:张欣(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向为宽带移动通信系统;彭端,教授,主要研究方向为宽带移动通信系统。

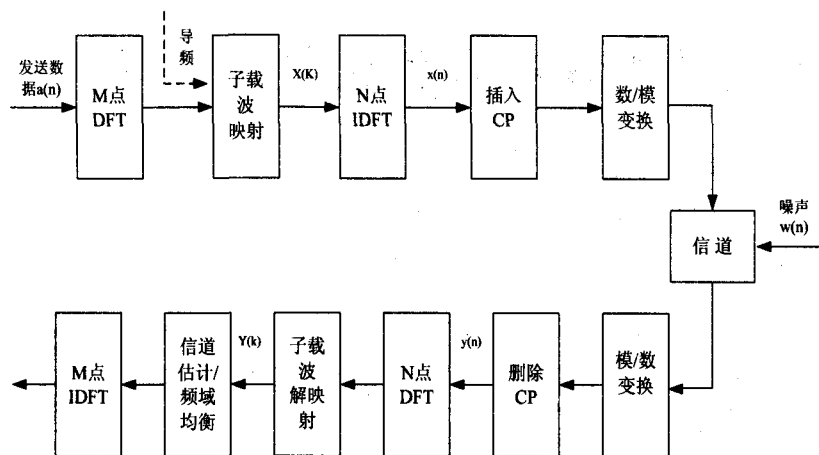


图1 基于导频辅助的SC-FDMA系统模型

然后加循环前缀CP,单载波信号通过多径信道,加噪声,去掉CP,接收到的信号可表示为:

$$y(n) = \sum_{i=0}^{r-1} h(n,i)x(n-i) + w(n) \quad (2)$$

$n = 0, 1, \dots, N-1; i = 0, 1, \dots, r-1$

其中,  $r$  为多径信道的径数,  $h(n,i)$  为第  $i$  径信道在采样时刻  $n$  时的信道响应,  $w(n)$  为零均值, 方差为  $\sigma^2$  的加性高斯白噪声。

将式(1)代入式(2)可得:

$$y(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X(K) \sum_{i=0}^{r-1} h(n,i) e^{j2\pi(n-i)k/N} + w(n) \quad (3)$$

令  $H(K,n) = \sum_{i=0}^{r-1} h(n,i) e^{-j2\pi nk/N}$ , 可得:

$$y(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X(K) H(K,n) e^{j2\pi nk/N} + w(n) \quad (4)$$

设  $k$  个子载波处作 DFT 进行频域变换得:

$$Y(K) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{-j2\pi nk/N} = X(K) H(K) + W(K) \quad (5)$$

$k = 0, 1, \dots, N-1$

其中  $H(K)$  为信道频率响应<sup>[4-7]</sup>。

## 2 信道估计算法介绍

现有常用的信道估计算法主要有最小方差准则(LS)和线性最小均方误差算法(LMMSE)。LS算法就是在不考虑噪声的情况下,对参数  $\hat{H}_{LS}$  进行估计,使其代价函数(6)最小。

$$J = [Y - X\hat{H}_{LS}]^H [Y - X\hat{H}_{LS}] \quad (6)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \{ [Y - X\hat{H}_{LS}]^H [Y - X\hat{H}_{LS}] \}}{\partial \hat{H}_{LS}} = 0$$

因此可得 LS 算法的信道估计为<sup>[8]</sup>:

$$\hat{H}_{LS} = [X^H X]^{-1} X^H Y = X^{-1} Y \quad (7)$$

由式(7)可以看到,LS估计算法只需要知道观测矩阵  $X$  和观测样本  $Y$ , 而不需要知道其他先验统计信

息,因此,LS算法的实现复杂度很低,同时其估计的准确度也不高,很容易受到高斯白噪声和子载波间干扰的影响。

为了提高信道估计的精确度,充分利用与信道相关的一些统计信息,下面介绍基于 LMMSE 准则的信道估计算法。假设  $\hat{H}$  为信道估计值,  $H$  为真实值,则  $e = H - \hat{H}$ , 它的 MSE 为:

$$E\{|e|^2\} = E\{|H - \hat{H}|^2\} = E\{|H - \hat{H}||H - \hat{H}|^H\} \quad (8)$$

LMMSE 就是使得  $E\{|e|^2\}$  最小。

可得 LMMSE 算法的信道估计为<sup>[8]</sup>:

$$\hat{H}_{LMMSE} = R_{HH} [R_{HH} + (XX^H)^{-1}\sigma^2]^{-1} \hat{H}_{LS} \quad (9)$$

式中,  $\sigma^2$  为噪声方差。

由式(9)知道, LMMSE 算法充分利用了信道自相关矩阵  $R_{HH}$ , 提高了信道估计的精确度,很好地抑制了高斯白噪声。但是信道自相关矩阵  $R_{HH}$  不易求得,且需要对相关矩阵求逆运算,运算量较大,实现复杂度较高。

## 3 改进的 LMMSE 信道估计算法

通过上文介绍的 LMMSE 信道估计算法,可知,当发送信号  $X$  发生改变,矩阵  $XX^H$  就跟着变化,同时,对矩阵  $XX^H$  求逆就需要进行实时运算,因此,复杂度相当高。为了降低 LMMSE 算法的复杂度,提出一个优化的导频结构。

先给出一个引理<sup>[9]</sup>: 对于一个  $M \times M$  的正定矩阵  $A$ , 它的第  $m$  个对角元素为  $a_m$ , 则有以下不等式成立:

$$\text{tr}(A^{-1}) \geq \sum_{m=1}^M \frac{1}{a_m} \quad (10)$$

当且仅当  $A$  为对角矩阵时,等号成立。

根据以上定理,当且仅当  $XX^H$  为对角矩阵时, MSE 为最小。因此,提出一个优化的导频结构:

$$XX^H = I_N \quad (11)$$

其中  $I_N$  为  $N \times N$  的单位矩阵。

同时,经过  $N$  点 DFT 后的信道响应矩阵写成<sup>[10]</sup>:

$$H = Qh \quad (12)$$

其中  $Q$  为 DFT 变换矩阵,  $h$  为信道冲激响应矢量。

因此:

$$R_{HH} = E\{HH^H\} = E\{Qh(Qh)^H\} = QR_{hh}Q^H \quad (13)$$

由傅里叶变换的性质可知<sup>[11]</sup>:

$$QQ^H = NI_N \quad (14)$$

由公式(11)知道,LMMSE算法涉及到求矩阵的逆,有一定的计算复杂度。现在利用一个优化的导频结构和傅里叶变换来简化LMMSE算法,其中会有轻微的估计性能的损失。把式(11),式(13)和式(14)代入LMMSE信道估计算法的表达式:

$$\hat{\mathbf{H}}_{\text{LMMSE}} = \mathbf{R}_{\text{HH}} [\mathbf{R}_{\text{HH}} + (\mathbf{X}\mathbf{X}^H)^{-1}\sigma^2]^{-1} \hat{\mathbf{H}}_{\text{LS}}$$

可得:

$$\hat{\mathbf{H}}_{\text{LMMSE}} = \mathbf{Q}\mathbf{R}_{\text{hh}} \left( \mathbf{R}_{\text{hh}} + \frac{\sigma^2}{N}\mathbf{I}_N \right)^{-1} \mathbf{Q}^H \hat{\mathbf{H}}_{\text{LS}} \quad (15)$$

由于SC-FDMA系统通过DFT变换把频率选择性衰落信道划分成若干个子信道,每个子信道占用的频带很窄,远小于信道的相干带宽,所以在子信道内的衰落是平坦的<sup>[12]</sup>。因此可以得到信道矢量 $\mathbf{h}$ 的自相关矩阵:

$$\mathbf{R}_{\text{hh}} = E\{\mathbf{h}\mathbf{h}^H\} = \text{diag}([\delta_0^2, \dots, \delta_{L-1}^2, 0, \dots, 0]) \quad (16)$$

#### 4 仿真结果与分析

通过MATLAB平台对文中所提出的方案进行仿真来验证该方案的估计性能。仿真平台参数为:载频频率为2 GHz,系统带宽为20 MHz,子载波数为1024,循环前缀CP的数目为64,数据调制采用16QAM,移动速度为30km/h。信道采用COST207 TU信道模型<sup>[13]</sup>,最大多普勒频率为100Hz。

由图2可以看到,改进的LMMSE算法的MSE比LS算法要小,几乎与传统的LMMSE算法一样。在高SNR情况下,LS算法和LMMSE算法的MSE接近。

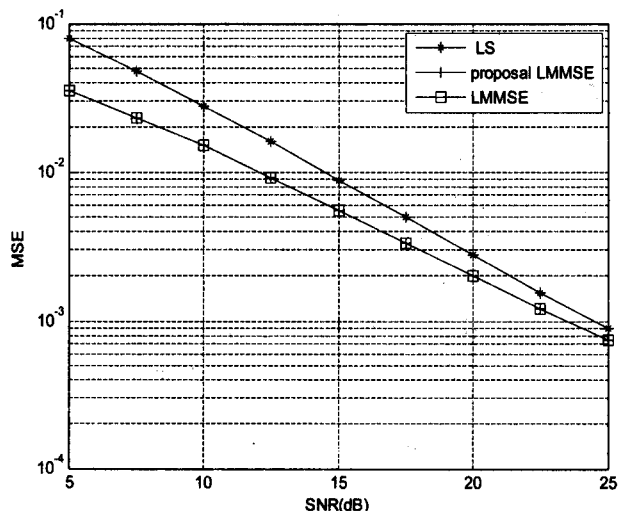


图2 三种信道估计算法的MSE曲线图

由图3可以看到,改进的LMMSE算法的BER介于LS算法与传统的LMMSE算法之间,在SNR为25dB时,改进的LMMSE算法比传统的LMMSE算法的BER有2dB的损失。

由此可见,改进的LMMSE算法计算复杂度低,并且估计性能只有轻微的损失,在算法复杂度和性能之

间的矛盾中,有比较好的折中。

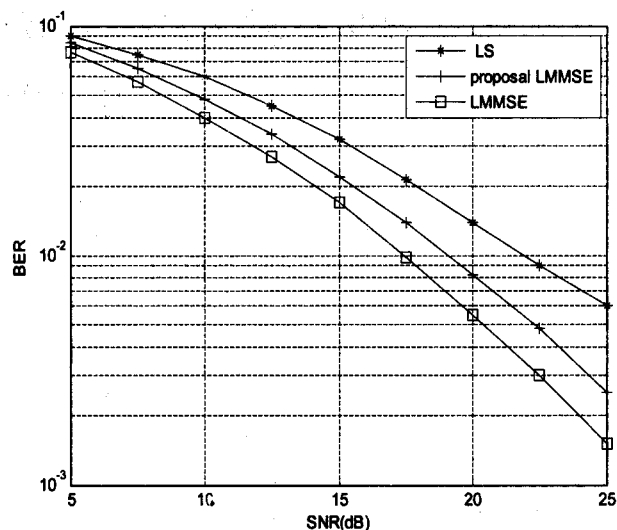


图3 三种信道估计算法的BER曲线图

#### 5 结束语

文中介绍了信道估计LS算法和LMMSE算法,并结合LTE上行链路的自身特点,提出了一种运用傅里叶变换和优化的导频结构的LMMSE信道估计算法。并利用MATLAB仿真了三种算法的MSE和BER曲线图。仿真结果表明,改进的LMMSE算法的估计性能比LS算法好,和传统的LMMSE算法相比,BER性能有轻微的损失,但是其实现了较低的计算复杂度。

#### 参考文献:

- [1] 沈嘉,索士强,全海洋. 3GPP长期演进(LTE)技术原理与系统设计[M]. 北京:人民邮电出版社,2008.
- [2] Ozdemir M K, Arslan H. Channel estimation for wireless OFDM systems[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2007, 9(2): 18-48.
- [3] 郭强,谢丽丽,钱治军. LTE上行信道估计算法研究[J]. 电子元器件应用, 2010, 12(5): 75-78.
- [4] Rana M M. Channel estimation techniques and LTE terminal implementation challenges[C]//International Conference on Computer and Information Technology (ICIT). [s.l.]: [s.n.], 2010: 545-549.
- [5] 李剑,陈发堂. LTE中上行链路参考信号研究[J]. 电子测试, 2010(5): 35-38.
- [6] 陈良明,韩泽耀. OFDM-第四代移动通信的主流技术[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(3): 184-187.
- [7] Huang Shih-Chan, Lin Jia-Chin, Chou Kaopeng. Novel Channel Estimation Techniques on SC-FDMA Uplink Transmission[C]//IEEE 71st Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring). [s.l.]: [s.n.], 2010: 1-5.
- [8] Proakis J G. 统计信号处理算法[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.

4) 在相邻的两个 paper 节点之间插入节点 d。

实验结果如图 5 所示。图中 LSS 的更新时间为其重索引时间。

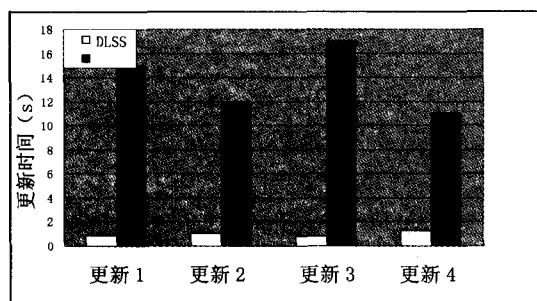


图 5 更新时间

查询效率: 选择 DBLP 数据集, 在其上选取 5 个不同的关键字集合, 其对应的关键字个数为 2~6 个。图 6 描述了 DLSS 索引方式和 LSS 索引方式在这 5 个关键字查询上的查询效率。可以看出, 两种索引方式的查询效率基本相同。

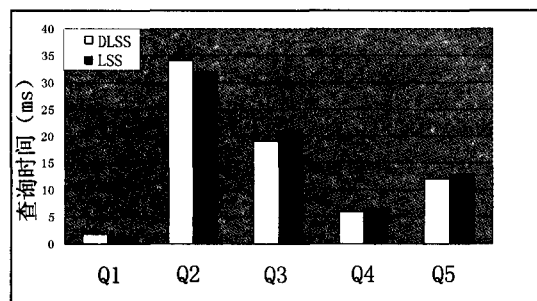


图 6 查询时间

综上所述, DLSS 索引方式不仅可以在动态环境下保持了索引结构的相对稳定, 也保持了高效的查询性能。

## 5 结束语

文中分析了当前关键字查询在动态环境下的不足, 以及目前的几种支持更新的编码方式, 在此基础上提出了一种支持动态 XML 文档上关键字查询的索引

DLSS。实验证明, 该索引方式不仅可以在动态环境下保证索引结构的稳定, 而且保持了高效查询性能。

## 参考文献:

- [1] eXtensible Markup Language (XML) [EB/OL]. 2004. <http://www.w3.org/xml>.
- [2] 周爱武, 李孙长, 程 博, 等. XML 数据库的研究与应用 [J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(9): 218-224.
- [3] 华珊珊, 谢铨洋. XML 查询语言 XQuery 的研究与实现 [J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(4): 48-50.
- [4] Guo L, Shao F, Botev C, et al. Xrank: ranked keyword search over xml documents [C]//SIGMOD. [s. l.]: [s. n.], 2003: 16-27.
- [5] 郑榕增, 林世平. 基于 Lucene 的中文倒排索引技术的研究 [J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(3): 80-83.
- [6] 韩 萌, 陈 群, 王 鹏. 基于 LCA 的高效 XML 关键字检索算法 [J]. 计算机工程, 2010, 36(23): 59-62.
- [7] 娄 颖, 李战怀, 郭文琪, 等. 一种基于 XML 文档关键字检索的结构索引 [J]. 计算机科学, 2010, 37(12): 120-124.
- [8] Li Guoliang, Feng Jianhua, Wang Jianyong, et al. Effective keyword search for valuable lcas over xml documents [C]//Proceedings of the Sixteenth ACM Conference on Information and Knowledge Management. New York: ACM, 2007: 31-40.
- [9] 高丹丹. 基于 SLCA 的 XML 关键字查询研究与改进 [D]. 济南: 山东大学, 2009: 23-24.
- [10] O'Neil P, O'Neil E, Pal S, et al. ORDPATHs: Insert-friendly XML Node Labels [C]//Proceedings of the 2004 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. Paris, France: ACM, 2004: 903-908.
- [11] Li C, Ling T W, Hu M. Efficient Updates in Dynamic XML Data: from Binary String to Quaternary String [J]. the VLDB Journal, 2008, 17(3): 573-601.
- [12] Xu Liang, Ling T W, Wu Huayu, et al. DDE: From Dewey to a Fully Dynamic XML Labeling Scheme [C]//Proceedings of the 35th SIGMOD International Conference on Management of Data. New York, USA: ACM, 2009.

(上接第 99 页)

- [9] 史荣昌, 魏 丰. 矩阵分析 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005.
- [10] Noh M, Lee Y, Park H. Low complexity LMMSE channel estimation for OFDM [J]. Communications IEEE Proceedings, 2006, 153(5): 645-650.
- [11] 梁 琳, 李小文. LTE 上行信道估计的算法与性能分析 [J]. 广东通信技术, 2010, 30(3): 29-31.

- [12] Lee Dae-Hong, Im Se-Bin, Choi Hyung-Jin. A novel pilot mapping method for channel-quality estimation in SC-FDMA system [C]//Asia-pacific Conference on Communications, APCC 2007. [s. l.]: [s. n.], 2007: 307-310.
- [13] Dong Min, Tong Lang. Optimal design and placement of pilot symbols for channel estimation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(12): 3055-3069.