

# 一种适用于 LTE 上行链路的低复杂度信道估计算法<sup>①</sup>

刘 琨, 刘洪武, 张小林

(南昌航空大学 信息工程学院, 南昌 330063)

**摘要:** 提出了一种适用于 3GPP 长期演进 (Long Term Evolution, LTE) 系统上行链路的信道估计算法。为了降低抑制噪声过程中信道能量的损失, 该算法对最小二乘 (Least Square, LS) 算法的时域结果采用从中间向两端搜索的方式进行能量检测。仿真结果表明, 该算法与 LS 算法、传统的基于 DFT 的估计算法、线性最小均方误差 (Linear Minimum Mean Square Error, LMMSE) 算法及负指数 LMMSE 算法相比, 性能良好, 且易于实现, 具有很好的实用性。

**关键词:** 长期演进; 信道估计; 离散傅里叶变换; 空子载波

## A Low Complexity Channel Estimation Algorithm for LTE Uplink

LIU Kun, LIU Hong-Wu, ZHANG Xiao-Lin

(College of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** This paper proposed a channel estimation algorithm for 3GPP Long Term Evolution (LTE) uplink. In order to reduce the loss of channel energy in the noise suppression process, the proposed algorithm detected the energy for the time-domain result of the Least Square (LS) algorithm by the method of searching from the middle to both sides. Simulation shows that, comparing to the LS algorithm, the traditional DFT based channel estimation algorithm, the Linear Minimum Mean Square Error (LMMSE) algorithm and negative-exponential LMMSE algorithm, the proposed algorithm has good performances and is prone to implement, which has strong practicability.

**Key words:** LTE; Channel estimation; DFT; Null subcarriers

## 1 引言

LTE 作为下一代无线宽带通信技术的主导标准, 为无线宽带化的实现和移动互联网的应用带来了无限可能, 因此世界各国都在加紧对其技术的研究和完善。在 LTE 上行链路中, 考虑到系统终端的发射功率受限, 而正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 技术具有非常高的峰均比, 因此采用了单载波频分多址 (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access, SC-FDMA) 方案<sup>[1]</sup>。在 SC-FDMA 系统中由于引入了循环前缀, 故在接收端可采用简单的频域均衡来消除码间干扰, 而这就必须知道信道的频率响应, 因此在频域均衡之前必须先进行信道估计。

信道估计的准确度将直接影响到整个系统的性能。

信道估计算法可分为盲估计算法和基于导频辅助的信道估计算法两种。而基于导频辅助的信道估计算法以其收敛速度快, 估计精度高等优点在实际系统中得到广泛应用。在各种基于导频辅助的信道估计算法中, 基于 DFT 的信道估计算法由于其性能良好且易于实现, 而备受关注<sup>[2-6]</sup>。

在 SC-FDMA 系统中, 为了避免过采样等对信号带来的影响, 一般都采用了空子载波, 而这必然给基于 DFT 的信道估计带来不利影响。针对 LTE 上行链路的这种实际情况, 本文提出了一种低复杂度的信道估计算法, 并利用 MATLAB 实现了该算法的仿真。

<sup>①</sup> 基金项目:国家自然科学基金(60973048);航空科学基金(20102056005);江西省教育厅青年科学基金(GJJ10194)

收稿时间:2011-08-29;收到修改稿时间:2011-10-11

## 2 系统模型

在 LTE 上行链路中，导频插入方式采用的是块状导频<sup>[1]</sup>。假设系统的总子载波数为  $N$ ，其中可用子载波数为  $M$ ，则系统可用矩阵形式表示为

$$Y = XH + W \quad (1)$$

式中  $Y$  为接收端的频域信号，为一个  $M \times 1$  的向量； $X$  为一个  $M \times M$  的对角矩阵，其对角线上的元素为发射端的频域信号； $H$  为信道的频率响应向量； $W$  为独立高斯噪声向量。

对于多径衰落信道，其单位冲激响应  $h(n)$  和频率响应  $H(k)$  可分别表示为：

$$h(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l \delta(n - \tau_l), \quad n=0,1,\dots,N-1 \quad (2)$$

$$H(k) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l e^{-j\frac{2\pi}{N}k\tau_l}, \quad k=0,1,\dots,N-1 \quad (3)$$

式(2)、(3)中， $h_l$ 、 $\tau_l$  分别表示第  $l$  径的信道衰落系数和信道时延， $L$  表示信道的多径数。

## 3 LTE上行链路信道估计

传统的基于导频辅助的信道估计算法包括 LS 信道估计算法、LMMSE 信道估计算法、负指数 LMMSE 信道估计算法以及基于 DFT 的信道估计算法等。

### 3.1 传统的信道估计算法

LS 信道估计算法是最简单的一种信道估计算法，该算法只需知道发送导频信号和接收到的导频符号即可。LS 估计器每估计一个信道衰落系数仅需一次乘法操作，因此运算量非常小。但由于 LS 准则没考虑噪声的影响，所以其估计的结果将受到噪声的严重影响。

LMMSE 信道估计算法以最小化均方误差为准则，是对 LS 估计的最佳线性滤波。由于该算法利用信道的统计相关性很好地抑制了噪声的影响，因此具有很好的信道估计性能。但该算法运算量太大，复杂度太高，且需要知道多径信道各径的幅度方差和传输时延，而这在实际系统中一般是很难获得的，因此其实用性较差。

负指数 LMMSE 信道估计算法是一种简化近似的 LMMSE 算法，它假定信道的多径时延服从均匀分布，信道延迟功率谱呈指数分布。该算法虽然不必精确估计出多径信道各径的功率和时延特性，但却必须要获知信道的最大时延和均方根时延，其复杂度依然很大。

### 3.2 基于 DFT 降噪处理的信道估计算法

考虑到在时域内信道能量主要集中在相对较少的

采样点上，因此可利用这个特性在时域内进行降噪处理，以提高 LS 信道估计的精度，由此便出现了基于 DFT 的信道估计算法。由于该算法易于实现且性能良好，所以备受关注。

但由于 SC-FDMA 系统中存在大量的空子载波，这将给基于 DFT 的信道估计带来一定的问题。假设空子载波对称分布在信道频率响应  $H(k)$  的两端，经离散傅里叶逆变换后得到信道单位冲激响应的估计  $\hat{h}(n)$  为

$$\begin{aligned} \hat{h}(n) &= \frac{1}{N} \sum_{k=\frac{N-M}{2}}^{\frac{N+M}{2}-1} H(k) e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=\frac{N-M}{2}}^{\frac{N+M}{2}-1} \left( \sum_{l=0}^{L-1} h_l e^{-j\frac{2\pi}{N}k\tau_l} \right) e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{L-1} h_l \sum_{k=\frac{N-M}{2}}^{\frac{N+M}{2}-1} e^{j\frac{2\pi k}{N}(n-\tau_l)}, \end{aligned}$$

$$n=0,1,\dots,N-1 \quad (4)$$

式中

$$\sum_{k=\frac{N-M}{2}}^{\frac{N+M}{2}-1} e^{j\frac{2\pi k}{N}(n-\tau_l)} = \begin{cases} M, & n=\tau_l \\ e^{j\frac{\pi(N-M)}{N}(n-\tau_l)} \cdot \frac{1-e^{j\frac{2\pi M}{N}(n-\tau_l)}}{1-e^{j\frac{2\pi}{N}(n-\tau_l)}}, & n \neq \tau_l \end{cases} \quad (5)$$

上述推导是在空子载波对称分布在信道频率响应  $H(k)$  两端的假设条件下得出的，而对于任意分布的空子载波的情况，只需补偿一个相位<sup>[7]</sup>。

图 1 所示为  $N=128$ ， $M=72$  时，利用部分信道频率响应（空子载波置 0）得到的信道单位冲激响应。

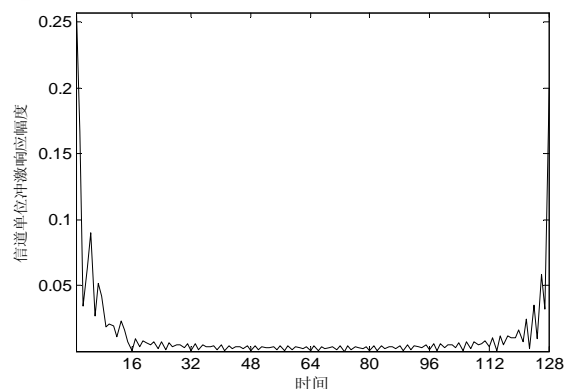


图 1 利用部分信道频率响应得到的信道单位冲激响应

从公式(4)、(5)和图 1 可以看到，当存在空子载波

时将导致信道能量的扩散，信道能量的集中性遭到一定程度的破坏。此时信道能量主要集中在符号的两端，符号中部的扩散能量很小，一般小于噪声能量，因此可采用能量检测的方法来抑制噪声<sup>[8]</sup>。通过上述分析，本文提出了一种低复杂度的信道估计算法，以适用于 LTE 上行链路。该算法描述如下：

1) 利用 LS 信道估计算法得到非空子载波的信道频率响应估计，并将空子载波置 0；

2) 通过离散傅里叶逆变换得到信道单位冲激响应估计  $\hat{h}_{LS}(n)$ ；

3) 定义

$$P(n) = |\hat{h}_{LS}(n)|^2, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

4) 为了减小算法对噪声的敏感性，对  $P(n)$  分别做公式(7)、(8)的运算，将其结果  $k_{s_1}$ 、 $k_{s_2}$  作为判决对象，判决规则：在公式(7)中，s 取值从  $(N/2-15)$  开始，逐次递减到 10。并将第一次大于等于某一门限值的  $k_{s_1}$  所对应的 s 值记为  $s_1$ 。如果未找到满足上述条件的 s 值，则令  $s_1 = 9$ 。在公式(8)中，s 取值从  $(N/2+15)$  开始，逐次递增到  $(N-9)$ 。同样，将第一次大于等于某一门限值的  $k_{s_2}$  所对应的 s 值记为  $s_2$ 。如果未找到满足上述条件的 s 值，则令  $s_2 = N - 8$ 。考虑到门限值的选取要在虚警概率和检测概率之间折中，因此可取门限值为 2.55；

$$k_{s_1} = \frac{(\sum_{n=s-9}^s P(n))/10}{(\sum_{n=s+1}^{N/2} P(n))/(N/2 - s)} \quad (7)$$

$$k_{s_2} = \frac{(\sum_{n=s}^{s+9} P(n))/10}{(\sum_{n=N/2}^{s-1} P(n))/(s - N/2)} \quad (8)$$

5) 找出  $s_1 < n < s_2$  范围内  $P(n)$  的最大值  $P_{max}$ ；

6) 将  $\hat{h}_{LS}(n)$  中满足条件

$$P(n) \leq P_{max} \quad (9)$$

的离散时间采样点处的采样值置 0，得到  $\hat{h}_{LS}(n)$ ；

7) 对  $\hat{h}_{LS}(n)$  做离散傅里叶变换，便得到降噪处理后的信道频率响应估计  $\hat{H}(k)$ 。

### 4 仿真结果

本节在 LTE 上行链路平台上，对 LS 算法、LMMSE

算法、负指数 LMMSE 算法及本文所提出的算法进行了仿真分析。

仿真按照文献[1]的协议标准，一个无线帧中包含 20 个时隙，每个时隙包含 7 个符号块，其中第 4 个符号块用于传送上行参考信号，其余 6 个符号块用于传送数据。系统的其他仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数	值	备注
系统带宽	20MHz	
总子载波数	2048	
可用子载波数	1200	
子载波间隔	15kHz	
循环前缀	160 个采样点	每时隙的第一个符号
	144 个采样点	其他符号
调制方式	QPSK	
信道模型	EPA 信道	

图 2 和图 3 分别为在 LTE 上行链路中，采用不同信道估计算法时的均方误差 (Mean Squared Error, MSE) 性能曲线和系统误比特率 (Bit Error Rate, BER) 性能曲线。

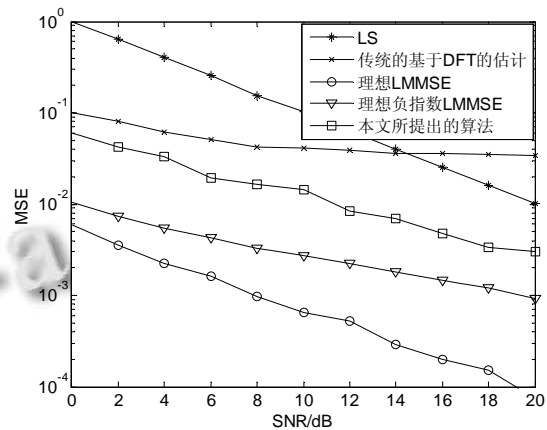


图 2 MSE 性能曲线

由图 2 可见，LS 信道估计抑制噪声的能力较差，因此其 MSE 性能最差。传统的基于 DFT 的信道估计在低信噪比时，由于对噪声的抑制效果与有效径能量损失相比所占比例较大，因此其 MSE 性能好于 LS 算法，但随着信噪比的升高，有效径能量的损失所占比例增大，传统的基于 DFT 的信道估计的性能受到严重影响，并且造成“地板效应”。理想 LMMSE 信道估计

由于获得了最优的信道相关矩阵,因此其 MSE 性能是最优的。对于已知信道的最大时延和均方根时延的理想负指数 LMMSE 信道估计,其 MSE 性能差于理想 LMMSE 信道估计,为这几种估计算法中的次优算法。而本文所提出的信道估计算法虽然其 MSE 性能差于理想 LMMSE 算法和理想负指数 LMMSE 算法,但在  $MSE = 10^{-2}$  时相对于 LS 算法仍有 8.69dB 的增益,且不存在“地板效应”。

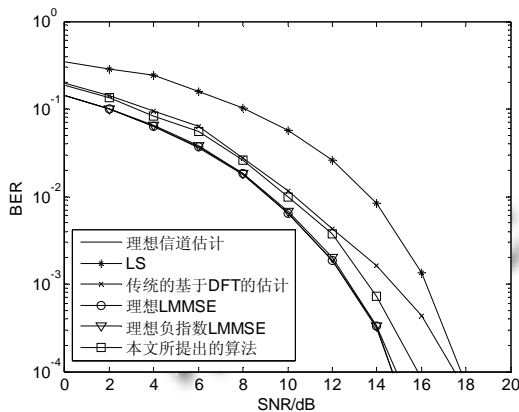


图 3 系统 BER 性能曲线

由图 3 可见,本文所提出的信道估计算法在 BER 性能上相对于 LS 算法有明显的提高,在时有 3.68dB 的增益;相对于传统的基于 DFT 的估计算法,其性能也有所改善。但该算法与理想 LMMSE 算法和理想负指数 LMMSE 算法相比仍有一定的性能差距,在  $BER = 10^{-2}$  时分别有 0.83dB 和 0.76dB 的性能损失。

下面分析一下上述几种信道估计算法的计算复杂度。LS 算法、理想 LMMSE 算法、理想负指数 LMMSE 算法和本文所提出的算法所需复数乘法的次数分别为  $M$ ,  $M^2 + M$ ,  $M^2 + M$ ,  $M + N \log_2 N$ 。假设  $N$  与  $M$  具有关系  $M = 3N/5$ ,则这几种算法所需复数乘的次数与  $N$  的关系曲线如图 4 所示。由图 4 可见,LS 算法复杂度最低,本文所提出的算法次之,理想 LMMSE 算法和理想负指数 LMMSE 算法复杂度最高。

在本文仿真环境  $N=2048$ ,  $M=1200$  的情况下,理想 LMMSE 算法与理想负指数 LMMSE 算法所需复数乘法的次数都为 LS 算法的 1201 倍,而本文所提出的算法所需复数乘法的次数仅为 LS 算法的 20 倍。

从上述分析中可以看出,本文所提出的信道估计算法在性能和计算复杂度之间取得了很好的折中。

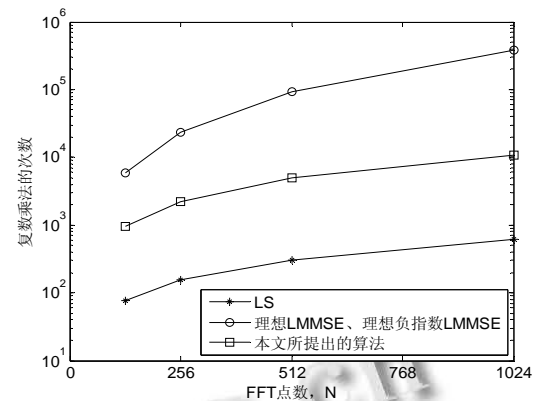


图 4 计算复杂度比较

## 5 结论

本文研究了 LTE 上行链路的信道估计问题。针对 LTE 上行链路中存在空子载波的情况,提出了一种低复杂度的信道估计算法。通过将该算法与 LS 算法、传统的基于 DFT 的估计算法、LMMSE 算法及负指数 LMMSE 算法进行仿真比较。结果表明,LS 算法性能较差,但复杂度最低;传统的基于 DFT 的估计算法在信噪比较大时会出现“地板效应”,性能严重下降;LMMSE 算法和负指数 LMMSE 算法虽然在 BER 性能上接近于理想信道估计,但复杂度太高;而本文所提出的估计算法在性能上好于 LS 算法和传统的基于 DFT 的估计算法,同时在复杂度上又低于 LMMSE 算法和负指数 LMMSE 算法,因此该算法易于硬件实现,具有很好的实用性。

## 参考文献

- 3GPP TS 36.211 V10.2.0. Physical channels and modulation (release 10). 3rd Generation Partnership Project, 2011.
- Jeongwook S, Seunghun J, Janghoon Y, Wongi J, Dong KK. Analysis of pilot-aided channel estimation with optimal leakage suppression for OFDM systems. IEEE Communications Letters, 2010,14(9):809-811.
- Wang Y, Li L, Zhang P, Liu Z. Channel estimation for OFDM systems in non-sample-spaced multipath channels. Electronics Letters, 2009,45(1):66-68.
- Kwak K, Lee S, Hong D, Jihyung K. A new DFT-based channel estimation approach for OFDM with virtual subcarriers by leakage estimation. IEEE Trans. on Wireless

(下转第 90 页)

80	10	1000	1e-12	100%	1e-29	100%	1e-36	100%
	20	1500	1e-03	90%	1e-18	78%	1e-27	76%
	30	2000	1e-01	16%	1e-13	28%	1e-22	28%

表 4 Rosenbrock 函数

M	D	$G_{max}$	SPSO		LPSO		FPSO	
20	10	1000	9.63	80%	9.45	90%	7.77	94%
	20	1500	414.77	50%	53.68	72%	36.56	80%
	30	2000	NON	NON	257.75	60%	137.3	76%
40	10	1000	9.50	86%	8.18	94%	6.24	98%
	20	1500	217.43	66%	42.43	74%	25.23	84%
	30	2000	NON	NON	144.96	60%	86.94	78%
80	10	1000	7.28	98%	7.77	96%	5.29	98%
	20	1500	208.25	72%	32.73	84%	17.89	90%
	30	2000	NON	NON	37.80	80%	54.43	86%

#### 4 结论

本文着重研究了惯性权值因子取值大小对粒子群优化算法收敛性所带来的影响,并在此基础上分析了现有的权值递减策略的优缺点,并提出一种基于各粒子适应值的递减策略,使得 PSO 算法在寻优能力和精度要求上都有不同程度的提高。但和取何值时, PSO 算法的性能会最优,及其在全局和局部间达到最佳平衡,还需要大量实验来验证。同时 PSO 算法本身缺乏

理论上的依据,具有一定的盲动性和随机性,如何解决这一不足也是下一步需要着重研究的问题。

#### 参考文献

- 1 Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization. IEEE on Networks, 1995: 1942-1948.
- 2 Eberhart R, Shi Y. Particle Swarm optimization: development, applications and resource. IEEE conf. on evolutionary Computation, 2001:81-86.
- 3 Shi Y, Eberhart RC. Empirical study of particle swarm optimization. International Conference on Evolutionary Computation. Washington, USA: IEEE, 1999: 1945-1950.
- 4 Shi Y, Eberhart R. Fuzzy adaptive particle swarm optimization. The IEEE Congress on Evolutionary Computation. San Francisco, USA: IEEE, 2003: 101-106.
- 5 Shi Y, Eberhart RC. Tracking and optimizing dynamic systems with particle swarms. The IEEE Congress on Evolutionary Computation. San Francisco, USA: IEEE, 2001: 94-100.
- 6 任小波,杨忠秀.一种动态扩散粒子群算法.计算机应用, 2010,30(1):159-161.
- 7 沈学利,张红岩,张纪锁.一种新的改进粒子群优化算法.计算机仿真,2011,28(3):246-249.
- 8 黄轩,张军,詹志辉.基于随机惯量权重的快速粒子群优化算法.计算机工程与设计,2009,30(3):647-650.

(上接第 85 页)

- Communications, 2008,7(6):2004-2008.
- 5 Ku ML, Huang CC. A refined channel estimation method for STBC/OFDM systems in high-mobility wireless channels. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2008,7(11): 4312-4320.
  - 6 Zhang J, Huang LQ. An improved DFT-based channel estimation algorithm for MIMO-OFDM systems. 2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks. Xianning, China, 2011:

- 3929-3932.
- 7 Diallo M, Boher L, Rabineau R, Cariou L, Helard M. Transform domain channel estimation with null subcarriers for MIMO-OFDM systems. 2008 IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems. Reykjavik, Iceland, 2008:209-213.
  - 8 袁清升,何晨,李国松,卜智勇.OFDM 系统中信道有效阶数的估计.电子学报,2005,33(12A):2352-2356.