

文章编号:1001-893X(2011)04-0106-05

LTE 系统中基于改进样条插值的信道估计方法^{*}

李小文,宋海贝,方前军

(重庆邮电大学 重庆市移动通信技术重点实验室,重庆 400065)

摘 要:上行控制信道(PUCCH)格式 1/1a/1b 在长期演进(LTE)系统中承载重要的控制信令,其信道估计对系统性能有着重要影响。普通循环前缀(CP)时,PUCCH 格式 1/1a/1b 要利用时隙内 3 个连续排放的导频进行插值需要考虑二阶插值或者三次样条插值。为了使其在 TD-LTE 测试仪表系统中得到高效实现,分析了两种插值算法,并提出改进的三次样条插值算法,即采用逐步外推的插值思想估计时隙内边缘的数据符号,通过离线完成大部分运算,使得信道估计的实现在减小复杂度的同时还降低了误比特率。

关键词:长期演进系统;上行控制信道;信道估计;三次样条插值;DSP 实现

中图分类号:TN929.5 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2011.04.023

A Channel Estimation Algorithm Based on Improved Spline Interpolation in LTE Systems

LI Xiao-wen, SONG Hai-bei, FANG Qian-jun

(Chongqing Key Lab of Mobile Communicatins, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In the Long Term Evolution(LTE) system, the physical uplink control channel(PUCCH) format 1/1a/1b carries important control information, channel estimation of which has great impact on the system performance. In the condition of normal cyclic prefix(CP), the second order or spline interpolation should be considered for PUCCH format 1/1a/1b to exploit three continuous pilots in one slot. To implement it efficiently in the TD-LTE test system, two interpolation algorithms are analysed and a better algorithm based on spline is proposed. The thought of stepwise extrapolation is adopted in the algorithm to estimate the data at the edge of the slot, and most of the computations are performed offline resulting in high performance at complexity reductions.

Key words: LTE system; physical uplink control channel; spline interpolation; channel estimation; DSP implementation

1 引 言

LTE 系统采用了在移动通信技术演进中起主导作用的正交频分复用(OFDM)接入技术,下行采用正交频分多址技术,上行采用单载波频分多址技术(Single Carrier-Frequency Division Multiple Access, SC

-FDMA),能够在 20 MHz 带宽内实现 100 Mbit/s 的下行峰值速率和 50 Mbit/s 的上行峰值速率^[1]。

经过无线信道的信号通常会经历多径衰落、频率选择性衰落,所以对解调之前的信号进行信道估计在 LTE 系统中具有重要意义。LTE 系统在发送端插入导频,接收端利用导频进行信道估计,通过插值

^{*} 收稿日期:2011-01-10;修回日期:2011-03-02

基金项目:国家科技重大专项项目(2009ZX03002-009)

Foundation Item: The National Science & Technology Major Project(2009ZX03002-009)

得到整个信道的信道频率响应。信道估计中常用的插值算法有线性插值、二阶插值、三次样条插值、时域插值等,二阶插值的性能优于线性插值^[2]。时域插值先将导频的信道频率响应通过 IDFT 转换至时域,时域补零后再经 DFT 转换至频域^[3],其插值性能高效,但在 DSP 处理器中实现的难度大。

本文对 PUCCH 格式 1/1a/1b 进行基于导频的信道估计,分析了二阶插值、三次样条插值这两种可以应用于若干个连续导频分布的插值算法,推导出实际应用公式,并且提出改进的三次样条插值,即采用逐步外推的插值思想估计一个时隙内边缘的数据符号,充分利用导频的信息对数据符号进行插值。结果表明,改进的插值算法大部分计算都可以离线进行,而且其性能相比于二阶插值、未改进的三次样条插值有明显的提升,适用于 TD-LTE 测试仪表的实现。

2 PUCCH 信道估计

2.1 PUCCH 简介

上行控制信道在 LTE 系统中承载重要的控制信令,在接收端对其进行精确的信道估计对整个系统性能有着重要影响。根据控制信令中包含的信息种类,即上行传输的调度请求(SR)、下行数据包的混合重传请求确认(HARQ ACK/NACK)、信道质量指示器(QI)、秩指示器(RI)、预编码矩阵指示器(PMI),PUCCH 支持 1/1a/1b、2/2a/2b 等几种格式。为了最小化传输控制信令所需要的资源、利用频率分集,PUCCH 在一个子帧(subframe)内的资源映射如图 1 所示。如果同时传输探测参考信号和 PUCCH 格式 1/1a/1b,则 PUCCH 上最后一个 SC-FDMA 符号将留给探测参考信号,图 1 中 N_{RB}^{UL} 表示上行配置的带宽, n_{PRB} 表示物理资源块的索引号,其中相同 m 标号的两个资源块(Resource Block, RB)是一个 PUCCH 域^[4]。

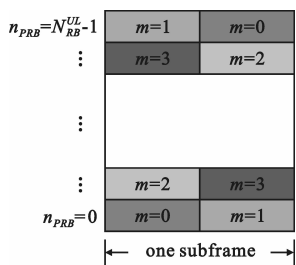


图 1 PUCCH 资源映射
Fig.1 Resource mapping of PUCCH

物理上行信道中用于信道估计的导频是解调参

考信号(Demodulation Reference Signal, DMRS),它是由通过对 Zadoff-Chu 序列做循环扩展得到的频域导频序列定义的。

2.2 导频的估计算法

LTE 系统在频域的信道估计可以分为估计导频的信道频率响应、数据符号插值两个子模块。基于导频的信道估计有最小二乘(Least Squares, LS)、最小均方误差(Minimum Mean Squares, MMSE)等方法,MMSE 比 LS 性能好,但要求计算信道自相关矩阵,复杂度高^[5]。考虑到 DSP 处理器的性能,本文选用 LS 算法作为信道估计算法。LS 算法就是使平方误差最小,即 $\hat{H}_p = Y_p / X_p$,其中 Y_p 表示接收到的导频, X_p 表示本地生成的导频, $\hat{H}_p$ 表示导频的信道频率响应估计值。

2.3 插值算法

根据 DMRS 的资源分布,对于扩展 CP 的 PUCCH 格式 1/1a/1b、普通 CP 的 PUCCH 格式 2/2a/2b,其插值均可以采用时隙内线性插值;而对于普通 CP 的 PUCCH 格式 1/1a/1b,由于其 DMRS 在每个时隙内是 3 个连续分布的,所以估计该时隙内数据位置上的信道频率响应不能利用线性插值,可以采用二阶插值或者三次样条插值,两者在 MATLAB 中存在库函数 Lagrangeinterp、spline。但是在 DSP 处理器中要实现所述插值只能借助于代码,因此 DSP 实现的关键就是在保证优良性能的条件下尽可能降低复杂度。

2.3.1 二阶插值

已知函数 $f(l)$ 在 3 个互异点 l_0, l_1, l_2 对应的函数值分别为 y_0, y_1, y_2 ,现构造一个插值函数 $\epsilon(l) = al^2 + bl + c$,使得 $\epsilon(l)$ 在插值节点 l_i 处与 $f(l)$ 在 l_i 处的值相等,即 $\epsilon(l_i) = f(l_i), (i = 0, 1, 2)$ 。

$\epsilon(l)$ 的参数 a, b, c 直接由插值条件决定,即满足下列代数方程组:

$$\begin{cases} al_0^2 + bl_0 + c = y_0 \\ al_1^2 + bl_1 + c = y_1 \\ al_2^2 + bl_2 + c = y_2 \end{cases}$$

由于 l_i 互异,故上述方程组系数行列式非零,从而 a, b, c 是存在且唯一的,利用二阶插值函数的拉格朗日形式构造 $\epsilon(l)$ ^[6]。

令

$$\epsilon(l) = A(l-l_1)(l-l_2) + B(l-l_0)(l-l_2) + C(l-l_0)(l-l_1)$$

由插值条件 $\epsilon(l_0) = y_0, \epsilon(l_1) = y_1, \epsilon(l_2) = y_2$ 可以

确定待定常数 A 、 B 、 C ，整理得插值函数 $\varepsilon(l)$ 为

$$\varepsilon(l) = y_0 \frac{(l-l_1)(l-l_2)}{(l_0-l_1)(l_0-l_2)} + y_1 \frac{(l-l_0)(l-l_2)}{(l_1-l_0)(l_1-l_2)} + y_2 \frac{(l-l_0)(l-l_1)}{(l_2-l_0)(l_2-l_1)} \quad (1)$$

2.3.2 三次样条插值

三次样条函数 $s(l)$ 是一种分段函数，该函数及其一、二阶导数在连接处都是连续的，它在节点 l_i ($a = l_0 < l_1 < \dots < l_{n-1} < l_n = b$) 分成的每个小区间 $[l_{i-1}, l_i]$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 上是三次多项式，区间 $[a, b]$ 上共需 $4n$ 个独立条件确定，由该函数及其一、二阶导数的连续性和插值条件 $s(l_i) = f(l_i)$, ($i = 0, 1, \dots, n$) 可以分别提供 $3(n-1)$ 、 $n+1$ 个独立条件，另外两个独立条件可以由两个端点条件决定^[7]。由于在信道估计中，待估计信道频率响应的各阶导数未知，所以端点条件设定为

$$\begin{aligned} s'(l_0) &= [f(l_1) - f(l_0)]/h_0 \\ s'(l_n) &= [f(l_n) - f(l_{n-1})]/h_{n-1} \\ h_i &= l_{i+1} - l_i \end{aligned} \quad (2)$$

由于 $s(l)$ 在每个子区间 $[l_{i-1}, l_i]$ 上为三次多项式，所以样条函数 $s''(l_i)$ 在 $[l_{i-1}, l_i]$ 上是线性函数，记 $M_i = s''(l_i)$, ($i = 0, 1, \dots, n$)，则 $s''(l_i)$ 在 $[l_{i-1}, l_i]$ 上可以表示为

$$s''(l) = (1-p)M_i + pM_{i+1} \quad (3)$$

其中 $p = (l - l_i)/h_i$, $h_i = l_{i+1} - l_i$ ，对式(3)两边进行两次积分，再代入插值节点整理得 $l \in [l_i, l_{i+1}]$ 时

$$\begin{aligned} s(l) &= (1-p)f(l_i) + pf(l_{i+1}) - \frac{h_i^2}{6}p(1-p) \cdot \\ &\quad [(2-p)M_i + (1+p)M_{i+1}], \\ &\quad (i = 0, 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (4)$$

对式(4)求导可得 $s'(l)$ ，由 $s'(l)$ 的连续性

$$s'(l_i + 0) = s'(l_i - 0), (i = 1, 2, \dots, n-1)$$

得到 M_i ($i = 0, 1, \dots, n$) 满足方程组

$$\mu_i M_{i-1} + 2M_i + \lambda_i M_{i+1} = q_i, (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (5)$$

且 $\mu_i = h_{i-1}/(h_{i-1} + h_i)$, $\lambda_i = 1 - \mu_i$,

$$q_i = \frac{6}{h_{i-1} + h_i} \left[\frac{f(l_{i+1}) - f(l_i)}{h_i} - \frac{f(l_i) - f(l_{i-1}))}{h_{i-1}} \right] \quad (6)$$

由端点条件式(2)有 $\lambda_0 = \mu_n = 1$, $q_0 = q_n = 0$ ，再根据公式(5)、(6)可以得到 $M_0, M_1, \dots, M_n$ ，代入式(4)即得三次样条函数的分段表达式。只要获得插值位置，所述过程大部分都可以离线计算，使其实际应用的复杂度大大降低。

3 改进的三次样条插值算法

对于普通 CP 的 PUCCH 格式 1/1a/1b，由表 2 可知，一个时隙内需要进行插值的数据符号数目等于 4 个 ($L = 0, 1, 5, 6$)，DMRS 的符号数目即插值节点数目等于 3 个 ($L = 2, 3, 4$)，在三次样条插值中相当于 $l_0 = 2 = L_2$, $l_1 = 3 = L_3$, $l_2 = 4 = L_4$ ，对应的函数值 $f(l)$ 即子载波 k 上所有 DMRS 的信道频率响应分别为 $H(k, L_2)$ 、 $H(k, L_3)$ 、 $H(k, L_4)$ 。可见，待插值数据分布于 DMRS 的两边，不属于任何分段区间，所以相当于在插值区间外作插值运算，进行外插会产生一定的误差，为了减小这种误差，提出一种改进的三次样条插值算法。

改进的三次样条插值算法在所述一个时隙内的操作思想描述如下：

Step1 计算数据位置 $L = 1, 5$ 处的估计值 $\hat{H}(k, L_1)$ 、 $\hat{H}(k, L_5)$ ：利用子载波 k 上位置 $L = 2, 3, 4$ 的所有 DMRS 的信道频率响应进行三次样条插值，得到区间 $[L_2, L_3]$ 、 $[L_3, L_4]$ 上的多项式，令与 DMRS 相邻的数据位置 $L = 1, 5$ 分别满足区间 $[L_2, L_3]$ 、 $[L_3, L_4]$ 上的多项式，按照所述样条插值过程可得估计值 $\hat{H}(k, L_1)$ 、 $\hat{H}(k, L_5)$ 。

Step2 计算数据位置 $L = 0, 6$ 处的估计值 $\hat{H}(k, L_0)$ 、 $\hat{H}(k, L_6)$ ：将子载波 k 上位置 $L = 1, 2, 3, 4, 5$ 的符号都看作位置 $L = 0, 6$ 用于信道估计的 DMRS，根据样条插值原理得到区间 $[L_1, L_2]$ 、 $[L_2, L_3]$ 、 $[L_3, L_4]$ 、 $[L_4, L_5]$ 上的多项式，令数据位置 $L = 0, 6$ 分别满足两端区间 $[L_1, L_2]$ 、 $[L_4, L_5]$ 上的多项式，按照所述样条插值过程可得估计值 $\hat{H}(k, L_0)$ 、 $\hat{H}(k, L_6)$ 。

可见，所述插值算法利用与 DMRS 相邻的数据位置估计值对边缘位置的数据进行三次样条插值，同时两次利用 DMRS 的信息，使得符号间信道频率响应的变化更加平滑，估计值更加准确。所述插值过程只描述了 PUCCH 上 3 个连续 DMRS 的情况，实际上改进的样条插值算法适用于 3 个以上任意多个连续数据的插值运算，可以应用到其它通信系统中，值得推广使用。

4 设计与实现

4.1 DSP 处理器

本系统选用 TMS320C6455 作为开发使用的 DSP

芯片。该芯片属于高速定点 DSP,最高时钟频率为 1.2 GHz,16 位定点处理性能达9 600 MIPS。

4.2 信道估计的 DSP 实现

终端所使用的导频是由网络端分配的,在进行信道估计时,网络端将会重新生成本地导频,放置于分配的内存区中。网络端对于上行信道数据的处理以子帧为周期进行,每接收一个子帧的数据就会对其进行 A/D 转换,然后根据上行信道采用的 CP 类型进行去 CP 处理,在 FPGA 模块完成 FFT 后传送到 DSP 处理器。网络端要对从上行信道接收到的数据进行处理,需要区分上行共享信道与上行控制信道,若是 PUCCH,再判断具体采用的格式。根据上述获取的信道信息,先将经过 FFT 处理后的数据进行解资源映射,得到接收的 DMRS 与数据符号,再将两路数据分别存储。

利用 LS 算法完成对各天线上 DMRS 的估计,算法中只涉及到一个除法。由于本地生成的 DMRS 模值为单位 1,所以接收到的 DMRS 序列与本地生成的 DMRS 序列的复数相除相当于前者与后者的共轭相乘。为了保证量化精度,需要将相乘结果的实部、虚部的最大值保存,再根据最大值进行归一化操作。

上行信道的 DMRS 在一个子帧内呈块状分布,在频率方向上都有 DMRS 符号,所以对数据符号插值只需要在时间方向上进行。利用数据所处的位置可以离线计算三次样条插值的各参数,最后将数据的估计值用 DMRS 估计值表示出来,并将表示值以数组的形式存放在内存中。设计插值程序为按照时隙内子载波递增的方向进行,即完成一个子载波上的全部数据插值后再对下一个子载波进行操作。

4.3 流程描述

综上所述,PUCCH 信道估计的 DSP 实现主要基于以下 6 个步骤:

- (1)将经 FFT 处理后的一个子帧数据读取至 DSP 处理器;
- (2)根据高层配置的 PUCCH 的 RB 数目、CP 类型、格式等参数完成信道类型判断;
- (3)将各天线上待处理的数据进行解资源映射,把解得的 PUCCH 数据及 DMRS 分别放入分配的内存区;
- (4)在接收端生成本地的 DMRS,放入分配的内存区;
- (5)采用 LS 算法获得 DMRS 符号的信道估计值;

- (6)读取内存中离线计算的参数,应用改进的三次样条插值估计 PUCCH 数据符号处的信道频率响应。

4.4 性能分析

在 MATLAB 仿真环境下对论文所提出的插值算法进行了仿真,并与二阶插值、三次条插值进行了比较。仿真条件选取如下:上行信道是 1×2 天线的 MI-MO 模型,信道类型是普通 CP 的 PUCCH 格式 1/1a/1b,带宽为5 MHz,即上行的 RB 数目是 25 个,每个子帧只有一个终端,则分配给 PUCCH 的 RB 数目是 1 个,FFT 大小是2 048,并且不同时传输探测参考信号。

图 3 给出了各种插值算法在扩展步行 A(Extended Pedestrian A,EPA)、多普勒频移5 Hz信道条件下的仿真性能。对比基于 LS 信道估计的二阶插值、三次样条插值以及改进的样条插值算法可知,由于改进的样条插值算法两次利用 DMRS 的信息,比前两者的插值都更为可靠,其误比特率明显最低,所以性能最优。

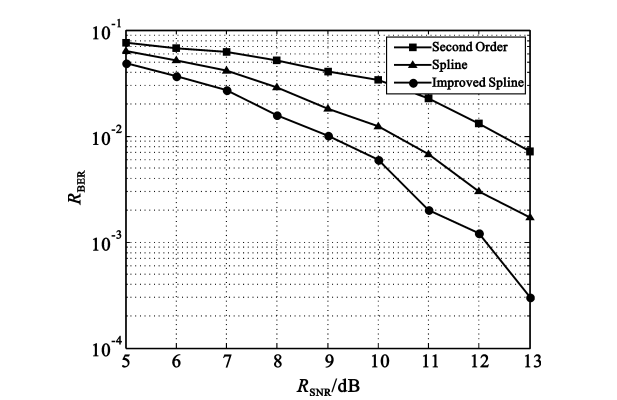


图 2 EPA 5 Hz 信道估计的插值算法性能对比
Fig.2 Performance comparison of interpolation algorithms in EPA with 5 Hz

在 DSP 处理器的软件实现中,通过优化程序循环体、指令并行,充分利用程序中的“NOP”指令^[8],按照上述仿真条件设计程序,经过程序运行,可以得到采用改进的三次样条插值进行信道估计时主要模块的最大执行周期数目(Cycle)数目,如表 1 所示。

表 1 各模块指令周期	
Table 1 Instruction cycles of each module	
模块	周期/cycle
DMRS 产生	58 000×2
解资源映射	5 100×2
LS 估计	2 600×2
改进的样条插值	1 800×2
总和	135 000

TMS320C6455 芯片的最高时钟频率为 1.2 GHz,即在一个子帧的 1 ms 时间内可以完成 1.2×10^6 cycle 的计算,本文方案的主要模块只需要 1.35×10^5 cycle,完全可以满足系统实时处理的需要。由于二阶插值、三次样条插值以及改进的样条插值大部分的计算都可以离线进行,三者在不同数据位置处的估计值都可以用 DMRS 的信道频率响应表示出来,所以在 DSP 实现的复杂度都是相当低的,具有高效的实时处理能力,但是改进的样条插值性能是最优的。

通过以上分析可知,改进算法不仅保证了插值计算的复杂度,还降低了误比特率,因此非常适合 TD-LTE 系统的要求,可以应用于该系统的实现。

5 结束语

LTE 系统要求提供速率更高的数据业务,因此对系统的实时性要求也更高。本文介绍了 LTE 上行控制信道的承载内容及映射方式,对现有的信道估计插值算法进行了详细分析,提出了一种基于 DSP 的 PUCCH 格式 1/1a/1b 信道估计插值模块的实现方案。通过分析其实现复杂度以及定点运算性能表明,该方案可以满足实时处理的要求,在保证低实时处理复杂度的条件下,其信道估计性能得到明显提升,对 LTE 系统物理层的软件开发工作具有重要的意义,同时也为其它通信系统提供了一种插值实现方案,值得推广使用。

参考文献:

- [1] Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker. LTE - The UMTS 长期演进理论与实践[M]. 马霓, 郭刚, 张晓博, 等, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2009: 5 - 11.
Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker. LTE - The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice[M]. Translated by MA Ni, WU Gang, ZHANG Xiao-bo, et al. Beijing: People's Posts & Telecom Press, 2009: 5 - 11. (in Chinese)
- [2] Meng - Han Hsieh, Che - Ho Wei. Channel estimation for OFDM systems based on comb - type pilot arrangement in frequency selective fading channels[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronic, 1998, 44(1): 217 - 225.
- [3] 陈奎, 徐钊. OFDM 系统二维变换域信道估计算法[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(6): 927 - 931.
CHEN Kui, XU Zhao. 2 - D Transform Domain Channel Estimation Method for OFDM Systems[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(6): 927 - 931. (in Chinese)

- [4] 3GPP TS 36.211 v9.0.0, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Physical Channels and Modulation (Release 9)[S].
- [5] Sinem Coleri, Mustafa Ergen, Anuj Puri, et al. Channel Estimation Techniques Based on Pilot Arrangement in OFDM Systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2002, 48(3): 223 - 229.
- [6] 李岳生, 黄友谦. 数值逼近[M]. 青岛: 人民教育出版社, 1978: 27 - 30.
LI Yue - sheng, HUANG You - qian. Numerical Approximation[M]. Qingdao: People's Education Press, 1978: 27 - 30. (in Chinese)
- [7] 程正兴, 李水根. 数值逼近与常微分方程数值解[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000: 67 - 75.
CHENG Zheng - xing, LI Shui - gen. Numerical Approximation and Numerical Solution of Ordinary Differential Equations [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2000: 67 - 75. (in Chinese)
- [8] Texas Instruments Incorporated. TMS320C6000 系列 DSP 编程工具与指南[M]. 田黎育, 何佩琨, 朱梦宇, 译. 北京: 清华大学出版社, 2006: 32 - 50.
Texas Instruments Incorporated. TMS320C6000 series DSP programming tools and guidelines[M]. Translated by TIAN Li - yu, HE Pei - kun, ZHU Meng - yu. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 32 - 50. (in Chinese)

作者简介:

李小文(1955—), 男, 重庆人, 1988 年获重庆大学信号与系统专业工学硕士学位, 现为重庆邮电大学硕士生导师, 主要从事 TD-LTE 综合测试仪表的开发;

LI Xiao - wen was born in Chongqing, in 1955. He received the M.S. degree in signals and systems from Chongqing University in 1988. He is now an instructor of graduate students. His research concerns TD-LTE development of integrated test instruments.

宋海贝(1987—), 女, 河南鹤壁人, 2009 年获河南师范大学电子信息工程专业工学学士学位, 现为硕士研究生, 主要研究方向为 LTE 系统物理层关键技术;

SONG Hai - bei was born in Hebi, Henan Province, in 1987. She received the B.S. degree in Electronic and Information Engineering from Henan Normal University, in 2009. She is now a graduate student. Her research concerns LTE system physical crucial technology.

Email: songhaibei1987@163.com

方前军(1985—), 男, 湖北荆州人, 2009 年获工学学士学位, 现为硕士研究生, 主要研究方向为 LTE 系统物理层关键技术。

FANG Qian - jun was born in Jingzhou, Hubei Province, in 1985. He received the B.S. degree in 2009. He is now a graduate student. His research concerns LTE system physical crucial technology.