

## TD-LTE 下行信道估计的 ASIP 实现

陶 佳<sup>1</sup>, 龙 恳<sup>1</sup>, 冯雪林<sup>2</sup>, 林江南<sup>2</sup>

(1. 重庆邮电大学重庆市移动通信技术重点实验室, 重庆 400065;

2. 中科院计算技术研究所无线中心, 北京 100190)

**摘 要:** 基于 ASIP 的处理芯片和特定应用的 ASIP 指令集特点, 选择了一种基于小区专用参考信号的 TD-LTE 下行信道估计算法的 ASIP 实现方案, 并对这种方案完成了 ASIP 汇编实现。这种汇编实现具有较低的时间复杂度和定点运算误差, VCS 仿真结果表明, 该实现方案具有良好的实时处理能力。

**关键词:** 信号处理; 信道估计; TD-LTE; 小区专用参考信号; ASIP

**中图分类号:** TN911.7      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2016)12-0101-05

## Realization of Channel Estimation in TD-LTE Downlink Based on ASIP

TAO Jia<sup>1</sup>, LONG Ken<sup>1</sup>, FENG Xue-lin<sup>2</sup>, LIN Jiang-nan<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Mobile Communications Technology of Chongqing, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. Wireless Center, Institute of Computing Technology,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** A scheme for realizing Application Specific Instruction Set Processor (ASIP) is chosen, which is based on a channel estimation algorithm of cell-specific reference signals in TD-LTE downlink. The ASIP chip contains a set of instructions for particular applications. Besides, the assembly language realization of the scheme is implemented, which exhibits lower time complexity and less fixed point operation error. Simulation results of Verilog Compiled Simulator (VCS) show that the scheme has a good real-time processing capability.

**Key words:** signal processing; channel estimation; TD-LTE; cell-specific reference signal; ASIP

### 0 引言

LTE (Long Term Evolution) 是所有无线通信系统里非常重要的一种无线通信系统, 它利用多址接入方式 (OFDMA) 技术和 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 多天线技术<sup>[1]</sup> 的完美结合, 很好地降低了时延、提高了数据速率和系统容量。无线通信信道复杂多变, 能否很好地对无线信道进行信道估计并在接收端恢复出发送端的数据, 对于任何一个无线通信系统的应用都至关重要。信道估计也是 LTE 无线通信系统中至关重要的关键技术之一。

根据所选的数字信号处理器 (DSP) 的不同, 信道估计的实现方案和汇编实现复杂度也不同。文献[2]根

据所选的 TI 的 TMS320C6455 DSP 芯片, 采用 LS (Least Squares) 线性插值信道估计算法方案和通用指令集完成了 DSP 汇编实现, 能够较好地满足实际需求; 文献[3]选择飞思卡尔的多核多 DSP 开发平台 MSC8156AMC, 采用 LS 线性插值估计算法方案, 并结合通用指令集完成了 DSP 汇编实现, 能够较好地对信道进行估计。但是文献[2-3]是基于通用汇编指令集实现的, 不能充分挖掘数据级的并行度 (DLP), 因此算法执行效率较低。

本文采用中科院计算所无线中心自主研发的具有超长指令字 (VLIW) 和单指令多数据 (SIMD) 结构的 ASIP (Application Specific Instruction Set Processor) 处理芯片, 并根据基带信号处理的并行化特点设计了高效的专用指令集。本文根据 OFDM 信道估计的方案, 选择合适的专用指令, 利用 VLIW 和 SIMD 技术实现了 LS 线性插值估计算法, 降低了汇编实现的时间复杂度。通过 Matlab 和 VCS (Verilog Compiled Simulator) 仿真实验表明, 本方案汇编实现的定点误差较小, 汇编实现的复杂

收稿日期: 2015-12-04

修回日期: 2015-12-23

基金项目: 国家重大专项 (2014ZX03003004-003)

作者简介: 陶 佳 (1989—), 男, 重庆丰都人, 硕士生, 研究方向为无线通信技术。

度即 cycle 数也较小,具有很好的实时处理能力。

## 1 下行参考信号

LTE 下行信道估计采用了小区专用参考信号,在用户一侧进行信道估计和相干解调。小区专用参考信号支持数据信道在小区的每个下行子帧中发送,可以在 0~3 号天线之中的一个或多个天线上传输并且子载波间隔只能为 15 kHz。

为增加 LTE 系统抗多径时延扩展和抗多普勒频移的能力,3GPP 协议<sup>[4]</sup>规定在一个时隙的 0 号 OFDM 符号和 4 号 OFDM 符号上存在参考信号;在频域上,每 6 个子载波插入一个参考信号。本文采用 2×2 MIMO 信道模型,占用 0 和 1 号天线端口。参考信号生成的算式为

$$r_{l,n_s}(m) = \frac{1}{\sqrt{2}}(1 - 2 \cdot c(2m)) + j \frac{1}{\sqrt{2}}(1 - 2 \cdot c(2m+1))$$

$$m = 0, 1, \dots, 2N_{RB}^{\max, DL} - 1 \quad (1)$$

式中: $n$  为一个无线帧中的时隙号; $l$  为一个时隙中的 OFDM 符号数; $c(m)$  为伪随机序列。

## 2 信道估计算法方案

LTE 下行链路信道估计最常用的算法有最小二乘法(LS)和线性最小均方误差算法<sup>[5]</sup>(LMMSE)。其中:LS 信道估计算法不需要知道信道的任何统计特性,计算简单易于实现,但算法性能较差,精度较低;LMMSE 信道估计算法有较好的信道估计性能,但是存在大量的矩阵运算,算法复杂度很高。本文根据所选的 ASIP 实现角度出发,综合考虑算法的性能和实现复杂度,选择了 LS 线性插值估计算法。

### 2.1 信道估计算法流程

LS 线性插值估计算法流程如图 1 所示。送入信道估计模块的数据是经过 FFT 变换后的数据,为了便于 LS 算法的实现,需要将参考信号与数据分离后再进行 LS 估计。LS 估计是将接收到的参考信号向量与每一个已知的参考信号向量做除法,得到参考信号点处的信道频率响应(CFR)。最后将参考信号点处的 CFR 进行稀疏,预留 5 个子载波的位置,并通过一阶线性插值算法得到这些子载波处的 CFR。

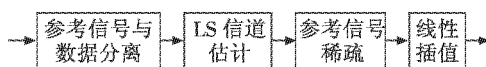


图 1 信道估计算法流程图

Fig. 1 Flow chart of channel estimation algorithm

### 2.2 参考信号与数据信号分离

为了便于并行化处理接收到的参考信号,需要将

参考信号从数据序列中分离出来,形成参考信号序列  $R_i$ ,即

$$R_i = y_{(S+6 \times i)} \quad i = 0, 1, \dots, (N_{RE}/6 - 1) \quad (2)$$

其中:对于一个时隙中的 0 号 OFDM 符号,参考信号的起始偏移量  $S = N_{ID}^{\text{cell}} \% 6$ ;对于 4 号 OFDM 符号, $S = (N_{ID}^{\text{cell}} + 3) \% 6$ ,其中, $N_{ID}^{\text{cell}}$  为物理层小区标识。

### 2.3 LS 估计算法

将 LTE 下行链路中发送端的数据矩阵表示为  $X$ ,接收端数据为  $Y$ ,噪声为  $Z$ ,则接收端收到的信号矩阵表示为

$$Y = X * H + Z \quad (3)$$

LS 信道估计算法<sup>[6]</sup>利用最小平方的准则,需要式(4)的代价函数值最小

$$J(\hat{H}_{LS}) = \|Y - X\hat{H}_{LS}\|^2 \quad (4)$$

令代价函数关于  $\hat{H}_{LS}$  的偏导数等于 0,即

$$\frac{\partial J(\hat{H}_{LS})}{\partial \hat{H}_{LS}} = -2(X^H Y)^* + 2(X^H X \hat{H}_{LS})^* = 0 \quad (5)$$

然后可以得到 LS 信道估计的解为

$$\hat{H}_{LS} = (X^H X)^{-1} X^H Y = X^{-1} Y \quad (6)$$

$$\text{即 } \hat{H}_{LS} = \begin{bmatrix} Y(0) & Y(1) & \dots & Y(N-1) \\ X(0) & X(1) & \dots & X(N-1) \end{bmatrix}^T$$

### 2.4 参考信号稀疏与插值

参考信号的稀疏,即将参考信号恢复到参考信号与数据信号分离之前的频域位置上,和参考信号与数据分离过程的逆过程类似。在本信道估计算法中,采用线性插值算法<sup>[7]</sup>来恢复数据子载波上的 CFR。线性插值算法原理是利用相邻导频点处的 CFR 信息,确定它们之间的数据子载波处的 CFR。对于第  $k$  个子载波,有  $mL < k < (m+1)L$ ,其线性内插算式为

$$H(k) = H(mL+l) = (1 - \frac{l}{L})\hat{H}_{LS}(mL) + \frac{l}{L}H_{LS}(mL+L) \quad (7)$$

式中: $H(k)$  是第  $k$  个数据子载波处的 CFR; $\hat{H}_{LS}(mL)$  和  $H_{LS}(mL+L)$  分别是与第  $k$  个子载波相邻的导频处的 CFR, $L$  是导频的插入间隔,对于 LTE 系统, $L=6$ ,即每 6 个子载波中插入一个导频信号。最后通过线性插值后的  $H(k)$  即为信道估计在频域  $k$  点的值。

## 3 ASIP 处理器

本文采用的数字信号处理器是中科院计算所自主研发的一款专用指令集处理器 ASIP。基于 ASIP 的数字信号处理芯片的指令集是针对特定应用程序和应用场景而精心设计的。因此,这类 ASIP 处理芯片能在特定

的领域内发挥它的优势,可实现程序的高效运行,同时可兼顾低功耗的能力。

### 3.1 ASIP 的结构

此 ASIP 专注于基带信号处理,具有处理多路数据链路、混合单指令多数据 (SIMD) 和超长指令字 (VLIW) 的执行、流水线的控制 and 数据吞吐率间的平衡及多端口寄存器文件的高效访问的能力,从而满足无线通信技术对高速处理器的要求。

VLIW 和 SIMD 混合结构如图 2 所示。

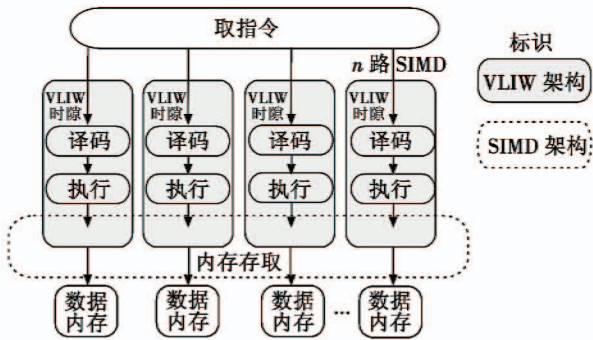


图 2 ASIP 处理器结构

Fig. 2 The architecture of ASIP processor

SIMD 是一种空间并行技术,通过一个控制器来控制多个运算单元,同时对向量数据中的每个元素执行相同的操作。VLIW 是一种利用指令并行的 CPU 体系架构,通过将多条指令集联合组成一条超长的指令来实现高效并行处理的。

### 3.2 ASIP 的指令集和数据类型

ASIP 的指令集可以分为标量指令集和向量指令集两部分。标量指令集包括整数算术运算指令、逻辑运算指令、按位移位指令、条件跳转指令和无条件跳转指令。向量指令一部分为基本的向量指令,包括算术运算指令、向量逻辑运算指令、向量数据移位指令和数据搬移指令;另一部分为专用指令,包括乘累加指令 (VMAC)、蝶形运算指令 (VBFY)、数据重塑指令 (SHUF) 等。专用指令 SHUF 可以高效地对本文中 LS 线性插值信道估计下的分离参考信号模块与稀疏参考信号模块进行数据处理,SHUF 功能的描述如下。

```

v. 16shuf vrD, vrS, vsP, vmM
for(i = 0; i < VLW; i++) {
    if (vmM[i]) {
        if(0 <= vsP[i] <= 31)
            vrD[i] = vrS[vsP[i]];
        else
            vrD[i] = vrS[i];
    }
}
    
```

}}

它通过 32 位控制寄存器 vmM 来控制搬移的数据量,通过寄存器 vsP 的值来将向量寄存器 vrS 中的值搬移到向量寄存器 vrD 中。

ASIP 的数据类型包括以下几种:1) 16 bit 有符号整数;2) 32 bit 有符号整数;3) 16 bit 有符号定点数;4) 32 bit 有符号定点数;5) 16 bit 有符号复整数;6) 32 bit 有符号复整数;7) 16 bit 有符号复定点数;8) 32 bit 有符号复定点数。

## 4 信道估计模块的 ASIP 实现

结合插值估计算法的方案和 ASIP 指令集的特点,LS 线性插值估计算法的 ASIP 汇编实现可以分为以下几个部分来实现。

### 4.1 参考信号与数据信号分离的汇编实现

分离参考信号与 LS 估计的 ASIP 实现参考 2.2 节的算法原理,假设参考信号的起始偏移量  $S = 0$ ,具体的 ASIP 汇编实现原理见图 3。从图中可以看到,起始参考信号  $R$  的偏移量为 0,SHUF 向量指令一次能处理 16 位数据,每位数据为 32 bit 有符号,所以需要将 6 个向量中的 16 个参考信号用 SHUF 指令到一位向量(图中  $Y$ )中。

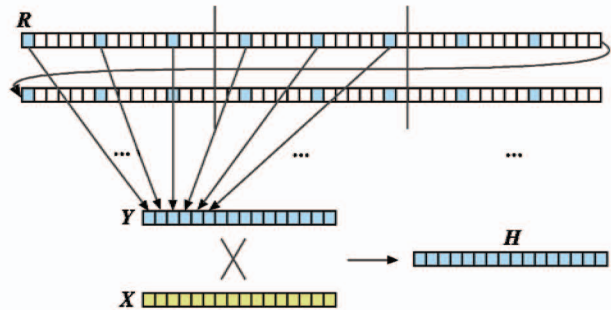


图 3 分离参考信号与 LS 估计的实施方案

Fig. 3 Implementation of the reference signal separation and LS estimation

### 4.2 LS 估计的汇编实现

LS 估计的方法见式(6)。为了获得参考信号点处的 CFR,需要将接收到的参考信号与已知的参考信号对应项做除法。DSP 汇编指令中没有专用的复数除法指令,可以将复数的除法转化为乘法,即首先取已知 RS 的共轭得到  $X$ ,再与接收到的 RS 值  $Y$  对应项做乘法,最终得到 CFR 值  $H$ 。

### 4.3 稀疏参考信号与线性插值

稀疏参考信号与线性插值的原理见 2.4 节,并假设起始偏移量  $S = 3$ ,具体的 ASIP 汇编实现原理见图 4。



图4 稀疏参考信号与线性插值方法

Fig.4 Dispersion of reference signal and linear interpolation

前后两个采样值乘以一定的系数并相加得到 CFR。因此,需要构造两组向量:第1组向量  $H_1$  是利用 SHUF 指令将参考信号处的 CFR(图4中  $H$ ) 稀疏到6个向量中来得到;第2组向量  $H_2$  是先将参考信号的 CFR 左移一位并利用相同的 SHUF 规则将其稀疏到6个向量中来得到。根据线上对应的线性系数相加得到所求的 CFR。

4.4 性能分析

在 Matlab 中搭建 LTE 下行发送和接收链路,采用最大带宽为 20 MHz 的条件,共 100 个 RB,无线信道采用 EPA 环境<sup>[8]</sup>,接收端采用 LS 线性插值估计算法进行信道估计。为了仿真 ASIP 汇编指令对 16 位<sup>[9]</sup>(包括一位符号位)定点数据的处理过程,在 Matlab 中对 LS 线性插值估计算法模块进行浮点向定点的转化,最后将 LS 信道估计模块的浮点运算的仿真结果和定点运算的仿真结果对接收端误码率的影响绘制于图 5,从仿真图中可以看到,定点化对误率几乎没有损失,能够很好地满足实际应用。

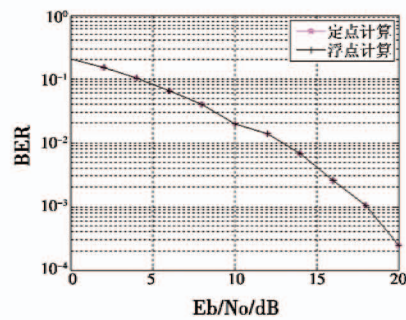


图5 EPA 环境下误码率性能仿真图

Fig.5 BER performance simulation map under EPA environment

通过汇编仿真得到 LS 线性插值信道估计算法模块的 cycle 数为 6227 个,其中关键模块的汇编的运行周期(cycle 数)如表 1 所示。LTE 下行链路仿真如图 6 所示。

表1 关键模块的运行周期

Table 1 Operation cycle of key modules

模块名称	运行周期	模块名称	运行周期
小区专用参考信号生成	2015	稀疏信号与线性插值	3012
分离参考信号与 LS 估计	1200	共计	6227

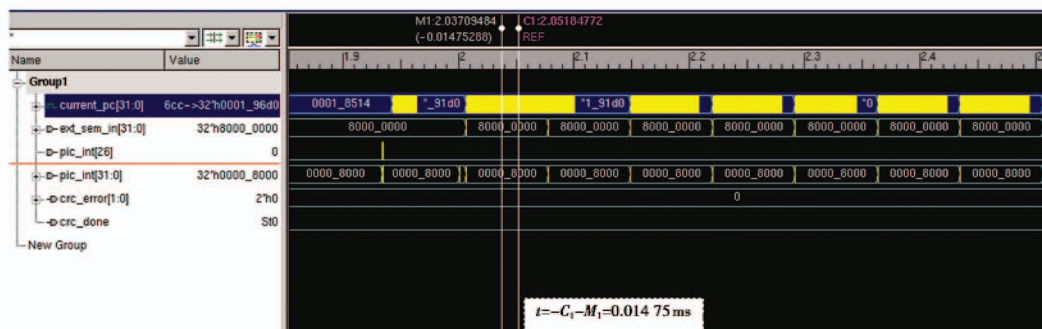


图6 LTE 下行链路仿真

Fig.6 LTE downlink simulation

VCS 是编译型 Verilog 模拟器,它具有仿真基带芯片的功能,用汇编代码在基带芯片中的 ASIP 芯片中搭建 LTE 下行链路,此次仿真采用最大带宽为 20 MHz,共 100 个 RB。如图 6 所示,时序逻辑仿真图中寄存器的循环冗余码校验误差(crc\_error)值都为 0,可以判断出每个下行子帧的接收数据都正确译码。ASIP 芯片的时钟是 430 MHz,一个子帧在 1 ms 内信道估计模块占用 0.014 75 ms 的时间,具有很好的实时处理能力。

### 5 小结

本文根据中科院计算所开发的 ASIP 芯片和 ASIP 指令集,选择了 LS 线性插值估计算法实现方案。仿真结果表明,这种实现方案的定点运算的误差很小,ASIP 汇编实现的复杂度很低,具有很好的实时处理能力。本文实现方案对实际应用有较高的参考价值。

### 参考文献

[1] SHIN H, LEE J H. Closed-form formulas for ergodic capacity of MIMO rayleigh fading channels [ C ] // IEEE International Conference on Communications, 2003 : 2996-3000.

[2] 李小文,梁琳. TD-LTE 下行信道估计的 DSP 实现 [ J ]. 器件与应用, 2011, 35(7) : 44-48. ( LI X W, LIANG L. Realization of channel estimation in TD-LTE downlink based on DSP [ J ]. Parts & Applications, 2011, 35(7) : 44-48. )

[3] 汲晓磊. LTE-A 下行信道估计技术及 DSP 实现 [ D ]. 成都:电子科技大学,2013. ( JI X L. LTE-A downlink channel estimation and DSP implementation [ D ]. Chengdu : University of Electronic and Technology of China, 2013. )

[4] 3GPP. TS 36. 211 V10. 7. 0. physical channels and modulation [ Z ]. 2013.

[5] MEIDLINGER M, WANG Q. Performance evaluation of LTE advanced downlink channel estimators [ C ] // The 19th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), IEEE, 2012 : 252-255.

[6] 张帅. LTE 下行链路信道估计技术研究 [ D ]. 成都:西南交通大学,2014. ( ZHANG S. Research on channel estimation algorithm of LTE downlink [ D ]. Chengdu : Southwest Jiaotong University, 2014. )

[7] ZHANG X J, HE J A, HOU L, et al. Study for channel estimation in OFDM system based on comb-pilot [ C ] // The 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2010 : 1-3.

[8] 3GPP. TS 36. 104 v8. a. 0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) base station radio transmission and reception [ EB/OL ]. [ 2010-06-21 ]. [http://www.3gpp.org/ftp/Specs/2010-06/Rel-8/36\\_series/](http://www.3gpp.org/ftp/Specs/2010-06/Rel-8/36_series/).

[9] 李萌. 一种 16 位定点 DSP 核的设计和实现 [ D ]. 沈阳:沈阳工业大学,2014. ( LI M. Design and research of a 16-bit-fixed-point DSP core [ D ]. Shenyang : Shenyang University of Technology, 2014. )

(上接第 100 页)

TIR lens for LED streetlight [ J ]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2009, 121 ( 19 ) : 1761-1765.

[9] FANG Y C, TZENG Y F, LI S X. Multi-objective design and extended optimization for developing a miniature light emitting diode pocket-sized projection display [ J ]. Optical Review, 2008, 15(5) : 241-250.

[10] CHEN W C, LAI T T, WANG M W, et al. An optimization system for LED lens design [ J ]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(9) : 11976-11983.

[11] TSAI J T, LIU T K, CHOU J H. Hybrid Taguchi-genetic algorithm for global numerical optimization. [ J ]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(4) : 365-377.

[12] FANG Y C, LIU T K, TSAI C M, et al. Extended optimization of chromatic aberrations via a hybrid Taguchi-genetic algorithm for zoom optics with a diffractive optical element [ J ]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2009, 11(4) : 45706-45719.

[13] TSAI J T, CHOU J H, LIU T K. Optimal design of digital IIR filters by using hybrid Taguchi genetic algorithm [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(3) : 867-879.

[14] 甄艳坤,李娟妮,白燕. 基于混合田口基因算法的 TIR 透镜优化设计 [ J ]. 计算机工程与设计 2013, 34(12) : 4395-4399. ( ZHEN Y K, LI J N, BAI Y. Optimal design of TIR lens based on the hybrid Taguchi-genetic algorithm [ J ]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(12) : 4395-4399. )

欢迎投稿 <http://www.dgykz.com>