

面向芯片实现的 LTE Turbo 码参数优化设计

张云春, 许希斌, 丁国鹏

(厦门大学 通信工程系, 福建 厦门 361005)

摘要:该文分析了 LTE 系统中 Turbo 码的译码, 并针对定点运算的特点进行了改进。通过大量的仿真确定了定点 LOG-MAP 译码算法的关键参数。量化比特数和 AWGN 中 GAIN 值, 外在(extrinsic)信息因子以及定点化、归一化、溢出处理等操作, 这些处理使得该译码算法在译码性能上接近浮点 LOG-MAP 译码算法, 对于 Turbo 译码在硬件上的实现具有一定的参考价值。

关键词: LTE; GAIN; 外在信息因子

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1009-3044(2011)07-1625-03

For the Chip's Design of LTE Turbo Code Optimization

ZHANG Yun-chun, XU Xi-bing, DING Guo-peng

(Communication Engineering school, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: This article analyze Turbo decoder in LTE system, And the characteristics for the fixed-point arithmetic has been improved. By a large number of simulation Determined the key parameters on fixed-point LOG-MAP decoding algorithm, Including the number of quantization bits and value of GAIN in AWGN, extrinsic information factor and Fixed point, Normalized, overflow operation, Such treatment makes the decoding algorithm in decoding performance close to the classic LOG-MAP decoding algorithm, for Turbo decoding implementation in hardware has some reference value.

Key words: LTE; GAIN; extrinsic information factor

Turbo 码因为具有接近 Shannon 限的性能, 从提出后便得到广泛的关注, 由于优异的纠错编码性能对移动通信系统具有非常的大吸引力, 所以在第三代通信系统中都将 Turbo 码作为信道编码的方案, 特别是在 LTE 系统中 turbo 码^[1]的编码方案中引入了 QPP 交织器, 使得 turbo 码编码性能获得极大的提高。本文的研究对象是 LTE 系统中的 Turbo 码, 通过仿真确定译码参数, 从多个角度提高译码的整体性能, 整理出一套可行的译码方案。

1 Turbo 码译码算法

用于 Turbo 码译码的具体算法有: MAP(Maximum A Posteriori)、Max-Log-MAP、Log-MAP 和 SOVA(Soft Output Viterbi Algorithm) 算法。这里简要概述 Log-MAP 算法。

1.1 LOG-MAP 算法

通过对 Turbo 码译码算法原理的比较研究, 我们知道 MAP 算法^[2]非常复杂, 运算量极大, 运算中不仅有大量的乘法和加法, 还有在数字电路中较难实现的指数和对数运算, 这极大的影响了 MAP 算法的实用。Koch 和 Baier 及 Erfanian 等人提出 Max-Log-MAP 算法, 大大地简化了 MAP 算法的复杂性, 由于计算中做了一定地近似处理, 因此这种算法不是最优的。Robertson 等人对 Max-Log-MAP 算法做了一定地修正, 被称作 Log-MAP 算法。Log-MAP 算法^[3]是 MAP 算法在对数域上的转换。经过对数域的转换, 信息比特后验概率的对数似然比即 LLR 值为:

$$L(u_k|Y) = \ln \sum_{s'} \alpha_{k-1}(s') \cdot \gamma_k(s', s) \cdot \beta_k(s) - \ln \sum_{s'} \alpha_{k-1}(s') \cdot \gamma_k(s', s) \cdot \beta_k(s) \\ = \max_{s'} [-A_{k-1}(s') + R_k(s', s) + B_k(s)] - \max_{s'} [-A_{k-1}(s') + R_k(s', s) + B_k(s)] \quad (1)$$

上式利用雅可比对数算子:

$$\max^*(x, y) = \ln(\exp x + \exp y) = \max(x, y) + \ln[1 + \exp(-|x - y|)] = \max(x, y) + f_c(|x - y|) \quad (2)$$

定义修正函数:

$$f_c(x) \triangleq \ln(1 + e^{-|x|}) \quad (3)$$

由于在 Turbo 码的译码迭代过程中, 每个 SISO 译码模块输出的信息中一定要有一部分作为下次的先验信息输入, 所以要从(1)式计算出的 $L(u_k|Y)$ 中分离出信息。我们把它分成三部分:

$$L(u_k|Y) = L(u_k) + L_c y_{ks} + L_e(u_k) \quad (4)$$

其中 $L(u_k)$ 称为 u_k 先验信息, $L_c y_{ks}$ 为系统比特信息, $L_e(u_k)$ 为外在信息, 其中 $L_e(u_k)$ 信息在 Turbo 码的译码中被用作下一个成员译码器的先验信息输入。

2 仿真及分析

基于性能和译码速率的考虑,本文采用 Log-Map 算法(修正函数 $fc(x)$ 采用查表方法计算机^[4])对 Turbo 码译码算法的一些参数进行了仿真分析。

2.1 定点化过程中 GAIN 值对 LOG-MAP 算法的影响

为了便于硬件实现后看出硬件实现后的译码性能,对于每个接受到的输入比特 $xx(i)$,进行了定点化的处理:处理方式如下:

$$I_{xx}(i)=fix(xx(i)*GAIN) \tag{5}$$

fix 表示取整。

其中 GAIN 的取值是随着量化比特数而变化的,其计算方法如下:

由于 GAIN 值的选取跟经过信道后的接收信号的幅度和量化比特数有关,因此对于不同的量化比特数和接收信号幅度,GAIN 值也行相应的调整。

根据仿真的结果来看,当接收信号幅 $[-8,+8]$ 之间的时候,采用 6 比特量化时,其区间为 $[-32,32]$,因此有:

$$GAIN*[-8,8]=[-32,32]/2 \tag{6}$$

得出 $GAIN=2$ 。

同样的当采用 8 比特量化时,其区间为 $[-128,128]$,同样有:

$$GAIN*[-8,8]=[-128,128]/2 \tag{7}$$

得出 $GAIN=8$ 。由此可以得出计算 GAIN 值的一般公式:假设信号幅度为 $[-2^a,2^a]$,量化比特数位 n ,则有:

$$GAIN*[-2^a,2^a]=[-2^n, 2^n]/2 \tag{8}$$

即可计算出 GAIN 的值。

对于量化比特数 QUANTIZ_BITS,取值原则上可以为任意整数,在实际过程中一般取 6 或 8,对与不同的量化比特数,取值的范围也不同,如当为量化比特数位 6 时,取值范围 $[-32,31]$,其中:

$$qmax=(1<<(QUANTIZ_BITS-1))-1 \tag{9}$$

仿真程序中取为 $[-qmax,qmax]$ 是为了保证正负数值的对称。

为了提高精度,在递推 α_k 和 β_k 的状态似然值时,要不断的根据上一时刻求出来的两个状态似然值 α_{k-1} 和 β_{k-1} 的数据是否溢出或全为负,对所有数据进行偏移(加上 Shift)。这里的偏移量 Shift 加在当前时刻的值中。若变量定点化位数 QUANTIZ_BITS 等于 6,则当全为正时,则依据偏移量:

$$Shift=-(1<<(QUANTIZ_BITS-3))*3 \tag{10}$$

可得偏移量 $Shift=-24$ 。

若全为负则偏移量:

$$Shift=(1<<(QUANTIZ_BITS-2)) \tag{11}$$

可得偏移量 $Shift=16$ 。

对于不同量化比特数相应的归一化取值如表 1 所示。

表 1 不同量化比特数相应的归一化取值

量化比特数	正溢出 shift 取值	全为负值的 shift 取值
4	-6	4
5	-12	8
6	-24	16
7	-48	32
8	-96	64

为了防止在译码过程中值的溢出,特在每次数据处理后加入限幅函数,如果变量值大于 $qmax$,则取为 $qmax$,如果小于 $-qmax$ 则取为 $-qmax$,以此防止中间值溢出。在定点化仿真过程中采用了加入 CRC 校验的仿真方法,即每经过译码器译码一次就将译码结果进行 CRC 校验,一旦 CRC 校验成功且未达到迭代次数的最大值,则终止迭代并输出译码结果。

仿真条件:在 AWGNX 信道条件下,采用定点算法,量化比特数位 6,迭代次数为 7,码长为 6144;采用 LOG-MAP 算法;其中蓝色为 $GAIN=2$ 时的曲线,红色曲线为 $GAIN=1.44$ 时的曲线,仿真结果见图 1 所示。

仿真条件:在 AWGNX 信道条件下,采用定点算法,量化比特数位 8,迭代次数为 7,码长为 6144;采用 LOG-MAP 算法;其中蓝色为 $GAIN=8$ 时的曲线,红色曲线为 $GAIN=1.44$ (先前的参数)设置时的曲线,仿真结果见图 2 所示。

从图 2 仿真结果可以看出,当量化比特数为 6 时,两者性能基本相同,新的 GAIN 值略好,从图 3 可以看出当量化比特数为 8 比特时,新的 GAIN 值比原先的设置要好约 0.1dB。总的来说,新的参数设置方法性能要好于原先的参数设置。

2.2 外在(extrinsic)信息因子对译码性能影响

在一般的 LOG-MAP 算法中,对外在信

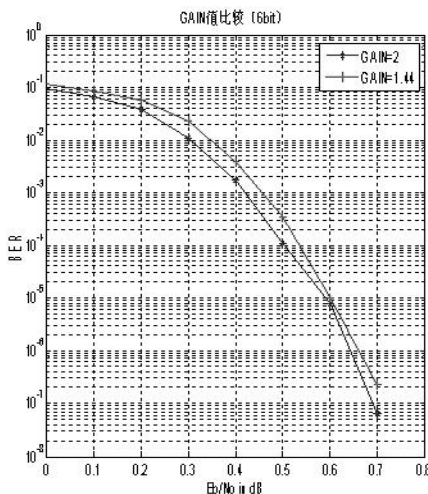


图 1 GAIN 值对译码性能影响

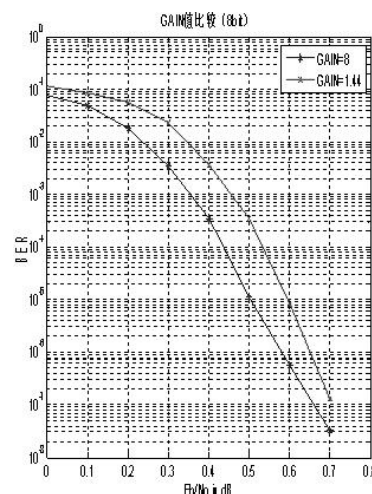


图 2 GAIN 值对译码性能影响

息是不做任何处理的,外在信息经过交织或去交织后作为下一个译码器的先验信息。Jorg Vogt 和 Adolf Finger 提出了一个显著提高译码性能的方法,即用一个系数(scale)乘以外在信息 $L_e(u_k)$ 。把处理后的外在信息作为下一个译码器的先验信息输入。在仿真的过程中分别对 $scale=[0.65\ 0.7\ 0.75\ 0.8\ 0.85\ 0.9\ 0.95]$ 原始方案(1)进行了仿真,为了便于比较取出其中性能较好的 3 条曲线,仿真曲线如图 3 所示

仿真条件:在 AWGNX 信道条件下,采用定点算法,量化比特数为 6,GAIN=2;最大迭代次数为 7,码长为 6144;采用 LOG-MAP 算法,这里比较了 $scale=[0.65\ 0.7\ 0.75\ 0.8\ 0.85\ 0.9\ 0.95]$ 原始方案(1)。

通过大量的仿真得知,当 $scale=[0.65\ 0.7\ 0.75\ 0.8\ 0.85\ 0.9\ 0.95]$ 原始方案(1)时, $scale$ 值对于性能影响差异相差不到 0.1db,这里把 $scale=0.7, 0.85$, 原始方案(没有乘以外在信息因子)三条曲线(见图 3)单独拿出来对比我们可以清晰的看到,当 $scale$ 值等于 0.85 时误码率最低,根据仿真结果,推荐选取 $scale=0.85$ 。

2.3 定点与浮点结果比较

仿真条件:根据 3.1,3.2 节参数的调整后,令 $GAIN=8, scale=0.85$,在最大迭代次数为 7,码长为 6144;LOG-MAP 算法的情况下,定点译码与浮点译码仿真曲线的对比如图 4 所示。

由仿真结果可以看出,当量化比特数为 6 比特时,定点译码与浮点译码在译码的性能差异较大,但是从图中可以看出当量化比特数为 8,GAIN=8, $scale=0.85$ 时,8 比特定点与浮点的性能差异不超过 0.1dB。

3 结论

本文对 Turbo 码的译码算法进行了简要的分析,并针对定点数字信号处理的特点对它的实现结构进行了优化。仿真结果表明,采用 8 比特量化输入,GAIN 等于 8,外在信息因子 $scale$ 等于 0.85,迭代次数为 7 的定点译码算法,其性能非常接近浮点 LOG-MAP 算法。对于 Turbo 译码在硬件上的实现非常具有参考价。

参考文献:

- [1] Berrou C,Glavieux A,Thitimajshima P.Near Shannon Limit Error-correcting Coding and Decoding:Turbo-codes [A].Proc IEEE International Conference on Communication (ICC)[C].Geneva, witzerland:IEEE,1993:1064-1070.
- [2] Berrou C,Glavieux A.Reflections on the Prize Paper:Near Optimum Error-correcting Coding and Decoding:Turbo Codes[J].IEEE Information Theory Society Newsletter,1998,48(2):24-31.
- [3] Bahl L R,Cocke J,Jelinek F,et al.Optimal Decoding of Linear Codes for Minimizing Symbol Error Rate[J].IEEE Trans on Inform Theory, 1974,20(2):248-287.
- [4] Robertson P,Villebrun E,HoehorP.A Comparison of Optimal and Sub-optimal MAP Decoding Algorithms Operating in the LOG Domain [A].ICC 95[C].Seattle:ICC,1995:1009-1013.
- [5] 沈嘉,索士强,全海洋,等.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.

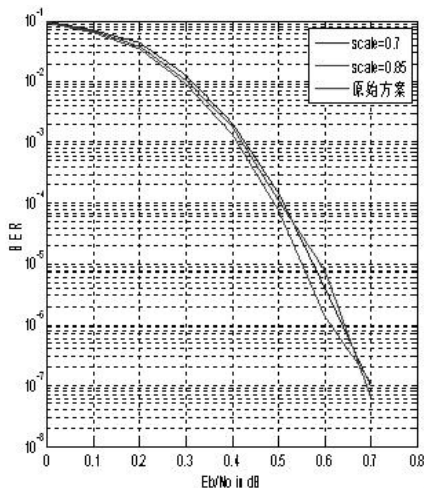


图 3 $scale=0.7, scale=0.85$ 与原始方案比较

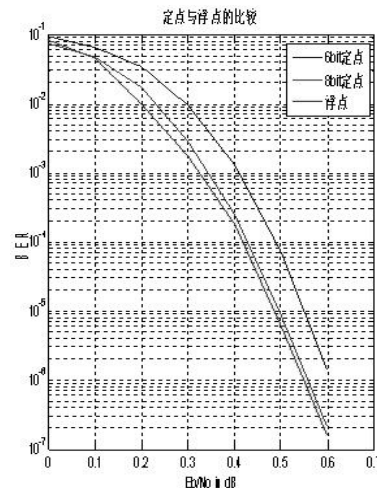


图 4 定点与浮点仿真比较