

IEEE802.16e 中的卷积 Turbo 码编译码算法研究

王 钢¹, 高宏亮², 杨文超¹

(1. 哈尔滨工业大学 通信技术研究所, 哈尔滨 150080, gaohongliang1983@126.com;

2. 中国移动通信集团设计院有限公司黑龙江分公司, 哈尔滨 150080)

摘 要: 为了分析不同设计参数对 IEEE802.16e 中卷积 Turbo 码 (CTC) 性能的影响以及对比 IEEE802.16e 支持的 CTC 和卷积码的编码性能, 介绍了 IEEE802.16e 中的 CTC 的编码过程, 给出了编码过程中的循环状态确定方法的推导过程, 分析了 CTC 的迭代译码结构和译码算法, 最后对 CTC 的性能进行了仿真. 仿真结果表明: 在相同码率和相同调制方式下 CTC 的编码增益要比卷积码大, 采用 CTC 比采用卷积码有着明显的性能优势. 因此在码率较低、信道状况较好或对系统实时性要求严格的情况下, 可考虑使用卷积码, 以降低信道编码的复杂度; 而在码率较高、信道状况较差或对误码率要求严格时, 可考虑选用 CTC 编码方案, 以保证通信的可靠性.

关键词: IEEE802.16e; 卷积 Turbo 码; 循环状态; Max-Log-Map 算法

中图分类号: TN911.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2010)01-0051-04

Encoding and decoding algorithm for convolutional Turbo code in IEEE802.16e

WANG Gang¹, GAO Hong-liang², YANG Wen-chao¹

(1. Communications Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China, gaohongliang1983@126.com;

2. China Mobile Group Design Institute Co., Ltd. Heilongjiang Branch, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to analyze the impact of different coding parameters on CTC performance and compare the performance of CTC with that of convolutional codes both supported by IEEE802.16e, a coding scheme of CTC used in IEEE802.16e is introduced and the derivation for determination of circular state in encoding process is presented. Then the iterative decoding structure and decoding algorithm of CTC are analyzed and the performance of CTC is simulated. Results show that, at the same code rate and with the same modulation mode, CTC has a larger coding gain than convolutional codes. Therefore, under conditions of low code rate, good channel condition and strict real-time requirement, convolutional codes can be used to reduce the complexity of channel coding. While under conditions of high code rate, poor channel condition and strict BER requirement, CTC encoding scheme should be used to ensure the reliability of communication.

Key words: IEEE802.16e; convolutional Turbo code (CTC); circular state; Max-Log-MAP algorithm

802.16e 标准的物理层中, 数据分帧进行传输, 采用的前向纠错编码 (FEC) 来提高信息传输的可靠性. 最新标准协议中明确提出卷积 Turbo 编码 (CTC) 作为可选的信道编码方式. 相对于传统 Turbo 码, CTC 具有编码效率高, 译码时延小, 译码迭代次数少等优点^[1]. 本文将主要研究 CTC

的编译码算法, 并对 CTC 的性能进行仿真分析.

1 CTC 的编码原理

CTC 是非二进制的 Turbo 码, 具有 Turbo 码的性能特征^[2], CTC 编码器结构和 Turbo 码的编码器结构类似, 不同之处只是 CTC 采用双二进制输入. 另外, CTC 采用循环递归系统卷积码 (CRSC) 作为子编码器, 编码器结构如图 1 所示. CRSC 具体编码过程分为预编码和实际编码两个

收稿日期: 2008-07-18.

基金项目: 装备预先研究资助项目 (51306020201).

作者简介: 王 钢 (1962—), 男, 教授, 博士生导师.

位 u_k 的译码信息, 而且计算前后向状态度量, 分别反映了 k 时刻之前和之后码元对 u_k 的影响, 因此误码率大大减低.

由于 CTC 编码时采用双二进制输入, 所以信息比特的对数似然比为

$$L_i(u_k) = \ln \frac{P(u_k = i | y)}{P(u_k = 0 | y)}, \quad (i = 1, 2, 3).$$

将后验概率 $P(u_k = i | y)$ 表示为

$$P(u_k = i | y) = \sum_{u_k=i}^{(s',s)} P(s', s, y_k) = \sum_{u_k=i}^{(s',s)} \alpha_{k-1}(s') \cdot \gamma_k^i(s', s) \cdot \beta_k(s).$$

式中: $\alpha_{k-1}(s')$ 是 $k-1$ 时刻状态 s' 的前向状态度量; $\beta_k(s)$ 是 k 时刻状态 s 的后向状态度量; $\gamma_k^i(s', s)$ 是 k 时刻状态 s' 到状态 s 的分支度量.

$$\alpha_k(s) = \sum_{s'} \sum_{i=0}^3 \gamma_k^i(s', s) \cdot \alpha_{k-1}(s'), \quad (4)$$

$$\beta_{k-1}(s') = \sum_s \sum_{i=0}^3 \gamma_k^i(s', s) \cdot \beta_k(s), \quad (5)$$

$$\gamma_k^i(s', s) = P(u_k = i) \cdot \exp(L_C y_{ka} u_{ka} / 2 + L_C y_{kb} u_{kb} / 2 + L_C y_{ky} u_{ky} / 2 + L_C y_{kw} u_{kw} / 2). \quad (6)$$

式中: $L_C = 4aE_s/N_0 = 4aE_b R_s/N_0$ 称为信道的置信因子. a 的取值和信道有关, 高斯信道时 $a = 1$, 衰落信道 a 代表衰落幅度, E_b/N_0 是比特信噪比, R_s 是编码速率. $P(u_k = i)$ 可以根据先验信息对数似然比进行求解.

由 CRSC 编码器特点可知, 在每一帧数据编码时, 两个 CRSC 编码器的开始和结束状态都为循环状态 S_C , 所以状态度量 α, β 的初始条件值为

$$\begin{cases} \alpha_0(s) = 1, s = S_C, \beta_N(s) = 1, s = S_C; \\ \alpha_0(s) = 0, s \neq S_C, \beta_N(s) = 0, s \neq S_C. \end{cases} \quad (7)$$

这样只要知道分支度量 $\gamma_k^i(s', s)$, 就可根据 α, β 的初始条件值递推出每一时刻的前后向状态度量, 进而求出每一时刻信息比特的对数似然比.

3.2 Log-MAP 算法和 Max-Log-Map 算法

从译码性能来讲, MAP 算法是最优的, 但是由于存在大量的指数和乘法运算, 译码复杂度太高. 为了降低译码复杂度, 便于硬件实现, 通常将 MAP 算法计算转化到对数域上来进行, 从而将乘法变成了加法, 避免了指数运算^[5]. 把 MAP 算法中的变量都转换为对数形式的算法就是 Log-MAP 算法. Log-MAP 算法基于以下的 \max 函数操作:

$$\ln \sum_{i=1}^k e^{x_i} = \max(x_i) + \ln \sum_{i=1}^k e^{x_i - \max(x_i)}. \quad (8)$$

如果把式(8)右边第二项舍去就是 Max-Log-MAP 算法.

对式(4)~(6)取对数并应用式(8)可得到

$$A_k(s) = \ln \alpha_k(s) = \ln \sum_{s'} \sum_{i=0}^3 e^{\Gamma_k^i(s', s)} \cdot e^{A_{k-1}(s')} \approx \max[A_{k-1}(s') + \Gamma_{k-1}^i(s', s)],$$

$$B_{k-1}(s') = \ln \beta_{k-1}(s') = \ln \sum_s \sum_{i=0}^3 e^{\Gamma_k^i(s', s)} \cdot e^{B_k(s)} \approx \max[B_k(s) + \Gamma_k^i(s', s)],$$

$$\Gamma_k^i(s', s) = \ln \gamma_k^i(s', s) = (L_C y_{ka} u_{ka} + L_C y_{kb} u_{kb} + L_C y_{ky} x_{ky} + |L_C y_{kw} x_{kw}|) / 2 + \ln P(u_k = i).$$

相应的对数似然比

$$L_i(u_k) \approx \max_{(s', s)} [A_{k-1}(s') + \Gamma_k^i(s', s) \cdot B_k(s)] - \max_{(s', s)} [A_{k-1}(s') + \Gamma_k^0(s', s) \cdot B_k(s)], \quad i = 1, 2, 3.$$

从最大似然判决角度上看, Turbo 码的 MAP 迭代译码算法并不是最优的, 然而, 用一个与信噪比无关的适当参数加权 MAP 中的外信息, 可降低迭代译码的次最优性, 该方法为增强型 MAP 算法.

通常增强型 Max-Log-MAP 每次迭代过程中用外信息乘以系数 0.75^[6]; 而增强型 Log-MAP 用外信息乘以系数 0.9.

4 CTC 性能仿真

CTC 进行译码时的每次迭代过程中都要按式(7)对前后向状态度量进行初始化, 而译码端并不能知道编码端的循环状态是什么, 所以译码端用式(7)对前后向状态度量进行初始化在实际应用中是不可能的. 图 3 是在 AWGN 信道条件^[7-8]下, 采用 16QAM 调制, 码率为 1/2, 码长为 480 时对不同确定译码初始状态方法对编码性能的影响进行仿真的结果.

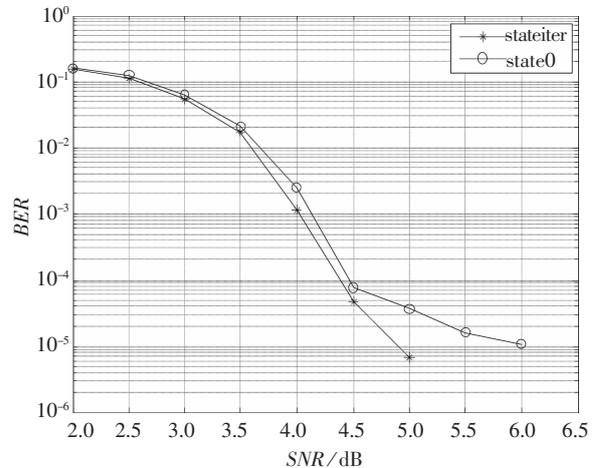


图 3 不同确定循环状态方法的仿真结果

图 3 中 stateiter 曲线表示把上一次迭代译码的前后向状态度量的结束状态作为本次迭代译码前后向状态度量的初始状态; state0 曲线表示直接令前后向状态度量初始状态为 0 进行译码. 从图中可看出: 在信噪比低于 4.5 dB 时, 采用状态传递的方法比直接令前后向度量初始状态为 0 的方法性能

稍好,但是直接令初始状态为 0 的方法收敛速度比较慢,需要信噪比达到 6 dB 时误码率才会到 10^{-5} .

图 4 中给出了在 AWGN 信道条件下,采用 16QAM 调制,码率为 1/2,码长为 480 时,迭代次数为 1~8 时的性能曲线.随着迭代次数的增加,CTC 的误码率曲线不断降低.当迭代次数增加到 5 次后误码率曲线趋于收敛,此时再继续增加迭代次数误码率也没有明显的下降,而传统 Turbo 码译码使误码率趋于收敛的迭代次数一般为 8 次^[9].

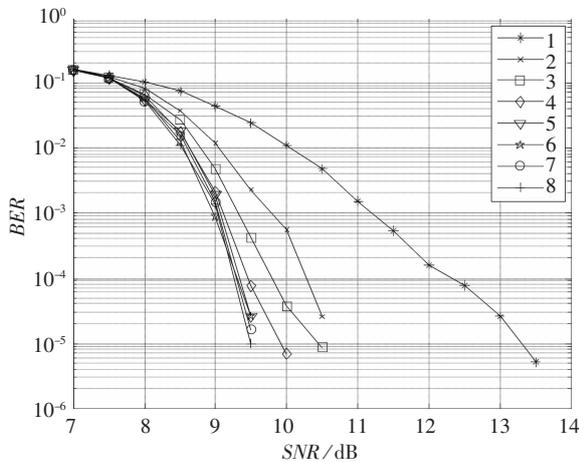


图 4 迭代次数对 CTC 性能影响的仿真结果

图 5 给出了 CTC 和 IEEE802.16e 协议支持的 tail-biting 卷积码^[10]的性能对比仿真结果.仿真基于 IEEE802.16e OFDMA 物理层规范搭建的仿真平台,QPSK 调制,信道模型采用 802.16 建议的 SUI-3^[11]多径衰落信道模型.从仿真结果可看出:在相同码率和相同调制方式下 CTC 的编码增益要比卷积码大,采用 CTC 比采用卷积码有着明显的性能优势.而在信噪比较低时 CTC 的曲线和卷积码几乎重合,是因为低信噪比下 CTC 对于编码器的初始状态估计不准,使得译码错误较多,和卷积码相比没有体现出性能优势;而随着信噪比的增高,状态估计准确率提高,CTC 的性能就逐渐好于卷积码.

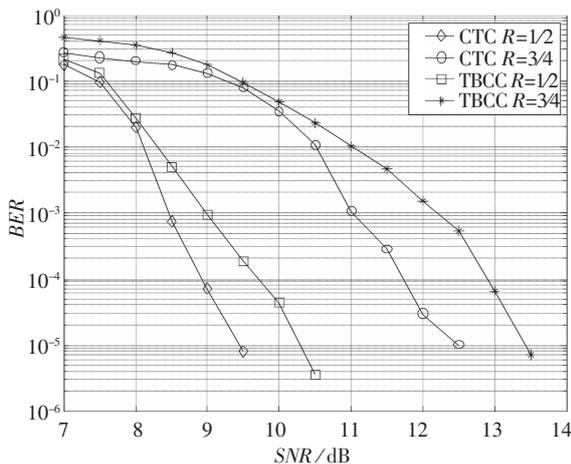


图 5 CTC 和卷积码的性能对比

5 结 论

在译码确定循环状态时,采用状态传递的方法性能好于直接令前后向量初始状态为 0 的方法;随着迭代次数的增加,卷积 Turbo 码的性能不断提高.当迭代次数增加到 5 次后误码率曲线趋于收敛;采用 CTC 比采用卷积码有着明显的性能优势,但是 CTC 的编译码复杂度都比较高,译码延时也比较大.因此在码率较低、信道状况较好或对系统实时性要求严格的情况下,可考虑使用卷积码,以降低信道编码的复杂度;而在码率较高、信道状况较差或对误码率要求严格时,可考虑选用 CTC 编码方案,以保证通信的可靠性.

参考文献:

- [1] BERROU C, JEZEQUEL M, DOUILARD C, et al. The advantages of non-binary turbo codes [C]//Information Technology in the Workplace 2001. Cairns: [s. n.], 2001:61-63.
- [2] IM S B, KIM M G, CHOI H J. An efficient tail-biting MAP decoder for convolutional turbo codes in OFDM systems [C]//TENCON 2004. 2004 IEEE Region 10 Conference. Bangkok: [s. n.], 2004: 589-592.
- [3] IEEE. IEEE Std 802.16e-2005 and IEEE Std 802.16e-2004 Cor1-2005, IEEE standard for local and metropolitan area networks, Part 16: air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems [S], New York: [s. n.], 2005:430-448.
- [4] 赵冬, 彭涛, 王文博. 802.16e 系统中 CTC 译码算法研究[J]. 无线电工程, 2007, 37(2): 27-30.
- [5] HE Z Y, FORTIER P, ROY S. Highly-parallel decoding architectures for convolutional turbo codes [J]. IEEE Transactions on very Large Scale Intergration Systems, 2006, 14(10): 1147-1150.
- [6] ZHAN C, ARSLAN T, ERDOGAN A T, et al. An efficient decoder scheme for double binary circular turbo codes [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Toulouse: [s. n.], 2006: 229-232.
- [7] 贺玉成, 杨莉, 王新梅. 纠错码性能仿真中的误码率估计[J]. 通信学报, 2001, 22(9): 34-37.
- [8] HATT B, TEJAS CAIN M, M. Matlab as a development environment for FPGA design [J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 8(11): 607-610.
- [9] 张涛. IEEE802.16e 中的卷积 Turbo 码分析[J]. 信息技术, 2007, 31(11): 36-38.
- [10] MA H, WOLF J. On tail biting convolutional codes [J]. IEEE Transactions on Communications, 1986, 34: 104-111.
- [11] 张帆. WIMAX 中抗多径衰落问题的研究—WIMAX 中的空时分集信道估计[D]. 南京: 东南大学, 2006: 25-34.

(编辑 张 宏)