

文章编号:1000-582X(2003)04-0046-03

一种改善 Turbo 码迭代译码收敛特性的方法*

吴玉成¹, 张红², 冯聃¹

(1. 重庆大学通信工程学院, 重庆 400044; 2. 浙江经贸职业技术学院 信息技术系, 浙江 杭州 310012)

摘要: Turbo 码可为数字通信系统提供接近信道容量的纠错能力, 其迭代译码算法的收敛稳定性是算法能否实用的关键因素之一。针对短长度交织器对随机错误扩散能力弱带来的迭代收敛稳定性差的问题, 在 Turbo 码的常用迭代译码方法的基础上加以改进, 利用前后两次迭代序列的信息熵引入迭代步进因子以改善迭代译码的收敛特性。给出了迭代步进因子的产生方法并进行了计算机仿真, 仿真结果表明, 该方法可有效改善短交织长度时 Turbo 码的迭代译码收敛特性。

关键词: Turbo 码; 迭代译码; 收敛性

中图分类号: TN912.3

文献标识码: A

前向纠错是数字通信系统提高通信可靠性和连续性的重要环节, Turbo 码自 1993 年首次提出后由于其强大的纠错能力而引起广泛关注, 对于 Turbo 译码算法的研究与改进是其研究的重要内容之一^[1-2]。

Turbo 码编码器结构^[3-4]如图 1 所示。信息数据序列 $\{d_k\} (k = 1, 2, \dots, N)$ 一方面送入递归系统卷积码编码器 RSC1 编码, 一方面经交织器重排后送入 RSC2 编码。根据系统码率的需要设置 RSC1、RSC2 编码器的删除模式。在 Turbo 码设计中, 交织器是一个非常重要的因素。通常采用的是非均匀交织器(随机或半随机交织器), 其作用是使交织后进行递归系统卷积码输出码字的最小重量有尽可能大的提高^[1,3-4]。Turbo 码译码采用图 2 所示的迭代译码结构。在译码中, 采用的是软输入软输出逐位最大后验概率译码算法^[3-4]。

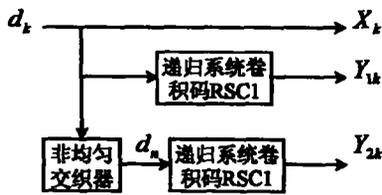


图 1 Turbo 码编码器

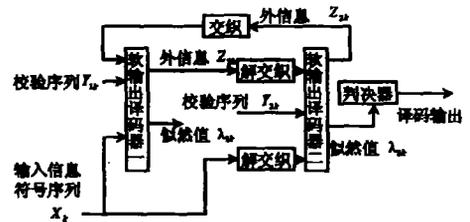


图 2 Turbo 码译码原理图

研究中发现^[2,5], 在译码迭代中, 如果交织器不能将一组数据中的突发错误很好地扩散, 下一次迭代译码反而会使误码率会有所上升, 这种情况在交织器长度较小时更为突出。为此, 笔者提出了一种改进的迭代译码方法以减少其影响。

1 Turbo 码译码的收敛判据

对于成员译码器来说, 其译码输出包括 3 个部分^[4,6]: 接收信息数据、先验概率、外信息。因此译码器 1、2 的输出为:

$$\lambda_1^{(i)}(\hat{d}_k) = L_c \cdot x_k + z_2^{(i-1)}(\hat{d}_k) + z_1^{(i)}(\hat{d}_k) \quad (1)$$

$$\lambda_2^{(i)}(\hat{d}_k) = L_c \cdot x_k + z_1^{(i)}(\hat{d}_k) + z_2^{(i)}(\hat{d}_k) \quad (2)$$

式(1)中, \hat{d}_k 表示信息数据 d_k 的判决信息, L_c 表示信道可靠性度量, $\lambda_1^{(i)}(\hat{d}_k)$ 表示第一个单元译码器第 i 次迭代计算得到的关于 d_k 的对数似然比, $z_2^{(i-1)}(\hat{d}_k)$ 表示上次迭代第二个成员译码器计算得到的外信息, 该外信

* 收稿日期: 2002-12-08

资助项目: 重庆市应用基础项目(2001-6965)及重庆大学骨干教师基金资助

作者简介: 吴玉成(1971-), 男, 河南光山人, 副研究员, 重庆大学博士后, 主要研究方向: 飞行器测控、信道编码、软件无线电。

息在第一个成员译码器的译码计算中相当于 d_k 的先验概率, $z_1^{(i)}(\hat{d}_k)$ 为成员译码器 1 计算得到的外信息, 该外信息将作为第二个成员译码器译码计算时的先验概率。式(2)中各变量具有类似的意义。

由于 $\lambda_2(k)$ 是 \hat{d}_k 的软判决信息(此处 \hat{d}_k 取值为 +1、-1), 因此

$$\hat{d}_k^{(i)} = \text{sign}(\lambda_1^{(i)}(k)) \quad (3)$$

$$|\lambda_1^{(i)}(k)| = \hat{d}_k^{(i)} \cdot \lambda_1^{(i)}(k) \quad (4)$$

在 Turbo 码译码过程中, 已经得到两个后验概率分布序列 λ_1, λ_2 , 设其分别是分布序列 P_1, P_2 的对数似然比。 P_1, P_2 分布的相对熵定义为^[6]

$$E_{P_2} \left\{ \log \frac{P_2}{P_1} \right\} \quad (5)$$

P_1, P_2 的相对熵是他们分布差异性的度量, E_{P_2} 表示对分布 P_2 求期望。在研究中, 认为 P_1, P_2 序列中各位是相互独立的, 因此

$$\log \frac{P_2}{P_1} = \sum_k \log \frac{P_2(k)}{P_1(k)} \quad (6)$$

根据以上的说明, 有

$$\begin{aligned} E_{P_2} \left\{ \log \frac{P_2(k)}{P_1(k)} \right\} &= P_2(\hat{d}_k = +1) \log \frac{P_2(\hat{d}_k = +1)}{P_1(\hat{d}_k = -1)} + \\ &P_2(\hat{d}_k = -1) \log \frac{P_2(\hat{d}_k = +1)}{P_1(\hat{d}_k = -1)} = \\ &-\Delta z_2^{(i)} \frac{1}{1 + \exp(\lambda_2^{(i)}(k))} + \log \frac{1 + \exp(-\lambda_1^{(i)}(k))}{1 + \exp(-\lambda_2^{(i)}(k))} \end{aligned} \quad (7)$$

当译码判决不再变化, 即

$$\text{sign}(\lambda_2^{(i)}(k)) = \text{sign}(\lambda_1^{(i)}(k)) = \hat{d}_k^{(i)} \quad (8)$$

此时式(7)可近似为

$$\begin{aligned} E_{P_2} \left\{ \log \frac{P_2(k)}{P_1(k)} \right\} &\approx -\hat{d}_k^{(i)} \Delta z_2^{(i)}(k) \cdot \\ &\frac{1}{1 + \exp(\lambda_2^{(i)}(k))} + \log \frac{1 + \exp(-\lambda_1^{(i)}(k))}{1 + \exp(-\lambda_2^{(i)}(k))} \end{aligned} \quad (9)$$

并且, 如果可靠性足够大时, 利用 $\log(1+x) \approx x$, 可得到

$$\begin{aligned} E_{P_2} \left\{ \log \frac{P_2(k)}{P_1(k)} \right\} &\approx \exp(-|\lambda_2^{(i)}(k)|) \cdot \\ &[1 - \exp(-\hat{d}_k^{(i)} \Delta z_2^{(i)}(k)) \cdot (1 + \hat{d}_k^{(i)} \Delta z_2^{(i)}(k))] \end{aligned} \quad (10)$$

当 $\Delta z_2^{(i)}(k)$ 的符号与 $\hat{d}_k^{(i)}$ 相同且其幅度小于 1 时, 进一步可得到

$$E_{P_2} \left\{ \log \frac{P_2}{P_1} \right\} \approx \sum_k \frac{|\Delta z_2^{(i)}(k)|^2}{\exp(|\lambda_1^{(i)}(k)|)} \quad (11)$$

上面的推导是在假设 P_1, P_2 统计独立的情况下得到的, 随着迭代译码的进行, 两个序列之间的独立性将减

弱, 不过, 式(11)的结果仍可作为大概的迭代终止判定准则^[6]。

$$T(i) = \sum_k \frac{|\Delta z_2^{(i)}(k)|^2}{\exp(|\lambda_1^{(i)}(k)|)} < \text{threshold} \quad (12)$$

$T(i)$ 表示第 i 次迭代分布 P_1, P_2 的相互熵, 当 $T(i)$ 小于某一门限时, 表明分布 P_1, P_2 已非常相似, 继续迭代已不能使误码率降低很多, 此时可终止迭代运算。

2 译码方法的改进

两个成员译码器软输出之间的差为

$$\lambda_2^{(i)} - \lambda_1^{(i)} = z_2^{(i)}(k) - z_2^{(i-1)}(k) = \Delta z_2^{(i)}(k) \quad (13)$$

在研究中发现^[2,5], 在译码迭代中, 如果交织器不能将一组数据中的突发错误很好地扩散, 下一次迭代译码反而会使误码率会有所上升, 这种情况在交织器长度较小时更为突出。为此, 这里将提出了一种改进的迭代译码方法以减少其影响。

由式(1)、(2)、(13)可得:

$$z_2^{(i)}(\hat{d}_k) = z_2^{(i-1)}(\hat{d}_k) + \alpha_i \cdot \Delta z_2^{(i)}(\hat{d}_k) \quad (14)$$

式中, α_i 为步进参数。经第 i 次迭代译码后, 用式(14)计算得到反馈到第 $i+1$ 次迭代成员译码器 1 的先验概率, 如果 $\alpha_i = 1$, 算法就是通常的迭代译码。笔者希望通过选择 α_i 使迭代有更好的收敛特性。

利用成员译码器输出序列相互熵来确定迭代步进参数。仿真结果^[5]表明, $T(i)$ 大致地随 i 的增加而减小, 当误码率不再继续降低时, 随着迭代次数的增加, $T(i)$ 通常以 10^{-2} 到 10^{-4} 的速度下降。在确定 α_i 时, 在迭代开始部分取 $\alpha_i < 1$, 随着迭代次数的增加, α_i 趋近于 1。在此, 使用如下的 α_i 的取值公式

$$\alpha_i = K_1 + (1 - K_1) e^{-K_2 \cdot (T(i)/T(i-1))} \quad (15)$$

式中, K_1, K_2 为常数, 且 $K_1 \leq 1, K_2$ 根据交织器长度 N 的不同以及信噪比的变化而调整。为了降低译码算法的复杂性和便于实现, 对不同的信噪比 K_2 维持常数。

3 仿真结果

为了验证本方法的有效性, 设计了 Turbo 码编译码程序并进行了计算机仿真, 仿真中取码长(交织器长度)为 256, 式(15)中取常数 $K_1 = 0.5, K_2 = 10$ 。图 3 是码率分别为 1/2 和 1/3 情况下传统方法和改进方法的误码率曲线。横轴为信噪比 E_b/N_0 , 纵轴为误码率 P_e 。可以看出, 在信噪比很低时改进方法可以获得更好的纠错能力。图 4 是码率为 1/3 的码在信噪比为 $E_b/N_0 = 2.0$ dB 时随着迭代次数增加, 误码率的下降曲线。纵轴为误码率 P_e , 横轴为迭代次数。从图中可以看出, 应用笔者的改进译码方法, 在交织器长度较短, 其误码率随迭代次数

增加规则地减小,不像传统方法那样出现大的起伏振荡,说明改进方法能提供较好的收敛特性。

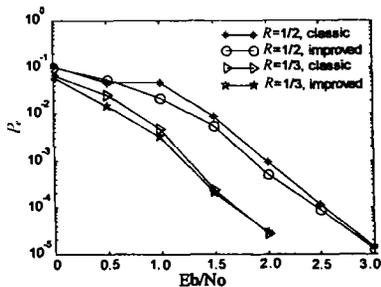


图3 码长为256的Turbo改进算法仿真曲线

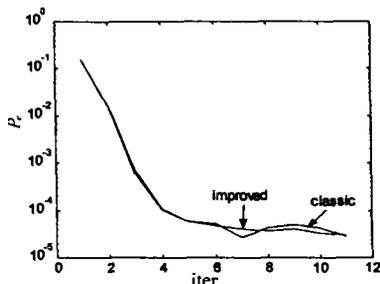


图4 误码率Pe随迭代次数iter的下降曲线

4 方法分析

当交织器长度较小时,其对突发错误的扩散能力

也相对较弱,因此,迭代译码过程中很容易产生收敛特性不好的现象,通过比较前后两次迭代译码所得的相互熵而确定译码过程中两个成员译码器输出软信息之间的相关特性的变化,并加入修正因子,突发错误的影响有所降低,从而改善了迭代译码的收敛特性。

参考文献:

- [1] BERROU C, GLAVIEUX A. Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo-codes[J]. IEEE Trans. Commun., 1996, 44(10): 1 261 - 1 271.
- [2] 吴玉成,杨士中,刘嘉兴. 差错控制编码在卫星通信中的应用[J]. 电讯技术,2000,40(1):3-7.
- [3] 王新梅,肖国镇. 纠错码——原理与方法(修订版)[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2001,505-531.
- [4] DIVSALAR D, POLLARA F. Multiple Turbo codes[A]. Proc IEEE Milcom - 95[C]. San Diego, CA, USA:1995, 279-285.
- [5] 吴玉成. Turbo码及其在卫星通信中的应用研究[D]. 重庆:重庆大学博士学位论文,2000.
- [6] HAGENAUER J, OFFER E, PAPKE L. Iterative decoding of binary block and convolutional codes[J]. IEEE Trans Info Theory, 1996, 42(2): 429-445.

A Method to Improve the Decoding Iteration Convergence Performance of Turbo Codes

WU Yu-cheng¹, ZHANG Hong², FENG Dan¹

(1. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Department of Information technology, Zhejiang Economic & Trade Polytechnic, Hangzhou, 310012, China)

Abstract: Turbo codes is an effective method for digital communication systems to get near channel capacity error correcting performance, its iteration convergence performance is the key factor for practicability. Based on the universal decoding method of Turbo codes, a step increment factor was introduced in the paper to improve the iteration convergence performance. The method to generate the step increment factor was also presented as well as its computer simulations. Simulation results show the method proposed can improve the convergence performance efficiency for Turbo codes with short interleaver.

Key words: turbo codes; iteration decoding; convergence performance

(责任编辑 吕赛英)