

文章编号: 1672-2892(2012)02-0188-04

基于信噪比估计的变门限 SCR 迭代停止准则

王晓明, 全厚德, 张 弛, 王 欣

(军械工程学院 光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003)

摘 要: 针对符号改变率(SCR)迭代停止准则固定判决门限带来的问题, 利用 Turbo 码的收敛特性给出一种基于信噪比估计的变门限 SCR 准则, 该准则在不同信噪比情况下选取不同的判决门限, 对低信噪比与高信噪比这 2 个区域进行改进。通过仿真得出, 改进后的 SCR 准则在低信噪比与高信噪比时, 能够在保证译码性能的同时, 有效地减少译码的平均迭代次数, 加快译码速度, 提高译码效率, 尤其是信噪比较低的情况下, 改善的效果非常明显。

关键词: Turbo 码; 符号改变率停止准则; 迭代译码; 变门限

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

An alterable limit SCR stopping criterion based on the SNR estimation

WANG Xiao-ming, QUAN Hou-de, ZHANG Chi, WANG Xin

(Optical and Electronic Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang Hebei 050003, China)

Abstract: Aiming to the problems caused by the settled limit Sign Chance Ratio(SCR) stopping criterion, by using the convergence characteristic of turbo code, an alterable limit SCR stopping criterion is proposed based on the Signal to Noise Ratio(SNR) estimation. This criterion chooses different limits based on different SNRs, and it is improved especially at the low and high SNR situation. The improved SCR criterion could reduce the average number of iterations efficiently as well as assure the bit error rate performance at the low and high SNR situation. It accelerates the decoding process and improves the decoding efficiency. The performance is improved significantly especially at a lower SNR condition.

Key words: Turbo code; Sign Chance Ratio stopping criterion; iterative decoding; alterable limit

Turbo码译码的最大特点是利用译码器之间相互交换外信息提高译码性能^[1]。算法一般采用预设1个固定的迭代次数, 而当译码经过一定次数迭代后, 继续迭代产生的性能增益非常小, 为减小这种由于多次迭代产生的译码延时, 需要对Turbo码的收敛特性进行研究。目前已经存在一些迭代停止准则, 本文重点对符号改变率(SCR)准则进行分析, 并且根据Turbo码的收敛特性, 给出一种基于信噪比(SNR)估计的变判决门限SCR停止准则, 该准则能够更好地利用Turbo码收敛特性, 在不影响译码性能的同时, 减小译码平均迭代次数, 提高译码效率。

1 Turbo 码的译码与信噪比估计

1.1 Turbo 码译码

Turbo 译码器的基本结构见图 1。它主要由 2 个软输入软输出译码器、交织器和解交织器组成。译码时, 将译码器 1 对信息序列进行最佳译码, 产生关于信息序列中每一个比特的似然信息, 并将其中的外信息经过交织后送给译

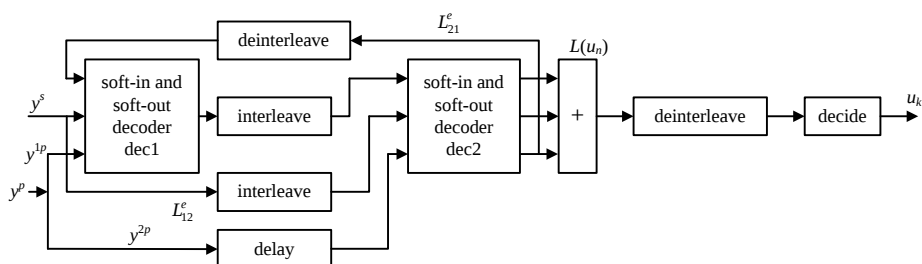


Fig.1 Turbo decoder structure
图 1 Turbo 码译码器结构图

码器 2 作为先验信息,译码器 2 对交织的信息序列进行最佳译码,并将产生的外信息经过解交织后作为译码器 1 的先验信息送入译码器 1,进行下一次译码。这样通过 2 个译码器之间相互交换“软信息”,不断提高译码性能,这就是 Turbo 码译码原理^[2]。图 1 中, y^s 为信息位, y^p 为经过复合的校验位信息, y^{1p} 为校验位 1, y^{2p} 为校验位 2, $L(u_n)$ 为信息的对数似然比, L_{12}^e 为译码器 1 向译码器输出的外信息, L_{21}^e 为译码器 2 向译码器传输的外信息, e 为外信息, u_k 为输出的译码结果。

1.2 信噪比估计

由于在用于 Turbo 码迭代译码的最大后验概率(Maximum A Posteriori Probability, MAP)类算法中,在加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道上实现译码都需要为算法提供信道信噪比 R_{SN} 的值,因此必须在接收到数据信息后,进行信噪比估计。本文采用 Summer 信噪比估计器^[3-4]。

利用采样信息 r_n 的幅度信息来计算期望 $E[r_n^2]$ 和 $E[|r_n|]$ 。定义信噪比 $R_{SN} = E_S / \sigma^2$ (其中 E_S 为采样信息的期望, σ 为采样信息的方差)和 $x = E[r_n^2] / E[|r_n|]^2$, 利用三阶多项式拟合,当信噪比 R_{SN} 在 -2 dB~5 dB 时,得拟合多项式:

$$\hat{R}_{SN} = -639x^3 + 2663x^2 - 3722x + 1749 \quad (1)$$

式中 $\hat{R}_{SN}$ 为信噪比估计值。

2 SCR 准则性能分析与改进

目前常用的迭代停止准则有: Hangenauer 于 1996 年提出的一种基于交叉熵(Cross Entropy, CE)的迭代停止准则^[5]; Wu Y 利用先验信息与外信息的特性,提出了一种符号差别率(Sign Difference Ratio, SDR)准则^[6],该准则通过判决分量译码器输入的先验信息与输出的外信息符号是否一致来决定是否停止迭代; Shibutani A 提出一种利用循环冗余校验码(Cyclic Redundancy Check, CRC)检错的结果判断是否停止迭代^[7]; Shao R Y 在 CE 准则的基础上进行了简化,提出了 SCR 和 HAD(Hard Decision Aided)准则^[8]。本文重点对 SCR 准则进行研究,下面给出 SCR 准则的推导过程^[3]。

文献[4]中指出 SCR 准则是由交叉熵准则简化而来,如果记第 i 次迭代时 2 个分量译码器的输出符号概率分别为 $p_1^{(i)}(u)$ 和 $p_2^{(i)}(u)$, 其中 u 为译码器输出的信息符号,由交叉熵准则可知,其判决条件式为:

$$T(i) = H[p_1^{(i)}(u), p_2^{(i)}(u)] \approx \sum_{k=1}^N \frac{|L_{e,2}^{(i)}(u_k)|^2}{|e^{L_1^{(i)}(u_k)}|} \quad (2)$$

式中: $L_{e,2}^{(i)}(u_k)$ 表示译码器 2 第 i 次迭代输出的外信息; $L_1^{(i)}(u_k)$ 表示译码器 1 第 i 次迭代输出的外信息。

若 $C(i)$ 表示外信息 $L_{e,2}^{(i-1)}(u_k)$ 和 $L_{e,2}^{(i)}(u_k)$ 相比符号发生变化的元素数,则式(2)可以写成:

$$T(i) \approx \sum_{k=1}^N \frac{|L_{e,2}^{(i)}(u_k)|^2}{|e^{L_1^{(i)}(u_k)}|} = \sum_{k \in S} \frac{|L_{e,2}^{(i)}(u_k)|^2}{e^{|L_1^{(i)}(u_k)|}} + \sum_{k \in S'} \frac{|L_{e,2}^{(i)}(u_k)|^2}{e^{|L_1^{(i)}(u_k)|}} = T_1(i) + T_2(i) \quad (3)$$

式中: $T_1(i)$ 表示译码器 1 输出信息的交叉熵; $T_2(i)$ 表示译码器 2 输出信息的交叉熵; 状态 s 是指编码时输入信息 u_k 前编码器的状态值; s' 指编码时输入信息 u_k 后编码器状态值。

根据条件熵假设条件^[3], $|L_{e,2}^{(i)}(u_k)|$ 对 $T_1(i)$ 的作用远小于对 $T_2(i)$ 的作用,而且 $T_1(i)$ 中 $|L_1^{(i)}(u_k)|$ 的均值远大于其在 $T_2(i)$ 中的均值。因此与 $T_2(i)$ 相比, $T_1(i)$ 的影响可以忽略不计。从而交叉熵准则简化为:

$$T(i) = \sum_{k \in S} \frac{|L_{e,2}^{(i)}(u_k)|^2}{e^{|L_1^{(i)}(u_k)|}} = \delta_i C(i) \quad (4)$$

式中 δ_i 为 $\frac{|L_{e,2}^{(i)}(u_k)|^2}{e^{|L_1^{(i)}(u_k)|}}$ 均值。

式(2)给出的是与分布 $p_1^{(i)}(u)$ 和 $p_2^{(i)}(u)$ 的交叉熵直接相关的连续 2 次迭代后 $L_{e,2}^{(i-1)}(u)$ 与 $L_{e,2}^{(i)}(u)$ 中符号变化的元素个数。根据这个关系,可以设计基于 $L_{e,2}(u)$ 中符号变化个数 $C(i)$ 的迭代停止准则。通常设

$$C(i) \leq qN \quad (5)$$

式中: $0.005 \leq q \leq 0.03$; N 为数据长度。在每次迭代译码后计算 $C(i)$ 的值,如满足式(5)的条件,则停止迭代,否则继续。

下面对 SCR 准则性能进行 MATLAB 仿真分析,主要考虑译码的平均迭代次数和误码率性能。

图2为SCR准则在不同判决门限下Turbo码译码的平均迭代次数,仿真参数设置为:信道模型为AWGN信道;算法为Log-MAP算法;数据帧长为400个;生成多项式为[7,5];最大迭代次数为10次;交织方式为随机交织。

通过设置不同的判决门限,可以看出,在判决门限较小时,随着判决门限的增大,译码平均迭代次数逐渐减小。在低信噪比时,判决门限都要达到9.5次以上,而且判决门限平均迭代次数的影响非常小,这是因为在信噪比非常低的时候,译码的误码率比较高,一般情况下远远达不到迭代停止准则的要求,必须达到最大迭代次数后才能停止译码。而当判决门限提高到一定程度后,可以有效减小译码的平均迭代次数,此时由图3可以看出,在信噪比较低时,译码性能并没有太大的影响。而当译码达到一定次数后,随着迭代次数的增加,带来的译码性能增益非常小,这时如果继续迭代只能增加译码延时,所以可以考虑在信噪比较低时,适当提高SCR准则的判决门限值,以减小译码平均迭代次数。

图3为不同判决门限下Turbo码的译码性能,参数设置与上面相同,可以看出,不同的判决门限对Turbo码性能的影响,在信噪比较低时(小于1 dB),判决门限的设定对译码性能的影响非常小,在信噪比较高时(大于2.5 dB),只要设定的判决门限不过大,误码率可以达到 10^{-5} 数量级,误码率非常低,完全可以保证数据传输的准确性。因此,可以考虑在信噪比较大时,适当提高判决门限,以减小平均迭代次数。而且随着信噪比的增加,可以达到完全正确传输。这时只要判决门限在一定范围内,对Turbo码性能几乎没有影响,在很小的迭代次数(2次左右)下就可以满足条件,停止迭代。

在SCR准则的应用过程中,一般设定1个固定判决门限,为保证在任何情况下都能较好完成译码,一般选取的判决门限比较低,实际应用中通常选取 $q=0.005$,而通过上面的分析可以发现,由于设置固定的判决门限,所以在信噪比较低和信噪比较高的时候需要进行的迭代次数较多,而相应的译码性能增益很小,综合SCR迭代准则条件下Turbo码译码的平均迭代次数和误码性能,根据以上对SCR准则特点的分析,经过大量的仿真实验,给出一种变门限的SCR准则。判决门限的选取如下:

$$q = \begin{cases} 0.2, & 0 \leq R_{SN} < 1.0 \\ 0.005, & 1.0 \leq R_{SN} < 2.5 \\ 0.02, & R_{SN} \geq 2.5 \end{cases} \quad (6)$$

需要说明,由于信噪比在1.0~2.5之间时,误码性能对判决门限的灵敏度比较高,所以此时判决门限仍旧选取为0.005,以保证误码性能;在信噪比大于2.5 dB时,选取的参数 q 值不能太大,如果 q 值选取过大,在误码性能还没有达到最佳时即停止迭代,会严重影响译码性能。

由图4可以看出,通过针对不同信噪比选取不同的判决门限值,在信噪比较低和信噪比较高时,Turbo码的平均迭代次数明显下降。在信噪比较低时,由于判决门限的增大,极大降低了译码的平均迭代次数,在信噪比为0 dB时,与门限值为0.005的SCR准则相比平均迭代次数减小2.588次,在信噪比为0.5 dB和1.0 dB时,平均迭代次数分别减小了3.572次和4.248次。信噪比较高时,平均迭代次数介于门限值为0.005到0.03的SCR准则之间,需要指出,当信噪比大于4 dB时,门限值的选择对算法的平均迭代次数没有影响。此时平均迭代次数约为2次。

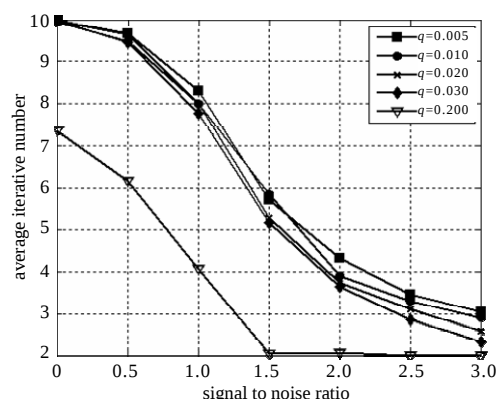


Fig.2 Average iterative number

图2 平均迭代次数

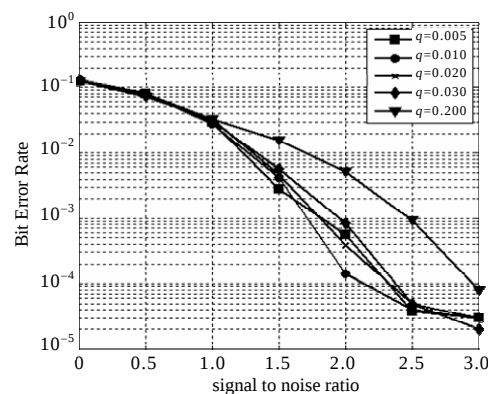


Fig.3 Bit Error Rate

图3 误码率

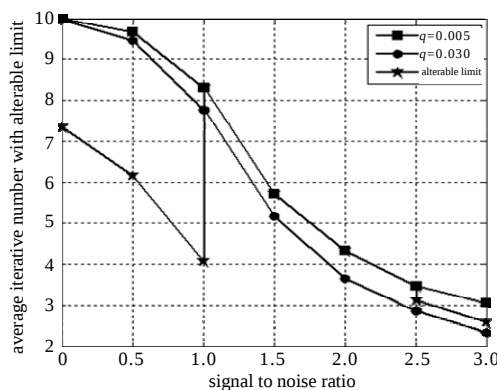


Fig.4 Average iterative number with alterable limit

图4 变门限下译码平均迭代次数

通过图 5 可以发现,变门限准则的译码性能与 $q=0.005$ 时的误码性能大体一致,性能优于 $q=0.03$ 时的 SCR 准则。变门限 SCR 准则在平均迭代次数减小的同时,Turbo 码的译码性能并没有受到影响,或者说此时带来的影响非常小,可以忽略。所以,变门限的 SCR 准则在保证译码性能的同时,在信噪比较低时,极大减小了译码的平均迭代次数,从而降低译码延时,提高了译码效率。

3 结论

Turbo 码译码迭代停止准则中的 SCR 准则需要预先设定 1 个停止门限,为保障良好的译码性能,通常选取的门限值比较低,虽然这样可以保证良好的译码性能,但是在信噪比较低和信噪比较高时,都会增加译码的平均迭代次数,本文通过对 SCR 准则进行分析,并且利用 Turbo 码的收敛特性,提出一种基于信噪比的变门限 SCR 迭代停止准则,并通过仿真证明,该准则并没有增加额外的复杂度,能够在保证译码性能的同时,有效减少译码的平均迭代次数,尤其是信噪比较低的情况下,改善的效果非常明显。

参考文献:

- [1] 赵旦峰,李文意. Turbo 码译码及其应用研究的最新进展[J]. 信息与电子工程, 2003,1(2):72-74.
- [2] 王新梅,肖国镇. 纠错码—原理与方法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2001.
- [3] Summer T A, Wilson S G. SNR mismatch and online estimation in turbo decoding[J]. IEEE Trans. Commun., 1998,46(4): 421-423.
- [4] 刘东华. Turbo 码原理与应用技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.
- [5] Hangenauer J, Offer E, Pake L. Iterative decoding of binary block and convolutional codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1996,42(2):429-445.
- [6] Wu Y, Woerner B D, Ebel W J. A simple stopping criterion for turbo decoding[J]. IEEE Communications Letters, 2000,4(8): 258-260.
- [7] Shibutani A, Suda H, Adachi F. Reducing average number of turbo decoding iterations[J]. Electronics Letters, 1999,35(9): 701-702.
- [8] Shao R Y, Lin S, Fossorier M P C. Two simple stopping criteria for turbo decoding[J]. IEEE Transactions on Communications, 1999,47(8):1117-1120.

作者简介:



王晓明(1986-),男,黑龙江省鸡西市人,在读硕士研究生,主要研究方向为数字通信技术及应用.email:wxm12195114@163.com.

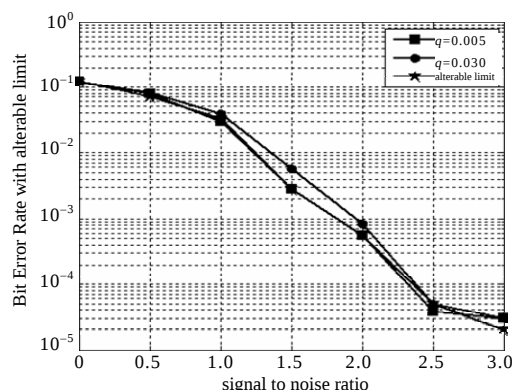


Fig.5 Bit Error Rate with alterable limit

图5 变门限下的误码率

全厚德(1963-),男,辽宁省大连市人,教授,博士生导师,主要研究方向为通信与信息系统。

张弛(1968-),男,石家庄市人,讲师,在读博士研究生,主要研究方向为指挥控制系统。

王欣(1983-),女,河北省藁城市人,讲师,主要研究方向通信与信息系统。