

文章编号:1671-6833(2013)02-0067-04

一种具有不等差错保护能力的 Turbo 预编码方案

张卫党, 杨程程

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:通过 Turbo 预编码思想与不等差错保护技术的结合,以达到对不同重要性信息的不等保护.所设计的 Turbo 预编码方案,以简单的线性分组码为外码(预编码器),以 Turbo 码为内码构成的串行级联码.针对这种预编码方案研究了新的外码 SISO 迭代译码算法.最后,对 1/3 码率的 Turbo 预编码系统按外码译码方式的不同进行了仿真,并与 1/2、1/3 码率的 Turbo 码作性能比较.结果表明,本方案不仅使 Turbo 码的性能得到了有效的提高,也实现了对不同信息的不等差错保护.而且,编译码思路简单可行.

关键词:Turbo 码;不等差错保护;预编码;SISO 迭代译码算法

中图分类号:TN911.22 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2013.02.018

0 引言

Turbo 码纠错能力极强,是接近 Shannon 理论极限的“好码”^[1].它在高速率数据传递中有着传统信道编码无可比拟的优势,目前已经成为第三代移动通信的信道编码标准之一.在现实通信中,不同的信息具有不同的重要性.为了实现数据高效可靠传输,不等差错保护技术是个极佳的选择.因而将性能优异的 Turbo 码与不等差错保护技术相结合具有重要的研究意义.

传统的 Turbo 码不等差错保护方案有:利用 Turbo 本身具有的不等差错保护特性为不同位置安排重要性不同的信息^[1];利用特殊的删余矩阵为重要性不同的信息提供不同的码率^[2-4];改变编码结构,为重要信息构造更多的子码.这些通常是以牺牲次要信息的正确传输率为代价来提高重要信息的正确传输率,虽然对重要信息起到了重点保护,但是 Turbo 码的整体性能并未提高甚至有所下降.基于此,设计既能提高 Turbo 码总体性能,又能实现不等差错保护的 Turbo 码方案是一个极大的挑战.

预编码器是指置于“类 Turbo 码”编码器之前的用于提高迭代译码性能的装置^[5].在 Turbo 码之前加入预编码器构成串行级联码的方案,能有

效地提高 Turbo 码的性能.但是加入预编码器必然使整个编码系统变得复杂.所以,设计简单而高效的预编码器成为研究者的追求.以线性分组码为外码、Turbo 码为内码构成的串行级联码已经有多人研究过^[6-7],为了达到提高 Turbo 码性能的目的,采用的分组码往往是纠突发差错能力极强的码,如 RS 码, BCH 码等. Burket. F 等研究了 BCH 码与 Turbo 码构成的串行级联码,有效地降低了 Turbo 码的“错误平层”效应^[6]. Narayanan. K 等通过对 Turbo 码中最易出错的比特进行 BCH 编码保护,有效地提高了高信噪比时 Turbo 码的性能^[7].他们都利用了 BCH 码纠突发差错较强的能力来纠正 Turbo 码译码后的残余错误,所以在低信噪比下,当错误超出其纠错范围时, Turbo 码的性能并不能改善甚至恶化.随着分组码复杂度的提高,译码复杂度会成指数增长,造成码率也有损失.所以,如果采用的分组码不合理,结果就会得不偿失.

笔者将预编码的思路与不等差错保护相结合,仍然以分组码为外码, Turbo 码为内码构成串行级联码,这里外码相当于一个预编码器.通过合理的设计编译码方法达到既能为不同重要性的信息提供不等差错的目的,同时也能提高 Turbo 码的总体性能.

收稿日期:2012-10-27;修订日期:2012-12-26

基金项目:河南省自然科学基金资助项目(2010B510020);郑州大学研究生科学研究基金资助项目(11L00504);郑州大学校研究生教育支持基金资助项目

作者简介:张卫党(1958-),男,郑州大学教授,博士,主要从事通信技术研究.邮箱:iewdzhang@zzu.edu.cn.

1 编码方案

将重要性不同的信息序列分3个等级,预编码器将重要性最高的信息与中间级信息模二和得到的信息作为校验信息,与原始信息一起送入内编码器进行 Turbo 编码. 编码结构中两个交织器的长度相同. 预编码器可根据各级信息比特数量来安排串并转换器的路数,这里为了方便与 Turbo 码进行性能比较,就以码率为 2/3 的 (6,4) 分组码为外码,与 1/2 码率的删余 Turbo 码串行级联构成码率为 1/3 的级联码为例. 预编码模型如图 1 所示.

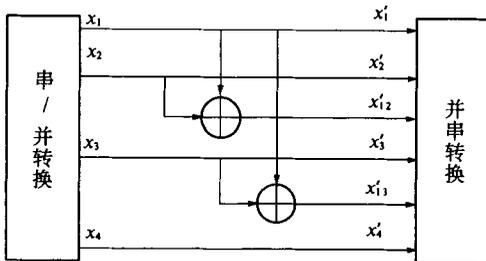


图 1 预编码模型

Fig. 1 Scheme of precoded code

预编码模型中第一路表示重要性最高的信息,第二路以及第三路表示重要性处于中间级的信息,第四路表示最不重要信息. 经过预编码处理,待传输的信息中插入了两路信息冗余. 根据预编码的结构,在预编码的逆过程——外码译码时,第一级可从这些校验信息中提取最多的译码信息,第二级获得的次之,第三级为零. 这是实现信息不等差错保护的关键. 图 1 描述了预编码器输入信息 x 与输出信息 x' 之间的关系.

2 SISO 迭代译码方案

预编码采用的 (6,4) 分组码纠检错能力较弱,所以相比于文献 [6-7] 提出的级联码方案,如仍采用分组码的译码方式,那么内码译码之后的错误残余得不到再次纠正,且不论性能是否下降,码率已经大打折扣(后文对外码采用分组码译码方式的方案进行了仿真). 所以,针对笔者的预编码方案,重新设计了外码的译码方法. 同时,整个译码结构都采用迭代译码思想,不仅内码的两个分量码之间进行信息的交换,而且外码与内码之间也要进行信息交换,各个译码器均采用软输入软输出(SISO)算法. 整个译码思想是提高编解码性能的关键. 译码结构图如图 2 所示.

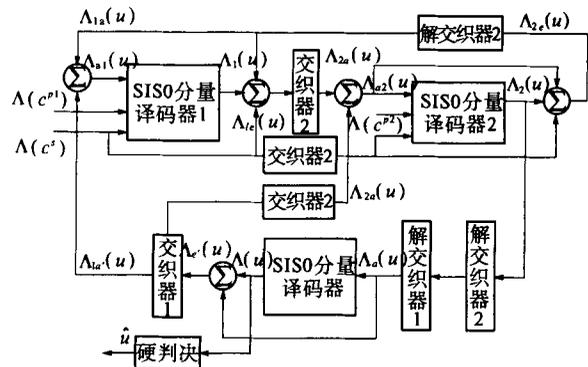


图 2 译码结构图

Fig. 2 Structure of decoding

在经典的 Turbo 码迭代译码方案中, SISO 分量译码器 1 生成的外信息 $\Lambda_{1e}(u)$ 经过交织器之后作为 SISO 分量译码器 2 的先验信息 $\Lambda_{2a}(u)$, $\Lambda_{2e}(u)$ 作为译码器 2 的外信息再经解交织之后成为译码器 1 的先验信息 $\Lambda_{1a}(u)$, 如此循环往复, 实现了信息迭代. 本研究中, 内码译码中两个分量译码器的先验信息 $\Lambda_{a1}(u)$ 和 $\Lambda_{a2}(u)$ 除了各自之间的信息供给, 又多了一个来源: 外码译码器将分量译码器 2 的输出 $\Lambda_2(u)$ 经过两个解交织器后作为先验信息 $\Lambda_a(u)$, 经过外码译码, 输出似然信息 $\Lambda(u)$, 输出信息与先验信息之差就是外信息 $\Lambda_e(u)$, 它经过交织器 1 就构成了分量译码器 1 先验信息的一部分 $\Lambda_{1a}(u)$, 它经过两个交织器就构成了分量译码器 2 先验信息的一部分 $\Lambda_{2a}(u)$. 于是, 内码与外码之间也形成了信息交换, 实现了内部迭代. 最后, 经过一定次数的迭代, 外码输出的软信息经过硬判决得到最终输出. (公式 1, 2) 分别为译码器 1 及译码器 2 的先验信息 $\Lambda_{a1}(u)$ 、 $\Lambda_{a2}(u)$. (公式 3) 为外码译码器输出外信息 $\Lambda_{2e}(u)$. 式中 I 表示经过交织, I^{-1} 表示经过解交织.

$$\Lambda_{a1}(u) = \Lambda_{1a}(u) + \Lambda_{1e}(u) = \Lambda_{2e}(u(I_2^{-1})) + \Lambda_e(u(I_1)) \tag{1}$$

$$\Lambda_{a2}(u) = \Lambda_{2a}(u) + \Lambda_{2e}(u) = \Lambda_{1e}(u(I_2)) + \Lambda_e(u(I_1, I_2)) \tag{2}$$

$$\Lambda_e(u) = \Lambda(u) - \Lambda_a(u) = \Lambda(u) - \Lambda_2(u(I_2^{-1}, I_1^{-1})) \tag{3}$$

内码译码采用基于后验概率的软输出 Log-MAP 算法. 两个 SISO 分量译码器在 k 时刻输出的似然信息由式 4 表示.

$$\Lambda_{(1,2)}(u_k) = \ln \frac{P(u_k = 1 | Y_1^N)}{P(u_k = 0 | Y_1^N)} \tag{4}$$

针对提出的预编码方案设计了新的外码译码方法, 它的思想是按照各个信息比特之间的关系,

从相关校验信息比特中最大化地提取当前有效信息比特的判决外信息 $\Lambda_e(u)$,然后将外信息与先验信息之和作为外码译码器最终的判决信息 $\Lambda(u)$,以提高译码可信度.外码译码同样采用 SISO 算法,它的输入为分量译码器 2 的输出似然信息 $\Lambda_2(u)$,同时要分帧译码.

外码译码器在 k 时刻输出的似然判决信息为式 5,它由先验信息和外信息两部分构成.对于不同重要性等级的信息来说,判决外信息的计算也有差异.若将 k 时刻进入外码译码器的似然信息表示为 $\Lambda_{(j)}^i(u_k)$,上角标对应预编码器每一路输入输出的第 i 位,下角标 j 用于区分信息的重要性等级,对应预编码器输出信息的下角标.假设 k 时刻进入外码译码器的信息比特的似然信息来自预编码器的第一路,则从时刻 k 到 $k+5$ 的似然信息分别对应了预编码器的六路输出,各路似然信息由式 6 得到.

$$\Lambda(u_k) = \Lambda_a(u_k) + \Lambda_e(u_k) \quad (5)$$

$$\Lambda_{(j)}^i(u_{k+s}) = \ln \frac{P(u_{k+s} = 1 | Y_1^N)}{P(u_{k+s} = 0 | Y_1^N)} = I_j^i$$

$$\begin{cases} s = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \\ j = 1, 2, 12, 3, 13, 4, \end{cases} \quad (s \text{ 与 } j \text{ 一一对应}) \quad (6)$$

各个时刻信息的判决外信息用 $\Lambda_{(j)e}^i(u_k)$ 表示,根据预编码中有效信息与校验信息之间的关系可计算得到.以 k 时刻第一路信息比特为例,根据预编码方案,时刻 $k+1$ 与 $k+2$ 的信息组合,以及时刻 $k+3$ 与 $k+4$ 的信息组合是它判决外信息的来源,所以如果接收信息为 $u_k = 1$ 的情况,就等价于这两个组合都为异号;若是 $u_k = 0$,这两个组合都为同号.这几个相关时刻的软判决信息都由外码译码器的先验信息得到.基于此关系,可分别得到 $u_k = 1$ 和 $u_k = 0$ 的概率,进而得到式 7 所示的第一路外码似然判决外信息,其中对指数和对数的运算采用了 MAX 简化算法,其他各路原理相同.中间级信息的判决外信息只来源于两个时刻的信息组合.第三级为不重要信息,没有经过预编码,因此不需要参与外码译码,判决外信息为零.从判决外信息的计算方法可以看到,在预编码中插入的校验信息位在外码译码中得到了充分的应用,而且有效信息不仅从校验信息中得到了额外信息,同时也给校验信息提供了判决依据.由于交织器的存在以及 Turbo 码分量编码为卷积码,所以第三级信息会受到其他信息译码可信度的影响而使其译码可信度增强.以上所述是本方案提高 Turbo 码性能的主要原因.而且,相比文献[6-

7]的外码译码方法,本方案更简单.

$$\Lambda_{(1)e}^1(u_k) = \ln \frac{P(u_{k+1}=1 | Y_1^N)P(u_{k+2}=0 | Y_1^N) + P(u_{k+1}=0 | Y_1^N)P(u_{k+2}=1 | Y_1^N)}{P(u_{k+1}=1 | Y_1^N)P(u_{k+2}=1 | Y_1^N) + P(u_{k+1}=0 | Y_1^N)P(u_{k+2}=0 | Y_1^N)}$$

$$+ \ln \frac{P(u_{k+3}=1 | Y_1^N)P(u_{k+4}=0 | Y_1^N) + P(u_{k+3}=0 | Y_1^N)P(u_{k+4}=1 | Y_1^N)}{P(u_{k+3}=1 | Y_1^N)P(u_{k+4}=1 | Y_1^N) + P(u_{k+3}=0 | Y_1^N)P(u_{k+4}=0 | Y_1^N)}$$

$$= \ln \frac{e^{I_2^1} + e^{I_{12}^1}}{e^{I_2^1 + I_{12}^1} + 1} + \ln \frac{e^{I_3^1} + e^{I_{13}^1}}{e^{I_3^1 + I_{13}^1} + 1}$$

$$\approx \max(I_2^1, I_{12}^1) - \max(I_2^1 + I_{12}^1, 0) + \max(I_3^1, I_{13}^1) - \max(I_3^1 + I_{13}^1, 0) \quad (7)$$

3 仿真结果及分析

为了验证笔者提出的预编码方案的可行性,对 1/3 码率的 Turbo 预编码方案以及 1/2、1/3 码率的经典 Turbo 码进行了仿真和比较.同时,为了观察新的 SISO 外码译码算法带来的性能增益,对外码采用分组码译码方式的 1/3 码率预编码方案也进行了仿真,并与前者进行比较.其中, Turbo 码的分量编码器为生成多项式(7,5)的递归系统卷积码,两个随机交织器长度为 600,迭代次数为 5,信息长度为 10^7 ,在 AWGN 信道下得到了平均误比特率、误帧率以及各重要性等级信息的误比特率曲线.其中,图 3 为误比特率曲线图,图 4 为误帧率曲线图.

图 4 中,最下面为重要信息的误比特率曲线,向上依次为中间级信息、新译码方案 Turbo 预编码、不重要信息、1/3 码率 Turbo 码、分组码译码方式 Turbo 预编码及 1/2 码率 Turbo 码的平均误比特率曲线.由此看出, Turbo 预编码方案使重要性不同的各级信息得到了不等保护;比较 1/2 码率 Turbo 码、分组码译码方式 Turbo 预编码以及新译码方案 Turbo 预编码的误比特率及误帧率曲线可知,在不考虑码率损失的情况下,预编码确实带来了性能增益,但是,分组码译码方式 Turbo 预编码的增益是微弱的,而新的 SISO 译码算法使 Turbo 预编码的性能得到了有效提高;新译码方案 Turbo 预编码相比于同速率的经典 Turbo 码,整体误比特率性能也得到了改善,预编码带来的性能增益超过了码率损失带来的影响.比较文献[5-7]的结果,笔者预编码方案使低信噪比下 Turbo 码的性能也得到了提高,但由于 Turbo 译码性能的“瀑布效应”,低信噪比下的性能增益小于高信噪比下的增益.在低信噪比下,平均误比特率性能提高了 0.6 dB 左右;在高信噪比下,平均误比特率性能提高了约 0.8~1.0 dB.

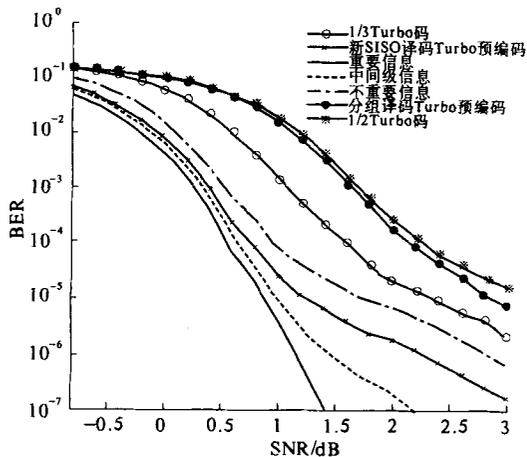


图3 误比特率曲线图

Fig. 3 Curve of bit error rate

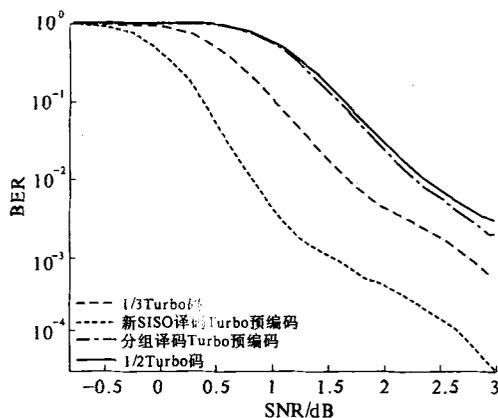


图4 误帧率曲线图

Fig. 4 Curve of frame error rate

4 结论

基于 Turbo 码将预编码思路与不等差错保护技术相结合,为 Turbo 码设计了简单的预编码器,并针对该预编码结构设计了相应的软输入软输出译码算法.从仿真结果看到,该方案不仅实现了不

等差错保护的目,同时新的 SISO 外码译码算法有效地提高了 Turbo 码的性能.而且,本方案编译码思想简单灵活.系统可根据待传信息的重要性不同改变预编码的路数,在码率和预编码增益上得到折中.但是,由于本文信息重要性等级及数量的划分是预先设定的,所以对于不同的信息组合,这种方案的实用性有待更深入的研究.

参考文献:

- [1] BERROU C, GLAVIEUX A, THITIMAJSHIMA P. Near Shannon limit error - correcting coding and decoding: turbo codes(1)[C]. Proc. IEEE Int. Conf. Communications, May, 1993: 1064 - 1070.
- [2] ZHANG Wei-dang, SHAO Xia, TORKI M, et al. Unequal error protection of JPEG2000 images using short block length Turbo codes[J]. IEEE Transactions on Communications. June, 2011, 15(6): 659 - 661.
- [3] AYDINLIK M, SALEHI M. Turbo coded modulation for unequal error protection[J]. IEEE Transactions on Communications. April, 2008, 56(4): 555 - 564.
- [4] 黄成进. 移动通信中具有不等差错保护(UEP)能力的 Turbo 码技术研究[D]. 中山大学信息科学与技术学院. 2007: 40 - 47.
- [5] TONG Sheng, ZHENG Hui-juan, BAI Bao-ming. Pre-coded turbo code within 0.1 dB of Shannon limit[J]. Electronics Letters. April, 2011, 47(8): 521 - 522.
- [6] BURKET F, HAGENAUER J. A serial concatenated coding scheme with iterative Turbo and feedback decoding[C]. Proc. Int. Symp. On Turbo Codes & Related Topics. 1997: 227 - 230.
- [7] NARAYANAN K, STUBER G. Selective serial concatenation of Turbo codes[J]. IEEE Communication Letters, Sept, 1997, 1(5): 136 - 139.

A Precoded Turbo Coding Scheme With Unequal Error Protection Ability

ZHANG Wei-dang, YANG Cheng-cheng

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The combination of precoded Turbo thoughts and unequal error protection technology, helps to achieve unequal protection for information with different importance. The precoded turbo coding scheme designed in this paper consists of the simple linear block code as the outer code (precoder) and the Turbo code as the inner code. They make up the serial concatenated codes. According to this precoding scheme, this paper researches a new outer code SISO iterative decoding algorithm. At last, 1/3 rate of the precoded Turbo system has been simulated according to the decoding algorithms of outer code, and has been compared with the performance of 1/2 and 1/3 rate Turbo code. The results show that this scheme not only improves the performance of Turbo code effectively, it also realizes unequal error protection for different informations. And the coding and decoding ideas are simple and feasible.

Key words: Turbo code; unequal error protection(UEP); precoding; SISO iterative decoding algorithm