

基于短帧交织的 Turbo 码编码器研究

李建平¹, 王宏远²

(1. 北京大学信息科学技术学院, 北京 100871; 2. 华中科技大学电信系, 湖北武汉 430074)

摘要: 本文分析了 Turbo 码编码器及其输出码字的组成原理, 基于使输出码字最小汉明重量最大化和使最小汉明重量输出码字出现的概率最小化的原则, 结合结构化交织器和随机交织器的优点, 提出了一种伪随机的结构化反块交织器, 并进一步提出了采用双伪随机反块交织器的 Turbo 码编码器方案. 该方案有效的增大了 Turbo 码输出码字的最小汉明距离, 同时避免了 Turbo 码边缘效应且具有伪随机性, 因此, 可有效的提高系统的纠错性能. 仿真实验结果显示, 该方案在短帧传输的条件下有着最佳的综合性能. 特别是在信噪比高时, 采用该方案与采用其它交织器的 Turbo 码方案相比, 在提高系统的可靠性上具有明显的优势.

关键词: Turbo 码; 成员编码器; 交织器; 突发错误; 比特错误率

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 03-0444-04

Research on Turbo Encoders Based on Short Frame Interleavers

LI Jian-ping¹, WANG Hong-yuan²

(1. School of Electronics Engineering & Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Dept. of Electronics & Information Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Turbo codes with random interleavers are capable of achieving better error correcting performance than that obtained with structured interleavers at low SNR and the situation is in general the other way round at high SNR. To get better performance under the condition of various signal-to-noise ratios, this paper proposed a novel pseudo-random reverse block interleaver, which efficiently avoids the edge effect and combines the advantages of random interleavers and structured interleavers. Built in two proposed interleavers with different starting points, a novel Turbo encoder produced herein, capable of making Turbo codes obtains an increment in the minimum Hamming weight and consequently obtain a decrease at bit error rate. Simulation results show that the error-correcting performance of Turbo codes with it is superior to those obtained with other encoders on the whole when the short frame is transmitted. In particular, for clean channel, Turbo codes with the proposed encoder are capable of achieving much better error correcting performance than before.

Key words: Turbo codes; constituent encoder; interleaver; burst error; bit error rate

1 引言

Turbo 码能获得接近 Shannon 极限的纠错性能, 交织器的采用是其中的一个重要原因^[1]. Shannon 等在给出信道编码定理在分组码情况下的证明时, 引用了使信道实现无误差传输的三个基本条件, 其中之一是采用随机编、译码方式^[2,3]. Turbo 码又称并行级联码 (PCC) 或并行级联卷积码 (PCCC), 它是二个或多个系统码的并行级联^[4]. 典型的 Turbo 码编码器如图 1 所示, 由于在二个成员编码器 E_1 和 E_2 之间存在着交织器, 扰乱了成员编码器 E_2 的输入序列中的码元顺序, 使 Turbo 码编码器的输出呈现出随机性, 从而提高 Turbo 码的纠错性能^[1,4].

Turbo 码所表现出的接近 Shannon 极限的误比特率 (BER), 使得它在深空通信、移动通信等系统中有广阔的应用前景. 目前, Turbo 码已成为 CDMA2000 标准的信道编码方

案^[6]. 在语音传输中, 信道编码器每帧所处理的数据量通常不超过 200 比特. 如 JD-CDMA 无线移动系统, 其每帧的数据量为 192 比特^[7]. 因此, 寻求短帧交织的 Turbo 码编码器优化方案, 非常具有现实意义. 本文在分析交织器性能的基础上, 对短帧交织的 Turbo 码编码器构成方案展开分析和讨论, 以求给出不同信道条件下 Turbo 码编码器的优化方案.

2 Turbo 码编码器输出码距离分析

尽管 Turbo 码编码器的各成员编码器 (如图 1 中的 E_1 和 E_2) 为卷积码编码器, 但 Turbo 码编码器的输出仍然可看成为分组码^[8]. 图 1 中编码器的输出构成了 $(N + r_1 + r_2, N)$ 的分组码. 分组码的纠错性能极大地取决于码距离分布^[9].

在图 1 所示的 Turbo 码编码器中, 设输入信息长度为 N , 则在 Turbo 码编码器的输出端可得到一个编码效率为 $1/3$ (不

考虑增信删余的 $(3N, N)$ 的分组码. 用哑元 w 表示分组码 C 的信息部分, 变量 w 表示信息部分重量; 哑元 Z 表示校验部分, 变量 j 表示校验部分重量. 则可得分组码的输入冗余重量计算函数^[4] (IRWEF) 为:

$$A^C(W, Z) = \sum_{w,j} A_{w,j} W^w Z^j \quad (1)$$

其中 $A_{w,j}$ 表示信息部分汉明重量为 w 、校验部分汉明重量为 j 的码字的数目. 此时码字的汉明总重量为 $w + j$.

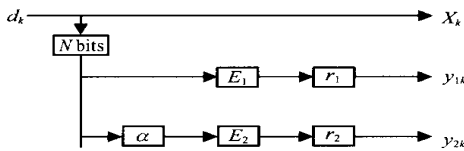


图 1 典型的 Turbo 码编码器

当输入信息重量为 w 时, 分组码中校验部分的重量分布函数^[4,8] 为:

$$A_w^C(Z) = \sum_j A_{w,j} Z^j = \frac{1}{w!} \left. \frac{\partial^w A^C(W, Z)}{\partial W^w} \right|_{W=0} \quad (2)$$

其中 $A_w^C(Z)$ 被称为条件重量计算函数. 显然, 条件重量计算函数 $A_w^C(Z)$ 与输入冗余重量计算函数 (IRWEF) $A^C(Z)$ 间存在关系式:

$$A^C(W, Z) = \sum_w W^w A_w^C(Z) \quad (3)$$

记图 1 中成员编码器 E_1 和 E_2 的输出分别为分组码 C_1 和 C_2 . 对于长度为 N 的输入信息序列, 重量为 w 的情况共有 C_N^w 种. 当采用均匀的交织方式时, Turbo 码编码器总的输出码组的条件重量计算函数为:

$$A_w^C(Z) = \frac{A_{w_1}^{C_1}(Z) \cdot A_{w_2}^{C_2}(Z)}{C_N^w} \quad (4)$$

在高斯白噪声 (AWGN) 信道中, 当采用最大似然 (ML) 软判决解码时, 根据冗余重量计算函数 (IRWEF) 或条件重量计算函数可得出比特错误率的一个联合上界的表示形式如下^[4]:

$$P_b(e) \leq \frac{1}{2} \sum_m D_m \text{efc} \left(\sqrt{m \frac{R_c E_b}{N_o}} \right) \quad (5)$$

其中: $D_m = \frac{w}{N} A_{w,j}, m = j + w \quad (6)$

因为 $\text{efc}(x)$ 为单调减函数, 由式 (5) 可知, 当传输数据经过某一给定信道时 (码率 R_c 以及信噪比 E_b/N_o 确定), 其比特错误率 $P_b(e)$ 主要取决于码重集合 $\{m\}$ 中的数值. $\{m\}$ 中数值越大, 则 $P_b(e)$ 的取值区间越小. 由于 $\text{efc}(x)$ 单调减, 在 x 最小处取得最大值, 因此, 要实现低比特错误率, 传输码组的最小码重 m 要尽可能大. 事实上, 当分组码的最小码字重量为 d 时, 其最大可纠错数目 $t \approx (d-1)/2$ ^[10].

决定比特错误率 $P_b(e)$ 取值范围的另一参数是系数集合 $\{D_m\}$ 中的数值. 在式 (5) 中, 系数集合 $\{D_m\}$ 中数值越小, 则 $P_b(e)$ 的上界越小. 由式 (6)、(4) 和 (3) 可知, 当每帧输入信息序列长度 N 增加时, 即交织器的交织长度增加时, 系数集合 $\{D_m\}$ 中的数值变小. 这意味着可通过增加交织器的交织长度来降低系统的比特错误率. 在移动通信系统中, 交织器交织长

度的确定要受到系统时延和计算复杂性的制约. 由于 $\text{efc} \left(\sqrt{m \frac{R_c E_b}{N_o}} \right)$ 是 m 的单调减函数, 在交织器长度一定时, 可通过减小系数集合 $\{D_m\}$ 中小 m 值所对应项的数值以使式 (5) 中比特错误率 $P_b(e)$ 的上界变小. 由式 (6) 和式 (1) 可知, 这相当于减小低汉明重量码字的数目 $A_{w,j}$.

由上述讨论可知, 在交织器的交织长度确定时, 要提高分组码的纠错能力, 直接的方法是增大分组码的最小码字重量或减小最小码字重量出现的概率.

3 Turbo 码编码器方案比较

在图 1 所示的 Turbo 码编码器中, 当交织器为随机交织器时, 总存在成员编码器 E_1 和 E_2 的输入码元序列完全相同的情况. 也就是说采用随机交织器只能通过减小式 (5) 中系数集合 $\{D_m\}$ 中的数值来提高 Turbo 码的纠错性能, 并不能增加 Turbo 码编码器输出码字的最小汉明重量; 而当为结构化交织器 (structured interleaver) 时, 则能保证成员编码器 E_1 和 E_2 有不同的输入码元序列, 从而增加 Turbo 码的最小汉明重量. 在 Turbo 码的分析与设计, 交织器的随机特性和结构化特性有着各自的作用: 在低信噪比 (SNR) 时, 随机交织器性能优于结构化交织器; 而在高信噪比 (SNR) 时, 通过合适的设计, 通常可使结构化交织器性能优于随机交织器^[8]. 因此, 如果能结合随机交织器和结构化交织器的优点, 则 Turbo 码的性能可以得到进一步的改善^[11].

表 1 是 Turbo 码编码器中采用随机交织器、反块交织器^[8]、伪随机反块交织器的比较结果. 反块交织器是一个 $n \times d$ 的矩阵, 输入码元从第一行到第 n 行逐行自左至右写入, 输出则是从第 d 列到第一列逐列自下至上读出. 伪随机反块交织器仍然是一个反块交织器, 只不过对应于待传输数据的不同帧数, 读出时的起始列不同, 因而使交织器具有伪随机特性. 具体实现如下:

对于每一帧待传输数据, 产生一个伪随机数 $p (1 \leq p \leq d)$, 读出时从第 p 列开始逐列自下至上直至读完第一列, 然后从第 d 列到第 $p+1$ 列. 伪随机数 p 的产生式为:

$$p = \text{mod}(n^2 + n + \text{mod}(n, 2), d) + 1 \quad (7)$$

其中, n 为传输帧数, mod 为求模运算, 有:

$$\text{mod}(n, m) = n \text{ mod } m \quad (8)$$

在表 1 数据的仿真实验中, 所采用的成员编码器为递归系统卷积码 (RSC) 编码器, 生成子为: $G1 = 7, G2 = 5$. 交织长度 $L = 192$, 信道为带突发错误的加性高斯白噪声信道. 其中突发长度 $l = 20$, 强度为 0.5, 为加性噪声的均方差. 采用 MAX-log-MAP 算法, 迭代次数 $m = 5$.

表 1 采用不同交织器的 Turbo 码结果比较

	0.5 (dB)	1.5 (dB)	2.5 (dB)
随机型	3.09×10^{-2}	2.00×10^{-3}	7.54×10^{-5}
反块型	3.28×10^{-2}	1.30×10^{-3}	3.51×10^{-5}
伪随机型	2.90×10^{-2}	1.40×10^{-3}	3.82×10^{-5}

从表 1 中可知, 在图 1 所示的 Turbo 码方案中, 低信噪比 (0.5dB) 时, 交织器采用随机交织器时的比特错误率低于采

用反块交织器的情况,即低信噪比时随机交织器性能优于反块交织器;而在高信噪比时,情况则正好相反。这主要是因为低信噪比时,随机的加性高斯白噪声(AWGN)在信道中起着主要的作用,采用随机交织器对于低信噪比时的该类噪声引起的误差有更好的纠正作用;在高信噪比时,信道中起主要作用的是突发错误,由于反块交织器的交织深度比较大(可通过设计实现),也就是可得到比较大的交织距离^[12],因此对突发错误有很好的纠正作用。伪随机反块交织器由于兼具随机交织器和结构化交织器的特性,对于随机的加性高斯白噪声和突发错误共存的信道,在低信噪比时其纠错性能更是优于随机交织器。而在高信噪比时,由于伪随机性的引入,伪随机反块交织器总存在一些交织距离比较小的输出,这对于突发错误起主要作用的情况,会影响其纠错性能。因此,伪随机反块交织器的纠错性能在高信噪比时稍逊于反块交织器而优于随机交织器。

从图1的结果可看出,对于随机噪声和突发脉冲噪声共存的信道,在低信噪比时,采用伪随机反块交织器的 Turbo 码纠错性能最佳;而在高信噪比时,则是采用反块交织器的性能最优。由于在高信噪比时,采用伪随机反块交织器和采用反块交织器的比特错误率差别微小,而通常对于信道纠错编码的要求主要集中在低信噪比时的情况,因此,从总体上看,伪随机反块交织器的性能更为理想。

以上从交织器的角度对 Turbo 码编码器及其性能进行了分析和比较。事实上, Turbo 码编码器由成员编码器和交织器组成,各成员编码器的设计和交织器的设计是相互关联的,二个分开的最优设计未必导致最优的 Turbo 码,应把成员编码器和交织器的设计作为一体来考虑使 Turbo 码达到最优^[13]。

图1为典型的 Turbo 码编码器表示形式。其中 E_1 和 E_2 为递归系统卷积码成员编码器, $\{d_k\}$ 为包含尾比特的输入信息序列, $\{x_k\}$ 为待传输的数据信息,即系统信息; $\{y_{1k}\}$ 和 $\{y_{2k}\}$ 分别为 E_1 和 E_2 输出的校验信息(冗余位)。根据传送码率的要求,将这三路信息经增信删余 ($R=1/2$) 或直接组合 ($R=1/3$), 实现 Turbo 码编码送往传输信道。由于 $\{y_{2k}\}$ 是 $\{d_k\}$ 经交织器交织后由成员编码器 E_2 产生, k 时刻成员编码器 E_2 输出的冗余位 y_{2k} 通常并不对应于该时刻的输入码元 d_k , 其结果是改变了 Turbo 码编码器的输出码距离分布,从而起到了提高 Turbo 码纠错性能的作用^[14]。然而,由于 d_k 和 y_{1k} 之间在位置上依序对应, y_{1k} 只与 d_k 及其前 m 个输入成员编码器 E_1 的码元有直接相关性 (m 为 E_1 的存贮长度), 在信道中存在突发误差时,这种结构会影响 Turbo 码的纠错性能。因此,如果将输入信息序列 $\{d_k\}$ 经过交织器“搅乱”后再送往成员编码器 E_1 , 如图2所示,选择交织器 α_1 和 α_2 使之有不同的输出序列,这样,送入信道传输的码元序列 $\{x_k, y_{1k}, y_{2k}\}$ 中的相邻码元 x_k, y_{1k} 和 y_{2k} 由信息序列 $\{d_k\}$ 中的不同位置部分组成,必然能进一步增强 Turbo 码对突发误差的抗干扰能力,提高 Turbo 码性能。

在图2所示的 Turbo 码编码器的构成方式中,取 α_1 为前述求取表1结果时所采用的伪随机反块交织器,而保持交织器 α_2 和 α_1 的起点指针相距 $L_m/2$ 列,称此时的 Turbo 码编

器为双伪随机反块交织器方案。该方案不仅保持了交织器的随机特性,而且考虑了 Turbo 码编码器并行级联的特点,通过采用多个交织器且选择不同的交织器输出方式使 Turbo 码对突发误差的抗干扰能力得到充分的提高。采用反块交织器、伪随机反块交织器和双伪随机反块交织器方案的 Turbo 码比特错误率结果如表2所示:

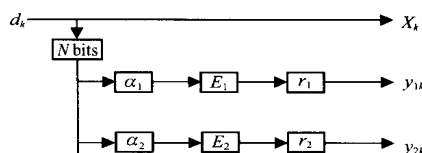


图2 双伪随机反块交织器的编码器结构
表2 采用反块交织器、伪随机和双伪随机反块交织器的 Turbo 码比较结果 ($m=5$)

	0.5 (dB)	1.5 (dB)	2.5 (dB)
反块	3.28×10^{-2}	1.30×10^{-3}	3.51×10^{-5}
位伪随机	2.90×10^{-2}	1.40×10^{-3}	3.82×10^{-5}
双伪随反	2.95×10^{-2}	1.60×10^{-3}	2.89×10^{-5}

从表2可看出,在低信噪比时,由于起主要作用的是随机噪声,采用伪随机反块交织器和双伪随机反块交织器的改变比率很小;在高信噪比时,由于是突发脉冲噪声在起主要作用,而双伪随机反块交织器采用了二个产生不同输出序列的交织器,因此得到最低的 Turbo 码比特错误率。

4 结论

通过上述分析和仿真实验结果可知,本文提出的伪随机反块结构化交织器由于可增加输出码字的最小码重同时又具有随机特性,对于信道中存在突发错误的短帧传输的 Turbo 码方案具有优于随机交织器、块交织器和反块交织器的性能。据此提出的双伪随机反块交织器的 Turbo 码方案在综合性能上更是得到进一步的提高。尤其是当信道中干扰小,信噪比高时,采用双伪随机反块交织器的 Turbo 码方案在纠错性能上明显优于采用其它交织器的 Turbo 码方案。这对于信道中重要数据的传输具有重要的意义。

参考文献:

- [1] C Berrou, A Gavieux, P Thitimajshima. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes [A]. Proc ICC '93 [C]. Geneva, Switzerland: ICC 93, 1993. 1064 - 1070.
- [2] G Battail. A conceptual framework for understanding turbo codes [J]. IEEE J Select Areas Commun, 1998, 16(2): 245 - 254.
- [3] 吴伟陵. 通向信道编码定理的 Turbo 码及其性能分析 [J]. 电子学报, 1998, 26(7): 35 - 40.
- [4] S Benedetto, G Montorsi. Unveiling Turbo codes: Some Results on parallel concatenated coding schemes [J]. IEEE Trans Inform Theory, 1996, 42(2): 409 - 428.
- [5] C Berrou, A Gavieux. Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo-codes [J]. IEEE Trans Commun, 1996, 44(10): 1261 - 1271.
- [6] 孙蓉, 陈军, 邓浩, 王新梅. Turbo 码 MAP 译码算法中量化问题

的研究[J]. 电子学报, 2001, 29(10): 1356 - 1359.

- [7] P Jung. Comparison of Turbo-code decoders applied to short frame transmission systems[J]. IEEE J Select Areas Commun, 1996, 14(3): 530 - 537.
- [8] H Herzberg. Multilevel Turbo coding with short interleavers [J]. IEEE J Select Areas Commun, 1998, 16(2): 303 - 309.
- [9] S G Wilson. Digital Modulation and Coding [M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- [10] J G Proakis. Digital Communications (third edition) [M]. New York: McGraw-Hill, Inc. 451 - 452.
- [11] Li Jianping, Wang Hongyuan. Turbo codes with hybrid interleaving mode [J]. High Technology Letters, 2001, 7(4): 50 - 53.
- [12] Li Jianping, Wang Hongyuan. Structured interleaver design based on two interleaving distances [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2002, 13(2): 13 - 15.
- [13] 叶中行, Victor Wei. Turbo 码的若干新进展[J]. 电子学报, 1998, 26(7): 41 - 46.
- [14] S Beledetto, G Montorsi. Design of parallel concatenated convolutional codes[J]. IEEE Trans Commun, 1996, 44(5): 591 - 560.

作者简介:



李建平 男, 1963 年 12 月生于湖南省武岗市, 1986 年、1991 年和 2002 年毕业于华中科技大学电信系分别获学士学位、硕士学位和博士学位, 目前在北京大学信息科学技术学院从事博士后研究工作, 其专业研究领域为通信与信息系系统, 目前研究兴趣主要在 Turbo 码和空时码等方面。



王宏远 男, 1946 年 12 月生江西省南昌市, 教授, 博士生导师, 1970 年毕业于北京理工大学无线电系, 1984 - 1985 年留美访问学者, 华中科技大学电信系教授, 视频信息中心主任, 目前主要从事多媒体通信, 信号处理和高清晰电视等领域的研究工作。

WWW.CNKI