

文章编号:1671-6833(2010)02-0109-04

## Turbo 码中交织器误比特率的分布分析方法

邵霞<sup>1</sup>, 张德辉<sup>2</sup>, 张卫党<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电学院 信息工程系, 河南 郑州 450011; 2. 郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 由于误比特率分布更能深刻细致地描述纠错码的纠错能力, 因此, 采用误比特率分布的方法, 对 Turbo 码中 3GPP 交织器、分组交织器和随机交织器在不同码率下的性能进行了比较和分析。仿真结果显示, 分组交织器的误比特率分布具有明显的周期特征; 随机交织器的误比特率分布的随机特性更为明显, 误码率分布比分组交织器分布的更为广泛; 而对于 3gpp 交织器, 它的误比特率分布具有较为平坦的分布曲线和较低的平均误比特率。

**关键词:** 纠错码; Turbo 码; 交织器; 误比特率; 3gpp

**中图分类号:** TP 331.2 **文献标识码:** A

### 0 引言

由于 Turbo<sup>[1]</sup> 码的出色表现, 已引起学者的广泛重视, 产生了很多研究成果。交织器在 Turbo 码中起着至关重要的作用, 因此, 对于交织器特性的研究, 也是 Turbo 码研究中的一个重要方面。在国外, 对交织器研究的经典文献是文献[2]中 S. Benedetto 等提出的均匀交织器 (Uniform Interleaver) 的概念, 将交织器看作成为一个以相同的概率进行均匀置换的置换器, 从而给出交织器的均匀特性及对 Turbo 码的平均影响。但是对于一个特定的交织器, 这种方法无能为力。也有的作者<sup>[3]</sup> 对交织器输入输出序列的相关特性进行了研究, 用相关性的大小对交织器的特性进行分析和解释。在文献[4]中, 作者提出了一种与分量码相匹配的交织器的分析与设计方法。文献[5]提出了一种基于低码重分布的分析设计方法。这些方法都可以对交织器的结构及对 Turbo 码的影响进行理论上的解释, 但这种分析一般只是局限于平均特性, 即能给出交织器对 Turbo 码平均误码率的影响, 不能给出交织器对 Turbo 码误码率逐位的影响。另外, 由于不等保护的应用日益广泛以及 Turbo 码在不等保护方面的出色性能, 找出 Turbo 码的每一个信息位的误比特率以及交织器对误比特率分布的影响将是很重要的。

为此, 笔者提出了一种基于误比特率分布的

分析方法, 对几种典型的交织器 (3GPP 交织器、分组交织器和随机交织器) 用仿真的方法求出误比特率分布, 在不同的码率下进行了分析和比较。结果显示, 这种方法可以深刻描述交织器对 Turbo 码误比特率的逐位影响, 从而为交织器的设计和分析及 Turbo 码的应用提供一个新的有效方法。

### 1 Turbo 码的编码结构

在第三代移动通信标准 (3GPP) 中, 传输信道主要采用了 3 种信道编码方式: 无信道编码、卷积码和 Turbo 码<sup>[1,6]</sup>。对于误比特率  $ber$  要求在  $10^{-3} \sim 10^{-6}$  的接收系统, 采用 Turbo 码。其具体分量码为八状态反馈卷积码, 其传输函数为:

$$G(D) = \left[ 1, \frac{n(D)}{d(D)} \right] \quad (1)$$

式中:  $d(D) = 1 + D^2 + D^3$  为反馈多项式, 即为递归函数, 是一个本原多项式, 周期为 7;  $n(D) = 1 + D + D^3$  为前馈多项式。

图 1 给出了 Turbo 码的编码器的具体结构框图。两个分量编码器采用同样的八状态结构, 其中, 图中虚线仅在归零过程中有效,  $X(t)$  为信息序列,  $Y(t)$  为第一路校验序列。信息序列经交织器交织后进入第二个分量码编码器进行编码,  $Y'(t)$  为第二路校验序列。交织器的作用是对输入的信息序列进行位置重排, 以减小两个分量编码器输出序列的相关性。

收稿日期: 2009-09-10; 修订日期: 2009-12-29

作者简介: 邵霞 (1970-), 女, 华北水利水电学院讲师, 硕士, 研究方向为通信中的关键技术。

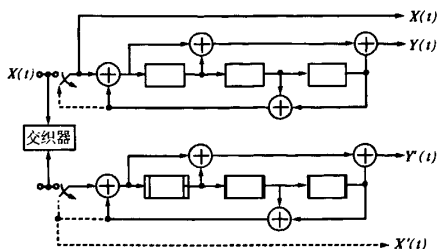


图1 八状态 Turbo 码编码器结构

Fig.1 Block diagram of 8-states Turbo encoder

## 2 3GPP 交织器

在 Turbo 码中,交织器对其性能起着至关重要的作用.交织器的类型主要有两种,一是固定交织器,或称规则交织器.在这种交织器中,输入和输出的置换关系由一个解析表达式给出.另一种是伪随机交织器,其输入输出之间的置换关系随机生成.而 3GPP 交织器<sup>[6]</sup>是两种类型的结合,它是在输入输出确定关系的基础上加上随机抖动.它由两部分组成,如图 2 所示:第一部分是先期交织器(Mother Interleaver),第二部分是修剪器(Pruning).

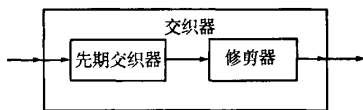


图2 3GPP 交织器的结构框图

Fig.2 Block diagram of 3GPP interleaver

当序列长度  $K$  给定时,先在 134 个先期交织器中选择一个合适大小的交织器( $(K+1)$  bit)生成,经过交织后,修剪掉 1 bit,这就是 3GPP 中 Turbo 码内交织器的组成.3G 交织是同时考虑了交织模式固定和交织位置随机而设计出来的.在输入序列长度处于 320 到 5114 bit 的情况下,其设计算法中的行和列的计算分别如下:

(1)首先由输入信息序列长度,根据式(2)来决定交织矩阵的行数  $R$

$$R = \begin{cases} 10, & 481 \leq K \leq 530 \\ 20, & K < 481 \text{ 或 } K > 530 \end{cases} \quad (2)$$

(2)然后选择交织矩阵的列数  $C$ .如果  $481 \leq K \leq 530$ ,那么矩阵的列  $C = p$  且  $p = 53$ .否则,就得先找到满足下面式(3)条件的最小质数  $p$ :

$$p+1 - \frac{K}{p} \geq 0 \quad (3)$$

找到  $p$  后,然后根据一定的规则<sup>[2]</sup>来决定交织矩阵的列数  $C$ .

(3)最后将输入序列  $X_k$  按行写入  $R \times C$  的交

织矩阵,在信息比特写入交织矩阵之后,按照一定的规则将交织矩阵进行行内和行间置换.交织完以后,然后按列从交织矩阵中读出,得到经交织以后的信息序列.

## 3 误比特率分布

信道编码的一个重要参数就是误比特率,它描述了一个码的平均纠错能力,其定义如下

$$ber = \frac{\text{接收到的错误比特数}}{\text{接收到的全部比特数}} \quad (4)$$

设信息序列为  $A = (a_0, a_1, \dots, a_i), i = 1 \sim k - 1$

1. 在一个仿真系统中,式(4)可以写为

$$ber = \frac{e_0 + e_1 + \dots + e_i}{kt} \quad (5)$$

式中: $t$  为仿真的次数; $k$  为信息序列的长度; $e_i$  为第  $i$  位在仿真过程中出现错误的次数,  $i = 1 \sim k - 1$

1. 可将式(5)进一步改写为

$$ber = \frac{e_0/t + e_1/t + \dots + e_i/t}{k} = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^{k-1} ber(i) \quad (6)$$

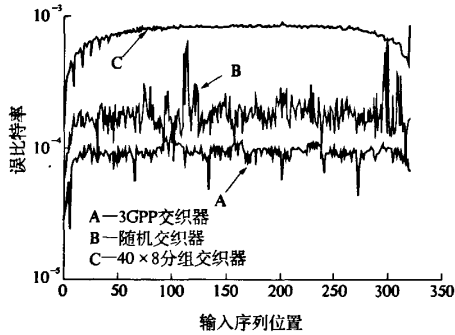
式中: $ber(i) = e_i/t$ ,为第  $i$  位信息在仿真过程中错误的比例,称之为位误比特率.

因此,一个码的平均误比特率就是所有位误比特率的平均值.显然,一个码的位误比特率,或称为误比特率分布,给出了码对每一位信息位的保护能力,更能反映一个码的纠错能力.如果一个码的误比特率分布很平坦,那么它就可以对每一位信息提供相等的保护.反之,如果一个码的误比特率分布有很大抖动,那么它对某些信息比特可以提供低于平均值的保护,对另外一些信息比特的保护就可能远远高于平均值.

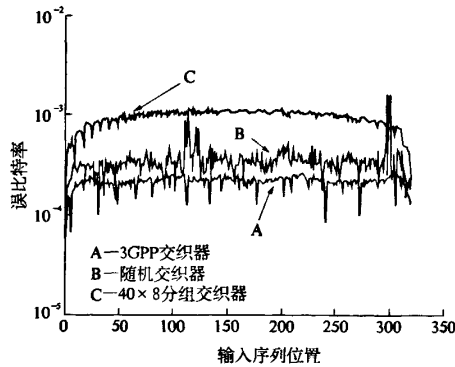
由于交织器的引入,使得 Turbo 码结构更为复杂,很难用解析得到方法给出平均误比特率,求出误比特率分布更是困难.笔者将用仿真的方法求出 Turbo 码的误比特率分布.图 3(a)、(b)是用统计的方法求出的交织长度为 320 的 3GPP Turbo 码的误比特率分布曲线.其中,码率分别为  $1/3$  和  $1/2$ ,采用 BCJR 译码算法,迭代 5 次,AWGN 信道.仿真的信息序列长度都为 1000000000.

图 3 给出码率分别为  $\frac{1}{3}, \frac{1}{2}$  时 3 种交织器下的误比特率曲线.图 3(a)为码率为  $1/3$ ,信噪比为 1.5 dB 时 3 种交织器下的误比特率曲线.由图 3(a)可以看出,3GPP 交织器具有最低的平均误比特率,为  $9.12 \times 10^{-5}$ ,远低于其他两个交织器的

曲线;随机交织器次之,为  $1.84 \times 10^{-4}$ ,而分组交织器的平均误比特率最高,为  $7.58 \times 10^{-4}$ 。很明显,曲线 A 在整个交织范围内给出了较为一致的误比特分布,只是在起始的 10 个比特左右和若干个其他位置上有较明显的波动。曲线 C 的分布在起始段和结尾处有较大的波动,在中部最为平坦。而曲线 B 在整个范围内都有较大的波动,在某些位置上的误比特率远远高于平均误比特率,这是由于随机交织器产生了重量较小的码字。由此可以看出,3GPP 交织器保留了分组交织器和随机交织器的优点,在保证较低的平均误比特率的同时,又对每一比特提供了几乎相等的保护能力。



(a) 码率为  $\frac{1}{3}$ , 信噪比为 1.5 dB



(b) 码率为  $\frac{1}{2}$ , 信噪比为 2 dB

图 3 3 种交织器下的误比特率分布曲线

Fig. 3 The ber distribution curves for the three interleavers separately

为了更能说明问题,表 1 给出了 3 个曲线的均值(平均误比特率)和均方差。均方差的计算公式由式(7)给出。

$$\text{均方差} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{319} (\overline{\text{ber}} - \text{ber}(i))^2}{320}}$$

(7)

式中: $\overline{\text{ber}}$ 为平均误比特率; $\text{ber}(i)$ 为第  $i$  位置上的误比特率。

表 1 给出 3 种交织器在不同码率下的平均误比特率和均方差。可以看出,3GPP 交织器具有最低的平均误比特率和最小的均方差。

表 1 不同交织器和码率下的平均误比特率和均方差

Tab. 1 The average bers and standard deviations for different interleavers and code rates

交织器	码率 = 1/3		码率 = 1/2	
	平均误比特率	均方差	平均误比特率	均方差
3GPP 交织器	$9.12 \times 10^{-5}$	$9.28 \times 10^{-6}$	$2.13 \times 10^{-4}$	$9.28 \times 10^{-6}$
随机交织器	$1.84 \times 10^{-4}$	$1.87 \times 10^{-5}$	$3.46 \times 10^{-4}$	$3.52 \times 10^{-5}$
分组交织器	$7.58 \times 10^{-4}$	$7.71 \times 10^{-5}$	$9.38 \times 10^{-4}$	$9.54 \times 10^{-5}$

图 3(b)为码率为 1/2,信噪比为 2 dB 时的 3 种交织器下的误比特分布曲线。其平均误比特率和均方差在表 1 中给出,删截矩阵为  $[1\ 0;0\ 1]$ 。由于此删截图案是一个周期性删截,它对两个校验序列的删截实际上是一个均匀的删截。因此,在这种删截图案下,删截对误比特率的分布没有造成太大的影响,各个曲线的形状没有明显改变。由表 1 可知:在删截情况下,相对于另外两条曲线,3GPP 交织器对应的曲线同样有着最小的抖动,对各个信息比特仍然在全范围内提供了最平稳的保护。

由图 3 可以看出,3GPP 交织器对应的曲线在整个范围内是很平坦的。而在起始段和个别位置上的误比特率明显低于平均值,因此,曲线还是有一定的不等保护能力。如果将那些重要的数据置于这些位置传输,将能有效提高对重要信息的保护能力。

4 结论

笔者用误比特率分布的方法,对 Turbo 码中 3 种典型的交织器(3GPP 交织器、分组交织器和随机交织器)在不同码率下的性能进行了比较和分析。仿真结果显示,分组交织器的误比特率分布具有明显的周期特征;随机交织器的误比特率分布的随机特性更为明显,误码率分布比分组交织器分布的更为广泛,在某些信息位置上,误比特率有明显恶化,这是由于一个随机置换的 Turbo 码更容易产生低码重的码字;而对于 3GPP 交织器,由于其结构的特殊性,它的误比特率分布同时兼有分组交织器和随机交织器的特点,因此在三者中具有最低的平均误比特率和最小的均方值,可对几乎所有信息提供较为平等的保护。而个别位置上的误比特率明显低于平均值,可以对这些位置

上的信息提供更为可靠的保护。

### 参考文献:

- [1] BERROU C, GLAVIEUX A, THITIMAJSHIMA P. Near shannon limit error - correcting and decoding: Turbo - codes [A]. 1993 IEEE Int Conf on Communication [C]. 1993:1064 - 1070.
- [2] BENEDETTO S, MONTORSI G. Design of parallel concatenated convolutional codes [J]. IEEE Trans On Communications, 1996, 44(5):591 - 600.
- [3] TAKESHITA O Y, COSTELLO D J. New deterministic interleaver designs for turbo codes [J]. IEEE Trans On Information Theory, 2000, 46(6):1988 - 2006.
- [4] FENG W, YUAN Y, VUCETIC B S. A code - matched interleaver design for turbo codes [J]. IEEE Trans On Commu, 2002, 50(2):926 - 937.
- [5] 张卫党, 袁聪, 王新梅. 分解法求 Turbo 码的低码重分布 [J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(7): 1207 - 1210.
- [6] 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.

## Analysis of the Ber Distributions of Interleavers

SHAO Xia<sup>1</sup>, ZHANG De - hui<sup>2</sup>, ZHANG Wei - dang<sup>2</sup>

(1. Department of Information Engineering, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450011, China; 2. School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The ber distributions, which can give a detailed description about the error correcting ability of error control codes, are introduced in this paper to analyze the interleavers of 3GPP interleaver, block interleaver and random interleaver. The ber distributions are given under different puncturing patterns. The results show that the ber distribution of block interleaver is periodic apparently and that of the random interleaver is spread more randomly. As for the 3GPP interleaver, because of its combination construction, its ber distribution has the advantages of both block and random interleavers, i. e. it has more flat distribution and lower averaged ber.

**Key words:** error - control code; Turbo code, interleaver; biterror; 3gpp

(上接第 108 页)

## A Blind Detection Digital Watermarking Algorithm Based on Pairs of Blocks DCT Coefficients

LU Ling, SUN Xin - de

(Department of Computer Science and Application, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China)

**Abstract:** A new blind detection digital watermarking algorithm based on Logistic mapping is proposed in this paper, which can be more effective for digital media copyright protection. At first watermarking image is encrypted by the chaotic sequence generated by Logistic mapping. According to the human visual system (HVS) some small blocks with size  $8 \times 8$  that have more texture complexity will be chosen. In each chosen sub-block some DCT coefficients are selected effectively in accordance with the property of common digital signal processing. Each pair of adjacent DCT coefficients can carry one bit watermarking information. Simulation experiments show that the algorithm improves effectively the robustness and the systems security.

**Key words:** logistic mapping; digital watermark; robustness; blind detection