

# WCDMA 中 Turbo 码质数交织器的研究与仿真

张 鹏<sup>1,2</sup>, 张代远<sup>1,2,3</sup>

- (1. 南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210003;
2. 江苏省无线传感网高技术研究重点实验室, 江苏 南京 210003;
3. 南京邮电大学 计算机技术研究所, 江苏 南京 210003)

**摘 要:** Turbo 码是一种前向信道纠错码。它比卷积码有更高的译码增益, 译码性能几乎接近 Shannon 理论极限, 从而在信道的传输中具有更高的可靠性, 适用于传输速率较高的业务。它优越的性能引起了人们广泛的关注。但由于 Turbo 码译码算法相对复杂, 造成的译码时延比较大, Turbo 码往往不适用于对实时性要求高的业务。WCDMA 系统中使用 Turbo 码传输 32 kbps 及以上的业务。文中介绍了 WCDMA 中所采用的 Turbo 码编码结构中的质数交织器, 利用 MATLAB 仿真, 分析交织长度对 Turbo 码性能的影响, 并与其他类型交织器性能上的比较, 验证了质数交织器在 WCDMA 系统中的性能优势。

**关键词:** Turbo 码; WCDMA; 质数交织器; MATLAB 仿真

**中图分类号:** TP301.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2012)11-0093-04

## Research and Simulation of Turbo Code Prime Interleaver in WCDMA

ZHANG Peng<sup>1,2</sup>, ZHANG Dai-yuan<sup>1,2,3</sup>

- (1. College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;
2. Jiangsu High Technology Research Key Laboratory for Wireless Sensor Networks, Nanjing 210003, China;
3. Institute of Computer Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Turbo coding is a kind of forward error correction coding method that outperforms convolutional coding in terms of BER and is close to the Shannon limit. So Turbo coding is more reliable in TrCHs, and it is applicable to applications that require high bit rate. Its excellent performance has drawn lots of attention. However, the decoding algorithms for Turbo coding are so complicated that takes a lot of time. So Turbo coding is not fit for real-time applications. Turbo coding is usually used for applications that require 32kbps or higher in WCDMA system. It introduces the prime interleaver in Turbo encode of the WCDMA system, using MATLAB simulation, analyses the influence of the interleaving length for Turbo code performance, and compared with the other types of interleavers, proves the performance advantages of the prime interleaver in WCDMA system.

**Key words:** Turbo code; WCDMA; prime interleaver; MATLAB simulation

## 0 引 言

Turbo 码在 1993 年由 C. Berrou 等人提出<sup>[1]</sup>, 其纠错性能在 AWGN 信道中已趋向 Shannon 极限。因此第三代移动通信标准普遍采用了 Turbo 码作为其高速数据信道的纠错编码方案<sup>[2]</sup>。Turbo 码是一种并行级联卷积码 (PCCC, Parallel Concatenated Convolutional Code), 由两个递归系统卷积码 (RSC 码) 通过一个内

交织器并行级联构成。在 Turbo 码系统中, 内交织器是 Turbo 码编码器中的重要模块, 其交织长度与交织结构是决定 Turbo 码纠错性能的主要因素<sup>[3]</sup>。文中将重点介绍 WCDMA 中的 Turbo 码结构中的质数交织器, 并给出相应的性能仿真结果。

## 1 WCDMA 中 Turbo 码编码结构

在 WCDMA 系统中, 采用并行级联 Turbo 编码器, 基本结构见图 1。它由两个递归卷积码编码器 (RSC) 并行组成, 在两个 RSC 之间加入质数交织器。

信源数据经过信源编码后按照规定的长度分成相同大小的输入码块, 这些输入码块在 WCDMA 系统中长度范围是 40 ~ 5114 比特。图 1 中输入序列  $c_k$  是输

收稿日期: 2012-03-05; 修回日期: 2012-06-13

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (yx002001)

作者简介: 张 鹏 (1988-), 男, 河南人, 硕士研究生, 研究方向为智能计算技术与应用; 张代远, 教授, 硕士生导师, 研究方向为智能计算理论、方法与应用, 计算机体系结构, 计算机在通信中的应用。

入码块的顺序输出比特序列,作为编码器的信息比特。编码器的输出包括信息比特流  $x_k$ 、RSC I 输出的校验比特流  $z_k$  和 RSC II 输出的校验比特流  $z'_k$ 。 $x_k z_k$  和  $z'_k$  以及相应的尾比特不需要打孔,经过复接后作为编码器的输出比特序列。RSC I 的输入信息是输入码块的顺序输出比特序列,RSC II 的输入是这个序列经过编码器内交织器交织后的输出序列。每输入一个信息比特,将产生 3 个编码输出比特,编码速率为  $1/3$ <sup>[4]</sup>。

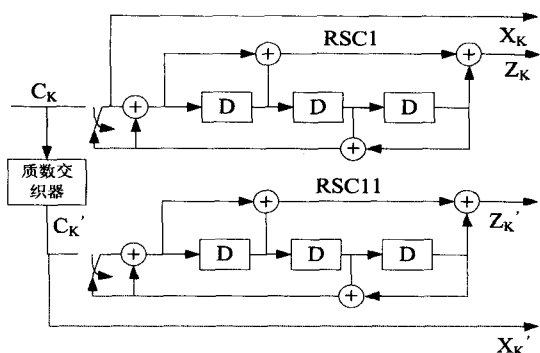


图 1 WCDMA 系统中 Turbo 编码器结构

## 2 质数交织器

WCDMA 标准中给出了具有优良性能的质数交织器(Prime Interleaver)作为 Turbo 码编码器的内交织器,克服了常用交织器的缺点,在各种交织长度上均能生成具有良好汉明距离特性的码型,满足多媒体传输的要求<sup>[5]</sup>。交织器的输入序列可以表示为  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ , 根据 WCDMA 标准的规定,  $40 \leq K \leq 5114$  ( $K$  为输入交织器的比特数)。交织器的行数和列数根据码块大小进行调整,当码块不能恰好填满交织器时,将在码块后填补适当个数的伪比特,使交织器恰好填满。伪比特在硬件实现时可以是 0 或者 1。交织器的行数和列数决定了交织器行内变换、行间变换的具体算法。

### 2.1 生成交织矩阵

交织器的输入序列  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ , 按照以下方法填入交织矩阵:

(1) 确定交织矩阵的行数  $R$ 。

交织矩阵的行数  $R$  可以用以下公式求得:

$$R = \begin{cases} 5, & 40 \leq K \leq 159 \\ 10, & 160 \leq K \leq 200 \text{ 或 } 481 \leq K \leq 530 \\ 20, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

(2) 确定交织矩阵的列数  $C$  和变换参数  $p$ 。

交织矩阵的列数  $C$  和对应的变换参数  $p$  可以用以下方法求得:

1) 若  $481 \leq K \leq 530$ , 则  $p = 53, C = p$ ;

2) 否则找到最小的质数  $p$ , 使  $K \leq R \times (p - 1)$

3) 用以下公式求得  $C$

$$C = \begin{cases} p - 1, & K \leq R \times (p - 1) \\ p, & R \times (p - 1) < K \leq R \times p \\ p + 1, & R \times p < K \end{cases} \quad (2)$$

(3) 将输入序列填入交织矩阵。

将输入序列  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$  逐行填入交织矩阵  $R \times C$ , 交织矩阵表示为:

$$\begin{bmatrix} y_1 & y_2 & y_3 & \cdots & y_C \\ y_{C+1} & y_{C+2} & y_{C+3} & \cdots & y_{2C} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ y_{C(R-1)+1} & y_{C(R-1)+2} & y_{C(R-1)+3} & \cdots & y_{RC} \end{bmatrix}$$

在交织矩阵中, 当  $k = 1, 2, \dots, K, y_k = x_k$ 。当  $R \times C > K$  时, 输入序列将不能填满交织器。此时在输入序列后填补  $R \times C - K$  个伪比特, 使交织器恰好被填满, 即当  $k = K + 1, K + 2, \dots, R \times C$  时,  $y_k = 0$  或 1。

### 2.2 交织器的行列变换

交织器的行列变换是为了进一步降低交织前后序列的相关性。行变换也叫行间变换, 即按照一定的图样对交织矩阵的  $R$  行重新排列, 这个图样仅与交织矩阵的行数  $R$  有关。列变换也叫行内变换, 即按照一定的图样对交织矩阵的每一行的  $C$  个比特重新排列, 这个图样与交织器的列数  $C$  以及将要进行变换的行号有关。

交织器的行列变换具体算法如下:

(1) 查质数质根表, 文中限于篇幅略去此表, 获得变换参数质根  $v$ 。

(2) 选择行间变换图样。

根据输入序列的比特数  $K$ , 从表 1 中选择交织矩阵的行间变换图样  $T(i), i = 0, 1, \dots, R - 1$ 。

表 1 质数交织器行间变换图样

$K$	$R$	$\langle T(0), T(1), \dots, T(R-1) \rangle$
$40 \leq K \leq 159$	5	$\langle 4, 3, 2, 1, 0 \rangle$
$160 \leq K \leq 200$ 或者 $481 \leq K \leq 530$	10	$\langle 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0 \rangle$
$2281 \leq K \leq 2480$ 或者 $3161 \leq K \leq 3210$	20	$\langle 19, 9, 14, 0, 2, 5, 7, 12, 18, 16, 13, 17, 15, 3, 1, 6, 11, 8, 10 \rangle$
其他	20	$\langle 19, 9, 14, 0, 2, 5, 7, 12, 18, 10, 8, 13, 17, 15, 3, 1, 16, 6, 15, 11 \rangle$

(3) 构造行内变换基础序列构造行内变换的基础序列  $s(j)$ , 构造方法如下式:

$$s(j) = (v \times s(j-1)) \bmod p, j = 1, 2, \dots, p-2, s(0) = 1 \quad (3)$$

令  $q_0 = 1$  是序列  $q_i, i = 0, 1, \dots, R-1$  的第一个质数, 确定序列  $q_i, i = 0, 1, \dots, R-1$  中的每一个  $q_i$ , 使  $q_i$  是满足与  $p-1$  互质、大于 6 且大于  $q_k, k < i$  的最小的质数。

构造序列  $r_i, i = 0, 1, \dots, R-1$ , 使  $r_{TC(i)} = q_i, i = 0, 1, \dots, R-1$ 。

#### (4) 行内变换。

依次对交织矩阵的第  $i$  行,  $i=0, 1, \dots, R-1$ , 做行内变换, 行内变换图样记作  $U_i(j)$  行内变换方法如下:

① 若  $C=p$ ,  $U_i(j) = s((j \times r_i) \bmod (p-1))$ ,  $j=0, 1, \dots, p-2$ ,  $U_i(p-1) = 0$ ;

② 若  $C=p+1$ ,  $U_i(j) = s((j \times r_i) \bmod (p-1))$ ,  $j=0, 1, \dots, p-2$ ,  $U_i(p-1) = 0$ ,  $U_i(p) = p$ 。若  $K=R \times C$ , 再交换  $U_{R-1}(p)$  和  $U_{R-1}(0)$  的值;

③ 若  $C=p-1$ ,  $U_i(j) = s((j \times r_i) \bmod (p-1)) - 1$ ,  $j=0, 1, \dots, p-2$ 。

交织矩阵的每一行按照对应的  $U_i(j)$  进行行内变换,  $U_i(j)$  表示交织矩阵第  $i$  行变换后第  $j$  个比特在变换前的位置。

#### (5) 行间变换。

按照(2)中得到的  $T(i)$  对交织矩阵进行行间变换,  $T(i)$  表示交织矩阵变换后第  $i$  行变换前的行号。

### 2.3 交织器的输出

变换后的交织矩阵表示为:

$$\begin{bmatrix} y_1 & y_{C+1} & y_{2C+1} & \cdots & y_{(C-1)R+1} \\ y_2 & y_{C+2} & y_{2C+2} & \cdots & y_{(C-1)R+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ y_R & y_{2R} & y_{3R} & \cdots & y_{C \times R} \end{bmatrix}$$

交织矩阵从第 0 列开始按列输出, 即  $y_1, y_2, \dots, y_{C \times k}$ , 去除伪比特后就是交织器的输出。

## 3 质数交织器的仿真与分析

在 WCDMA 系统中使用内交织器的目的是使同一个信息序列的两个校验序列相关性尽可能小, 从而提供给译码器最多的信息, 降低误码率<sup>[6]</sup>。

### 3.1 交织长度的影响

WCDMA 标准规定, 输入内交织器的序列比特数范围是 40~5,114<sup>[7]</sup>。下面研究输入序列长度对 Turbo 码性能的影响。

仿真中使用 Max-Log-MAP 译码算法, 迭代次数为 5 次, 输入序列长度为  $K$ , 信噪比范围是 0~3dB, 间隔为 0.2dB, 使用质数交织器, 统计在每个信噪比条件下使用各译码算法下的平均误码率, 仿真结果如图 2 所示。

可以看出, 在信噪比低于 0.5dB 时, 交织序列长度对误码率影响不是很明显。但实际应用中信噪比往往比较大, 在大信噪比环境下, 随着交织序列长度  $K$  的增加, 译码后输出的误码率越低, Turbo 码的性能越好。

同时应考虑到, 无论哪种译码算法, 交织序列越长, 意味着需要越多的空间来存储状态信息、软输出信

息等, 译码的时延也越长。所以在实际应用中, 应根据业务的实际需求和硬件的使用情况, 选用合适的序列长度, 达到最佳的效果。为了提高译码器的性能, 在一些低速业务的场合, 可以将几帧组成一个数据块, 加大交织长度; 相反, 对一些高速业务, 可以将一帧分成几个数据块, 降低交织长度。

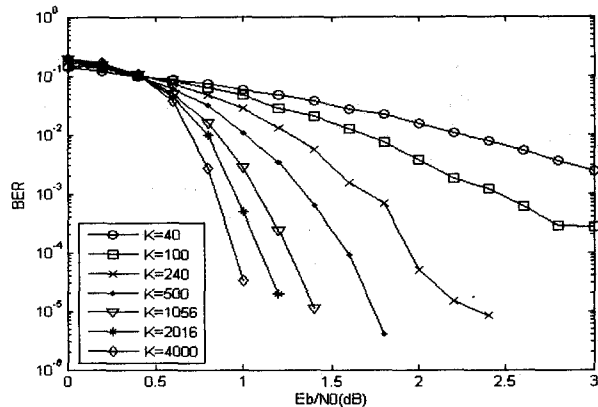


图 2 交织长度对误码率的影响

### 3.2 质数交织器与其他交织器的比较

除了 WCDMA 系统 Turbo 编译码中使用的质数交织器外, 交织器类型还有很多, 比较典型的包括行列交织器和随机交织器<sup>[8]</sup>。

行列交织器指输入序列按行写入交织矩阵, 然后按列读出。

随机交织器指对输入序列按照一定的随机生成的顺序读出<sup>[9]</sup>。

质数交织器在交织过程中使用的行内变换和行间变换最大程度地降低了输入序列与输出序列间的相关性<sup>[10]</sup>。

在不交织、使用行列交织器、随机交织器以及质数交织器时, 对 Turbo 码进行编译码仿真, 序列长度均为 500, 迭代次数为 5 次, 信噪比范围是 0~3dB, 间隔为 0.2dB, 使用 Max-Log-MAP 译码算法仿真结果如图 3 所示。

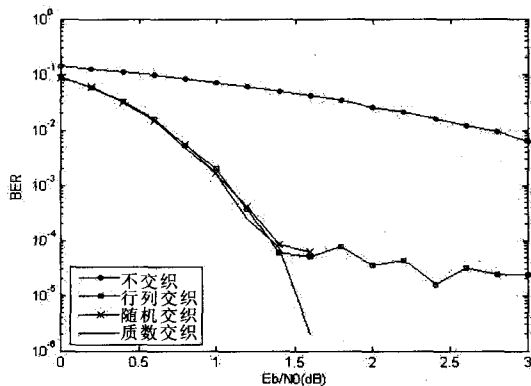


图 3 不同交织器性能比较

可以看出, 使用交织器可以极大地降低误码率, 提

高 Turbo 码性能。在低信噪比环境下,三种交织器对 Turbo 码的性能影响几乎相同,而质数交织器在高信噪比环境下性能比行列交织器和随机交织器有一些优势,不仅误码率相对较低,而且性能比较稳定。

在不交织、使用行列交织器、随机交织器以及质数交织器时,对 Turbo 码进行编译码仿真,序列长度均为 500,迭代次数为 5 次,信噪比为 1dB,使用 Max-Log-MAP 译码算法仿真结果如图 4。从图中可以看出,质数交织器虽然带来了比一般的随机交织器和行列交织器更多的复杂度,但它对不同的交织长度特别是交织长度比较大时有比其它交织器更好的性能。

由于交织方案必须随数据一起传输,致使传输效率减小,而且译码器也依赖交织方案的准确传输,所以随机交织器在理论上性能优异,但不实用<sup>[11]</sup>。

质数交织器的交织方案固定不变,不需要随数据一起传输<sup>[12]</sup>。虽然算法比其他交织器要复杂,相应的,交织时延会比较大,但考虑到在实际应用中,输入交织器的序列长度往往比较固定,所以交织器的输出顺序可以不需要反复计算,对时延几乎不会造成影响,而质数交织器相比其他的交织器上的性能优势可以在实际应用中显现出来。

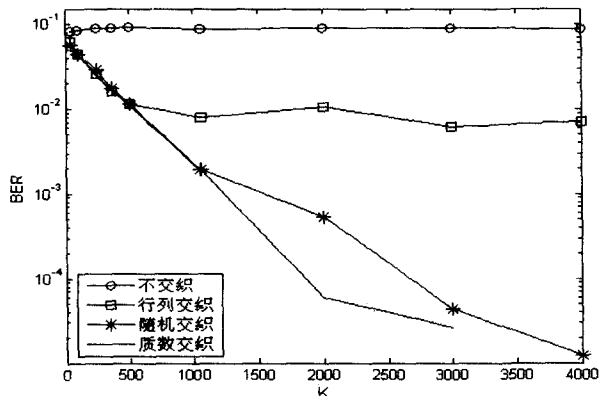


图 4 交织长度对不同交织器的影响

## 4 结束语

通过对 WCDMA 中 Turbo 码质数交织器算法理论

的研究,并通过 MATLAB 仿真实验结果分析可见随着交织长度的增加,译码器的纠错性能得到提高,WCDMA 中的质数交织器支持较大范围的各种帧长(40 ~ 5114 间任意整数),且均能保持良好的误码率。这一优异性能也使其特别适合作为多媒体传输时 Turbo 码的内交织器。

## 参考文献:

- [1] Berrou C, Glavieux A, Thitimajshima P. Near Shannon Limit Error-correcting Coding and Decoding: Turbo-codes [C]// Proc. of ICC'93. [s. l.]: [s. n.], 1993.
- [2] Berrou C, Glavieux A. Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo-codes [J]. IEEE Trans. on Commun., 1996, 44(10): 1261-1271.
- [3] 刘东华. Turbo 码原理与应用技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 236-238.
- [4] 3GPP TS 25.212, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Multiplexing and Channel Coding (FDD) (Release 6) [S]. 2006.
- [5] 吴江, 赵春明. WCDMA 中 Turbo 码算法及质数交织器的研究 [J]. 信息技术, 2002(4): 38-42.
- [6] 杨小辉, 熊建设, 徐洪梅, 等. Turbo 码及交织技术在 WCDMA 中的应用 [J]. 微计算机信息, 2006(33): 135-137.
- [7] 黄旭方, 覃团发, 陈跃波. WCDMA 系统中 Turbo 码编译码器交织长度的研究 [J]. 广西大学学报(自然科学版), 2002, 27(3): 210-212.
- [8] 吴运波, 罗汉文, 赵宇. WCDMA 中 Turbo 码译码算法和仿真 [J]. 移动通信, 2004(S2): 47-49.
- [9] 王视环, 王振宇, 周月臣. 一种应用于 ARQ 系统的新型 Turbo 码译码方案 [J]. 南京邮电学院学报(自然科学版), 2003, 23(2): 50-53.
- [10] 邱金刚, 陈自力, 何金义. AWGN 信道中 Turbo 码的性能和仿真 [J]. 军械工程学院学报, 2005, 17(2): 10-12.
- [11] 周炯槃, 庞沁华, 续大我, 等. 通信原理(合订本) [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006: 440-441.
- [12] 吴伟陵. 信息处理与编码(修订本) [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003: 306-309.

(上接第 92 页)

738.

- [8] 向世名. OpenGL 编程与实例 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.
- [9] 张芹, 吴慧中, 张健. 基于粒子系统的建模方法研究 [J]. 计算机科学, 2003, 30(8): 144-146.
- [10] 丁纪云, 陈利平, 李思昆. 基于 OpenGL 的烟花动态模拟方

法的研究与实现 [J]. 计算机工程, 2002, 2(3): 240-243.

- [11] Shreiner D. OpenGL 编程指南 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [12] 张妍妍. 烟花粒子系统模拟的设计与实现 [D]. 合肥: 安徽大学, 2010.