

# 交织器最优化设计的理论分析基础 及其工程仿真

吴湛击, 吴伟陵

(北京邮电大学信息工程系 181 信箱, 北京 100876)

**摘 要:** 交织器的设计作为 Turbo 码技术的关键性的核心环节, 一直缺乏系统的理论设计和明确的优化准则。为此, 本文首先探讨了交织器优化设计的理论基础和 Turbo 码性能卓越的深层原因, 从码重分析(空间离散)和相关性分析(时间离散)两个方面建立交织器优化设计的数学模型, 提出了单交织器设计的优化准则  $S_6$  函数。在此基础上, 又提出了权位倒置交织器, 经工程仿真证明性能良好, 无论在理论分析方面还是在仿真数据上, 其性能都明显优于 3GPP 标准中(3G TS 25.212 V3.3.0)的 mother-interleaver(文中称为标准交织)。

**关键词:** Turbo 码; 权位倒置交织器

**中图分类号:** TN911.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112(2002)07-1048-05

## The Theory Fundament and Engineering Simulation of The Optimum Design for Turbo-coding Interleaver

WU Zhanji, WU Weiling

(P. O. Box 181, Department of Information Engineering, BUPT, Beijing 100876, China)

**Abstract:** Turbo Interleaver has lacked systemic designing theory and explicit optimum criterion all the time. In this paper, the theory fundament will be discussed, and a multigrade Math Model is to be founded from two aspects, code weight analysis and correlativity analysis, in the meanwhile, optimum criterion of mono interleaver—function  $S_6$  is put forward. On the above basis, a novel weight-reverse interleaver is designed for the third generation mobile communication system, IMT2000, and computer simulation shows that its performance is excellent, both theory analysis and experiment simulation prove that it is much superior to mother-interleaver that is widely exploited at present in 3GPP standard (3G TS 25.212 V3.3.0).

**Key words:** Turbo code; weight-reverse interleaver

### 1 引言

1993 年, 法国的 C. Berrou 等人提出了一种新型的纠错码——Turbo 码<sup>[1]</sup>。它采用一种并行级联的方法实现了长码的编码, 同时构造了相应的译码器来完成这种长码的译码, 是一种实用的纠错码, 而它的性能非常逼近于仙农的性能界。尽管缺乏完善的理论支持, 但工程模拟表明 Turbo 码在信噪比很低的情况下, 仍能保持很好的性能, 在移动通信中有很好的应用前景, 因此, 有关 Turbo 码在 CDMA 中系统中的应用, 也受到了各国学者的重视<sup>[2-7]</sup>。现在, ITU 已将 Turbo 码作为第三代移动通信系统 IMT2000 中候选信道编码方案之一。

而交织器的设计作为 Turbo 码技术的关键性的核心环节, 对其性能的提高有很大影响, 但是一直以来都缺乏明确的优化准则。目前用作仿真比较的常见的交织器有块、对角、比特翻转、随机和  $s$  伪随机等交织方式, 此外还有  $CoPrime$ 、

Weldr Costas, Bernou Glavieux 和 JPL 等代数交织器<sup>[4]</sup>。通常的交织器优化都是对上述交织器通过代数变换进行择优, 例如在 3GPP 标准(3G TS 25.212 V3.3.0)中既是对块交织器按照一定的代数变换进行行间和行内重排并经删除得到的, 而 3GPP2 标准(3GPP2 C.S0002-A)的交织器设计可以认为是在比特翻转交织基础上的优化。对交织器的理论分析, 多采用分布因子参数(spreading factors)( $s, t$ )和归一化分散参数(normalized dispersion)  $\nu^{[4]}$ , 但是这些都是经验性公式, 缺乏明确的数学模型和优化准则。

### 2 交织器优化设计的理论基础

众所周知, 数字信号最基本的特征就是离散, 这包括两层含义——时间的离散和空间的离散。我们可以从模拟信号的数字化过程中清楚地看到这点: 抽样是时间轴上的离散化过

程, 量化和编码是空间轴上的离散化过程. 那么, 纠错码性能的充分发挥也应当适应这一基本特征. 一言以蔽之, 笔者认为, 纠错编码的本质作用在于, 它加剧了数字信号的时空离散性. 同样地, 这也包含了两层含义: 第一, 加剧了空间的离散性, 亦即使得每个码字在整个码空间均匀离散地分布, 占据足够大的空间域. 同样也就使相邻码字的离散空间域间隔充分大; 第二, 加剧了时间的离散性, 亦即使得相近码元在信息序列的时间轴上均匀离散地分布, 占据足够大的时间域, 同时也就使相邻码元的离散时域间隔充分大.

目前, 虽然对于前者人们已经有了较充分的研究, 提出了汉明距离、码重、最小自由距离等基本概念, 发展了重量分布、距离谱等分析方法, 都着重于加剧空间的离散化, 但对于后者, 则一直未引起足够的重视, 缺乏有效的分析. 这固然是由于在传统的单路串行纠错编码中, 空间离散化是提高纠错性能的主要矛盾, 占据主导地位, 而时间的离散化作为次要矛盾, 效果非彰, 作用有限. 然而, 随着具有革新意义的 Turbo 码的提出, 为后者充分发挥作用开辟了道路.

Turbo 码不同于传统意义上的单路串行纠错码的最显著的本质区别在于: (1) 纠错编译码是引入交织的并行结构; (2) 在接收端反馈迭代地译码, 完成了由连续误码向离散误码的矛盾转化, 沟通了由不可纠错模式向可纠错模式过渡的通道, 为时间离散化应用开辟了广阔的前景, 促进了时间和空间离散化这一对矛盾运动的有机统一, 其中, 交织器贯穿编译码的全过程, 起到了举足轻重的关键性作用.

具体地说, 交织器的作用体现在两方面: (1) 从码重层次(空间离散)看, 交织器增大了校验码重, 尤其是改善了低码重输入信息序列的输出校验码重, 从而提高了最小自由距离, 增强了纠错能力; (2) 从相关性层次(时间离散)分析, 它降低了输入/输出信息序列的相关性, 使得邻近码元的校验位(自相关性)和相同码元在不同编码支路的校验位(互相关性)同时被噪声淹没的可能性都大大降低, 从而增强了抵御长时间突发噪声的能力(尤其在瑞利信道), 同时也有利于接收端的分集接收, 使得经过反馈译码后同一个约束长度内(卷积码)或同一个分组内(循环码)出现多个连续误码的可能性大为削弱, 这当然有助于正确译码, 况且诸如语音、图象、文本等信息本身也存在一定的冗余度, 孤立的发音、象素、文字等信息被破坏往往不影响收信人的正确理解, 倘若一串连续的信息被破坏则给收信人的正确理解带来很大困难. 总之, 原本连续的误码被离散, 是对抗突发噪声的有效手段. 本文将在上述理论分析的基础上, 建立有关的数学模型.

### 3 交织器优化设计的数学模型和优化准则

#### 3.1 交织器的相关性分析及其目标函数

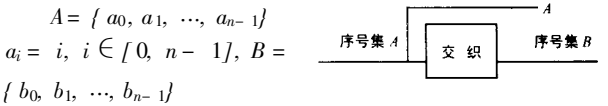
##### 3.1.1 先定义以下函数

$$S_1(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} |x_i - y_i| \text{ (帧间)}; S_2(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} |j(i) - k(i)| \text{ (帧内)}; S_3(x, y) = \min\{|j(i) - k(i)| / x_j = y_k = i, i \in [0, n-1]\} \text{ (帧间)}; S_4(x) = \min\{|x_i - x_{i-1}| / i \in [1, n-1]\} \text{ (帧内)}; S_5(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} |x_i - x_{i-1}| \text{ (帧内)}; S_6(x) =$$

$$\sum_{k=1}^{n-1} w(k) \sum_{i=1}^{n-k} \frac{|x(i+k) - x(i)|}{n-k} \text{ (帧内)}.$$

这里的  $x, y$  都是长度为  $n$  且取值范围为  $[0, n-1]$  的自然数排序序列

##### 3.1.2 单交织目标函数的建立



决策 1: (互相关性分析) 希望两个输入信息序列  $A, B$  相同位置的序号差均值最大.

目标函数 1:  $\max S_1(A, B)$

决策 2: (互相关性分析) 希望两个输入信息序列  $A, B$  相同序号对应的位置差均值最大.

目标函数 2:  $\max S_2(A, B)$

决策 3: (互相关性分析) 希望两个输入信息序列  $A, B$  相同序号对应的位置差的最小值最大.

目标函数 3:  $\max S_3(A, B)$

决策 4: (自相关性分析) 希望交织后的信息序列  $B$  相邻位置的序号差的最小值最大.

目标函数 4:  $\max S_4(B)$

决策 5: (自相关性分析) 希望交织后的信息序列  $B$  相邻位置的序号差均值最大.

目标函数 5:  $\max S_5(B)$

决策 6: (自相关性分析) 希望交织后的信息序列  $B$  邻近位置的序号差越大越好, 邻近位置的隶属度函数定义为  $w(k) = e^{-\lambda k}$ ,  $k$  为位置差;  $\lambda$  推荐值为 0.48127;  $w(k)$  的递减率为黄金分割点 0.618.

目标函数 6:  $\max S_6(B)$

决策 7: 综合以上决策

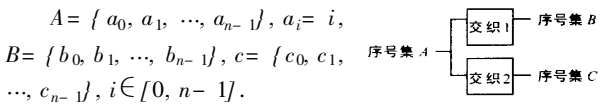
目标函数 7:

$$\max S_7 = C_1 S_1(A, B) + C_2 S_2(A, B) + C_3 S_3(A, B) + C_4 S_4(B) + C_5 S_5(B) + C_6 S_6(B)$$

式中  $C_i (i \in [1, 6])$  为待定常数,  $C_i > 0, \sum C_i = 1$ .

一般地说, 在单交织器模式下, 对各种交织器进行大致比较和直观洞察, 可选用  $S_5$  函数; 要进行精确计算和定量分析, 可选用  $S_6$  函数, 这一点将在下文的模拟仿真中得到确证.

##### 3.1.3 多交织器目标函数的建立



多目标决策:  $\max T_1 = C_1 S_1(B, C) + C_2 S_2(B, C) + C_3 S_3(B, C) + C_4 [S_4(B) + S_4(C)] + C_5 [S_5(B) + S_5(C)] + C_6 [S_6(B) + S_6(C)]$

式中  $C_i (i \in [1, 6])$  为待定常数,  $C_i > 0, \sum C_i = 1$ .

### 3.2 交织器的码重分析及其数学模型的实现

先定义以下函数:

◎ 小码重隶属函数  $f(x) = e^{-\lambda x}$

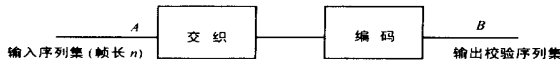


图 3 码重分析图

⊗ 大码重隶属函数  $g(x) = 1 - e^{-\lambda_1 x}$

模糊决策: 交织器应使小码重的输入序列  $a_i$  产生大码重的校验序列  $b_i$ 。

3.2.1 数学建模

设  $a_{ij} \in A, b_{ij} \in B, i \in [1, n], j \in [1, C_n^i]$  ( $A, B$  见图 3)

$b_{ij} = E(a_{ij})$  ( $E$  表示某种交织映射及其编码过程)

$$\text{求 } E, \text{ 使得: } \max S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{C_n^i} \frac{w(i)f(a_{ij})g(b_{ij})}{C_n^i}, (G(a_{ij}) = i, G \text{ 表示求码重}).$$

3.2.2 随机进化算法

step1: 随机产生  $C_1$  个 (充分大) 不同的交织映射  $d_i, i \in [1, C_1], t = 0$

step2: 分别计算每种映射  $d_i$  下的目标函数  $S_i$

细化: 可随机产生  $C_2$  个 (充分大) 随机序列做为输入序列, 近似计算  $S_i$ ; 分配给每个码重  $i$  的序列数  $n_i$  正比于权重函数  $W(i)$ , 且  $\sum_{i=0}^n n_i = C_2$

step3: 保留  $\eta_1 C_1$  个 ( $\eta_1 < 1$ )  $S_i$  较大的映射  $m_i, i \in [1, \eta_1 C_1]$ , 舍去其余映射;  $t = t + 1$ ;

step4: 补充  $\eta_2 C_1$  个映射  $n_i, i \in [1, \eta_2 C_1]$ , 并计算其目标函数  $S_i$

细化: ①对每个  $m_i$ , 相应地补充  $k_i$  个与其接近的随机映射  $h_{ij}, j \in [1, k_i], k_i \propto S_i$ , 且  $\sum_{i=1}^{\eta_1 C_1} k_i = \eta_2 C_1$ ;

细化: ② $L(x)$ : 与某种映射方式接近的隶属函数。

$X$  为变序对数,  $X \in Z^+$ ,  $X$  亦可随机产生, 要求  $P(x) \propto L(x)$

step5: 随机补充  $(1 - \eta_1 - \eta_2) C_1$  个映射  $L_i, i \in [1, (1 - \eta_1 - \eta_2) C_1]$ , 并计算其目标函数  $S_i$

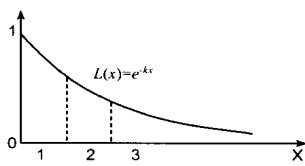


图 4 映射方式隶属函数图

step6: 设  $T = \max\{S(m_i), S(n_j), S(L_k)\}, i \in [1, \eta_1 C_1], j \in [1, \eta_2 C_1], k \in [1, (1 - \eta_1 - \eta_2) C_1]$ ,

并判断  $T$  是否:  $|T_t - T_{t-1}| < \theta T_t$  ( $\theta$  为趋于零的参数)

否, 转 step3; 是, 停机打印。

说明:

⊗  $n$  对卷积码而言, 是帧长; 对分组码而言, 是一个分组内的信息位数。

⊗ 分组码的  $n$  值一般较小 ( $n \leq 15$ ), 那么, 可用完全枚举法; 卷积码  $n$  值较大, 只能用随机进化算法。

⊗ 为加快算法的收敛速度, 可在 Step1 中附加在实践中被证明性能优良的交织器作为初始交织映射。

⊗ 之所以称其为随机进化算法, 是因为该算法是对生物

进化思想的工程仿真。其中, step3 保证算法的择优性, 是适者生存思想的体现; step4 保证了算法的平稳性, 是生物遗传思想的体现; step5 保证了算法的开放性, 是生物突变思想的体现。

⊗ 这种随机进化的思想也可推广到其它目标函数形式下的交织器的优化设计, 如本文在相关性分析中也运用了这一思想。

3.3 多交织器的扩展及其多层次数学模型的实现

在单交织器方式中, 有一路输入信息序列直接送到编码器, 并没有得到很好的组织和规划。有鉴于此, 完全可以设计一种多交织器, 比如图 2 所示的双交织器, 设计步骤如图 5 所示。

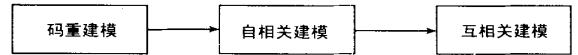


图 5 设计步骤图

首先, 用进化随机算法找到码重分析目标函数值最优时的交织映射集。(设映射集为  $H, h_i \in H, i \in [1, total]$ )

其次, 在  $H$  中, 计算  $S_6(h_i)$ , 保留自相关函数目标函数值较大的  $C^* total$  个映射方式 ( $C < 1$ , 待定参数), 设其交织映射集为  $H', H' \subset H, i \in [1, C^* total]$ ;

最后, 在  $H'$  中, 计算  $S(h'_i, h'_j) = \frac{\mu[S_6(h'_i) + S_6(h'_j)]}{2} + (1 - \mu)S_2(h'_i, h'_j)$  ( $i, j \in [1, C^* total], \mu \leq 1$ , 待定参数)

取目标函数值最大时的  $h_i^*, h_j^*$  分别作为双交织器的映射方式。

4 权位倒置交织器 (Weight-reverse interleaver) 的提出与算法分析

在比特翻转的交织器中, 一般要求帧长为  $L = 2^n$ , 如果帧长非 2 的整数幂, 固然可用分组设计的方法解决之, 但不能保证其性能一定达到最优。鉴于此, 本文将提出一种权位倒置的算法。

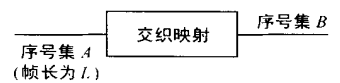


图 6 权位倒置图

在比特翻转的交织器中, 一般要求帧长为  $L = 2^n$ , 如果帧长非 2 的整数幂, 固然可用分组设计的方法解决之, 但不能保证其性能一定达到最优。鉴于此, 本文将提出一种权位倒置的算法。

可设  $A = \{a_0, a_1, \dots, a_{L-1}\} = \{0, 1, 2, \dots, L-1\}$

$B = \{b_0, b_1, b_{L-1}\}$

$L = P_1^* P_2^* P_3^* \dots P_k^*$  ( $P_i$  为大于 1 的整数, 通常取质数)

$$a_i \xrightarrow{\text{交织映射}} b_i$$

对任意的  $a_i \in [0, L-1]$ , 其对应的  $b_i$  的算法如图 7 所示。

算法说明:

$$(1) C_1 = a_i \text{ mod } P_1, d_1 = (a_i - C_1) / P_1,$$

$$(2) b_i = C_1^* P_2^* P_3^* \dots P_k^* + C_2^* P_3^* \dots P_k^* + \dots + C_{k-1}^* P_k^* + C_k$$

$$(3) a_i = C_1^* 1 + C_2^* P_1 + C_3^* P_1^* P_2 + \dots + C_{k-1}^* P_1^* P_2^* P_3^* \dots P_{k-2} + C_k^* P_1^* P_2^* P_3^* \dots P_{k-1}$$

(4) 从  $a_i, b_i$  的表达式中, 可以看到对于任意  $C_j (j \in [1,$

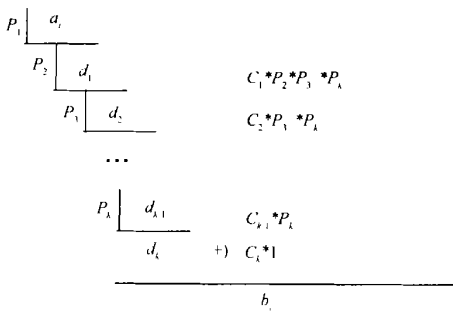


图 7 权位倒置算法图

K) , 其在  $a_i$  与  $b_i$  中的权位是互补对称的:

$a_i$  中的权位是  $P_0 * P_1 * P_2 * \dots * P_{j-1}$  (定义  $P_0 = 1$ );

$b_i$  中的权位是  $P_{j+1} * P_{j+2} * P_{j+3} * \dots * P_k$

这正是权位倒置名称的由来。

(5)从 ④中可看到这种权位的映射方式显然是一一映射, 从而保证了交织方式也是一一映射的。

(6)从 ④中还可知:  $a_i$  中的小权位映射成  $b_i$  中的大权位, 反之亦然, 这就说明序号集  $A$  中邻近的两个序号(小权位差)被映射成序号集  $B$  中相邻位置上的两个远离的序号(大权位差), 反之亦然, 即序号集  $B$  中相邻的两个序号被插在远离的两个位置上, 从而大大削弱了  $B$  序列的自相关性( $S_6$  函数)。同时, 对相同的  $C_j$ , 在  $a_i$  与  $b_i$  中权位互补对称, 这样的权位差使序号集  $A$  和  $B$  相同位置的序号差( $S_1$  函数)更加离散化, 也降低了它们之间的互相关性。

(7)由帧长和算法可知, 比特翻转的交织器仅是权位倒置交织器在帧长为基 2 条件下的一个特例, 而块交织也是权位倒置交织器在帧长分解为两个相同因数条件下的特例。

(8) $\{P_i\}$  序列的大小排序可以是任意的, 但一般取升序排列(模式 0), 降序排列(模式 1), 或两边小中间大的准对称排列(模式 2)

(9)一般地说, 如果帧长  $L$  可以分解成若干个小质因数的乘积, 那么可以认为权位倒置交织将输入信息序列充分离散化, 是近似最优交织器; 如果帧长  $L$  为质数或只能分解成少数几个大质因数, 那么可寻找满足小质因数乘积的与  $L$  接近的一个数(设为  $M$ )作为虚拟帧长, 进行权位倒置交织, 然后在得到的映射序列中通过删除多余序号( $M > L$  时)或均匀插入不足序号( $M < L$  时), 最终得到一个近似最优交织器。以上所述, 就是任意帧长的权位倒置交织器的设计方法。可以认为它就是  $S_6$  函数单交织器准则下的近似最优解。

(10)可将(9)中得到的近似最优解作为一个可行的初始解, 用本文提出的随机进化算法, 搜索数学模型的最优解。至于目标函数, 在单交织器模式下, 笔者认为可用模糊决策的  $S_6$  函数, 当然也不排除使用经过精心校参  $C_i$  的多目标决策的  $S_7$  函数; 而在多交织器模式下, 推荐采用上文提出的多层次的数学模型。

(11)在追求高编码效率( $R = 1/2$ )的条件下, 由于两个分量编码输出的监督位序列(不妨设  $\{Y_{1k}\}$  和  $\{Y_{2k}\}$ )要交替删除, 为避免出现一些信息位被重复编码, 而另外的信息位未被编

码, 那么我们期望  $\{Y_{1k}\} \cap \{Y_{2k}\} = \Phi$ , 亦即两个监督位序列没有重复编码, 从而保证每个信息位都被编码。为解决这一问题, 笔者认为可采用信息位分组交织的方法, 其原理如图 8 所示, 亦即将序号集  $A$  中的奇序号和偶序号分开, 然后奇信息位只需经过一个权位倒置交织, 而偶信息位不仅要进行同样的权位倒置交织, 还需要经过一个反置器, 最后将两路信息复接在一起, 得到映射序列序号集  $B$ 。这里所谓的反置器类似于堆栈的概念, 先进后出, 将序列倒读。

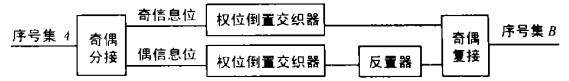


图 8 奇偶-权位倒置交织器

(12)我们将采用虚拟帧长技术和奇偶分组技术的权位倒置交织器称为广义权位倒置交织器。本文提出的权位倒置交织器, 虽然是针对瑞利信道下的 Turbo 码提出的, 但是根据归纳逻辑的一般性, 笔者认为它对于普遍意义上的信道交织也是具有一定的推广和借鉴价值。

(13)笔者再提供一种权位倒置的等效图表排列算法:

Step1: 将  $\{a_i = i\}$  序列按行号写入列数为  $P_k$  的矩阵, 并令  $t = K - 1$ 。

Step2: 从矩阵(群)中, 逐个按列读出, 并将每列数据按行写入一个列数为  $P_t$  的矩阵中(矩阵行数为  $P_{t-1} * P_{t-2} * \dots * P_2 * P_1$ ), 这样的矩阵共计“ $P_{t+1} * P_{t+2} * \dots * P_{k-1} * P_k$ ”个, 按序排列。

Step3: 令  $t = t - 1$ ; 若  $t \neq 0$ , 转 Step2; 否则就得到一个一维行向量, 这就是所求的映射序列。

比如, 以帧长 12(模式 0)为例, 权位倒置交织器可如图 9 所示的推算。

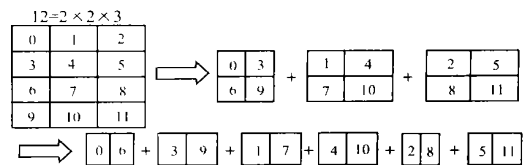


图 9 模式 0 推算图

从而, 得到映射序列为  $\{0, 6, 3, 9, 1, 7, 4, 10, 2, 8, 5, 11\}$ 。

### 5 各种交织器的工程仿真和比较

在先进的 cossap 仿真平台上, 对比测试了标准交织(3G TS 25.212 V3.3.0)和权位倒置交织的性能。相关的实验参数为: 生成多项式  $g_1 = 17$ , 反馈多项式  $g_2 = 13$ , 尾比特  $N_u = 3$ , 信道编码效率  $\eta = 1/3$ 。采用 log-map 算法, 迭代次数为 10。

#### 5.1 仿真结果一

我们选取文献[4]采用的 1156 作为测试帧长, 在高斯信道下进行了未知信道信息(without CSI)仿真, 结果如图 10 所示。

我们分别测试了块交织、标准交织、随机交织和虚拟帧长为 1536(模式 1)的权位倒置交织。从图中可看到五种交织器的优劣排序为: 随机交织、权位倒置 1536(模式 1)、标准交织、块交织。其中, 权位倒置交织器由 1536 帧长删除为 1156 帧长,

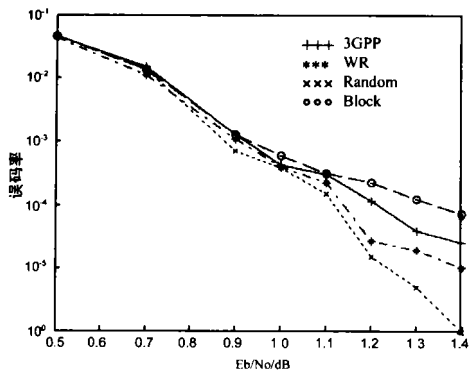


图 10 高斯信道实验图

另外为克服尾效应再将其倒序输出。

测试了帧长为 1156

表 1 交织器的  $S_6$  值表

的各交织器的  $S_6$  值, 结果如表 1 所示。

	1536(模式 1)	标准交织	块交织
$S_6$	730.23	642.92	249.13

### 5.2 仿真结果二

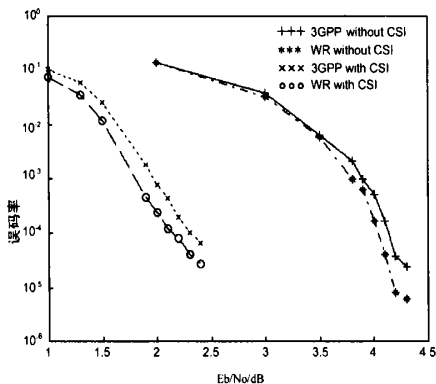


图 11 非相关瑞利信道实验图

在非相关瑞利信道下, 对权位倒置交织器和标准交织器进行了已知信道信息(with CSI)和未知信道信息(without CSI)的对比测试, 如图 11 所示, 帧长仍取 1156, 其余测试条件与仿真测试一相同。

从图 11 中, 可看到:

(1) 在非相关瑞利信道下, 无论是已知信道信息(with CSI)还是未知信道信息(without CSI), 权位倒置交织器的误码率都明显低于标准交织器。

(2) 实验数据与理论分析吻合, 这证明了  $S_6$  函数作为交织器优选的目标函数是可信的, 同时也说明时间离散性是决

定交织器性能的重要因素。

## 6 结论

由上文论述, 可总结出以下结论:

- ① 本文提出的权位倒置交织器是一种性能良好的交织器, 其误码率对比 3GPP 提出的标准交织(3G TS 25.212 V3.3.0)有明显的改善。
- ② 交织器误码率优劣很大程度上取决于其时间离散特性。
- ③ 在单交织器模式中, 可将  $S_6$  函数作为交织器设计的优化准则。

### 参考文献:

[ 1 ] C Berrou, A Glavieux, P Thitimajshima. Near shannon limit error correcting coding and decoding: Turbo Codes [ A ]. in Proc. ICC' 93 [ C ]. Geneva, Switzerland: ICC, 1993. 1064- 1070.

[ 2 ] 吴伟陵. 通向信道编码的 Turbo 码及其性能分析 [ J ]. 电子学报, 1998, 28(7): 35- 40.

[ 3 ] 孙毅. Turbo 码在移动通信中的应用 [ D ]. 北京: 北京邮电大学, 1999.

[ 4 ] Heegard. The Turbo Coding [ M ]. Boston: kluwer Academic Publisher, 1999.

[ 5 ] J dAndersen, V V Zyablow. Interleaver design for Turbo coding [ A ]. in Proc. int. symp. on turboCodes and Related Topics [ C ]. France: TRT, 1997, 9: 154- 156.

[ 6 ] S A Barbucescu, S S Pietrobon. Interleaver design for Turbo coding [ J ]. Electronic Letters, 1994, 30(11): 2107- 2108.

[ 7 ] J Hokfelt, T Maseng, O Eford. Assessing interleaver suitability of Turbo codes [ J ]. Nordic RadioSymposium, 1998, 10: 323- 327.

### 作者简介:



吴湛击 男, 1977 生于山西长治, 1999 年毕业于南京邮电学院, 现为北京邮电大学信息工程系直博研究生, 研究范围包括宽带通信、编码理论、移动通信等。

吴伟陵 1938 年生, 北京邮电大学信息工程系教授、博士生导师, 中国电子学会信息论分会主任委员, 主要从事信息论、信息处理与移动通信方面的教学和科研工作。