

# 一种 Turbo 码随机交织器的迭代估计方法

刘骏, 李静, 于沛东

(解放军信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘 要:** 信道编码参数分析是对编码参数的逆向分析和估计, 是智能通信、信号截获等领域的关键技术之一。Turbo 码在通信系统中应用广泛, 其交织参数估计问题十分重要。针对 Turbo 码的随机交织器, 提出一种基于 Turbo 译码器软输出之间相关性判决的迭代估计算法。该算法利用接收解调的软判决序列, 克服了现有方法仅针对特定交织结构以及因使用硬判决而导致容错能力低的缺点。仿真结果表明, 在低信噪比条件下, 该算法具有更好的性能和相对低的复杂度。

**关键词:** Turbo 码; 随机交织器; 软判决; 低信噪比; 相关性判决; 迭代估计

**中图分类号:** TN911.7

**文献标识码:** A

## Iterative estimation method for random interleaver of Turbo codes

LIU Jun, LI Jing, YU Pei-dong

(Information System College, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Channel coding parameter analysis meant reversely analyzing and estimating the coding parameters, and was one of the key techniques for intelligent communication, information interception and so on. Since Turbo codes were widely used in communication systems, parameter estimation for their interleavers was of great importance. Focusing on the random interleaver of Turbo codes, an iterative estimation algorithm based on correlation decision between the soft outputs of the Turbo decoder was presented. The algorithm used soft-decisions of the demodulator output sequence. It overcame the shortcomings of existing methods which often aimed at certain interleaving structures only, and suffered from weak robustness since they used hard-decisions. Simulation results show that the proposed algorithm has better performance and relatively lower complexity, especially in low signal-to-noise ratio cases.

**Key words:** Turbo codes; random interleaver; soft-decision; low signal-to-noise ratio; correlation decision; iterative estimation

### 1 引言

信道编码参数分析<sup>[1,2]</sup>是利用接收到的编码序列, 对编码参数进行逆向分析, 为译码提供参数, 最终还原信息序列, 它是认知无线电、信号截获等领域的关键技术之一。Turbo 码最早由法国不列颠通信大学的 Claude Berrou 教授等提出<sup>[3,4]</sup>, 由于引入了交织器和解交织器, 实现了随机性编码, 从而获得了接近 Shannon 理论极限的性能。Turbo 码在低信噪比环境中所展现的优异性能, 使其被广泛应

用于现代数字通信系统中, 因此对其参数的识别分析具有重要意义。

针对 Turbo 码的分析识别主要包括 RSC 子编码器以及交织器。目前对于交织器的识别研究相对较少, 文献[5~8]对矩形交织器和卷积交织器的识别进行了研究。然而 Turbo 码一般采用伪随机交织来获得更高的编码增益, 文献[9~11]针对 Turbo 码的伪随机交织进行了分析。其中, 文献[9,10]都是基于多样本数据的一阶相关统计算法, 文献[9]还要求接收序列无误码, 而文献[10]则要求接收序列中的信息

收稿日期: 2014-06-25; 修回日期: 2014-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61072046)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China(61072046)

序列无误码。文献[11]也是基于多样本数据,利用信息序列和交织后的编码序列对交织器逐位恢复,对每一位交织图案列出多个候选,并计算出由每位候选带给卷积分量码编码器状态的平均信息熵,通过设定检测门限对候选进行排除,最终得到整个交织图案。

由于 Turbo 码主要应用于低信噪比环境中,接收方特别是信号截获方接收的都是低信噪比信号,这给 Turbo 码编码参数的分析识别带来了困难与挑战。上述文献中关于 Turbo 码的分析方法通常使用解调输出的硬判决序列,而由低信噪比信号得到的解调硬判决序列往往存在大量的误码,因此传统的依靠无误码或者低误码率的识别分析方法不再适用。实际上,解调输出的软判决中不仅含有发送比特的符号信息,还包含了该符号的可靠度信息,利用解调软判决输出,则既可以发挥可靠度信息的作用,又可以将运算代入实数域,丰富了信号处理的手段。目前已有文献基于解调软判决对 RSC 子编码器进行识别<sup>[12,13]</sup>,文献[13]提出利用解调软判决,建立编码系数的代价函数,借助实数域中的优化理论和方法,求得编码器系数的最优解。目前针对交织器的基于解调软判决的分析识别方法还很少见。

本文主要针对 Turbo 码的伪随机交织,提出基于译码器软输出之间相关性判决的迭代方法实现交织关系的分析识别,与现有的相关方法对比,在低信噪比条件下,该方法具有更好的性能以及相对较低的复杂度。

## 2 问题模型

Turbo 码的编码器和译码器中均包含交织器部分,典型的 Turbo 码编码器结构如图 1 所示,它是由 2 个反馈系统卷积码(RSC)编码器通过一个交织器分开并行级联而成。

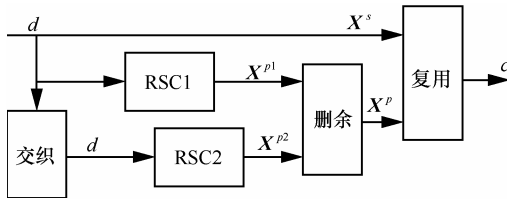


图 1 典型 Turbo 码编码器结构

交织实际上就是将数据序列中元素的位置进行重置,从而得到交织序列的过程,解交织就是将

交织序列恢复为交织前的数据序列。

以图 1 中的交织器为例,设交织器的输入信息序列向量为

$$\mathbf{D} = (d_1, d_2, \dots, d_N)^T \quad (1)$$

其中,  $d_i \in \{0,1\}$ ,  $i=1,2,\dots,N$ ,  $N$  为信息帧长,同时也是交织器的长度。

交织映射输出序列向量记为

$$\tilde{\mathbf{D}} = (\tilde{d}_1, \tilde{d}_2, \dots, \tilde{d}_N)^T \quad (2)$$

其中,  $\tilde{d}_j \in \{0,1\}$ ,  $j=1,2,\dots,N$ 。

序列向量  $\mathbf{D}$  与  $\tilde{\mathbf{D}}$  仅仅是元素的位置顺序不同,它们的关系可以表示为

$$\tilde{\mathbf{D}} = \mathbf{T}\mathbf{D} \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{T}$  为  $N \times N$  的交织矩阵,它的每一行元素有且仅有一个为 1,且每行元素 1 的位置都不相同,其余元素均为 0。例如  $\mathbf{T}(i,j)=1$  表示交织器将  $\mathbf{D}$  中的第  $i$  个元素映射成  $\tilde{\mathbf{D}}$  中的第  $j$  个元素。

向量  $\mathbf{D}$  与  $\tilde{\mathbf{D}}$  分别输入 2 个 RSC 子编码器进行编码,对应生成的校验序列  $\mathbf{X}^{p1}$  和  $\mathbf{X}^{p2}$  经过删余后与信息序列  $\mathbf{X}^s$  (即  $\mathbf{D}$ ) 复用,得到编码序列  $\mathbf{C}$ 。 $\mathbf{C}$  经过调制映射后送入信道,记接收到的序列向量为  $\mathbf{Y}$ 。

本文讨论利用观测信号  $\mathbf{Y}$  来估计交织矩阵  $\mathbf{T}$ 。需要指出,上述模型并不针对特定的交织类型,因此适用于任意交织器。

## 3 基于序列互相关的交织器估计

### 3.1 交织器输入输出序列的互相关矩阵

记  $\mathbf{U} = (u_1, u_2, \dots, u_N)^T$  和  $\tilde{\mathbf{U}} = (\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \dots, \tilde{u}_N)^T$  分别为  $\mathbf{D}$  和  $\tilde{\mathbf{D}}$  对应的双极性序列向量,即其元素均取自集合  $\{-1,1\}$ 。由式(3)可得  $\tilde{\mathbf{U}} = \mathbf{T}\mathbf{U}$ ,考虑  $\mathbf{U}$  和  $\tilde{\mathbf{U}}$  的互相关矩阵,有

$$\mathbf{R}[\tilde{\mathbf{U}}\mathbf{U}] = \mathbf{R}[\mathbf{T}\mathbf{U}\mathbf{U}] = \mathbf{T}\mathbf{R}[\mathbf{U}\mathbf{U}] \quad (4)$$

一般地,信息序列  $\mathbf{U}$  在不同时刻是不相关的,因此有  $\mathbf{R}[\mathbf{U}\mathbf{U}] = \mathbf{I}_{N \times N}$ ,其中  $\mathbf{I}_{N \times N}$  表示  $N \times N$  维单位阵。于是得到

$$\mathbf{R}_{\tilde{\mathbf{U}}\mathbf{U}} = \mathbf{T} \quad (5)$$

设  $\mathbf{T}$  的第  $i$  ( $1 \leq i \leq N$ ) 行中“1”的位置为  $\theta_i$  ( $\theta_i \in \{1,2,\dots,N\}$ ),由式(5)可得

$$\theta_i = \arg \max_{j \in \{1,2,\dots,N\}} \{\mathbf{R}_{\tilde{\mathbf{U}}\mathbf{U}}(i,j)\} \quad (6)$$

可见, 若估计出互相关矩阵  $\mathbf{R}_{\bar{U}U}$ , 则可求出交织参数  $\theta_i$  以及交织矩阵  $\mathbf{T}$ 。因此, 本节接下来讨论  $\mathbf{R}_{\bar{U}U}$  的估计问题。

设 Turbo 码的 2 个子编码器的参数已知。接收序列解复用分路后分别由 2 个 SISO 译码器进行译码。设译码器输出的对数似然比向量分别为  $\mathbf{L}_1 = (l_1, l_2, \dots, l_N)^T$  和  $\mathbf{L}_2 = (\tilde{l}_1, \tilde{l}_2, \dots, \tilde{l}_N)^T$ , 其中,  $l_i$  和  $\tilde{l}_i$  分别为  $u_i$  和  $\tilde{u}_i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) 的对数似然比。以  $l_i$  为例, 其定义为

$$l_i = \log \frac{p(u_i = 1 | \mathbf{Y})}{p(u_i = -1 | \mathbf{Y})} \quad (7)$$

用  $\hat{u}_i$  和  $\hat{\tilde{u}}_i$  表示  $u_i$  和  $\tilde{u}_i$  的条件均值, 可得

$$\hat{u}_i = E[u_i | \mathbf{Y}] = \frac{e^{l_i} - 1}{e^{l_i} + 1} \quad (8)$$

$$\hat{\tilde{u}}_i = E[\tilde{u}_i | \mathbf{Y}] = \frac{e^{\tilde{l}_i} - 1}{e^{\tilde{l}_i} + 1} \quad (9)$$

$\hat{u}_i$  和  $\hat{\tilde{u}}_i$  取值范围为  $(-1, +1)$ 。当译码器的输出比较可靠, 即输出似然比的绝对值较大时, 它们的值趋近于  $-1$  或  $+1$ 。记  $\hat{\mathbf{U}} = (\hat{u}_1, \hat{u}_2, \dots, \hat{u}_N)^T$  和  $\hat{\tilde{\mathbf{U}}} = (\hat{\tilde{u}}_1, \hat{\tilde{u}}_2, \dots, \hat{\tilde{u}}_N)^T$ , 显然  $\hat{\mathbf{U}}$  和  $\hat{\tilde{\mathbf{U}}}$  即为  $\mathbf{U}$  和  $\tilde{\mathbf{U}}$  的软判决估计。在此基础上, 可得到互相关矩阵  $\mathbf{R}_{\bar{U}U}$  的估计, 即

$$\hat{\mathbf{R}}_{\bar{U}U} = E[\hat{\mathbf{U}}\hat{\mathbf{U}}^T] \quad (10)$$

在实际应用中, 用样本平均实现数学期望。设共接收到  $M$  个编码帧, 每帧得到的软判决序列为  $\hat{\mathbf{U}}_k$  和  $\hat{\tilde{\mathbf{U}}}_k$  ( $k=1, 2, \dots, M$ ), 则

$$\hat{\mathbf{R}}_{\bar{U}U} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \hat{\mathbf{U}}_k \cdot \hat{\mathbf{U}}_k^T \quad (11)$$

于是由式(6)可得

$$\hat{\theta}_i = \arg \max_{j \in \{1, 2, \dots, N\}} \{\hat{\mathbf{R}}_{\bar{U}U}(i, j)\} \quad (12)$$

### 3.2 交织参数估计的可靠性

式(12)将  $\hat{\mathbf{R}}_{\bar{U}U}$  中每一行中最大值的位置作为交织矩阵  $\hat{\mathbf{T}}$  相应行中 1 的位置的估计。显然这一估计的可靠性依赖于  $\hat{\mathbf{R}}_{\bar{U}U}$  的可靠性。

用  $f_0(r)$  和  $f_1(r)$  分别表示  $\hat{\mathbf{R}}_{\bar{U}U}$  中对应于  $\mathbf{T}$  中 0 和 1 位置的元素值的概率密度函数。图 2 给出了通过实验 ( $N=128$ ,  $M=10\,000$ ,  $E_b/N_0=4$  dB,  $\mathbf{T}$  未知) 统计得出的  $\hat{\mathbf{R}}_{\bar{U}U}$  第 1 行中的  $f_0(r)$  与  $f_1(r)$ , 并且还给出了对应  $f_0(r)$  与  $f_1(r)$  的均值和方差的正

态分布  $N(0, \sigma_0^2)$  和  $N(u, \sigma_1^2)$ 。

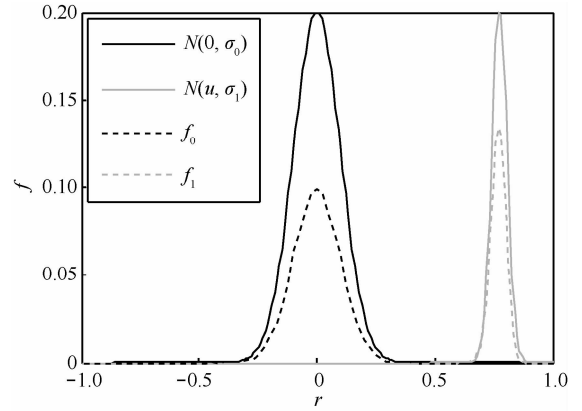


图 2  $\hat{\mathbf{R}}_{\bar{U}U}$  中元素值的概率密度

由于  $f_0(r)$  与  $f_1(r)$  的确切表达式的理论推导是十分复杂的, 并且由图 2 可以看出,  $f_0$  和  $f_1$  与正态分布相似, 为方便计算, 本文用正态分布来近似描述, 即令

$$f_0(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} e^{-\frac{r^2}{2\sigma_0^2}} \quad (13)$$

$$f_1(r) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{(r-u)^2}{2\sigma_1^2}} \quad (14)$$

其中,  $f_0(r)$  的均值为 0, 方差为  $\sigma_0^2$ ,  $f_1(r)$  的均值为  $u$  ( $0 < u < 1$ ), 方差为  $\sigma_1^2$ 。这些参数的取值均与 SISO 子译码器输出的似然比有关。当输出似然比的绝对值越大, 即译码输出确定度越高, 则方差  $\sigma_0^2$  和  $\sigma_1^2$  越小, 且  $u$  越接近 1。

将  $\hat{\mathbf{R}}_{\bar{U}U}$  中的第  $i$  行按元素值从大到小排序后记作  $\mathbf{r}_i = [r_{i_1}, r_{i_2}, \dots, r_{i_N}]^T$ 。用  $H_1$  表示式(10)估计正确, 用  $H_0$  表示估计错误。则

$$f(\mathbf{r}_i | H_1) = f_1(r_{i_1})f_0(r_{i_2})f_0(r_{i_3}) \cdots f_0(r_{i_N}) \quad (15)$$

$$\begin{aligned} f(\mathbf{r}_i | H_0) &= f_0(r_{i_1})f_1(r_{i_2})f_0(r_{i_3}) \cdots f_0(r_{i_N}) + \\ &f_0(r_{i_1})f_0(r_{i_2})f_1(r_{i_3}) \cdots f_0(r_{i_N}) + \cdots \\ &+ f_0(r_{i_1})f_0(r_{i_2})f_0(r_{i_3}) \cdots f_1(r_{i_N}) \\ &= \sum_{l=2}^N f_1(r_{i_{-l}}) \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq l}}^N f_0(r_{i_{-k}}) \\ &\approx f_0(r_{i_1})f_1(r_{i_2})f_0(r_{i_3}) \cdots f_0(r_{i_N}) \end{aligned} \quad (16)$$

用正确估计与错误估计的对数似然比来表示估计的可靠度, 则有

$$\begin{aligned}
& \ln \frac{P(H_1 | \mathbf{r}_i)}{P(H_0 | \mathbf{r}_i)} = \ln \frac{f(\mathbf{r}_i | H_1)}{f(\mathbf{r}_i | H_0)} \\
& = \ln \frac{f_1(r_{i-1})f_0(r_{i-2})}{f_1(r_{i-1})f_0(r_{i-2})} \\
& = \ln \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{(r_{i-1}-u)^2}{2\sigma_1^2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} e^{-\frac{r_{i-2}^2}{2\sigma_0^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{(r_{i-1}-u)^2}{2\sigma_1^2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} e^{-\frac{r_{i-1}^2}{2\sigma_0^2}}} \\
& = \frac{2u\sigma_0^2(r_{i-1}-r_{i-2}) + (\sigma_1^2 - \sigma_0^2)(r_{i-1}^2 - r_{i-2}^2)}{2\sigma_0^2\sigma_1^2} \quad (17)
\end{aligned}$$

当  $\sigma_0^2$  与  $\sigma_1^2$  比较接近时, 式(17)分子中的第二项可忽略, 这时  $\hat{\theta}_i$  的可靠度近似与  $\hat{\mathbf{R}}_{\hat{u}}$  中第  $i$  行的最大值与次最大值之差成正比。因此, 本文用  $r_{i-1}$  与  $r_{i-2}$  的相对差值

$$g_i = \frac{r_{i-1} - r_{i-2}}{r_{i-2}}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (18)$$

来衡量式(12)估计结果的可靠度。并设定门限  $g_{\text{DEC}}$ , 仅当  $g_i$  大于  $g_{\text{DEC}}$  时, 认为  $\hat{\theta}_i$  的估计是可靠的, 并按式(19)所示得到交织矩阵的估计  $\hat{\mathbf{T}}$ 。

$$\hat{T}(i, j) = \begin{cases} 1, & j = \hat{\theta}_i \text{ 且 } g_i > g_{\text{DEC}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

#### 4 Turbo 译码与交织矩阵估计的迭代处理

上一节已经提到, 当 SISO 子译码器的输出越确定,  $\sigma_0^2$ 、 $\sigma_1^2$  越小,  $u$  越大, 则  $\hat{\theta}_i$  的可靠度越高。然而, 在交织器未知的条件下, 译码存在很大的困难。一方面, 译码器 2 无法得到信息序列对应的接收序列, 只能根据校验序列进行译码; 另一方面, 2 个子译码器之间无法进行外信息交换, 不能进行迭代译码, 这时 2 个子译码器很难得到确定度高度的译码结果。因此, 在此基础上只能得到非常少量的高可靠度  $\hat{\theta}_i$ , 即估计出的  $\hat{\mathbf{T}}$  仅有少量的非全 0 行。

为此, 本文提出如图 3 所示的译码与交织器估计迭代处理的方案。其中,  $\mathbf{Y}$  为接收序列,  $\mathbf{y}^s$ 、 $\mathbf{y}^{p1}$  和  $\mathbf{y}^{p2}$  分别对应于信息位以及编码器 1 和编码器 2 产生的校验位,  $\mathbf{L}_1$  和  $\mathbf{L}_1^e$  分别为译码器 1 的软输出以及提供给译码器 2 的外信息,  $\mathbf{L}_2$  和  $\mathbf{L}_2^e$  分别为译码器 2 的软输出以及提供给译码器 1 的外信息。

在迭代处理中, 根据每次估计得到的交织矩阵  $\hat{\mathbf{T}}$ , 重新进行 Turbo 译码, 并根据译码输出重新估计  $\mathbf{T}$ 。只要每次新的迭代使用的交织矩阵比上次迭代有更多的非全 0 行, 子译码器 2 就能获取更多的信息序列观测值, 2 个子译码器也能在更多的序列位置上进行外信息交换, 因此, Turbo 译码输出的软信息将比上一次迭代更为确定, 相应的互相关矩阵的估计也将更为可靠, 从而使交织矩阵的估计更趋完整。

在迭代初始时, 设  $\hat{\mathbf{T}} = \mathbf{0}$ 。在每次迭代完成时, 判断  $\hat{\mathbf{T}}$  是否仍有全 0 行并且与上次迭代的估计结果不同。若是, 则继续下次迭代, 否则迭代停止。当迭代停止时, 若  $\hat{\mathbf{T}}$  没有全 0 行, 则说明估计交织成功, 否则说明此次估计失败。

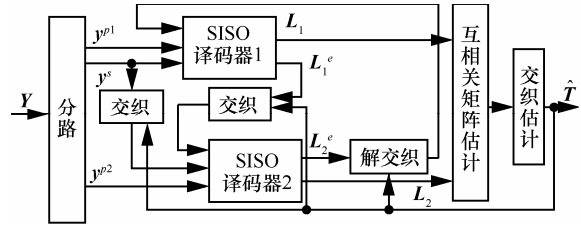


图 3 迭代估计交织方案

#### 5 仿真及分析

本文的仿真都是针对加性高斯白噪声环境中采用 S-伪随机交织的 1/3 码率的 Turbo 码进行的, 假设子编码器 RSC 参数、交织起点以及交织长度已知。

图 4 给出了在不同信噪比以及不同数据帧数条件下, 每次迭代估计出的交织矩阵的行数。其中信息帧长  $N = 512$  bit, 阈值  $g_{\text{DEC}} = 0.3$ 。可见, 随着迭代次数的增加, 交织矩阵的估计越来越完整, 直到最终完全正确估计出交织关系。且随着信噪比或数据帧数的增加, 所需迭代次数减少, 这是因为信噪比相对较高或数据帧数较多的情况下, 译码器输出更加可靠, 由此计算出的相关矩阵  $\hat{\mathbf{R}}_{\hat{u}}$  也更加可靠, 每次迭代能得到更多的交织关系。

下面给出本文与文献[11]中算法性能的对比。图 5 给出了在不同信息帧长和数据帧数条件下, 2 种算法的识别正确率随着信噪比的变化情况 ( $g_{\text{DEC}} = 0.3$ )。可以看出, 相同条件下, 本文算法比文献[11]中的 Cluzeau 算法的识别性能好。且数据帧数  $M$  越多, 识别正确率越高, 因为数据帧数的增多使平均后的相关值能够更加准确地显示相关性, 从而提高正确率。而随着帧长  $N$  的增加, 识别正确

率会降低, 这是因为 2 种算法都是从前往后逐渐恢复交织, 每一步都会积累一些不确定性, 交织长度越长, 对后面的交织关系的恢复影响越大。

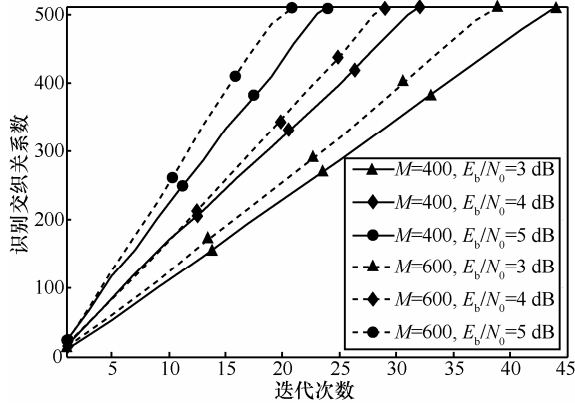


图4 识别交织关系系数随迭代次数变化曲线

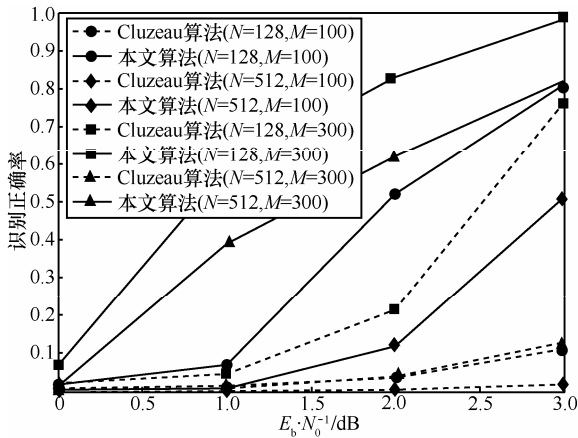


图5 不同帧长和数据帧数情况下识别正确率

图6所示为信息帧长  $N=128$  和  $N=512$  时, 识别正确率达到 90% 以上时 2 种算法所需数据帧数  $M$  随着信噪比的变化情况 ( $g_{DEC}=0.3$ )。可以看出, 达到相同识别性能时, 本文算法相对于 Cluzeau 算法所需数据量要少, 且信噪比越低, 减少的越多。这是因为当信噪比较高时, 由正确候选计算出的平均信息熵较大, 软判决中可靠度信息的重要性未充分体现。当信噪比逐渐降低时, 正确候选计算出的平均信息熵不再突出, 而可靠度信息的作用越来越凸显, 从而使本文算法对数据量的节省越来越明显。

图7给出了在不同信噪比条件下, 阈值  $g_{DEC}$  的选取对识别正确率达到 90% 以上时所需数据量的影响, 其中信息帧长  $N=512$ 。可以看出, 随着  $g_{DEC}$  的增大, 所需数据量减少, 这是因为  $g_{DEC}$  取得越大, 判决所需可靠性越大, 即对特别可靠的  $\hat{\theta}_i$  才进行判决, 这时对数据量的要求就相对减少。

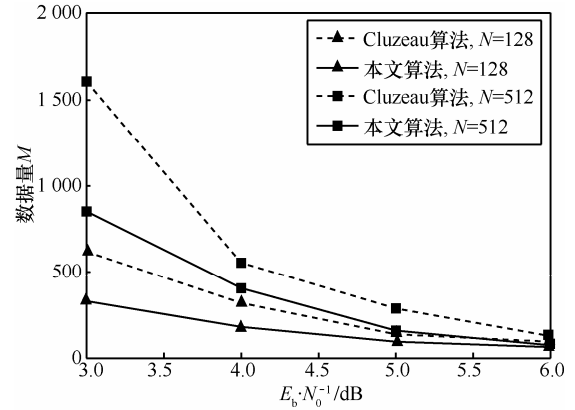


图6 正确率达 90% 以上时所需数据量

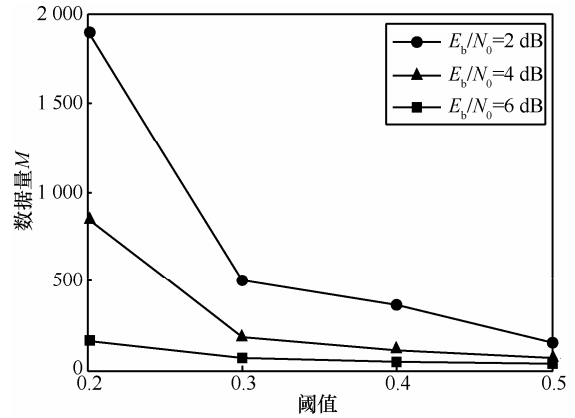


图7 阈值对数据量的影响

## 6 结束语

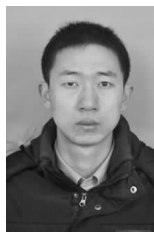
对于 Turbo 码交织器的识别, 传统的方法不容错或者容错能力极低, 在低信噪比条件下性能急剧下降, 且有些方法只能针对特定的交织结构。本文提出利用 Turbo 码译码器的软输出进行相关性的判决来得到交织关系, 能够克服低信噪比条件带来的误码率影响, 且可针对任意交织方式。实验表明, 本文提出的方法能够实现在低信噪比条件下任意交织关系的识别, 具有较好的容错能力。

需要指出, 本文算法是在假设子编码器 RSC 参数、交织起点以及交织长度已知的情况下提出的, 如果上述参数未知, 则需要先对上述参数进行估计。对于子编码器 RSC 参数, 可利用文献[13]中算法进行估计, 而交织起点和交织长度可以尝试经验值或者进行遍历。上述参数若有一项估计错误, 算法性能将急剧下降甚至失效, 复杂度则与交织起点和交织长度的尝试次数成正比。因此在后面的研究中, 可以研究子编码器 RSC 参数、交织起点以及交织长度与交织关系的联合识别。

## 参考文献:

- [1] 张永光, 楼才义. 信道编码及其识别分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.  
ZHANG Y G, LOU C Y. Channel Coding Recognition and Analysis[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [2] 解辉, 黄知涛, 王丰华. 信道编码盲识别技术研究进展[J]. 电子学报, 2013, 41(6): 1166-1176.  
XIE H, HUANG Z T, WANG F H. Research progress of blind recognition of channel coding[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(6): 1166-1176.
- [3] BERROU C, GLAVIEUX A, THITIMAJSHIMA P. Near shannon limit error-correcting coding and decoding: turbo codes[A]. IEEE International Conference on Communication[C]. Piscataway, 1993. 1064-1070.
- [4] 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.  
WU W L. Turbo codes to channel coding theory and their performance analyses[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(7): 35-40.
- [5] SICOT G, HOUCHE S. Blind detection of interleaver parameters [J]. Signal Processing, 2009, 89(4): 450-462.
- [6] LU L, LI K H, GUAN Y L. Blind detection of interleaver parameters for non-binary coded data streams[A]. IEEE International Conference on Computing[C]. Dresden, 2009. 1-4.
- [7] LU L, LI K H, GUAN Y L. Blind identification of convolutional interleaver parameters[A]. ICICS 2009 Proceedings of the 7th International Conference on Information, Communications and Signal Processing[C]. Piscataway, NJ, USA, 2009. 1-5.
- [8] 甘露, 刘宗辉, 廖红舒. 卷积交织参数的盲估计[J]. 电子学报, 2011, 39(9): 2173-2177.  
GAN L, LIU Z H, LIAO H S. Blind estimation of the parameters of convolutional interleaver[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(9): 2173-2177.
- [9] 张永光. 一种 Turbo 码编码参数的盲识别方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2011, 38(4): 167-172.  
ZHANG Y G. Blind recognition method for the Turbo coding parameter[J]. Journal of Xidian University, 2011, 38(4): 167-172.
- [10] CÔTE M, SENDRIER N. Reconstruction of a Turbo-code interleaver from noisy observation[A]. International Symposium on Information Theory 2010[C]. Austin, Texas, USA, 2010. 2003-2007.
- [11] CLUZEAU M, FINIASZ M, TILLICH J P. Methods for the reconstruction of parallel Turbo codes[A]. International Symposium on Information Theory 2010[C]. Austin, Texas, USA, 2010. 2008-2012.
- [12] 于沛东, 李静, 彭华. 一种利用软判决的信道编码识别新算法[J]. 电子学报, 2013, 41(2): 301-306.  
YU P D, LI J, PENG H. A novel algorithm for channel coding recognition using soft-decision[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(2): 301-306.
- [13] YU P D, LI J, PENG H. A least square method for parameter estimation of sub-codes of Turbo codes[J]. IEEE Communication Letters, 2014, 18(4): 644-647.

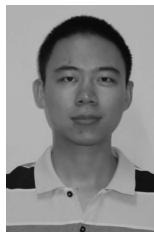
## 作者简介:



刘骏 (1990-), 男, 江苏仪征人, 解放军信息工程大学硕士生, 主要研究方向为信道编码识别分析。



李静 (1972-), 女, 山东烟台人, 博士, 解放军信息工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为信道编码、信号分析与处理。



于沛东 (1989-), 男, 湖南慈利人, 解放军信息工程大学博士生, 主要研究方向为信道编码及其识别分析。