

删余 Turbo 码的随机交织器识别

李晓丹, 刘 锐, 黎 勇*

(重庆大学计算机学院, 重庆 401331)

摘要: Turbo 码已被广泛应用于第三代移动通信技术(3rd Generation mobile communication technology, 3G)、第四代移动通信技术(4th Generation mobile communication technology, 4G)等通信系统中. 为了提高信道编码效率, 在 Turbo 码的实际应用中常结合删余技术. 由于部分校验位的缺失, 删余 Turbo 码的盲识别难度更高, 且目前针对删余 Turbo 码的交织器识别研究较少. 本文在删余 Turbo 码的随机交织器识别中, 基于对数符合度的概念, 提出利用软输出维特比算法(Soft Output Viterbi Algorithm, SOVA)对后验信息进行更新以辅助识别, 从而弥补对数符合度的近似计算所导致的性能损失. 仿真结果表明: 与现有的相关算法相比, 本文算法具有更好的性能; 加之对数符合度和 SOVA 两者的计算复杂度均相对较低, 所以本文算法也具备较高的实时性.

关键词: 删余 Turbo 码; 随机交织器; 对数符合度; 软输出维特比算法; 软判决

基金项目: 中央高校业务费项目(No.2024CDJGF-008)

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)07-2461-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20250107

Blind Identification of Random Interleaver for Punctured Turbo Codes

LI Xiao-dan, LIU Rui, LI Yong*

(School of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 401331, China)

Abstract: Turbo codes have been widely used in communication systems such as 3G (3rd Generation Mobile Communication Technology) and 4G (4th Generation Mobile Communication Technology). To improve the efficiency of channel coding, puncturing techniques are commonly employed in practical applications. Due to the absence of some parity bits, the blind recognition of punctured Turbo codes becomes more challenging, and there is currently limited research on interleaver identification for such codes. This paper addresses the identification of random interleavers in punctured Turbo codes by leveraging the concept of logarithmic conformity, and proposes utilizing the soft output viterbi algorithm (SOVA) to update a posteriori information, thereby compensating for the performance loss caused by the approximation in logarithmic conformity computation. Simulation results demonstrate that the proposed algorithm outperforms existing related algorithms in terms of performance. Moreover, both the logarithmic conformity and SOVA have relatively low computational complexity, making the proposed algorithm highly suitable for real-time applications.

Key words: punctured Turbo code; random interleaver; logarithmic conformity; soft output viterbi algorithm; soft decision

Foundation Item(s): Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2024CDJGF-008)

1 引言

信道编码参数盲识别的研究内容是通过对接收到的数据进行分析, 推导出未知的编码参数, 从而为信道解码或后续处理提供关键的技术支持. Turbo 码的性能优越, 已被广泛应用于第三代移动通信技术(3rd Generation mobile communication technology, 3G)、第四代移

动通信技术(4th Generation mobile communication technology, 4G)、卫星通信等数字通信系统中^[1]. Turbo 码盲识别在非协作通信中具有重要研究价值, 其核心问题包括分量编码器与交织器的盲识别^[2]. 通常, 交织器的识别建立在已知分量编码器参数的基础上. 文献[3~5]中已提出多种针对分量编码器识别的方案. 然而, 目前针对交织器检测与识别的研究较为有限. 文献[6]中

所提识别方法依赖于已知交织前后的数据,限制了其应用范围. 文献[7]中所提识别方法与Turbo码译码思想有关,计算候选交织图样带给分量编码器的平均信息熵,并设置门限进行排除,但该方法计算复杂度随着分量编码器的约束长度呈指数级增长. 文献[8]中的方法虽能利用有限域中有理分式的级数展开完成交织图样的识别,但该方法的容错性较低. 上述方案都是基于硬判决信息,然而Turbo码主要应用场景通常具有较大噪声干扰,此时硬判决序列往往包含大量误码,导致理想无误码场景或低误码率场景下的识别方法无法继续使用. 为了提高识别的正确率,文献[9~11]基于软判决信息,并利用校验向量的特征进行交织器的识别. 由于仅基于分量编码器约束长度内的相关位置进行识别,识别过程中产生的错误影响范围有限,增大了算法的抗噪性能,同时具备较低计算复杂度. 然而,随着交织长度的增加,识别过程中产生的错误会导致后续交织图样也无法识别,上述算法不再适用. 基于文献[9],文献[12]采用Gibbs采样法对相关数据进行纠错,虽然提高了算法的容错能力,但也大幅增加了计算复杂度. 为了进一步提高识别正确率,文献[13,14]在识别过程中加入了译码的思想. 其中,文献[13]利用软输入软输出(Soft Input Soft Output, SISO)译码的原理,对文献[7]的方法进行改进,通过BCJR(Bahl Cocke Jelinek Raviv)译码算法对候选图样中不同交织位置进行当前交织关系的验证,计算所得概率最大的交织位置即为当前交织关系中正确的交织图样. 在低信噪比的情况下,该方法相对基于校验关系的算法存在性能提升,同时计算复杂度增加. 文献[14]引入BCJR迭代译码以及小范围遍历两种纠错算法,相对基于校验关系的识别方法进一步提高了识别正确率.

为了提升Turbo码的灵活性与效率,在实际编码过程中通常采用删余方法以提高编码效率. 然而,删余操作使接收端无法获得完整的递归系统卷积码码字,限制了大部分盲识别方法在删余型Turbo码场景中的适用性. 目前关于Turbo码伪随机交织器的盲识别研究较少,而针对删余条件下的伪随机交织器识别的研究更少. 在文献[9]中,刘骏等人提出了一种基于校验关系的识别方法,根据接收到的码字软信息,同时实现了非删余和删余条件下的Turbo码随机交织器盲识别,但该方法的抗噪性存在提升的空间.

综上所述,现有基于校验关系的交织识别算法在低信噪比应用场景下识别正确率有待提升,而基于迭代译码的交织识别算法计算复杂度偏高. 针对上述问题,本文利用基于校验关系的识别方法对通信系统中所截获到的码字软信息进行盲识别,在此基础上引入软输出维特比算法(Soft Output Viterbi Algorithm,

SOVA)译码辅助识别. 通过译码算法对码字信息进行纠错并与校验关系算法相结合,在保证算法实时性的同时也提高了容错性. 本文针对删余Turbo码首先引入了对数符合度概念,其次为了补偿对数符合度取近似产生的损失,提出了采用SOVA更新后验概率进行辅助识别. 仿真结果表明:本文算法能够快速有效地完成删余条件下伪随机交织图样的盲识别,与目前已有的基于校验关系的识别算法相比,该方法在不同参数下均具有大于1 dB的性能增益,并且在截取帧数较少时增益可达约2 dB. 同时该方法具备较高的实时性.

2 问题模型

如图1所示,两个参数相同的递归系统卷积(Recursive Systematic Convolutional, RSC)编码器并行级联组成码率1/3的典型Turbo编码器. 其中,第二个RSC编码器输入经过交织器 π 后得到交织序列, RSC编码器的码率为1/2. 信息序列 x 经交织器处理后生成交织序列 x_π . 随后,序列 x 和 x_π 分别输入两个RSC子编码器,生成校验序列 y' 和 z' . 根据删余矩阵对校验位的元素进行周期性的删除,分别得到 y 和 z . 删余后的序列 y 和 z 与信息序列 x 复用,得到编码序列 (x, y, z) . 随后,使用二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)调制后通过信道传输,信道是均值为0、方差为 σ^2 的加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道,解调后得到软判决序列 (s_x, s_y, s_z) . 假设所有截获Turbo码的码字起点和码字长度为已知信息,并且分量码编码器的参数也为已知信息(可通过文献[3]中算法进行识别),从而 (x, y, z) 序列也为已知信息. 本文拟针对长期演进(Long Term Evolution, LTE)标准下的删余Turbo码进行研究,利用截获的 M 个Turbo码码字的软信息 (s_x, s_y, s_z) 恢复交织器 π .

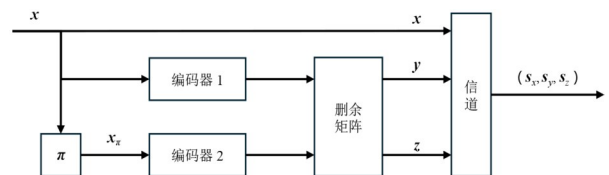


图1 Turbo码编码器

3 交织器识别算法的实现

3.1 算法基本思想

本文所提出的算法是在对数符合度算法^[11]的基础上加以改进的. 为说明本文算法的实现过程,本节基于典型1/2码率RSC码,介绍对数符合度的定义以及交织器识别算法的实现. 下面首先介绍文献[11]中的方法. 对于任何二元域的序列 $m = (m_{k,1}, m_{k,2}, \dots, m_{k,N}) \in \mathbf{F}_2^N$ 都

可用多项式表示为 $\mathbf{m}(D)=m_{k,1}+m_{k,2}D+\dots+m_{k,N}D^{N-1} \in \mathbf{F}_2(D)$. 其中, N 为序列长度. 假设编码器共输入 M 帧码字的信息序列, 其中第 $k(1 \leq k \leq M)$ 帧信息序列为 $\mathbf{x}_k(D)=x_{k,1}+x_{k,2}D+\dots+x_{k,N}D^{N-1}$. 对于 Turbo 码, 信息序列经过伪随机交织器打乱顺序后得到伪随机交织序列 $\mathbf{x}_k^\pi(D)=x_{k,\pi(1)}^\pi+x_{k,\pi(2)}^\pi D+\dots+x_{k,\pi(N)}^\pi D^{N-1}$, 将其作为第二个 RSC 的输入, 对应的输出校验序列为 $\mathbf{z}_k(D)=z_{k,1}+z_{k,2}D+\dots+z_{k,N}D^{N-1}$, 则对于 Turbo 码的第二个 RSC, 每一帧的 $\mathbf{z}_k(D)$ 和 $\mathbf{x}_k^\pi(D)$ 之间都有如下关系:

$$\mathbf{z}_k(D)=\mathbf{x}_k^\pi(D) \cdot \frac{\mathbf{g}_1(D)}{\mathbf{g}_2(D)} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{g}_1(D)=g_{1,0}+g_{1,1}D+\dots+g_{1,m}D^m$ 和 $\mathbf{g}_2(D)=g_{2,0}+g_{2,1}D+\dots+g_{2,m}D^m$ 分别为 RSC 所产生校验序列的前向生成多项式和反馈多项式, 常数 m 为 RSC 的寄存器数量. 式(1)可表示为

$$\pi_t^* = \arg \max_{\pi} \prod_{k=1}^M P \left(\left(\sum_{u=0}^m \oplus x_{k,\pi(t-u)} g_{1,u} \right) \oplus \left(\sum_{u=0}^m \oplus z_{k,t-u} g_{2,u} \right) = 0 \right), \quad \forall k=1, 2, \dots, M \quad (5)$$

由式(5)可知, 要确定时刻 t 的交织关系 π_t^* , 需要计算每一帧在 t 时刻校验方程成立的概率, 以及不同帧对应的概率乘积. 其中, t 时刻校验方程的计算需要用到一

$$\pi_t^* = \arg \max_{\pi} \sum_{k=1}^M \ln \left[\frac{P \left(\left(\sum_{u=0}^m \oplus x_{k,\pi(t-u)} g_{1,u} \right) \oplus \left(\sum_{u=0}^m \oplus z_{k,t-u} g_{2,u} \right) = 0 \right)}{P \left(\left(\sum_{u=0}^m \oplus x_{k,\pi(t-u)} g_{1,u} \right) \oplus \left(\sum_{u=0}^m \oplus z_{k,t-u} g_{2,u} \right) = 1 \right)} \right], \quad \forall t=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

假设第 k 帧在时刻 t 的对数符合度为 $J_{k,t}$, 其定义如下:

$$J_{k,t} = \ln \left[\frac{P \left(\left(\sum_{u=0}^m \oplus x_{k,\pi(t-u)} g_{1,u} \right) \oplus \left(\sum_{u=0}^m \oplus z_{k,t-u} g_{2,u} \right) = 0 \right)}{P \left(\left(\sum_{u=0}^m \oplus x_{k,\pi(t-u)} g_{1,u} \right) \oplus \left(\sum_{u=0}^m \oplus z_{k,t-u} g_{2,u} \right) = 1 \right)} \right], \quad \forall t=1, 2, \dots, N, \forall k=1, 2, \dots, M \quad (7)$$

式(7)中定义的对数符合度表示在一个约束长度内, 交织位置的码元使得码元之间的约束关系成立的似然值. 其中, $J_{k,t}$ 越大, 第 k 帧在时刻 t 的校验方程成立概率越大, 可作为恢复交织位置的依据.

记 $L(X)=\ln(P(X=0)/P(X=1))$, 对式(7)进行化简并求其近似值^[4], 则有:

$$J_{k,t} \approx \prod_{i \in \phi_1} \text{sign}(L(x_{k,\pi(t-i)})) \prod_{j \in \phi_2} \text{sign}(L(z_{k,t-j})) \cdot \min_{i \in \phi_1, j \in \phi_2} (|L(x_{k,\pi(t-i)})|, |L(z_{k,t-j})|) \quad (8)$$

其中, 集合 $\phi_1 = \{i|g_{1,i}=1, i=0, 1, \dots, m\}$, 集合 $\phi_2 = \{j|g_{2,j}=1, j=0, 1, \dots, m\}$. 校验方程成立的概率越大, 式(8)的值则

$$\mathbf{x}_k^\pi(D) \cdot \mathbf{g}_1(D) = \mathbf{z}_k(D) \cdot \mathbf{g}_2(D) \quad (2)$$

对等式左右两侧的多项式进行求和, 可以得到二元域上的零多项式:

$$\mathbf{x}_k^\pi(D) \cdot \mathbf{g}_1(D) \oplus \mathbf{z}_k(D) \cdot \mathbf{g}_2(D) = 0 \quad (3)$$

将原始信息序列 \mathbf{x}_k 通过交织器映射得到的 \mathbf{x}_k^π 代入式(3), 可得:

$$\left(\sum_{u=0}^m \oplus x_{k,\pi(t-u)} g_{1,u} \right) \oplus \left(\sum_{u=0}^m \oplus z_{k,t-u} g_{2,u} \right) = 0, \quad \forall t=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

式(4)即为 RSC 中信息序列和校验序列之间满足的校验方程. 其中, \oplus 和 $\sum \oplus$ 分别代表模 2 加与模 2 求和. 其原理是当前交织关系所对应的实际交织位置下的码元, 能够使得截获的 M 帧码字的软判决序列满足等式(4)的概率最大. 因此, 利用 t 时刻的校验方程可以对当前交织关系所对应的实际交织位置进行估计:

个约束长度内的码字信息. 计算乘积增加了算法的计算复杂度, 考虑转为加法来简化运算. 所以将式(5)作对数运算, 即采用对数似然比运算简化式(5), 可得:

越大.

针对截获的 M 帧信息序列, 定义 t 时刻的平均对数符合度为

$$S_t(M) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M J_{k,t}, \quad \forall t=1, 2, \dots, N \quad (9)$$

综上, 交织器识别问题即可等效为在每一帧的每个时刻遍历搜寻集合 \mathbf{x}_k 中所有元素, 并对 M 帧的对数符合度求平均值. 目的是在每一帧的每个时刻从 \mathbf{x}_k 中挑选到的元素的共同作用下, 使得式(9)值最大. 因此, 针对收到的所有码字, 估计 t 时刻交织位置则转换为求下式的最大值:

$$\pi_t^* = \arg \max_{\pi} \{S_t(M)\}, \quad \forall t=1, 2, \dots, N \quad (10)$$

3.2 交织识别

首先, 本节以 LTE 标准下的 1/2 码率删余 Turbo 码为例, 它根据 LTE 标准下的 1/3 码率 Turbo 码通过删余矩阵 $\mathbf{P}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 得到. 1/2 码率删余 Turbo 码的交织识别思路与 1/3 码率无删余 Turbo 码的交织识别思路类似. 但是, 删余 Turbo 码的信息比特和校验比特之间的关系相对于非删余 Turbo 码需要进一步推导. 在码率 1/2

的情况下,校验序列 \mathbf{z}'_k 经过删余后长度减半,得到 $N/2$ 的序列 \mathbf{z}_k ,即取 \mathbf{z}'_k 中下标为偶数的比特. 利用文献[15]中的算法可推导出删余后约束长度内信息序列和校验序列的关系. 记 $\mathbf{x}^1_{k,\pi}$ 和 $\mathbf{x}^2_{k,\pi}$ 为 $\mathbf{x}_{k,\pi}$ 从第一比特和第二比特分别作为起点,按序每两个比特取一个比特得到的序列. 所以,在 $1/2$ 码率时分段取得的交织信息序列 $\mathbf{x}^1_{k,\pi}$ 和 $\mathbf{x}^2_{k,\pi}$ 与校验序列 \mathbf{z}_k 满足以下关系:

$$\begin{aligned} & \left(\sum_{u=0}^m \oplus x^1_{k,\pi(t-u)} g'_{1,u} \right) \oplus \left(\sum_{u=0}^m \oplus x^2_{k,\pi(t-u)} g'_{2,u} \right) \\ & \oplus \left(\sum_{u=0}^m \oplus z_{k,\pi(t-u)} g'_u \right) = 0, \quad \forall t = 1, 2, \dots, N/2 \end{aligned} \quad (11)$$

根据删余后约束长度内的信息序列和校验序列的关系,可得:

$$\begin{aligned} & x^2_{k,\pi(t-3)} \oplus \left(x^1_{k,\pi(t)} \oplus x^2_{k,\pi(t)} \right) \\ & = \left(x^1_{k,\pi(t-2)} \oplus x^2_{k,\pi(t-2)} \right) \oplus \left(x^1_{k,\pi(t-1)} \oplus x^2_{k,\pi(t-1)} \right) \\ & \oplus z_{k,\pi(t-3)} \oplus z_{k,\pi(t-2)} \oplus z_{k,\pi(t)}, \\ & \quad \forall t = 1, 2, \dots, N/2 \end{aligned} \quad (12)$$

由式(12)可见,在 $t-3$ 时刻下,只能确定当前时刻所对应的两个交织位置 $\{x^1_{k,\pi(t-3)}, x^2_{k,\pi(t-3)}\}$. 但由于在 t 时刻下计算 $J_{k,t}$ 需要用到 $t-3$ 时刻所对应的 $x^2_{k,\pi(t-3)}$,即具体的交织位置 $\pi(2t-6)$,因此,在 t 时刻才能够对 $t-3$ 时刻所对应的实际交织位置进行判定. 同样,只能确定 $t-2$ 时刻所对应的两个交织位置 $\{x^1_{k,\pi(t-2)}, x^2_{k,\pi(t-2)}\}$,和 $t-1$ 时刻所对应的两个交织位置 $\{x^1_{k,\pi(t-1)}, x^2_{k,\pi(t-1)}\}$. 由式(12)可知,在 t 时刻不需要明确知道 $t-2$ 时刻和 $t-1$ 时刻交织位置的具体对应关系,只需要知道 $\{\pi(2t-4), \pi(2t-5)\}$ 与 $\{\pi(2t-2), \pi(2t-3)\}$ 的位置信息. 综上,每次计算对数符合度的作用是确定当前 t 时刻两个交织位置,即 $\{x^1_{k,\pi(t)}, x^2_{k,\pi(t)}\}$ 所对应到 $\{\pi(2t-1), \pi(2t)\}$ 的位置信息,以及确定 $t-3$ 时刻的 $x^1_{k,\pi(t-3)}$ 和 $x^2_{k,\pi(t-3)}$ 分别对应的位置 $\pi(2t-7)$ 和 $\pi(2t-6)$.

为了便于表示,定义 t 时刻交织位置集合的元素为 $\{u, v\}$,定义 $t-3$ 时刻的交织位置元素为 w ,则 t 时刻的平均对数符合度为 $S_{t, [\{u, v\}, w]}(M)$. 当 $\{u, v\}$ 正确对应到 $\{x^1_{k,\pi(t)}, x^2_{k,\pi(t)}\}$ 或 $\{x^2_{k,\pi(t)}, x^1_{k,\pi(t)}\}$ 其中一个,且 w 也正确对应到 $x^2_{k,\pi(t-3)}$ 的情况下, $S_{t, [\{u, v\}, w]}(M)$ 的值总为正数. 否则,当任何一个元素对应错误的时候, $S_{t, [\{u, v\}, w]}(M)$ 的值近似为 0. 每个时刻 t 都需要找到集合 $\{u, v\}$ 和元素 w 以完成识别,识别依据如下:

$$\begin{aligned} & [\{u, v\}, w] = \arg \max_{u, v \in \Omega_t} \left\{ S_{t, [\{u, v\}, w]}(M) \right\}, \\ & \quad \forall t = 1, 2, \dots, N/2 \text{ 且 } w \in \{x^1_{k,\pi(t-3)}, x^2_{k,\pi(t-3)}\} \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $\Omega_t = \{1, 2, \dots, N\} \setminus \{\pi(1), \pi(2), \dots, \pi(2t-2)\}$. 已知信息序列最后六个比特对应的交织位置为 $\pi(N-5), \pi(N-4), \pi(N-3), \pi(N-2), \pi(N-1), \pi(N)$. 由于 LTE 标准下的 $1/2$ 码率删余 Turbo 码约束长度 m 为 3,所以在不传输归零比特的情况下,根据上述方式只能得到 $\{\pi(N-5), \pi(N-4)\}, \{\pi(N-3), \pi(N-2)\}, \{\pi(N-1), \pi(N)\}$ 这三组具体的位置信息. 但是, $\pi(N-5)$ 与 $\pi(N-4), \pi(N-3)$ 与 $\pi(N-2), \pi(N-1)$ 与 $\pi(N)$ 这三对交织位置信息之间是两两无法区分的. 通常, Turbo 码在归零比特上不进行删余,因为归零比特可确保编码器的终止状态归零,帮助解码器更准确地恢复信息比特. 所以,根据 $4m$ 个归零比特的具体信息可以恢复最后六个比特的信息位对应的交织位置.

其次,本节以 LTE 标准下的 $3/7$ 码率删余 Turbo 码为例,上述 $1/3$ 码率 Turbo 码通过删余矩阵 $\mathbf{P}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 可得到 $3/7$ 码率的 Turbo 码,同样对其信息比特和校验比特之间的关系进行推导. 记 $\mathbf{x}^1_{k,\pi}, \mathbf{x}^2_{k,\pi}$ 和 $\mathbf{x}^3_{k,\pi}$ 为 $\mathbf{x}_{k,\pi}$ 以第一、第二和第三比特分别作为起点,按序每三个比特取一个比特得到的序列. 其中, $\mathbf{x}^1_{k,\pi}$ 和 $\mathbf{x}^3_{k,\pi}$ 具有对应的校验位,而 $\mathbf{x}^2_{k,\pi}$ 对应的校验位被删余. 所以,校验序列 \mathbf{z}'_k 经过删余后得到 $2N/3$ 的序列 \mathbf{z}_k . 记 \mathbf{z}^1_k 和 \mathbf{z}^2_k 为 \mathbf{z}_k 以第一比特和第二比特分别作为起点,按序每两个比特取一个比特得到的序列. 所以,在 $3/7$ 码率时分段取得的交织信息序列 $\mathbf{x}^1_{k,\pi}, \mathbf{x}^2_{k,\pi}$ 和 $\mathbf{x}^3_{k,\pi}$ 与校验序列 \mathbf{z}^1_k 和 \mathbf{z}^2_k 满足以下关系:

$$\begin{aligned} & \left(\sum_{u=0}^m \oplus x^1_{k,\pi(t-u)} g'_{1,u} \right) \oplus \left(\sum_{u=0}^m \oplus x^2_{k,\pi(t-u)} g'_{2,u} \right) \\ & \oplus \left(\sum_{u=0}^m \oplus x^3_{k,\pi(t-u)} g'_{3,u} \right) \oplus \left(\sum_{u=0}^m \oplus z^1_{k,\pi(t-u)} g'_{4,u} \right) \\ & \oplus \left(\sum_{u=0}^m \oplus z^2_{k,\pi(t-u)} g'_{5,u} \right) = 0, \quad \forall t = 1, 2, \dots, N/3 \end{aligned} \quad (14)$$

其中,对于每段都需要建立两个校验方程,第一个校验方程用于确定 t 时刻的第一个交织位置 $x^1_{k,\pi(t)}$;第二个校验方程用于确定 t 时刻的后两个交织位置 $\{x^2_{k,\pi(t)}, x^3_{k,\pi(t)}\}$,以及区分 $t-1$ 时刻的 $x^2_{k,\pi(t-1)}$ 和 $x^3_{k,\pi(t-1)}$,分别如下所示:

$$\begin{aligned} & x^1_{k,\pi(t)} = \left(x^1_{k,\pi(t-2)} \oplus x^2_{k,\pi(t-2)} \oplus x^3_{k,\pi(t-2)} \right) \\ & \oplus \left(x^1_{k,\pi(t-1)} \oplus x^2_{k,\pi(t-1)} \oplus x^3_{k,\pi(t-1)} \right) \\ & \oplus \left(z^1_{k,\pi(t-2)} \oplus z^2_{k,\pi(t-2)} \right) \oplus z^1_{k,\pi(t)}, \\ & \quad \forall t = 1, 2, \dots, N/3 \text{ 且 } t \text{ 为奇数} \end{aligned} \quad (15)$$

与

$$\begin{aligned} & \left(x^2_{k,\pi(t)} \oplus x^3_{k,\pi(t)} \right) = x^3_{k,\pi(t-1)} \oplus \left(z^1_{k,\pi(t)} \oplus z^2_{k,\pi(t)} \right) \oplus z^2_{k,\pi(t-1)}, \\ & \quad \forall t = 1, 2, \dots, N/3 \text{ 且 } t \text{ 为偶数} \end{aligned} \quad (16)$$

同理,当 t 为奇数时,定义该时刻需要识别的交织

位置的元素为 i , 当 i 正确对应到 $x_{k,\pi(t)}^1$ 时, $S_{t,i}(M)$ 的值总为正数. 否则, 当 i 对应错误时, $S_{t,i}(M)$ 的值近似为 0. 其识别依据如下:

$$i = \arg \max_{i \in \Omega_t} \{S_{t,i}(M)\}, \quad (17)$$

$\forall t = 1, 2, \dots, N/3$ 且 t 为奇数

其中, $\Omega_t = \{1, 2, \dots, N\} \setminus \{\pi(1), \pi(2), \dots, \pi(3t-3)\}$. 当 t 为偶数时, 定义该时刻交织位置集合的元素为 $\{u, v\}$, 定义 $t-1$ 时刻的交织位置元素为 w , 则 t 时刻的平均对数符合度为 $S_{t, \{u, v, w\}}(M)$. 当 $\{u, v\}$ 正确对应到 $\{x_{k,\pi(t)}^2, x_{k,\pi(t)}^3\}$ 或 $\{x_{k,\pi(t)}^3, x_{k,\pi(t)}^2\}$ 其中一个, 且 w 也正确对应到 $x_{k,\pi(t-1)}^3$ 的情况下, $S_{t, \{u, v, w\}}(M)$ 的值总为正数. 否则, $S_{t, \{u, v, w\}}(M)$ 的值近似为 0. 其识别依据如下:

$$[u, v, w] = \arg \max_{u, v \in \Omega_t} \{S_{t, \{u, v, w\}}(M)\}, \quad (18)$$

$\forall t = 1, 2, \dots, N/3$ 且 t 为偶数, $w \in \{x_{k,\pi(t-1)}^2, x_{k,\pi(t-1)}^3\}$

其中, $\Omega_t = \{1, 2, \dots, N\} \setminus \{\pi(1), \pi(2), \dots, \pi(3t-2)\}$. 由式(16)可得, 3/7 码率 Turbo 码最后偶数时刻所对应的两个交织位置 $\{x_{k,\pi(t)}^2, x_{k,\pi(t)}^3\}$ 也无法进行区分, 同样需要利用归零比特对其进行恢复.

3.3 基于 SOVA 辅助的概率更新

为了降低截获的码字软信息序列误码率, 可以通过译码算法对其进行后验概率的更新, 正确性更高的软信息序列可以为交织关系的识别带来性能增益. BCJR 及 SOVA 皆为 SISO 算法. BCJR 是基于码字网格图的软输出译码算法, 其作用是让比特错误率达到最小值, 但计算量大且硬件实现复杂度高. SOVA 是软输出维特比算法, 这种算法不仅能得出最大似然路径, 而且能对输入的软信息进行更新得到后验概率, 译码时延相对 BCJR 较小且复杂度较低, 但译码性能相对 BCJR 有损失. 为了避免大量乘法运算, 实际应用中的常用译码算法为 SOVA、Log-BCJR 与 Max-Log-BCJR.

为了在复杂情况下实现更好的容错性能且尽量降低算法的复杂度, 本节首先提出一种基于 SOVA 译码的数据预处理方式. 通过 SOVA 更新 \mathbf{x} 的后验概率再计算对数符合度, 能够更加充分地利用第一个 RSC 的接收数据, 再应用到第二个 RSC 以进行交织识别.

3.4 算法复杂度分析

通过分析算法的推导过程与实现步骤可以看出, 算法的主要计算开销集中在采用 SOVA 译码算法进行后验概率更新的部分, 以及对数符合度的计算部分, M 为实验中截获的码字个数, N 为交织长度. 对数符合度的计算部分涵盖了对数似然值的比较以及对数符合度的求和过程. 由 3.2 节可知, 删余方式不同导致交织识

别过程不同, 因此不同码率下的交织恢复算法复杂度需要分别进行分析. 首先, 对 1/2 码率 Turbo 码进行算法复杂度分析. 每个时刻 t 都需要找到当前时刻的两个交织位置集合, 以及完成对 $t-3$ 时刻交织位置的确定. 假设 t 时刻之前的所有交织图样关系已经识别结束, 则对于满足 t 时刻交织关系的交织图样识别需要进行 $M \cdot (N-2t+2) \cdot (N-2t+1) + 1$ 次的对数似然值比较, 以及 $(N-2t+2) \cdot (N-2t+1)$ 次的求和. 每一步的计算复杂度可近似认为与 M 成线性关系, 与 N^2 成线性关系. 上述部分共需要 $N/2$ 步完成, 所以, 关于对数符合度部分的计算复杂度是 $O(N^3 M)$. 利用文献[9]的算法对删余 Turbo 码进行识别也需要 $N/2$ 步, 每一步的计算复杂度为 $O(N^2 M m)$, 因此, 算法总计算复杂度为 $O(N^3 M m)$. 本文算法在校验方程的计算部分(对数符合度)与文献[9]算法的计算复杂度相当, 但计算方法更加简便, 对数符合度的求取仅仅需要提取符号和比较大小. 本文算法基于校验方程计算部分额外添加了译码辅助部分. SOVA、Log-BCJR 与 Max-Log-BCJR 的计算复杂度如表 1 所示, 其中 m 为 RSC 寄存器的个数. 由表 1 可知, SOVA 译码的计算量最小, 约为其他译码算法的一半, 其复杂度为 $O(2^m)$. 在每个时刻都需要对截取到的 M 个码字中所有信息位采用 SOVA 译码以进行后验概率更新, 且 RSC 码信息位长度为 N . 所以, 本文算法中译码辅助部分的计算复杂度为 $O(2^m N M)$, 即总的计算复杂度为 $O(2^m N M + N^3 M m)$. 其次, 对 3/7 码率 Turbo 码进行算法复杂度分析. 在 3/7 码率 Turbo 码的校验方程计算部分中: 当 t 为偶数时, 需要找到当前时刻其中两个交织位置的集合, 以及完成对 $t-1$ 时刻交织位置的确定, 所以偶数时刻每一步的计算复杂度与上述 1/2 码率 Turbo 码一致, 也为 $O(N^2 M m)$; 当 t 为奇数时, 需要找到当前时刻的第一个交织位置, 其算法复杂度约为偶数时刻的 $1/N$, 并且奇数与偶数时刻都需要 $N/3$ 步来完成校验方程计算部分. 所以, 3/7 码率 Turbo 码的校验方程计算部分的复杂度与 1/2 码率 Turbo 码一致, 均为 $O(N^3 M m)$. 并且, 在译码辅助部分, 3/7 码率 Turbo 码也需要对 N 个信息位进行后验概率更新. 所以, 基于文献[9]算法和本文算法, 3/7 码率 Turbo 码的总计算复杂度与 1/2 码率 Turbo 码相同. 由于本文所采用 RSC 的约束长度 m 仅为 3, 故其计算复杂度相比文献[9]中的算法并没有增加许多.

表 1 译码算法计算量比较

操作	SOVA	Log-BCJR	Max-Log-BCJR
加法	$2 \times 2^m + 8$	$15 \times 2^m + 9$	$10 \times 2^m + 11$
乘/除法	8	8	8
求最大值	$2^m + 3(m+1)$	$5 \times 2^m - 2$	$5 \times 2^m - 2$
查找表	0	$5 \times 2^m - 2$	0

4 仿真及分析

本节选用 LTE 标准下的 Turbo 码进行算法性能验证,两个分量码都是码率为 1/3 的 RSC 码,且具有相同的结构. 其中,校验序列的前向生成多项式为 $g_1(D)=1+D+D^3$,反馈多项式为 $g_2(D)=1+D^2+D^3$. 该 Turbo 码经 $P_1=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 和 $P_2=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 进行删余后分别得到 1/2 码率和 3/7 码率的删余 Turbo 码. 利用文献[15]中的算法进行推导:码率为 1/2 时,删余后 $g'_1(D)=1+D+D^2$ 、 $g'_2(D)=1+D+D^2+D^3$ 、 $g'_3(D)=1+D^2+D^3$;码率为 3/7 且 t 为奇数时,删余后 $g'_1(D)=1+D+D^2$ 、 $g'_2(D)=g'_3(D)=D+D^2$ 、 $g'_4(D)=1+D^2$ 、 $g'_5(D)=D^2$;码率为 3/7 且 t 为偶数时,删余后 $g'_2(D)=g'_4(D)=1$ 、 $g'_3(D)=g'_5(D)=1+D$. 针对信道编码参数的盲识别,常见的还有基于余弦符合度(Cosine Conformity, CC)的算法^[5]. 由于在本文的研究场景下,基于余弦符合度的算法性能均略差于基于校验方程符合度的算法^[9],所以,在实验部分主要选用后者与本文算法进行对比,在部分参数下加入基于余弦符合度的实验. 为了便于说明,接下来用“LD”表示校验方程符合度算法,用“LLR”表示对数符合度算法,用“SNR”表示信噪比. 其中,信噪比被定义为 $10 \log_{10}(1/2\sigma^2)$. 除非特别说明,仿真中的交织关系为计算机随机生成,设置蒙特卡罗仿真次数为 1 000 次,信噪比间隔 0.1 dB 取值.

4.1 算法有效性验证

表 2 展示了信息序列在引入或不引入 SOVA 译码的情况下的互信息 I . 其中 $I \in [0, 1]$,数值越高表示信息越可靠. 以信息长度 $N=128$,截取帧数 $M=50$ 为例,进行了三组仿真对比,包括对码率 1/2 和 3/7 的 Turbo 码分量码进行 SOVA 后验概率更新,以及无 SOVA 译码操作. 结果表明:引入 SOVA 译码后,信息序列的后验概率更为可靠;同时,在较低码率下,用于 SOVA 译码的校验位数量更多,进一步提高了信息序列的可靠性.

表 2 码字中信息序列的互信息 I

SNR/dB	-1	0	1	2	3	4
SOVA(码率 1/2)	0.711	0.863	0.956	0.996	0.999	1
SOVA(码率 3/7)	0.841	0.919	0.979	0.998	0.999	1
无 SOVA 译码	0.657	0.736	0.809	0.873	0.924	0.960

图 2 和图 3 给出了不同译码辅助方式结合不同校验关系识别算法的性能. 针对 1/2 码率和 3/7 码率的删余 Turbo 码均设置两组仿真参数进行算法对比,分别是信息长度 $N=64$ 与截取帧数 $M=30$,以及信息长度 $N=256$ 与截取帧数 $M=80$. 从已有的结论可知,基于 LLR 的算法^[11]相对于基于 LD 的算法^[9]存在性能损失,这是因为采用了近似方法代替原有计算,导致部分软判决

信息未被保留. 从图 2 和图 3 的仿真结果均可以看出:在截取帧数较多,即 $M=80$ 时,SOVA/Log-BCJR/Max-Log-BCJR 结合 LLR 的方案相对于 SOVA/Log-BCJR/Max-Log-BCJR 结合 LD 的方案没有产生性能损失;在截取帧数较少,即 $M=30$ 时,SOVA/Log-BCJR/Max-Log-BCJR 结合 LLR 的方案相对于 SOVA/Log-BCJR/Max-Log-BCJR 结合 LD 的方案反而有一定的性能提升. 这是因为在截取帧数较少时,数据量少导致了数值不稳定. 基于 LLR 的算法本质是求取校验方程成立的似然值,而基于 LD 的算法是根据概率进行计算,得到的结果是一个绝对值小于等于 1 的数,相比于似然值其幅值更小,更容易受到错误数据的影响而恶化识别性能. 因此,本文选用其中复杂度最低的方案,即 SOVA 结合 LLR 进行交织器识别.

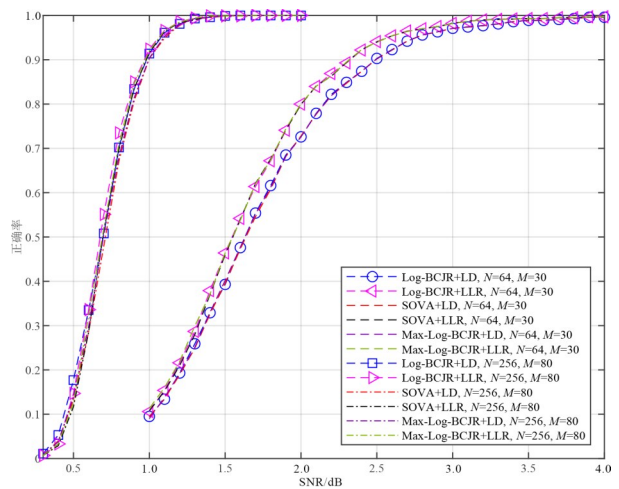


图 2 译码辅助方式和校验关系识别算法对识别率的影响(码率为 1/2)

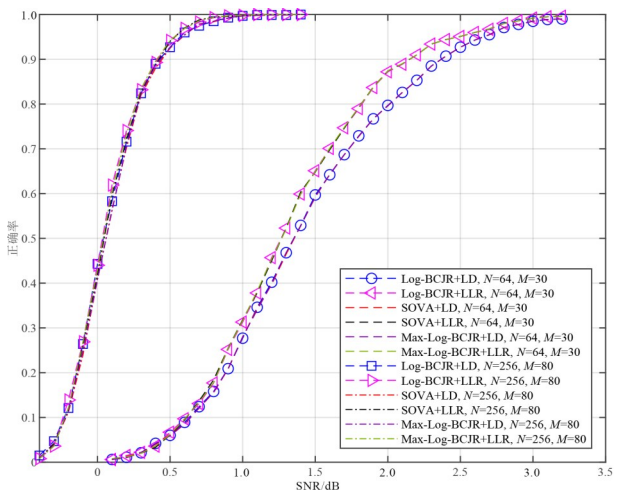


图 3 译码辅助方式和校验关系识别算法对识别率的影响(码率为 3/7)

图 4 给出了本文算法中交织位置与非交织位置的平均对数符合度. 其中,码率为 1/2,信息长度 $N=128$,

截取帧数 $M=100$. 从图 3 的仿真结果可以看出, 当 $\{u, v\}$ 正确对应到 $\{\pi(2t-1), \pi(2t)\}$ 或 $\{\pi(2t), \pi(2t-1)\}$ 其中一组交织位置, 且 w 也正确对应到 $\pi(2t-6)$ 时, 平均对数符合度 $S_{z, \{u, v, w\}}(M)$ 总为正值, 且与信噪比呈正相关; 当 $\{u, v\}$ 或 w 任意一个对应到错误交织位置时, 平均对数符合度 $S_{z, \{u, v, w\}}(M)$ 随着噪声的变化数值依然稳定在零值附近. 因此, 本文所采用方案对于交织图样识别具备有效性.

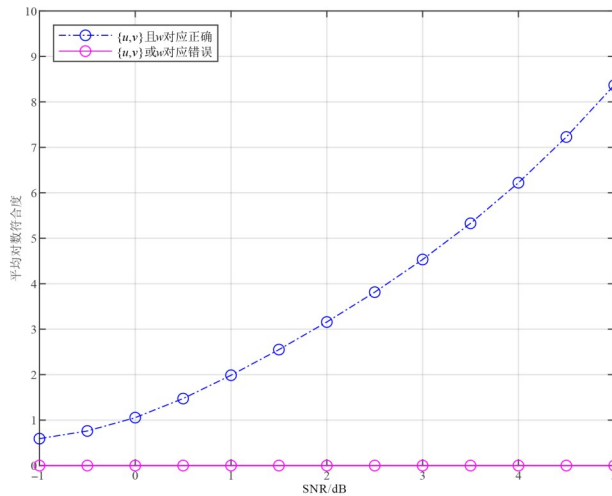


图4 算法的有效性验证

4.2 算法容错性分析

交织长度与截获码字数目是影响算法识别率的主要因素, 其分别对应于信息长度 N 与帧数 M . 因此, 我们针对这两个参数对算法进行仿真, 观察识别率的变化. 首先, 设定不同信息长度 N , 针对相同帧数 M , 统计算法识别出完整交织图样的成功率; 其次, 设定不同帧数 M , 针对相同信息长度 N , 统计算法识别出完整交织图样的成功率.

图 5 反映了信息长度 N 与算法识别正确率的关系. 其中, N 分别为 64、128、256、512, 帧数 M 为 50. 图 6 反映了帧数 M 与算法识别正确率的关系. 其中, M 分别为 100、120、150、200, 信息长度 N 为 128. 由图可知, 帧数 M 不变时, 识别成功率会随着信息长度 N 的增大而下降; 这是由于本算法采用逐次恢复的方法, N 增大时, 需要识别的交织长度也随之增大, 后续交织图样的识别结果会受到前面时刻交织图样更多的干扰, 导致识别后续交织图样的难度也相应增加. 而信息长度 N 不变时, 识别成功率会随着帧数 M 的增大而上升; 这是因为截获数据量的增加使得平均对数符合度更加稳定可靠, 异常数据造成的影响较小, 因此更不容易对符合当前校验关系的正确交织位置产生误判. 并且, 从图 5 和图 6 均可以看出, 在相同条件下, 码率为 3/7 的识别正确

率比码率为 1/2 的更高. 因为在低码率的情况下, 校验序列存在更多冗余信息, 在译码辅助和校验方程计算部分都更有优势.

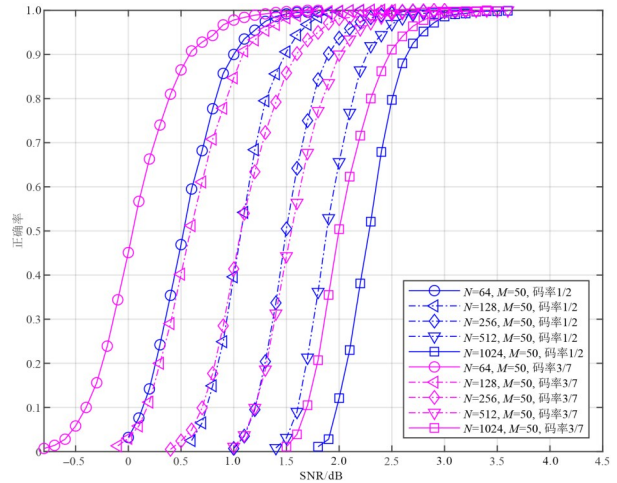


图5 信息长度对算法识别率的影响

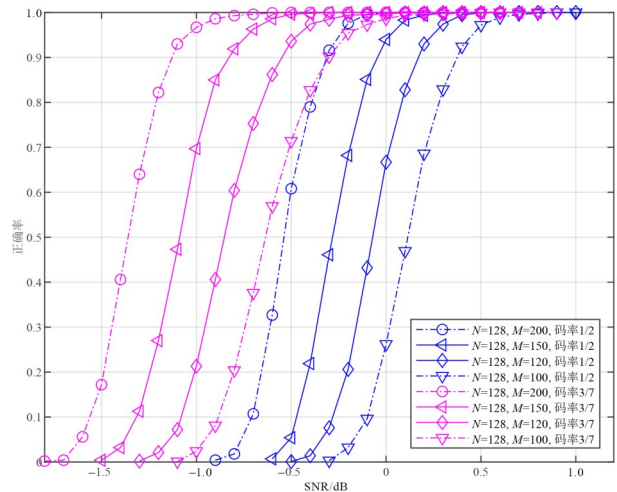


图6 截取帧数对算法识别率的影响

4.3 本文算法与其他算法比较

图 7 和图 8 说明了本文算法与文献[9]中算法在相同参数下的识别正确率的表现. 图 7 中的仿真码率为 1/2, 设置四组仿真参数进行算法对比, 分别是信息长度 $N=128$, 截取帧数为 $M=60$ 和 $M=300$; 信息长度 $N=1024$, 截取帧数 $M=80$; 信息长度 $N=256$, 截取帧数 $M=500$. 由图可知, 在截取帧数较大的情况下 ($M=300$ 和 $M=500$), 本文算法相比于文献[9]中算法分别有约 1.3 dB 与 1.1 dB 的性能提升; 在截取帧数较小的情况下 ($M=60$ 和 $M=80$), 本文算法相比于文献[9]中算法均有约 2 dB 的性能提升. 图 8 中的仿真码率为 3/7, 设置四组仿真参数进行算法对比, 分别是信息长度 $N=128$, 截取帧数为 $M=300$ 和 $M=500$; 信息长度 $N=256$, 截取

帧数 $M=80$; 信息长度 $N=512$, 截取帧数 $M=300$. 由图可知, 在截取帧数较大的情况下 ($M=300$ 和 $M=500$), 本文算法相比于文献[9]中算法分别有约 1.5 dB 与 1.3 dB 的性能提升; 在截取帧数较小的情况下 ($M=80$), 本文算法相比于文献[9]中算法有约 1.8 dB 的性能提升. 并且由图 7 和图 8 可知, 在不同参数下, 文献[9]中算法相比文献[5]中算法均有约 0.1 dB 的增益. 综上, 在不同码率下, 当截取帧数较少时, 本文算法与文献[9]中算法的性能差距更加明显. 主要原因在于, 数据量较小导致数值不稳定, 且基于 LLR 的算法结果幅值更大, 相较于基于 LD 的算法, 对错误数据的敏感性更低, 因而性能下降较少.

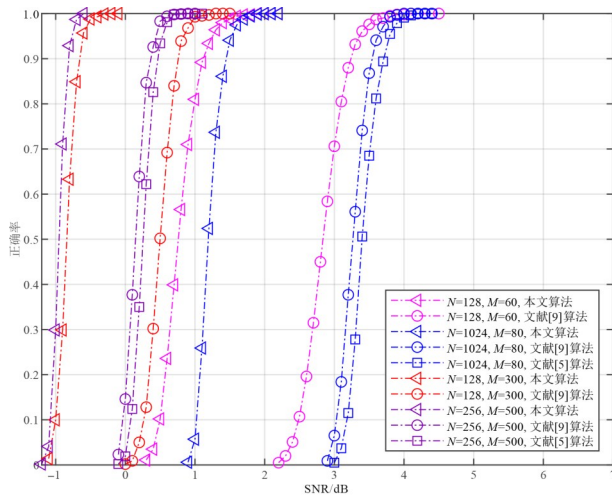


图7 不同算法性能对比(码率为1/2)

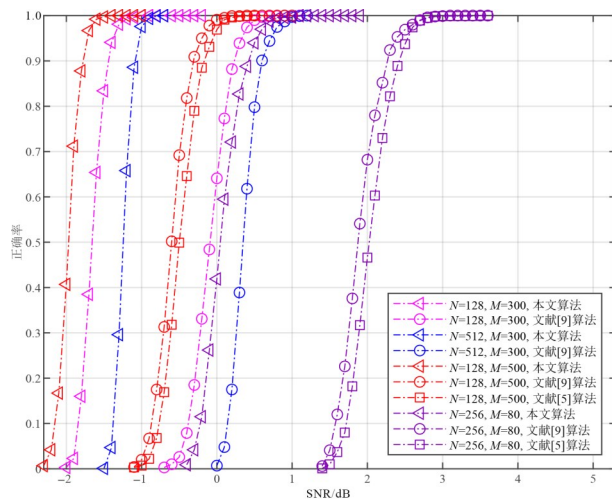


图8 不同算法性能对比(码率为3/7)

表3展示了本文算法与文献[9]中算法在不同信噪比下完全识别出交织图样所需的最小帧数 M , 仿真码率为1/2. 可以看出, 随着信噪比的增大, 信息的可靠性增加, 不同算法所需数据量均在减少. 同样, 由于SOVA

更新后验概率提高了信息序列软判决信息的正确性, 基于相同信噪比进行完整交织图样识别的情况下, 本文算法比文献[9]中算法所需最小帧数更少. 表4展示了本文算法在不同码率和不同信噪比下完全识别出交织图样所需的最小帧数 M . 可以看出, 在其他参数都相同的情况下, 码率为3/7时所需数据量比码率为1/2时少, 因为此时接收到的软判决序列中存在更多冗余信息, 在译码辅助更新和校验方程计算部分都更有优势, 故所需最小帧数更少. 其次, 从表3和表4中均可以看出, 由于信息长度 N 的增大, 前面时刻交织识别的累加错误会对后面时刻的交织识别结果产生干扰, 所以在相同信噪比下, 当 N 增加时, 不同参数的实验中所需数据量都呈增加趋势.

表3 本文算法与文献[9]算法在不同信噪比下完全识别出交织图样所需最小帧数 M

		SNR/dB					
		0	1	2	3	4	5
$N=64$	本文算法	140	77	50	40	33	29
	LD	838	308	170	91	48	40
$N=512$	本文算法	287	132	68	54	43	38
	LD	1 090	487	218	125	79	60

表4 本文算法在不同码率和不同信噪比下完全识别出交织图样所需最小帧数 M

		SNR/dB					
		0	1	2	3	4	5
$N=128$	3/7 码率	124	74	54	39	33	29
	1/2 码率	200	93	58	44	35	31
$N=256$	3/7 码率	131	83	60	43	34	32
	1/2 码率	271	112	64	51	38	33

5 结束语

本文针对1/2码率和3/7码率的删余Turbo码的随机交织盲识别进行研究, 利用SOVA更新后验信息以弥补对数符合度近似计算产生的性能损失. 仿真结果表明, 与现有算法相比, 本文算法具有更优异的性能, 同时也具备较高的实时性.

随着码率变高, Turbo码需要删余的比特数增多, 接收到的码字结构将更加不完整, 已知的约束关系会变得更少, 导致识别变得更为困难. 后续我们将进一步研究更高码率删余Turbo码的交织器盲识别方案.

参考文献

- [1] MUKHTAR H, AL-DWEIK A, SHAMI A. Turbo product codes: Applications, challenges, and future directions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 3052-3069.
- [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. (in Chinese)
- [3] YU P D, LI J, PENG H. A least square method for parameter estimation of RSC sub-codes of turbo codes[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(4): 644-647.
- [4] HAGENAUER J, OFFER E, PAPKE L. Iterative decoding of binary block and convolutional codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1996, 42(2): 429-445.
- [5] WU Z J, ZHANG L M, ZHONG Z G. A maximum cosinoidal cost function method for parameter estimation of RSC turbo codes[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(3): 390-393.
- [6] BARBIER J. Reconstruction of turbo-code encoders[C]// Digital Wireless Communications VII and Space Communication Technologies. SPIE, 2005, 5819: 463-473.
- [7] CLUZEAU M, FINIASZ M, TILLICH J P. Methods for the reconstruction of parallel turbo codes[C]//2010 IEEE International Symposium on Information Theory. Piscataway: IEEE, 2010: 2008-2012.
- [8] CÔTE M, SENDRIER N. Reconstruction of a turbo-code interleaver from noisy observation[C]//2010 IEEE International Symposium on Information Theory. Piscataway: IEEE, 2010: 2003-2007.
- [9] 刘骏, 李静, 彭华. 基于校验方程平均符合度的 Turbo 码交织器估计[J]. 电子学报, 2016, 44(5): 1213-1218.
LIU J, LI J, PENG H. Estimation of Turbo-code interleaver based on average conformity of parity-check equation[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(5): 1213-1218. (in Chinese)
- [10] 任亚博, 张健, 刘以农. 高误码率下 Turbo 码交织器的恢复方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(8): 1926-1930.
REN Y B, ZHANG J, LIU Y N. Reconstruction of turbo-code interleaver at high bit error rate[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(8): 1926-1930. (in Chinese)
- [11] 吴昭军, 张立民, 钟兆根. 低信噪比下随机交织器识别[J]. 电讯技术, 2018, 58(1): 52-58.
WU Z J, ZHANG L M, ZHONG Z G. Blind recognition of random interleaver at low SNR[J]. Telecommunication Engineering, 2018, 58(1): 52-58. (in Chinese)
- [12] 陈泽亮, 李静, 彭华, 等. 利用 Gibbs 采样进行优化的 Turbo 码交织器识别[J]. 电子学报, 2018, 46(1): 15-23.
CHEN Z L, LI J, PENG H, et al. An optimization method using Gibbs sampler for turbo-code interleaver identification[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(1): 15-23. (in Chinese)
- [13] TILLICH J P, TIXIER A, SENDRIER N. Recovering the interleaver of an unknown turbo-code[C]//2014 IEEE International Symposium on Information Theory. Piscataway: IEEE, 2014: 2784-2788.
- [14] 李卓伦, 韩卓茜. 利用多种纠错方式进行优化的 Turbo 码交织器识别[J]. 电子学报, 2021, 49(2): 239-247.
LI Z L, HAN Z X. An optimization method using multiple error correction for Turbo-code interleaver identification[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(2): 239-247. (in Chinese)
- [15] SHEN B Z, PATAPOUTIAN A, MCEWEN P A. Punctured recursive convolutional encoders and their applications in turbo codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(6): 2300-2320.

作者简介



李晓丹 女, 1998 年出生于福建省福州市. 现为重庆大学计算机学院博士研究生. 主要研究方向为信道编码及其盲识别.
E-mail: lxd@stu.cqu.edu.cn



刘锐 男, 1995 年出生于重庆市. 现为重庆大学计算机学院博士研究生. 主要研究方向为编码分布式计算及信道编码.
E-mail: liurui_cs@cqu.edu.cn



黎勇 男, 1982 年出生于重庆市. 现为重庆大学教授、博士生导师. 主要研究方向为信息编码理论及应用、计算机视觉、医学图像处理等. 中国电子学会会员编号: E190130735M.
E-mail: yongli@cqu.edu.cn