

利用多种纠错方式进行优化的 Turbo 码交织器识别

李卓伦, 韩卓茜

(解放军战略支援部队信息工程大学, 河南郑州 450001)

摘要: 针对现有基于校验关系的 Turbo 码交织器识别算法在低信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)时适应性较弱以及识别过程中容易出现差错传播的问题, 为了进一步提升交织识别的容错性与实时性, 在基于最大序列相关识别算法的基础上加入迭代译码和小范围遍历两种纠错算法, 更加充分的利用了接收数据的同时增强了抗误码能力. 仿真结果表明, 加入纠错算法使得原有算法的交织识别性能明显改善, 相同条件下完成全部交织参数识别所需数据量仅需原有的 1/3; 在相同数据量的条件下实现全部交织参数识别时的 SNR 增益大于 2dB. 此外, 基于译码纠错的方法具有通用性, 同样适用于其他基于校验关系的识别算法.

关键词: Turbo 码; 随机交织; 最大互相关; 译码; 纠错

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)02-0239-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20200575

An Optimization Method Using Multiple Error Correction for Turbo-Code Interleaver Identification

LI Zhuo-lun, HAN Zhuo-xi

(PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: The existing algorithms based on parity-check relationship in the recognition of interleaver for Turbo codes have weak adaptability at low signal-to-noise ratio(SNR) and are prone to "error propagation" in the recognition process, In order to further improve the fault tolerance and real time of interleaving recognition, we propose two error correction algorithms based on the maximum sequence correlation recognition algorithm, including iterative decoding and small traversal, which make full use of the received data and enhance the error resilience. Simulation results show that the performance of the improved algorithm is obviously better than the original algorithm by adding error correction algorithm, and it only needs 1/3 of the data to complete the identification of all the interleaved parameters under the same conditions and has more than 2dB gain to achieve the identification of all the interleaved parameters under the condition of the same amount of data. In addition, the method based on decoding error correction is universal, which is also applied to other recognition algorithms of parity-check relationship.

Key words: Turbo-code; random interweaving; maximum sequence correlation; decoding; error correction

1 引言

信道编码参数识别^[1]是在编码参数未知的情况下, 通过分析接收数据识别编码参数. Turbo 码是信道编码中一类性能较好的编码方案, 广泛用于现代数字通信系统中, 因此对其参数的识别具有重要意义. 针对 Turbo 码的分析识别主要包括分量编码器和交织器两

方面, 目前大部分算法集中于分量编码器^[2-4]的识别, 而对于交织器的识别大多局限于卷积交织和分组交织, 针对随机交织的研究相对较少.

Turbo 码随机交织识别的算法一般采取从前到后逐步识别, 现有的方法可以分为基于校验关系^[5-10]的识别方法和基于译码^[11-14]的识别方法. 文献[5~7]利用编码比特间的校验关系分别使用接收解调的硬判决

和软判决数据对交织关系识别,基于校验关系符合度的方法仅依赖于几个已识别的交织位置,计算复杂度低,但是随着交织长度的增加,算法的性能会急剧恶化.文献[8]在基于校验关系符合度的基础上提出基于对数校验关系符合度,以较少识别性能的损失降低了计算复杂度.文献[9]在文献[7]的基础上利用 Gibbs 样本法对相关数据进行纠错,在一定程度上改善了算法的容错性,但大幅度增加了算法的计算复杂度.文献[10]使用 Gibbs 采样预估值对数似然比通过最大序列相关性进行识别,该算法在现有基于校验关系算法中性能最优,但在低 SNR 下的识别依赖于较大的数据量.文献[11]利用译码后软输出的相关性,同硬判决译码算法相比提高了容错性,但是没有得到优于校验关系算法的结果.文献[12]引入译码状态概率分布熵的概念,将熵分布最好的交织位置作为识别结果,该方法性能低于校验关系法且计算复杂度高.文献[13]对文献[12]进行了改进,利用 BCJR 译码计算各个位置满足当前交织关系的概率,概率最大的位置为当前交织关系,该方法利用软输入软输出(Soft Input Soft Output, SISO)译码的原理,在低 SNR 情况下性能优于校验关系算法,但计算复杂度较高.文献[14]在文献[13]的基础上加入了纠错方法,牺牲复杂度来换取识别性能的提高,在现有方案中具有最优识别性能.综上所述,现有基于校验方程的交织识别算法不满足高容错的实际需求,而基于迭代译码的交织识别算法虽然性能更优异,但计算复杂度较高.本文在基于校验关系的识别方法上加入迭代译码以及小范围遍历两种纠错算法,将译码纠错与校验关系算法相结合,极大的提高了算法的容错性与实时性.仿真结果表明,与现有的基于校验关系的识别算法相比本文算法的性能得到了明显提高.

2 问题模型

典型的 Turbo 码编码器结构如图 1 所示,其由两个相同码率的递归系统卷积码(Recursive Systemic Codes, RSC)编码器通过交织器分开并行级联而成.信息序列 x 经交织器 π 后得到交织后的信息序列 x_π . x 和 x_π 分别经过两个 RSC 子编码器得到校验序列 y 和 z . 信息序列 x 以及校验序列 y 和 z 经映射及 AWGN 信道传输(假设映射为 BPSK,即 $0 \leftrightarrow +1, 1 \leftrightarrow -1$),最后接收端经过 SISO 解映射后得到对应的软判决序列 a, b, c . 现假设 Turbo 码的 RSC 参数已经识别(可由文献[3]获得),同时接收数据已正确地分为三路且每帧编码序列的起点和长度已知.假设接收到 M 帧数据,记为 $\{a_k, b_k, c_k\}$,其中 $k = [1, 2, \dots, M]$. 本文以未删余 Turbo 码(码率为 $1/3$)为例,利用接收的 M 帧序列恢复交织器 π .

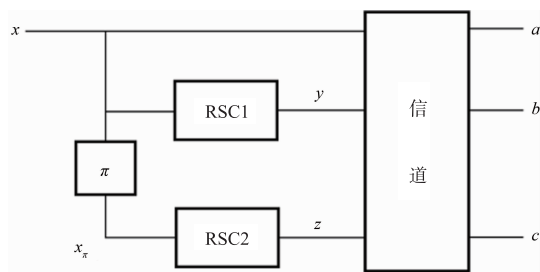


图1 Turbo码编码器

3 交织识别

3.1 基于序列最大互相关的校验关系识别

本文算法是在最大序列互相关算法的基础上进行的改进,下面首先简单介绍文献[10]中的方法.假设交织后的第 k 帧信息序列为 $x_{\pi(k)} = (x_{\pi(k),1}, x_{\pi(k),2}, \dots, x_{\pi(k),N})$,其中 $k = 1, 2, \dots, M, N$ 为序列长度(交织长度),序列 $x_{\pi(k)}$ 与 $z_{(k)}$ 之间有如下关系:

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

g_1 和 g_2 分别为前向生成多项式和反馈多项式, \oplus 和 $\sum \oplus$ 分别表示模 2 加和模 2 求和.

在第 k 帧数据中,标记:

$$A_{k,-\pi(t)} = [a_{k,\pi(t)}, a_{k,\pi(t-1)}, \dots, a_{k,\pi(t-m)}] \quad (2)$$

$$C_{k,t} = [c_{k,t-1}, c_{k,t-1}, \dots, c_{k,t-m}] \quad (3)$$

第 k 帧的 t 时刻 $x_{k,\pi(t)}$ 取值为 0, 1 的条件概率为:

$$P_c(x_{k,\pi(t)} = v) = P(x_{k,\pi(t)} = v | A_{k,-\pi(t)}, C_{k,t}) \quad (4)$$

式中 $v = 0, 1$, 利用贝叶斯公式将式(4)展开:

$$P_c(x_{k,\pi(t)} = v) = \frac{P(x_{k,\pi(t)} = v) P(C_{k,t} | A_{k,-\pi(t)}^v)}{P(C_{k,t} | A_{k,-\pi(t)})} \quad (5)$$

式中, $A_{k,-\pi(t)}^v = [v, a_{k,\pi(t-1)}, a_{k,\pi(t-2)}, \dots, a_{k,\pi(t-m)}]$.

为了简化运算,引入对数似然比来间接运算:

$$llr_c(x_{k,\pi(t)}) = \ln \left(\frac{P_c(x_{k,\pi(t)} = 0)}{P_c(x_{k,\pi(t)} = 1)} \right) = \ln \left(\frac{p(C_{k,t} | A_{k,-\pi(t)}^0)}{p(C_{k,t} | A_{k,-\pi(t)}^1)} \right) \quad (6)$$

式中, $llr_c(\cdot)$ 为对数似然比.

当 $i = t - m, \dots, t$ 时, $p(c_{k,i} | A_{k,\pi(t)}^0) = p(c_{k,i} | A_{k,\pi(t)}^1)$, 故式(6)可以进一步化简为:

$$llr_c(x_{k,\pi(t)}) = \ln \left(\frac{p(c_{k,t} | A_{k,\pi(t)}^0)}{p(c_{k,t} | A_{k,\pi(t)}^1)} \right) \quad (7)$$

由式(7)及文献[15]关于对数似然比的结论可知:码元 $x_{k,\pi(t)}$ 的条件对数似然比为 $\eta_{k,t}^v$ 为:

$$\begin{aligned} \eta_{k,t}^v &= llr_c(z_{k,t} | A_{k,\pi(t)}^v, C_{k,t-1}) \\ &= 2 \tanh^{-1} \left(\prod_{j \in \varphi_1} llr_c(x_{k,\pi(t-j)}^v) \prod_{j \in \varphi_2} llr_c(z_{k,t-j}) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $\varphi_1 = \{j = 0, \dots, m | g_{1,j} = 1\}$, $\varphi_2 = \{j = 1, \dots, m$

$\{g_{2,j} = 1\}$.

设传输信道为 AWGN 信道, 调制方式为 BPSK, 载波幅度为 A , 则:

$$llr(x_{k,\pi(t-j)}^v) = -2Aa_{k,\pi(t-j)}^v/\sigma^2 \quad (9)$$

$$llr(z_{k,t-j}) = -2Ac_{k,t-j}/\sigma^2 \quad (10)$$

式中, σ^2 为白噪声方差.

式(8)可进一步转化为条件概率:

$$P(z_{k,t} = 1 | A_{k,\pi(t)}^v, C_{k,-t}) = 1/(1 + e^{\eta_{k,t}^v}) \quad (11)$$

$$P(z_{k,t} = 0 | A_{k,\pi(t)}^v, C_{k,-t}) = e^{\eta_{k,t}^v}/(1 + e^{\eta_{k,t}^v}) \quad (12)$$

$$P(c_{k,t} | A_{k,\pi(t)}^v, C_{k,-t}) = \frac{P(c_{k,t} | z_{k,t} = 1)}{1 + e^{\eta_{k,t}^v}} + \frac{P(c_{k,t} | z_{k,t} = 0)e^{\eta_{k,t}^v}}{1 + e^{\eta_{k,t}^v}} \quad (13)$$

式中:

$$P(c_{k,t} | A_{k,\pi(t)}^v, C_{k,-t}) = \frac{P(c_{k,t} | z_{k,t} = 1)}{1 + e^{\eta_{k,t}^v}} + \frac{P(c_{k,t} | z_{k,t} = 0)e^{\eta_{k,t}^v}}{1 + e^{\eta_{k,t}^v}} \quad (14)$$

将式(13)和(14)带入式(7)可得:

$$llr_c(x_{k,\pi(t)}) = \max(-2c_{k,t}/\sigma^2 + \eta_{k,t}^0, 0) + \max(\eta_{k,t}^1, 0) - \max(-2c_{k,t}/\sigma^2 + \eta_{k,t}^1, 0) - \max(\eta_{k,t}^0, 0) \quad (15)$$

由式(15) $x_{k,\pi(t)}$ 的条件对数似然比可得到每一帧数据交织位置上码元似然比的预估值为:

$$ll\hat{r}(x_{\pi(t)}) = [ll\hat{r}(x_{1,\pi(t)}), \dots, ll\hat{r}(x_{M,\pi(t)})] \quad (16)$$

遍历可能的交织位置, 将所有数据帧上同一位置的对数似然比序列与其预估序列做互相关运算.

$$cor(t, i) = \sum_{j=1}^M ll\hat{r}(x_{j,\pi(t)}) llr(x_{j,i})/M \quad (17)$$

式中, $i \in \{1, 2, \dots, N\} \setminus \{\pi(1), \pi(2), \dots, \pi(t-1)\}$.

$$\pi(t) = \arg \max_{i=1, \dots, N} (cor(t, i)) \quad (18)$$

因此 t 时刻交织位置 $\pi(t)$ 为使最大序列相关 $cor(t, i)$ 最大值的 i , 本文记为最大相关法.

3.2 交织关系的检错算法

为了便于判定交织关系是否出错, 本文提出了一种检错方法. $ll\hat{r}(x_{j,\pi(t)})$ 的计算与 $A_{k,\pi(t)}^v, C_{k,t-1}$ 和 g 有关, 因此给定 t 的情况下, 不同 i 的计算 $cor(t, 1), \dots, cor(t, i)$ $i \in [1, 2, \dots, N]$ 可视为相互独立, 根据式(17)及中心极限定理本文认为以下假设成立: 当 i 给定时, 随机变量 $cor(t, 1), \dots, cor(t, i)$ $i \in [1, 2, \dots, N]$ 两两相互独立, 且都服从高斯分布.

假设最大相关法在 t 时刻识别正确, 表明 t 时刻前的交织关系出错概率很低. 因此当 $i = \pi(t)$ 时, 序列 $A_{k,\pi(t)}^v, C_{k,t-1}$ 满足编码约束关系, 此时记 $cor(t, i) \sim N(\mu_1, \delta_1^2)$, 而当 $i \neq \pi(t)$ 时, $cor(t, i) \sim N(\mu_2, \delta_2^2)$, 于是:

$$cor(t, i) \sim \begin{cases} N(\mu_1, \delta_1^2), & i = \pi(t) \\ N(\mu_2, \delta_2^2), & \forall i \neq \pi(t) \end{cases} \quad (19)$$

同理当 t 时刻识别错误, $cor(t, i)$ 独立同分布, 记为:

$$cor(t, i) \sim N(\mu_3, \delta_3^2), i \in \{1, 2, \dots, N \setminus \pi(t)\} \quad (20)$$

根据编码约束关系的符合程度, 一般有 $\mu_1 > \mu_2 > \mu_3$, 因此可以利用 $cor(t, 1), \dots, cor(t, i)$, $i \in [1, 2, \dots, N]$ 的均值来判定交织关系是否识别正确, 由于均值 u 的计算与接收数据的帧数 M 和 SNR 等多个因素有关, 为此本文提出了一种简单有效地门限判定方法, 使得门限的选取与上述因素无关, 下面对这种方法进行阐述.

最大相关法在 t 时刻识别得到的 N 个互相关值 $cor(t, 1), \dots, cor(t, N)$, 计算 t 时刻除 $cor(t, i_1)$ 外的 $N-1$ 个互相关值的均值和标准差.

$$\mu = \sum_{i=1, i \neq i_1}^N cor(t, i)/(N-1) \quad (21)$$

$$\delta = \sqrt{-\mu^2 + \sum_{i=1, i \neq i_1}^N cor(t, i)^2/(N-1)} \quad (22)$$

定义最大值 $cor(t, i_1)$ 偏离均值 μ 的程度为 λ_t :

$$\lambda_t = (cor(t, i_1) - \mu) / \delta \quad (23)$$

本文采用偏离程度 λ_t 及两个门限 T_A 和 T_B 来检错, 当 t 及其之后 T_B 个时刻的偏离程度 (即 $[\lambda_t, \lambda_{t+1}, \dots, \lambda_{t+T_B}]$) 都大于 T_A 的时候, 则判定 t 时刻交织识别正确. 下面对两个门限的设定进行说明, 记本文所提检错方法检测出 t_{error} (开始出错的位置) 前已经出错的交织关系为 W , 检测方法误判交织位置而损失的正确交织关系为 L , 设 $E(\cdot)$ 为数学期望, 门限 T_A 和 T_B 的设定应满足 $E(W)$ 和 $E(L)$ 均较小的条件. 假设当最大相关法识别正确时有 $\mu = \mu_2, \delta = \delta_2$, 当识别错误时有 $\mu = \mu_3, \delta = \delta_3$. 假设 t 时刻已经出错, 可得 $\lambda_t < T_A$ 成立的概率为:

$$p_0 = (1 - Q(T_A))^N \quad (24)$$

式中, $Q(A) = \int_A^{+\infty} f_{(0,1)}(x) dx$, $f_{(0,1)}(x)$ 为标准高斯分布的概率密度函数. 错误识别 n ($n = 1, \dots, N - t_{\text{error}} - 1$) 个交织关系后检错的概率为 $P_0(n)$.

$$P_0(n) = \begin{cases} 0, & n \leq T_B - 1 \\ p_0^{T_n}, & n = T_B \\ p_0^{T_n} (1 - p_0) \left(1 - \sum_{n=1}^{n-T_B-1} P_0(n) \right), & n \geq T_B + 1 \end{cases} \quad (25)$$

由于 t_{error} 未知, 不妨设 $t_{\text{error}} = 1$, 故期望 $E(W)$ 为:

$$E(W) = \sum_{n=1}^N n P_0(n) \quad (26)$$

如果 t 时刻最大相关法识别正确, 为了降低运算量, 假定 $\delta_1 = \delta_2 = \delta$, 并记 $T = (\mu_1 - \mu_2) / \delta = (\mu_1 - \mu) / \delta$, 则当前交织关系 $\pi(t)$ 识别正确的概率为 p_1 为:

$$p_1 = \Pr(cor(t, \pi(t)) > \max_{i \neq \pi(t)} (cor(t, i)))$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} (1 - Q(x + T))^{N-1} f_{0,1}(x) dx \quad (27)$$

假设一个交织关系出错后的所有交织关系都识别错误,则出错前已经正确识别前 $n(n=1, \dots, N)$ 个交织关系的概率 $P_1(n)$ 为:

$$P_1(n) = \begin{cases} p_1^n (1 - p_1), & 1 \leq n \leq N-1 \\ p_1^N, & n = N \end{cases} \quad (28)$$

同理,在 t 时刻交织关系 $\pi(t)$ 识别正确,而不等式 $\lambda_i < T_A$ 的概率 p_2 为:

$$\begin{aligned} p_2 &= \Pr(\text{cor}(t, \pi(t)) < T_A \delta + \mu) \\ &= 1 - Q\left(\frac{T_A \delta + \mu - \mu_1}{\delta}\right) = Q(T - T_A) \end{aligned} \quad (29)$$

原本可以识别前 $n(n=1, \dots, N)$ 个交织关系的条件下,因为检错错误导致识别 $t(t=1, \dots, n-1)$ 时刻交织关系出错的概率为 $P_2(n, t)$.

$$P_2(n, t) = \begin{cases} 0, & t \leq T_B - 1 \\ p_2^{T_n}, & t = T_B \\ p_2^{T_n} (1 - p_2) \left(1 - \sum_{t'=1}^{n-T_B-1} P_0(n, t')\right), & T_B + 1 \leq t \leq n \end{cases} \quad (30)$$

于是期望 $E(L)$ 为:

$$E(L) = \sum_{n=1}^N \left(P_1(n) \sum_{t=1}^{n-1} (n-t) \cdot P_2(n, t) \right) \quad (31)$$

由式(31)可知, $E(L)$ 除了依赖 T_A 和 T_B 外,还与 T 有关,记 $E(L)$ 的最大值为 $E_{\max}(L)$,当 T_A 和 T_B 确定时,通过数值搜索可得 $E_{\max}(L)$,因此 $E_{\max}(L)$ 只与 T_A 和 T_B 有关.综上所述由 $E(W)$ 和 $E_{\max}(L)$ 确定的门限 T_A 和 T_B 只与交织长度 N 有关.如何选取 T_A 和 T_B 将在下节说明.

3.3 基于小范围遍历的交织关系纠错算法

当检测到交织关系出错后,如何纠错是下一步有待解决的问题.为了提高识别的准确率,本节提出一种简单有效的纠错算法,本文记为“纠错方法1”.

最大相关法在识别任何一个交织位置出错的概率可以视为一个常数,记为 P_{error} . 识别出错前已正确识别 $i(i < N)$ 个交织参数的概率为 $(1 - P_{\text{error}})^i \cdot P_{\text{error}}$,其相应期望 E_r 为:

$$\begin{aligned} E_r &= N(1 - P_{\text{error}})^N + P_{\text{error}} \sum_{i=1}^{N-1} i (1 - P_{\text{error}})^i \\ &= \frac{1 - P_{\text{error}} - (1 - P_{\text{error}})^{N+1}}{P_{\text{error}}} \end{aligned} \quad (32)$$

图2给出了 E_r 与交织长度 N 的比值随概率 P_{error} 变化的曲线.随着 P_{error} 增大, E_r/N 迅速下降; N 越大, E_r/N 下降速度越快.当 P_{error} 远小于1时候, E_r/N 已下降至较低水平,例如当 $N=1024$,当 E_r/N 为0.1时,出错概率 $P_{\text{error}} \approx 0.01$,表明即便在识别正确率很低的情况下,每

个交织关系识别的正确概率依旧很高.因此当纠正 t_{error} 时,纠正后面错误的交织关系的概率很高,记序列 $\text{cor}(t, i)$, $i \in [1, N]$ 中第 i 大的元素为 $\text{cor}(t, \partial_i)$,下面对纠错方法1进行阐述.

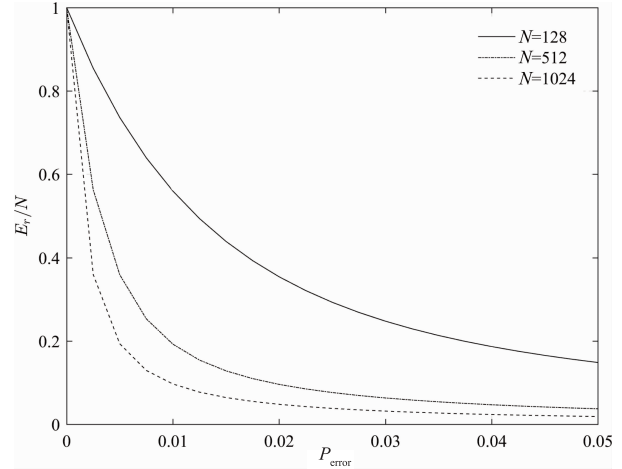


图2 出错前交织识别参数百分比随 E_r/N 随概率 P_{error} 变化的曲线

假设检错方法检测到 t 时刻为一个出错位置(即 $\pi(t) \neq \partial_t$)并且出错 t 时刻前交织关系识别无误,遍历 $\text{cor}(t, i)$, $i \in [1, N]$ 中最大的 F 个值(即遍历 $\pi(t) = \partial_t, t = [2, \dots, F]$ 求得 $t+1$ 时刻 $[\lambda_{t+1,2}, \lambda_{t+1,3}, \dots, \lambda_{t+1,F}]$)最后比较 $\max[\lambda_{t+1,2}, \lambda_{t+1,3}, \dots, \lambda_{t+1,F}]$ 与 $\lambda_{t+1,1}$ 的大小.如果 $\max[\lambda_{t+1,2}, \lambda_{t+1,3}, \dots, \lambda_{t+1,F}] > \lambda_{t+1,1}$,则说明纠错成功, $\max[\lambda_{t+1,2}, \lambda_{t+1,3}, \dots, \lambda_{t+1,F}]$ 对应的 ∂_i 为 t 时刻纠错后的交织位置,否则纠错失败继续下一时刻的交织关系识别.

3.4 基于迭代译码的交织关系纠错算法

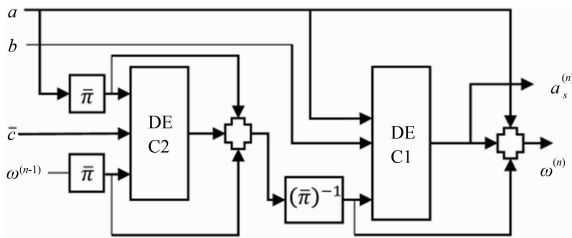
通过小范围遍历的方法可以有效抑制差错传播,但在 SNR 较低或者接收数据量较小时,即便纠正了当前时刻交织关系,仍有可能较快出错.为了在复杂情况下实现更好的容错性能,本节考虑通过译码降低误码率的方式辅助交织参数的识别.

本节首先提出一种数据预处理方式.如图1所示,最大相关法仅使用数据 a, c 对交织关系识别,而数据 b 由序列 x 编码得到,包含了序列 x 的信息.为了更充分的利用接收数据,本节提出一种基于序列 a, b, c 的最大互相关法对交织关系进行识别,记为最大相关法 (a, b, c) .

最大相关法 (a, b, c) 在交织识别前通过对接收序列 a, b 进行 BCJR 译码,译码结果记为 a_s .使用数据 a_s 代替数据 a 执行最大相关法.由于译码过程可以实现接收数据的纠错,序列 a_s 通常比 a 具有更低的误码率,这将有助于提高交织关系识别准确性.

当使用纠错方法1纠错后仍有 $\lambda_i < T_A$,此时记 $\lambda_i < T_A$ 中最小的 t 值为 t_{correct} ,可以认为 t_{correct} 前的识别关系均

正确. 因此, 记已正确识别的交织关系为 $\bar{\pi} = [\bar{\pi}(1), \bar{\pi}(2), \dots, \bar{\pi}(t_{\text{correct}})]$. 文献[16]表明即使已知部分交织参数也可以进行 Turbo 码迭代译码, 通常已知道的交织参数越多, 译码性能越优异. 因此, 本节利用已知交织参数 $\bar{\pi}$ 进行迭代译码, 设置译码迭代次数为 N_{tur} . 图 3 为迭代译码识别流程, 其中 DEC2, DEC1 分别为 BCJR 译码器, $(\bar{\pi})^{-1}$ 为交织器 $\bar{\pi}$ 对应的解交织器, 输入数据 \bar{c} 为 c 中交织关系识别正确的部分, $\omega^{(n)}$ 为第 n 次迭代生成的外部信息, 而 $\omega^{(0)} = a_s - a$, $a^{(n)}$ 为第 n 次译码的结果. 由于 Turbo 码迭代译码具有译码增益, 因此 $a^{(n)}$ ($n \geq 1$) 的正确率将比 $a^{(0)}$ 有所提高, 使用译码后的数据 $a^{(n)}$ 和 $c^{(n)}$ 从 t_{correct} 时刻重新对交织关系识别, 本文记为“纠错方法 2”.

图3 基于部分交织参数 $\bar{\pi}$ 的 Turbo 码译码原理图

3.5 本文识别算法总结

本文识别方法流程图如图 4 所示. 当交织参数识别开始时, 先执行最大相关法 (a, b, c) 对交织关系进行识别, 当检测到 t 时刻交织关系出错且 $t < N$ 时执行纠错方法 1, 其中 β_1 为遍历 $\partial_i, i \in [2, \dots, F]$ 中 i 的判决门限, 取值为 0.5, 当 ∂_i 满足 $\text{cor}(t, \partial_i) \leq \text{cor}(t, \partial_1) - \beta_1$ 时终止遍历, 记此时 i 的值为 F_1 , 最终确定 t 时刻的交织位置为 $\{\partial_i | \lambda_{t+1, \partial_i} = \max[\lambda_{t+1, 1}, \lambda_{t+1, 2}, \dots, \lambda_{t+1, F_1}]\}$, 否则继续使用最大相关法对 $t+1$ 时刻继续识别. 使用上述方法对交织关系识别完毕的情况下仍检测到部分交织关系出错, 则开始执行纠错方法 2. 若 $t_{\text{correct}}/N < r_c$, 其中 r_c 为平均识别正确率, 取值为 0.2, 当正确识别的交织关系占总交织长度的比例小于 r_c 时无法有效译码纠错, 终止纠错方法 2. 若纠错方法 2 使得 t_{correct} 增大, 表明纠错方法 2 纠错成功, 此时令 $\text{valid} = 1$ 并继续纠错, 否则停止纠错. 为了简化运算, 设定最大迭代次数 N_e 等于 10, 当纠错方法 2 的迭代次数 $n_e > N_e$ 时停止纠错. 此外, 根据 Turbo 码译码理论, 纠错方法 2 中 BCJR 译码迭代次数 n_i 为 3.

3.6 计算复杂度分析

文献[7]基于校验符合度法与文献[10]最大序列互相关方的运算量相当, 都需要 N 步计算, 每一步计算复杂度为 $O(MN)$, 总的计算复杂度为 $O(MN^2)$. 文献[14] BCJR 译码概率法的计算复杂度为 $O((2^{n_i} + m)MN^2)$, 其中 n_i 为译码迭代次数. 本文识别方法在最大相关法的基础上增加了检错和两种纠错算法, 下面分别对检错和纠错算法的计算复杂度进行说明: 检错算法的加法和乘

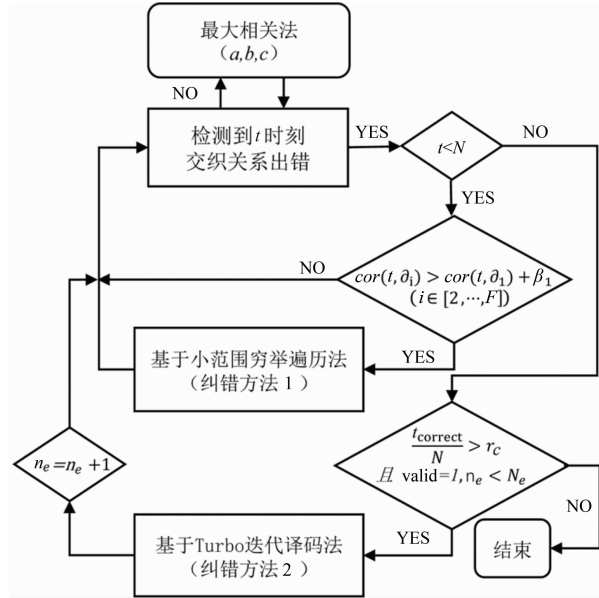


图4 本文识别算法原理图

法运算量均约为 $O((2M+4)N)$, 因此检错算法的计算复杂度为 $O(MN)$; 纠错方法 1 每纠正一个交织位置包括 $F_1 + 1$ 步文献[10]中的一步计算复杂度, 其中 F_1 是纠错遍历次数, 通常小于 5, 此时假设对所有交织位置都进行纠错, 因此纠错方法 1 的计算复杂度为 $O(MN^2)$; 纠错方法 2 每次迭代包含利用部分交织关系进行 BCJR 迭代译码以及使用最大相关法对 t_{error} 时刻后的交织关系重新识别两部分, 对应的计算复杂度分别为 $O(mMN^2)$ 和 $O(M(N-t_{\text{error}})^2)$, 此时假设 t_{error} 初始值为 $r_c N$ 并且纠错方法 2 迭代次数取最大值 N_e , 因此纠错方法 2 的计算复杂度约为 $O((m+1)N_e MN^2)$. 综上所述本文识别算法整体计算复杂度约为 $O((m+1)N_e MN^2)$, 计算复杂度介于基于校验关系识别算法和基于 BCJR 译码概率法之间.

4 实验仿真

本节对本文检错和纠错算法性能进行仿真, 为了同其他算法对比分析, 本文实验使用编码多项为 $(2, 1, 2)$ 的 RSC, 其生成多项式为 $g_1(D) = 1 + D^2, g_2(D) = 1 + D + D^2$, 实验中的统计结果均通过 500 次 Monte Carlo 实验获得.

4.1 本文交织关系检错算法的性能分析

图 5 以交织长度 $N = 512$ 为例, 给出了 $E(W)$ 和 $E_{\text{max}}(L)$ 随门限 T_A 和 T_B 变化的情况. 为便于观察, 图 5 中 $E_{\text{max}}(L)$ 乘以常数 $C (C = 200)$. 固定 T_B 后可以发现 $E(W)$ 随着 T_A 的增加而减少, 而 $C \cdot E_{\text{max}}(L)$ 随着 T_A 的增加而增加. 当 T_B 较小时, 无法满足 $E(W)$ 和 $E_{\text{max}}(L)$ 同时较小. 同时由式(26)可知 $E(W) \geq T_B$, 因此 T_B 的值也不能过大. 为了满足 $E(W)$ 和 $E_{\text{max}}(L)$ 均较小的条件,

本文选择 $T_B = 4$. 当 T_B 选定后可以确定 T_A 的值, 例如当 $T_B = 4, E(W) \leq 8.35, E_{\max}(L) \leq 0.04$ 时, T_A 的取值范围为 $3.3 \leq T_A \leq 3.7$, 可见, 满足一定约束条件的 T_A 的值并不唯一, 本文选取 T_A 的中值作为最终的选值.

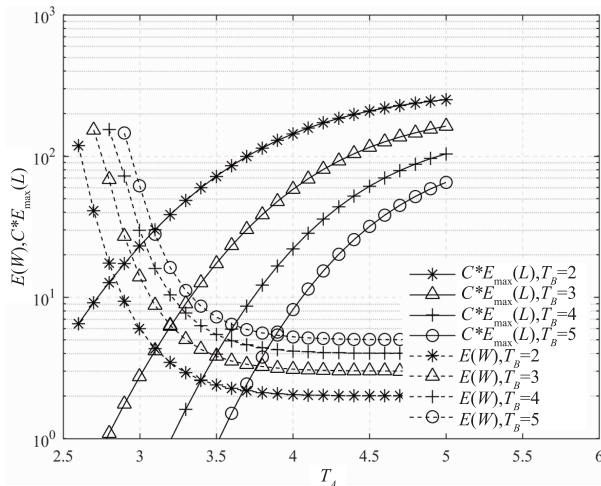


图5 $E(W)$ 和 $E_{\max}(L)$ 随门限 T_A 和 T_B 变化情况

由于 $E(W)$ 比 $E_{\max}(L)$ 更容易计算, 因此本文通过选取合适的 T_B 和 $E(W)$ 确定门限 T_A . 表 1 给出在 $T_B = 4, E(W) = 8$ 时, 门限 T_A 与 $E_{\max}(L)$ 随交织长度 N 变化的情况. 可以看出随着 N 的增加, 门限 T_A 逐渐变大, 而 $E_{\max}(L)$ 逐渐变少.

表 1 门限 T_A 与 $E_{\max}(L)$ 随交织长度 N 变化

参数	参数值	参数值	参数值	参数值
交织长度	256	512	1024	2048
门限 T_A	3.20	3.50	4.20	4.90
$C * E_{\max}(L)$	9.13	8.00	7.86	6.75

下面验证本文所提检错方法的性能. 图 6 给出使用本文检错算法情况下 λ_i 随时刻 t 的变化, 可以看出 λ_i 在交织关系识别正确时通常大于门限 T_A , 反之在交织关系识别出错时, λ_i 在绝大部分位置下小于 T_A . 实验中交织关系识别开始出错的时刻 t_{error} 为 90, 本文检错法检测到低于门限 T_A 的第一个时刻为 90, 验证了本文检错方法的有效性.

图 7 给出了在 $N = 1024$ 时不同数据量 M 和 SNR 条件下, 使用检错算法前后, 最大相关法正确识别率的对比, 可见, 在不同数据量 M 和 SNR 条件下, 使用本文检错算法前后没有给交织识别带来影响, 验证了本文检错方法所选门限 T_A 和 T_B 与数据量 M 和 SNR 无关.

4.2 本文纠错算法的性能分析

上一节验证了交织关系检错算法的有效性, 接下来将对本文所提纠错算法的性能进行验证. 为了形象展示本文所提识别方法的效果, 图 8 给出了四种不同算法(交织长度 $N = 1024, M = 150, \text{SNR} = 1\text{dB}$, 其中检错和纠错参数的选取分别参照表 1 和表 2)的识别性能.

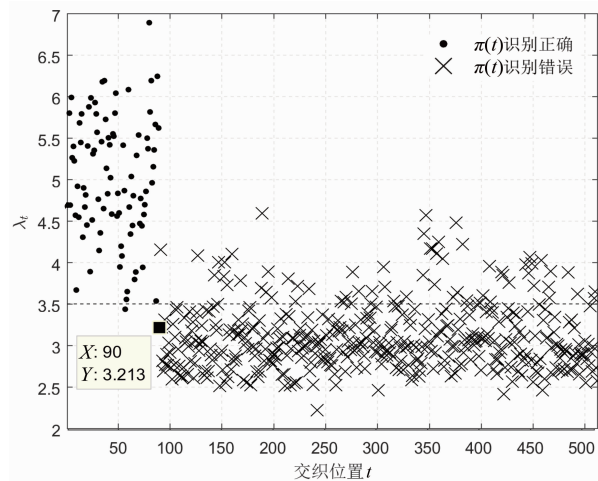


图6 λ_i 随交织位置 t 的变化

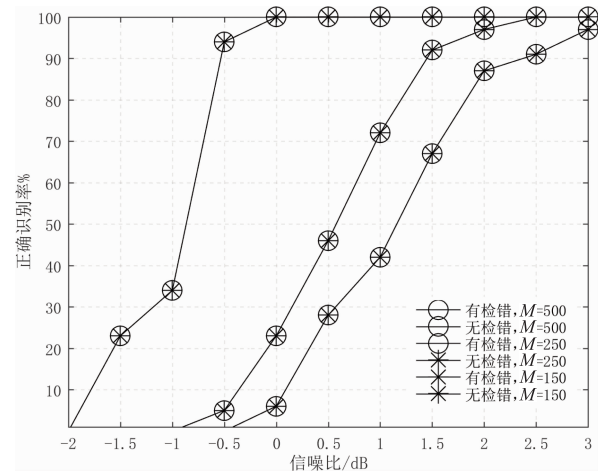


图7 检错方法对正确识别率的影响

由图 8(a) 所示, 在上述条件下最大相关法的 λ_i 大多低于门限 T_A , 交织关系正确识别率低. 对于图 8(b) 的最大互相关法(a, b, c), 由于更加充分利用了接收数据, 成功识别出 1/3 以上的交织关系. 由图 8(c) 可见, 本文识别方法(不包括译码纠错)识别的准确度进一步提高, 但由于 SNR 较低, 仍然较早地陷入错误状态. 最后, 观察图 8(d) 可得, 本文识别方法通过 Turbo 码迭代译码的方式, 不仅成功识别出之前识别出错的位置, 而且此后的 λ_i 值总体上明显呈上升趋势, 这是因为译码直接降低了数据的误码率. 一般来说 λ_i 的均值高于门限 T_A 越多, 识别效果越好.

下面从交织长度 N 和接收数据帧数 M 两个方面对算法的容错性进行分析. 图 9(a) 为在不同 SNR 下 N 对交织关系识别的影响, 随着 N 的增加, 算法的容错性越低并且变差的速度越快, 但本文识别方法对比最大互相关法完成全部交织参数识别时的 SNR 增益却逐渐增大, 证明本文算法在交织长度较长的情况下容错性提升显著. 图 9(b) 为不同 SNR 下不同 M 对交织关系识别

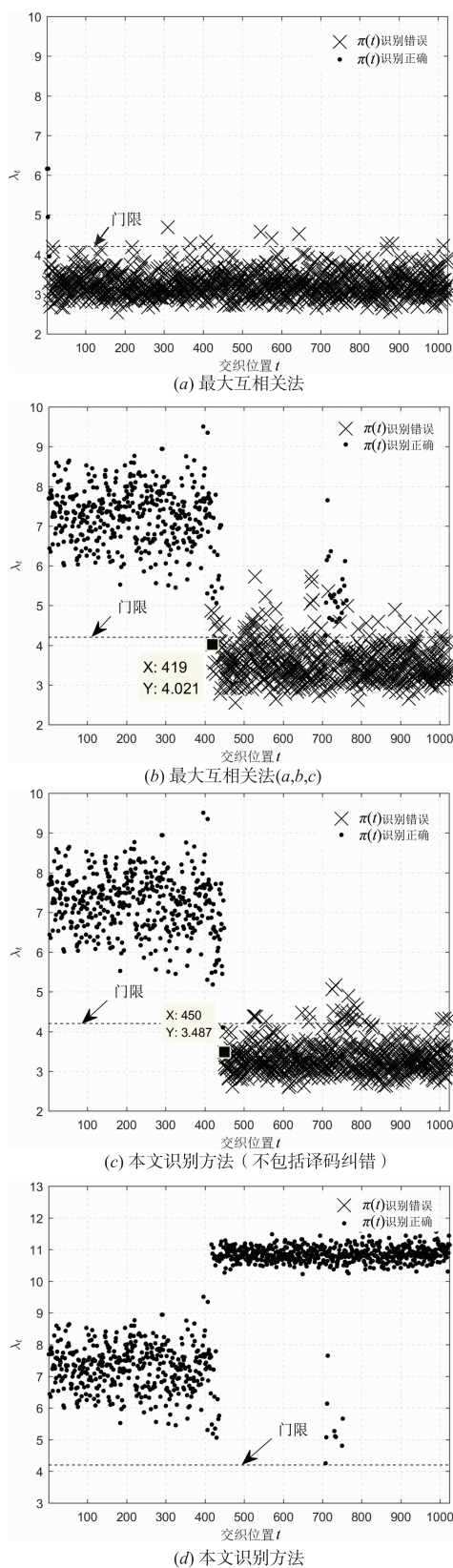


图8 基于最大相关法的不同识别算法性能的影响,当 M 增加,算法的性能得到了有效提升,主要原因在于 M 越多,序列的相关性越逼近真实情况,交织

位置相关值越大,但与此同时算法的计算复杂度也随之增加。

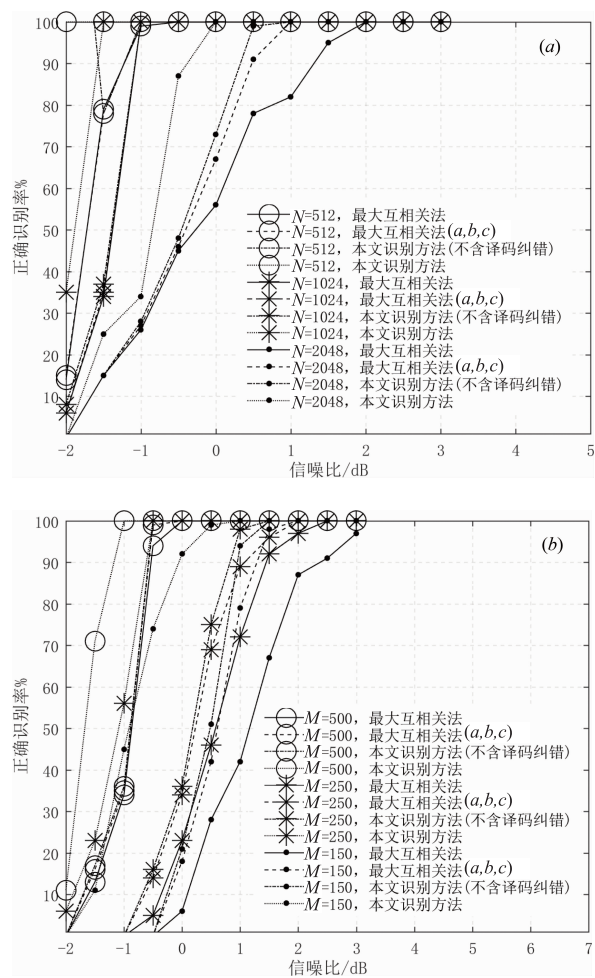


图9 (a)不同交织长度对识别性能的影响;(b)不同接收帧数对识别性能的影响

接下来将本文识别方法与其他典型算法进行对比,记最大相关法,本文识别方法(不包括译码纠错)和本文识别方法识别出全部交织关系所需要的帧数分别为 M_1, M_2, M_3 ,运行时间分别为 t_1, t_2, t_3 . 选取的对比算法为校验符合度法^[7]和基于 BCJR 译码概率法^[14](记 2 种算法相对应的数据量分别为 M_4, M_5 ,运行时间分别为 t_4, t_5),表 2 为不同算法完成全部交织参数识别所需帧数目。

在相同条件下所需 M 越少,算法的容错性越高,由表 2 可知,在 $SNR = 0$ 时, M_2 比 M_1 所需数据量降低了近 1/5, M_3 比 M_2 节省了约 1/2 的数据,表明本文纠错方法有效提高了识别能力并且 SNR 越高,纠错效果越好. 此外,本文识别方法完成全部交织参数识别所需的数据帧数 M_3 小于基于校验关系的典型算法 M_4 ,接近现有基于 BCJR 译码概率的最优算法 M_5 ,验证了本文识别算法具有较高的容错性。

表 2 不同算法完成全部交织参数识别所需帧数目对比

交织长度	SNR (dB)	帧数				
		M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
512	0	240	195	75	1200	68
512	1	170	135	65	850	55
512	2	115	80	45	350	39
1024	0	430	380	180	3200	105
1024	1	315	235	125	1800	66
1024	2	260	160	95	1020	43

下面评估算法的计算复杂度. 在相同条件下运行时间越少, 算法的实时性越好. 表 3 为不同算法在相同计算环境下完成全部交织参数识别的运行时间. 本文识别方法的运算时间 t_3 处于基于校验关系的典型识别法和 BCJR 译码概率算法之间, 并且随着 SNR 的增加, 本文识别方法的计算时间越趋近于最大相关法, 这是由于随着 SNR 的增加, 完成全部交织识别所需数据量越少, 此外 SNR 增加会进一步增加迭代译码增益, 提高交织关系识别准确率.

表 3 不同算法完成全部交织参数识别的运行时间

交织长度	SNR (dB)	时间 (s)				
		t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
512	0	2.24	3.94	33.2	9.85	58.3
512	1	1.58	2.83	11.7	6.56	45.2
512	2	1.07	1.81	4.48	2.98	21.8
1024	0	17.6	33.1	229.8	109.7	356.5
1024	1	12.9	22.5	63.8	61.8	267.8
1024	2	10.6	17.1	24.3	34.3	214.2

通过本文识别方法与其他算法的抗误码能力和计算复杂度的对比分析可知, 在接收帧数 M 充足或高 SNR 情况下, 无需使用纠错方法, 识别性能同现有的基于校验关系的最优算法相同, 同时识别的实时性明显优于基于 BCJR 译码概率算法; 在接收帧数 M 较少或低 SNR 情况下, 通过两种纠错方式可以有效提高识别性能, 算法的容错性与基于 BCJR 译码概率算法相似, 同时提高了识别的实时性. 综上所述, 本文识别方法在容错性与实时性更优异.

图 10 给出了基于校验符合度算法^[7]及使用本文纠错算法后对交织关系的识别性能, 其中交织长度 $N = 1024$, $M = 600$, $\text{SNR} = 0\text{dB}$. 由图 10(a) 可得, 在上述条件下基于校验符合度算法的 λ , 大多低于门限, 无法有效对交织关系识别. 图 10(b) ~ 图 10(d) 分别展示使用预处理接收数据及两种纠错方式后的识别性能, 仿真结果同图 8 相似, 使用本文识别方法后在相同条件下交织关系的识别性能也得到不同程度的提升. 综上所述本文识别算法同样适用于其他基于校验关系的典型算法, 具有较好的通用性.

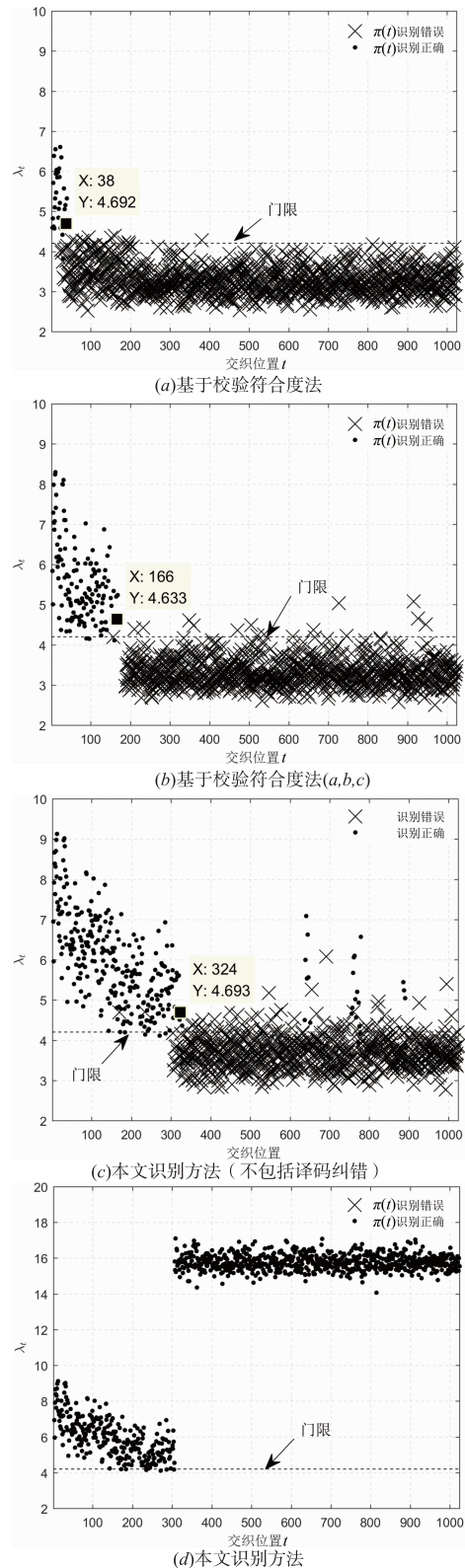


图 10 基于校验符合度算法的不同识别算法性能

5 结论

本文针对在低 SNR 条件下, 基于校验方程的交织识别算法容错性有限, 而基于译码迭代的算法实时性有待提高

的问题,在基于最大序列相关识别算法的基础上设计了一种简单有限的纠错机制。在利用提前设定好的门限(仅与交织长度有关)有效检错后,通过迭代译码以及小范围遍历对错误的识别位置进行纠正,提升了交织识别的容错性与实时性。此外,本文所提迭代译码纠错方法具有通用性,同样可以提升其他基于校验关系算法的性能。

参考文献

- [1] 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 Hui, HUANG Zhi-tao, WANG Feng-hua. Research progress of blind recognition of channel coding[J]. Acta Electronica Sinica,2013,41(6):1166-1176. (in Chinese)
- [2] Joachim Hagenauer, et al. Iterative decoding of binary block and convolutional codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory,1996,42(2):429-445.
- [3] YU Pei-dong, LI Jing, PENG Hua. A least square method for parameter estimation of RSC sub-codes of turbo codes[J]. IEEE Communications Letters,2014,18(4):644-647.
- [4] 张立民,吴昭军. 高误码率下 Turbo 码分量编码器快速识别算法[J]. 电子与信息学报,2018,40(1):239-247.
ZHANG Li-min, WU Zhao-jun. Fast recognition algorithm of Turbo code component encoder under bit error rate[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2018,40(1):239-247. (in Chinese)
- [5] Liru Lu, et al. Blind identification of convolutional interleaver parameters[A]. International Conference on Information Communications & Signal Processing [C]. Austin, USA:IEEE,2010. 1-9.
- [6] 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 Ya-bo, ZHANG Jian, LIU Yi-nong. Reconstruction of Turbo-code interleaver at high bit error rate. [J] Journal of Electronics & Information Technology,2015,37(8):1926-1930. (in Chinese)
- [7] 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):208-213.
LIU Jun, LI Jing, PENG Hua. Estimation of Turbo-code interleaver based on average conformity of parity-check equation[J]. Acta Electronica Sinica,2016,44(5):208-213. (in Chinese)
- [8] 吴昭军,张立民. 低信噪比下随机交织器识别[J]. 电讯技术,2018,58(1):52-58.
WU Zhao-jun, ZHANG Li-min. Recognition of random interleaver in low SNR[J]. Telecommunication Engineering,2018,58(1):52-58. (in Chinese)
- [9] 陈泽亮,李静,彭华. 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 Ze-liang, LI Jing, PENG Hua. Turbo code interleaver recognition optimized by Gibbs sampling [J]. Acta Electronica Sinica,2018,46(1):15-23. (in Chinese)

- [10] 吴昭军,张立民. 基于最大序列相关性的 Turbo 码交织器识别[J]. 航空学报,2019,40(6):257-268.
WU Zhao-jun, ZHANG Li-min. Blind recognition of interleaver for Turbo codes based on maximum sequence correlation[J]. Journal of Aeronautics,2019,40(6):257-268. (in Chinese)
- [11] 刘骏,李静. 一种 Turbo 码随机交织器的迭代估计方法[J]. 通信学报,2015,36(6):201-206.
LIU Jun, LI Jing. An iterative estimation method of Turbo random interleaver[J]. Journal of Communications,2015,36(6):201-206. (in Chinese)
- [12] Cluzeau M, Finiasz M, Tillich J P. Methods for the reconstruction of parallel turbo codes[A]. International Symposium on Information Theory [C]. Austin, USA: IEEE,2010. 2008-2012.
- [13] Tillich J P, Tixier A, Sendrier N. Recovering the interleaver of an unknown Turbo-Code[A]. International Symposium on Information Theory [C]. Austin, USA: IEEE,2014. 2784-2788.
- [14] 于沛东. 信道编码参数的容错分析技术研究[D]. 河南郑州:信息工程大学,2017.
Yu Pei-dong. Fault Tolerant Analysis of Channel Coding Parameters [D]. Zhengzhou, Henan: Information Engineering University,2017. (in Chinese)
- [15] HAGENAUER J. Iterative decoding of binary block and convolutional codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory,1996,42(2):429-445.
- [16] Shu Lin. Error Control Coding [M]. New Jersey, USA: Prentice Hall,2005. 350-389.

作者简介



李卓伦(通信作者) 男,1995年出生,内蒙古呼伦贝尔人,现为战略支援部队信息工程大学研究生,主要研究方向为信道编码参数分析。
E-mail:729242979@qq.com



韩卓茜 女,1996年出生,山西长治人,现为战略支援部队信息工程大学研究生,主要研究方向为雷达信号处理。
E-mail:925345932@qq.com