

文章编号: 2095-4980(2014)06-0832-05

非码长整数倍矩阵交织器参数盲估计算法

李 丹, 廖红舒, 甘 露

(电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 611731)

摘 要: 针对与线性分组码级联的矩阵交织器, 提出了一种矩阵交织参数盲估计方法。首先构造数据矩阵, 确定交织深度的整数倍; 再进行一维假设确定交织偏差; 最后对交织深度和交织宽度进行二维搜索, 对数据进行解交织, 确定这2个参数, 实现了矩阵交织不同交织深度下参数的盲估计。该方法适用于任何交织深度下矩阵交织器参数估计, 尤其适用于未被研究过的交织深度不等于码长整数倍的情况。仿真表明: 在误码率为0.001时, 无论交织深度是否为码长的整数倍, 所提算法的参数估计速度均较快, 且检测概率可达98%。

关键词: 信道编码; 分组交织; 盲估计; 非码长整数倍

中图分类号: TN971.1

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201406.0832

An algorithm of blind estimation of non-multiple code length matrix interleave parameters

LI Dan, LIAO Hong-shu, GAN Lu

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: For linear block code which takes the matrix interleave in channel coding, a new method is proposed to estimate blindly the interleave parameters. It determines firstly the multiple of interleave depth by constructing data matrix, then does one-dimensional hypothesis for the interleave offset. At last, two-dimensional hypothesis for the interleave depth and interleave width is taken in order to deinterleave the intercepted data, and to achieve the blind estimation of all interleave parameters. The method is applicable to any case of matrix interleaver for interleaver depth estimation, especially for the kind that the interleaver depth is not equal to an integer multiple of the code length which has not been studied so far. Simulation results show that, the detection probability can reaches 98% even though the bit error rate is 0.001. Meanwhile, the algorithm has a fast detection speed no matter what the interleaver depth is.

Key words: channel coding; convolutional interleave; blind estimation; non-multiple of code-word length

交织器具有打乱码字之间比特顺序的作用, 因而具有纠正信道的突发错误的能力, 可有效提高数据传输的可靠性。因此, 在实际应用中, 往往将纠错编码与交织器相结合使用。交织器一般与信道编码器级联使用, 在发送端, 信息序列首先进入编码器编码, 然后再送入交织器, 交织器按照交织规律重新排列好编码序列后再发出; 在接收端, 首先需要接入解交织器, 恢复编码序列后, 再对数据进行解码, 输出信息序列。

由于通信传输的信息在码字中, 所以必须将交织器进行解交织后才能得到实际信息, 因而对交织器参数的估计成为必要。实际应用中, 常用到的2种交织器^[1]是矩阵交织器和卷积交织器。近年来对交织参数的盲估计越来越受到研究人员的重视, 从公开发表的文献看, 主要是涉及矩阵交织参数的盲估计, “秩准则”算法^[2]利用了不同假设交织深度下数据矩阵秩的变化来估计矩阵交织参数, 在无误码情况下, 可以实现对交织参数的准确估计; 而在有误码情况下, 此算法性能急剧恶化。利用伽罗华域上的高斯约当消元法^[3-4]对矩阵交织参数进行盲估计, 该算法考虑了接收数据中存在误码的情况, 所以更适用于实际有误码信道。对矩阵交织宽度的估计中^[5], 需知交织深度和交织起点, 利用解交织后译码再交织, 最后检查误码率的方法确定交织宽度, 然而该方法遍历所有可能

收稿日期: 2013-12-20; 修回日期: 2014-03-17

基金项目: 国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金资助项目(11176005)

的交织和编码方式,算法复杂度较高。卷积交织器的识别中,利用交织码元之间的关系估计交织深度的方法^[6]无法估计出交织偏差。利用解交织方法估计交织参数^[7]是一种新的盲估计算法,但该算法并未讨论当矩阵交织器的交织深度不是码长的整数倍的情况,并属于全搜索模式,计算量繁重;解交织算法的改进算法^[8]减少了一维搜索,大大降低计算量,但仍然有三维搜索。利用数据帧结构估计交织深度的算法^[9],不适用于没有帧头的序列。

本文针对采用矩阵交织技术的线性分组码,提出了矩阵交织参数盲估计算法,包括了矩阵交织器的所有情况,同时利用交织序列和解交织序列构造数据矩阵,有效降低了参数假设范围,并且可以估计出交织偏差,保证解交织过程的正确进行,具有很好的实用性。

1 矩阵交织器

矩阵交织的交织参数一般有如下规则: S 定义为交织深度,交织宽度定义为 m ,则 $S=mN(m>1)$ 。在每一个长度等于 S 的交织块中,编码数据按行依次填入一个大小为 $m \times N$ 的矩阵,矩阵填满后,再按列依次读出。同样,接收端的去交织器则将接收到的交织数据按列依次填入 $m \times N$ 的矩阵,填满后再按行读出,从而完成去交织。

一般情况,当交织深度 S 等于码长整数倍时,有 $N=n$ (n 为码长);当矩阵交织深度不为码长整数倍时,有 $N \neq n$ 。本文将针对矩阵交织深度不等于码长整数倍时的情况,讨论矩阵交织器参数的估计方法。若交织矩阵行数为2,列数为5,即交织深度 $S=10$,交织示意图如图1所示,交织后读出的数据如图2所示。

交织参数的估计以正确构造去交织器,对接收数据去交织,恢复编码数据为目的。假设信道编码采用 (n, k) 分组码(其中 n 为分组码长, k 为信息位长),则需要估计交织深度 S ,交织宽度 m 。令 $X(X=x_1x_2x_3\cdots)$ 表示完整交织序列,每个分组码的首位码元作为交织同步码,总是最先进入交织器。令 $Z(Z=z_1z_2\cdots z_l)$ 表示从 X 中截取到的实际交织序列,其中 l 为截取的交织序列长度。由于在非合作通信中,接收方对传送的数据并未有任何先验信息,通常并不知道数据是否采用了交织技术,以及截取的数据起点 z_1 是分组码的第几位码元,因此,还需要估计交织同步偏差 d , d 的取值范围为 $0 \leq d \leq S-1$ 。

当一组完整的交织块起始数据为一个分组码的首位码元时,可观察图3所示的交织数据在一个或者几个交织块内码字之间关系,得到如下结论:当交织序列长度 $L=\text{LCM}(S, n)$ ($\text{LCM}(x, y)$ 表示整数 x 与 y 的最小公倍数)时,若序列起始位是交织同步码,则该序列中包含 $\text{LCM}(S, n)/n$ 组完整分组码,一个交织块内含有 $\lceil S/n \rceil$ 个完整分组码,其中 c_{11} 为交织同步码。

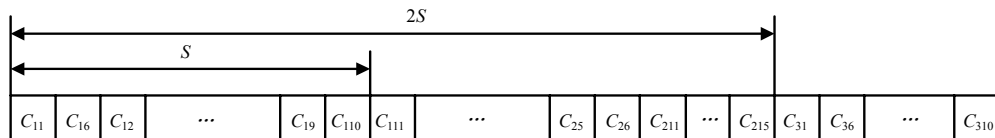


Fig.3 Matrix interleaving $c_{i1} \sim c_{in}$ are the bits of the i -th complete block code

图3 矩阵交织数据示意图

当 $0 < d \leq S-1$ 时,需分2种情况:第1种情况为交织深度 $S < n$,第2种情况为 $S > n$ 。第1种情况下, L 长序列包含 $\text{LCM}(S, n)/(n-1)$ 组的分组码。第2种情况下,则需分2种情况讨论,当矩阵交织器的列数 $N < n$ 和 $N > n$ 的情况:

1) $N < n$ 时,设 i 表示第 i 个完整分组码,则 $1 \leq i \leq \lceil S/n \rceil$,那么,当交织同步偏差满足 $(i-1)\lceil n/N \rceil < d \leq i\lceil n/N \rceil$ 时, L 长序列中包含 $\text{LCM}(S, n)/(n-i)$ 组完整分组码。

2) $N > n$ 时,没有规律可循。

设完整分组码组数用 η 表示,则无论上述那种情况, L 长内的完整分组码组数均可表示为:

$$\text{LCM}(S, n) / (n-1) \leq \eta \leq \text{LCM}(S, n) / n - \lceil S / n \rceil。$$

当交织深度等于码长整数倍时, 则是一个特殊情况, 即 $L = \text{LCM}(S, n) = S$, 交织同步时, 包含 $L = \text{LCM}(S, n) / n = m$ 组完整分组码; 当 $0 < d < m$ 时, 则包含 $L = \text{LCM}(S, n) / (n-1) = m-1$ 组的完整分组码, 当 $d \geq m$ 时, 则不包含完整分组码。

2 非码长整数倍矩阵交织参数的盲估计算法

2.1 算法原理

将截取的交织数据流 Z 依次按行填充到列数等于 S_1 (可设为任意大小) 的矩阵 $\mathbf{A}$ 中, 令 $\text{gfrank}(\mathbf{A})$ 表示矩阵 $\mathbf{A}$ 在 $GF(2)$ (伽罗华域) 中的秩, 定义归一化秩 ρ :

$$\rho = \frac{\text{gfrank}(\mathbf{A})}{S_1} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{A}$ 为 $S_2 \times S_1$ 的矩阵。假设 Z 的长度 l 足够大, 保证 $S_2 \geq S_1$ 。根据线性代数理论可知:

$$\rho \leq 1 \quad (2)$$

当 $S_1 = aL$ ($a = 1, 2, 3, \dots$) 时, 从上面推断可知, 矩阵 $\mathbf{A}$ 的每行向量中包含的完整分组码的组数 η 满足

$$(a-1) \lfloor S/n \rfloor + \text{LCM}(S, n) / n - \lceil S/n \rceil \leq \eta \leq a \lfloor S/n \rfloor。$$

由于分组码中的信息码元相互统计独立, 而校验码元与信息码元线性相关, 因此, 矩阵 $\mathbf{A}$ 中的校验码元所在的列向量是线性相关的, 令 ε 表示矩阵中相关的列数, 则有:

$$\varepsilon = (n-k)\eta \quad (3)$$

因此, ε 满足不等式: $(n-k)[(a-1) \lfloor S/n \rfloor + \text{LCM}(S, n) / n - \lceil S/n \rceil] \leq \varepsilon \leq (n-k)a \lfloor S/n \rfloor$ 。

最后, 根据线性代数和矩阵理论相关知识可知:

$$r \leq \rho \leq 1 \quad (4)$$

式中 $r = k/n$ 。因此, 当 $d=0$, 交织同步时, ρ 达到最小值, 可以看出, 此最小值恰等于分组码的编码效率 r 。

当 $S_1 \neq aL$ ($a = 1, 2, 3, \dots$) 时, 因为矩阵 $\mathbf{A}$ 每行向量中都不能包含完整分组码, $\varepsilon = 0$ 。 $\mathbf{A}$ 的列向量和行向量都是线性无关的, $\mathbf{A}$ 为满秩矩阵, 可得:

$$\rho = 1 \quad (5)$$

利用上述算法, 可以完成对交织延时偏差、交织深度和编码效率等参数的估计。

2.2 交织宽度的估计

矩阵交织器交织宽度的估计可以采用解交织的方法进行。当矩阵交织深度 S 和交织延时偏差 d 已知, 删除 Z 的前 $(S-d)$ 位数据, 得到交织同步序列 Z_1 。由矩阵交织可知, 交织宽度 m 为 S 的整数因子, 可设 m_1 ($1 \leq m_1 < S$), 令 m_1 遍历搜索, 通过对 Z_1 进行解交织, 再将解交织后的数据按行依次填到列数等于 S/m_1 的矩阵 $\mathbf{A}_1$ 中, 计算:

$$\rho_1 = \frac{\text{gfrank}(\mathbf{A}_1)}{(S/m_1)} \quad (6)$$

当 $m_1 = m/a$ ($a \in N, 1 \leq a \leq m$) 时, 有

$$\rho_1 = r \quad (7)$$

当 $m_1 \neq m/a$ ($a \in N, 1 \leq a \leq m$) 时, $\mathbf{A}_1$ 行向量中的原始分组码元混排, $\mathbf{A}_1$ 列向量均线性无关, 因此

$$\rho_1 = 1 \quad (8)$$

根据式(7)和式(8)可知, 通过计算不同假设交织宽度(m_1)下的 ρ_1 值, 令 ρ_1 达到最小值(等于 r)时对应的最大假设交织宽度 ($m_1 = m, a = 1$) 即为实际交织宽度。

2.3 算法的具体实现步骤

包含交织深度不等于码长整数倍时的矩阵交织参数的具体估计步骤流程图如图4所示。

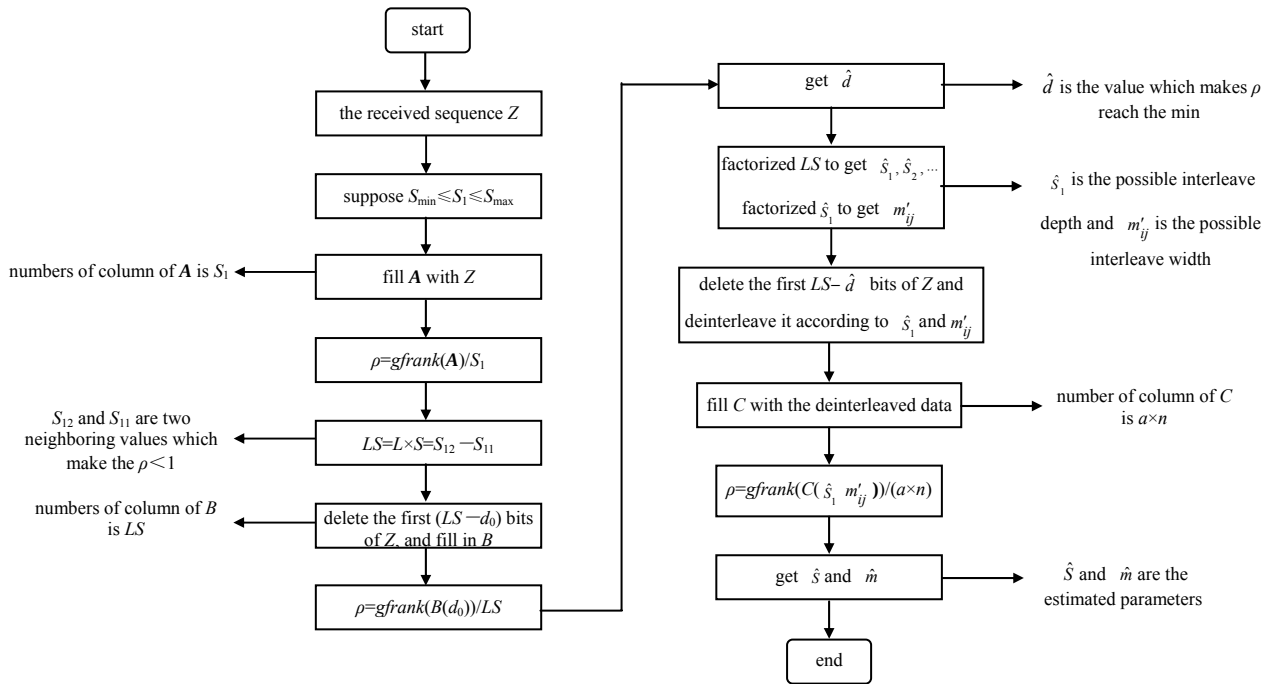


Fig.4 Flow diagram of the proposed method

图4 算法流程图

3 仿真实验

线性分组码选用 $(n=15, k=11)$ 汉明码, 矩阵交织器为 $(m=2, N=5)$ 交织器, 截取到的交织序列 Z 长度 $l=14\ 000$, 交织偏差 $d=7$, 汉明重量检测门限 $\beta=0.4$, 交织深度最小检测值 $N_{\min}=80$, 最大检测值 $N_{\max}=220$, 矩阵求秩行向量置换次数 $nb=3$ 。

首先令比特误码率 $P_e=0.001$, 图 5 和图 6 给出交织深度和交织延时偏差的估计。

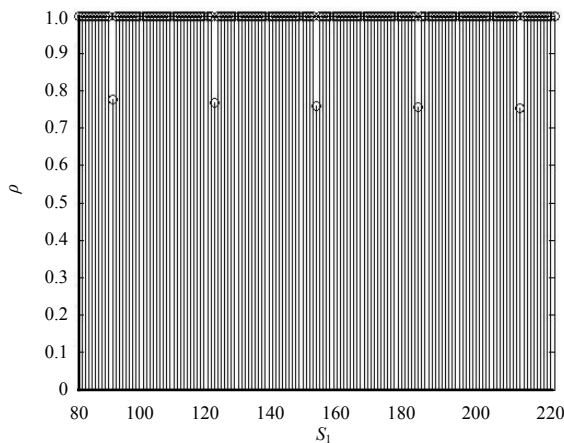


Fig.5 Different normalized ranks with different interleave depth

图5 不同交织深度下数据矩阵归一化秩大小

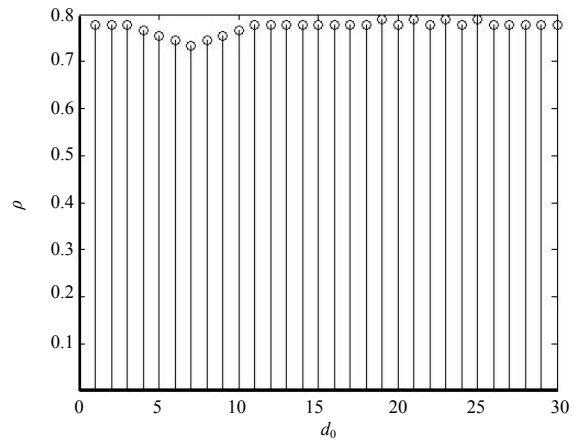


Fig.6 Different normalized ranks with different interleave depth interleave offset

图6 不同假设交织偏差下矩阵归一化秩大小

从图 5 可以看到: ρ 值小于 1 时, 对应的前 2 个相邻 S_1 值分别为 $S_{11}=90, S_{12}=120$, 交织深度的估计值 $LS=S_{12}-S_{11}=30$, 是实际交织深度的 2 倍。图 6 显示, 当交织深度的整数倍已知, 在不同假设交织延时偏差 d_0 ($0 \leq d_0 \leq LS-1$) 下, 令 ρ 值达到最小值时的延时偏差为 $\hat{d}=7$, 与实际交织延时偏差相符。

如图 7 中粗线条所示, 当 $\hat{S}_i=10, m'_{ij}=2$ 时, 归一化秩 ρ 达到最小值。则估计的交织深度和交织宽度与实际的交织深度和交织宽度相符。图 8 为该算法对交织器所有参数识别的整体识别概率随误码率的变化。

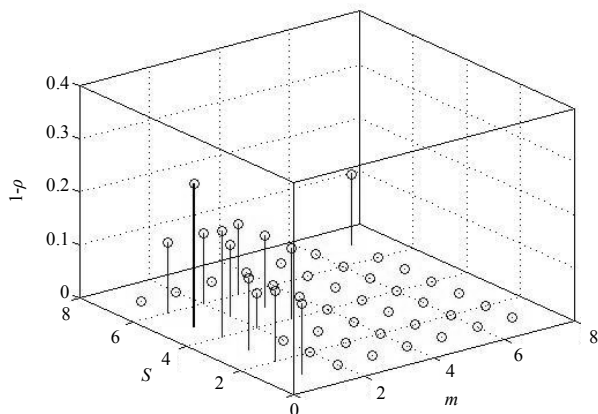


Fig.7 Normalized rank of deinterleaved data matrix with different interleave parameters

图7 不同交织参数下解交织数据矩阵归一化秩大小

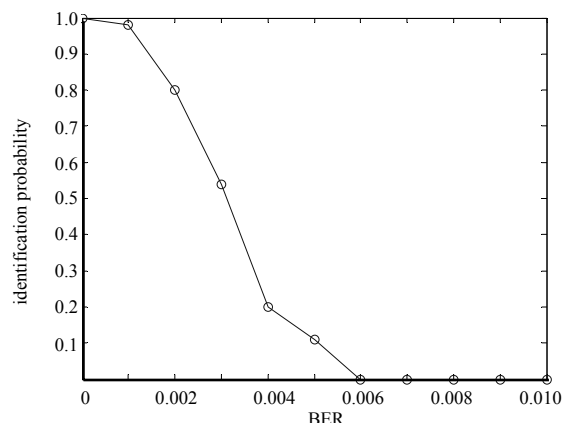


Fig.8 Identification probability with different BERs

图8 识别概率随误码率变化图

4 结论

本文提出了非码长整数倍的矩阵交织方法,该方法首先估计出矩阵交织器交织深度的整数倍,再估计出交织同步偏差,然后对估计出的交织深度整数倍做因数分解得到可能的交织深度,同时再根据可能的交织深度遍历所有可能的交织宽度,根据这些假设交织参数对接收数据解交织,得到解交织数据,分析其编码特性从而得出交织器参数的正确估计值。该方法能够适应交织深度是码长整数倍和非码长整数倍的所有情况,具有普适性。

参考文献:

- [1] Andrews K, Heegard C, Kozen D. A theory of interleavers[R]. Technical Report 97-1634, Computer Science Department, Cornell University, 1997.
- [2] Burel G, Gautier R. Blind estimation of encoder interleaver characteristics in a non cooperative context[C]// Proc. of the IASTED International Conference on Communication, Internet and Information Technology. Scottsdale, AZ, USA: [s.n.], 2003: 1-6.
- [3] Sicot G, Houcke S. Blind detection of interleaver parameters[C]// Proc. of the ICASSP 2005. Philadelphia, USA: [s.n.], 2005: 829-832.
- [4] Sicot G, Houcke S, Barbier J. Blind detection of interleaver parameters[J]. Signal Processing, 2009, 89(4): 450-462.
- [5] 郑鹏鹏, 张玉, 杨晓静. 基于矩阵模型的线性分组码及分组交织识别[J]. 计算机工程, 2012, 38(17): 84-86, 90. (ZHENG Peng-peng, ZHANG Yu, YANG Xiao-jing. Identification of linear block codes and packet interleaving based on matrix model[J]. Computer Engineering, 2012, 38(17): 84-86, 90.)
- [6] Liru Lu, Kwok Hung Li, Yong Liang Guan. Blind identification of convolutional interleaver parameters[C]// Proc. of the 7th International Conference on Information, Communications and Signal Processing. Macau, China: [s.n.], 2009: 1-5.
- [7] 甘露, 刘宗辉, 廖红舒, 等. 卷积交织参数的盲估计[J]. 电子学报, 2011, 39(9): 2173-2177. (GAN Lu, LIU Zong-hui, LIAO Hong-shu, et al. Blind estimation of the parameters of convolutional interleaver[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(9): 2173-2177.)
- [8] GAN L, LI D, LIU Z H, et al. A low complexity algorithm of blind estimation of convolutional interleaver parameters[J]. Science in China Series. F: Information Sciences, 2012, 55(10): 1-9.
- [9] 谢辉, 王丰华, 黄知涛. 卷积交织器盲识别方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(8): 1952-1957. (XIE Hui, WANG Feng-hua, HUANG Zhi-tao. A method for blind recognition of convolutional interleaver[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(8): 1952-1957.)