

基于归一化秩特征的交织类型盲识别

龙浪^{1,2} 杨俊安^{1,2} 刘辉^{1,2} 梁宗伟^{1,2}

(1. 国防科技大学电子对抗学院, 合肥, 230037; 2. 安徽省电子制约技术重点实验室, 合肥, 230037)

摘要: 在非合作通信中, 交织类型识别是进行交织参数识别的前提。针对现有类型识别算法受码长约束且抗误码性能较差的问题, 提出了一种适用于 RS 码的基于归一化秩特征的交织类型盲识别算法, 在不需要考虑码长约束的条件下, 通过高斯约当消元法对分析矩阵做初等变换, 结合所得下三角阵中各列的零值比计算出秩缺矩阵的归一化秩, 最后利用分组交织和卷积交织的归一化秩变化规律完成交织器类型盲识别。仿真实验结果表明, 本文所提方法可以较好地完成交织类型识别, 且具有良好的抗误码性能, 运算量较小, 可为实际的工程应用提供一些参考。

关键词: 盲识别; 卷积交织; 归一化秩; 分组交织

中图分类号: TN919.3 **文献标志码:** A

Blind Identification of Interleaver Type Based on Normalized Rank Characteristics

Long Lang^{1,2}, Yang Jun'an^{1,2}, Liu Hui^{1,2}, Liang Zongwei^{1,2}

(1. School of Electronic Countermeasures, National University of Defense Technology, Hefei, 230037, China; 2. Key Laboratory of Electronic Restricting Technique of Anhui Province, Hefei, 230037, China)

Abstract: The identification of interleaver type is the precondition for the identification of interleaver parameters in non-cooperative communication. A blind identification algorithm of interleaver type based on normalized rank characteristics for RS code is proposed. Unlike the prior works, the interleaver type identification process is carried out for a generic case without any restriction on the codeword length n . Combining the ratio of number of zeros in the column with Gauss-Jordan elimination through pivoting algorithm, the normalized rank can be determined in the presence of bit errors. Finally, the blind identification can be realized through the differences of the normalized rank between block interleaver and convolutional interleaver. Experimental results show that this proposed method can achieve a better performance compared with the existing algorithms in high bit error rate and can realize the identification of interleaver type. It has a certain guiding significance for practical engineering applications.

Key words: blind identification; convolutional interleaver; normalized rank; block interleaver

引 言

在数字通信中, 信道编码可以提高通信的可靠性, 目前信道编码主要包括线性分组码、RS(Reed-

Solomon)码、卷积码和 LDPC(Low-density parity-check)码等^[1-2],其中 RS 码由于具有纠错能力强、编码结构简单的特点,被广泛应用于无线通信、深空通信以及军事通信等各个领域中,例如在通用数据链(Common data link, CDL)系统中就采用 RS 码作为外编码,然而这种信道编码方式纠正突发错误的效果并不是很明显,因此在数字通信中,通常采用交织技术将经过信道编码后的码元位置进行置换,使信道上的突发错误在时间上扩散成随机错误,从而提高系统抵御突发错误的能力^[3-4],其中分组交织和卷积交织在实际通信系统中应用较为广泛。然而,对于信息对抗方,交织技术增加了编码识别的难度。交织技术一般运用在信道编码之后,若想完成对截获序列编码参数的盲识别并获取所传输信息,就必须先实现交织类型识别及其参数的识别,其中交织类型盲识别是进行交织参数盲识别的前提,是对截获序列作进一步处理的基础,例如,在破译信息对抗方 CDL 编码参数时,需先对交织器类型进行判断,因此,展开针对 RS 码的交织类型盲识别,具有一定的现实意义。

从公开发表的文献来看,目前已有的研究多是在已知交织类型的基础上,进行交织参数盲识别^[5-11],关于交织类型识别的文献相对较少。文献[11]中利用帧同步码的累积量峰值位置的个数来区分序列的交织类型,但是缺少进一步的阐述,且该方法需要已知帧同步码等先验信息。文献[12]提出一种针对线性分组码的分组交织器检测方法,但该方法需要已知相关起始位和相关长度等先验信息。文献[13]中提出了一种广义码重分布分析法,以交织序列的实际码重分布与均匀分布之间的欧式距离作为判决准则来进行类型识别,能较快识别出交织类型,但是适用的交织器类型受信号码字长度的限制,且抗误码性能较差。文献[14]中提出了一种利用估计出的交织参数特征逐一判断、依次识别的方法,该方法需要结合盲识别后的交织参数,缺乏可行性。

本文针对常用的分组交织和卷积交织,提出了一种适用于 RS 码的基于归一化秩特征的交织类型盲识别方法,通过构建分析矩阵,并利用高斯约当(Gauss-jordan elimination through pivoting, GJETP)算法^[15]对分析矩阵进行初等变换,从而计算出矩阵的归一化秩,结合分组交织和卷积交织下分析矩阵的归一化秩变化规律,实现交织类型的识别,并通过仿真实验验证了方法的可行性与有效性。

1 常见的交织类型

1.1 分组交织

当采用分组交织时,其工作原理如图 1 所示,以交织周期 $S = N_r \times N_c$ 的数据块为单位进行交织, N_r 和 N_c 分别表示交织矩阵的行数和列数,其中 $N_r = 6$, $N_c = 4$, 输入序列为 1 到 24。分组交织具有同组同块性的典型特征,同一分组码必在同一交织块内,不可能分布在两个数据块中。

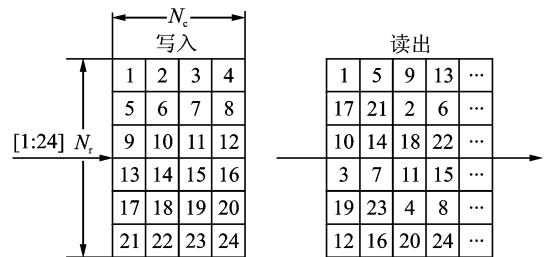


图 1 分组交织原理

Fig. 1 Structure of block interleaver

1.2 卷积交织

当采用卷积交织时,其工作原理如图 2 所示,其中 B 为交织深度即支路数, M 为交织宽度即延迟数。与分组交织相比,卷积交织后的码序列不具有分块特性,在一个码字长度范围内既有前一码字中的码元,也有后一码字中的码元,即交织后的序列具有前后交联性^[16],且在任意长度的码字分组块内都不只含若干个完整的码字集合,并将按照这样的特点循环下去。

2 交织类型盲识别

RS 码在实际通信系统中是以二进制码流进行传输的,参数为 (n_c, k, m) 的 RS 码序列可看做是伽罗

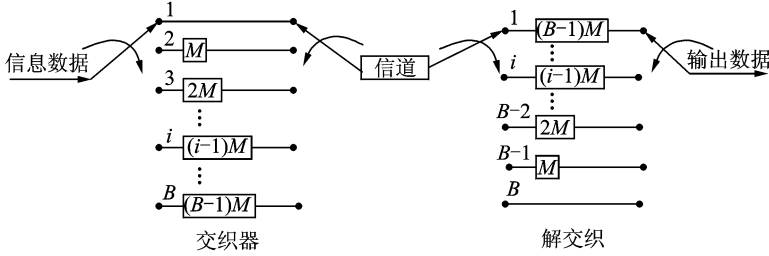


图 2 卷积交织原理

Fig. 2 Structure of convolutional interleaver and de-interleaver

华域(Galois field, GF)GF(2^m)上的码元在 GF(2)上映射得到的二进制(mn_c, mk)线性分组码^[17],其中 n_c为码长, k为信息长度, m为码字宽度,因而可利用基于线性分组码的交织类型盲识别方法来实现对 RS码的交织类型盲识别。

2.1 分析矩阵

将截获到的编码交织序列,按行排列成一个 r 行 b 列的矩阵 A,同时设置初始搜索周期 b_{min}和终止搜索周期 b_{max}, b 的取值遍历区间[b_{min}, b_{max}],假设序列长度为 L,则有 r=[L/b],其中[·]表示向下取整,且 r≫b。当每行中含有 t 组完整码字,且对齐正确时,如图 3(a)所示,则根据线性分组码的特点:同一码组内的校验码元和信息码元具有线性相关性,当对矩阵 A 进行列变换后,分析矩阵将会出现秩的缺失;反之,若没有对齐,如图 3(b)所示,则分析矩阵将不会出现秩的缺失,为满秩矩阵。本文中 将校验码元所在的列称为“相关列”,信息码元所在的列称为“独立列”。

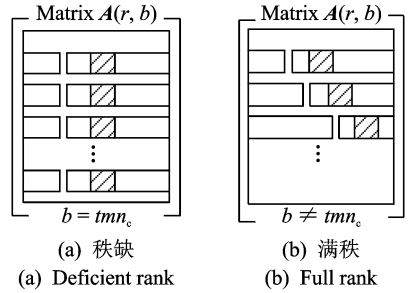


图 3 秩缺与满秩

Fig. 3 Deficient rank and full rank

2.2 归一化秩特征法

当选取的列数为 b_c 时,每行中含有多组完整码字,且对齐正确,此时分析矩阵 A 会出现秩的缺失,令此时矩阵的秩为 ρ,在不考虑误码的情况下,利用伽罗华域上的 GJETP 算法^[15]对矩阵 A 进行初等变换化成下三角矩阵 Q,如式(1)所示。

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ a_{2,1} & 1 & & & \cdots & & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & & \cdots & & \cdots \\ a_{\rho,1} & a_{\rho+1,1} & \cdots & 1 & \cdots & & \cdots \\ a_{\rho+1,1} & a_{\rho+1,2} & \cdots & a_{\rho+1,\rho} & 0 & \cdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ a_{b,1} & a_{b,2} & \cdots & a_{b,\rho} & \cdots & & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & & \cdots \\ a_{r,1} & a_{r,2} & \cdots & a_{r,\rho} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{r \times b_c} \quad (1)$$

式中 a_{i,j} (2≤i≤r, 1≤j≤ρ) 表示矩阵元素,可取 1 或 0。但由于在实际传输中可能存在误码,分析矩阵 A 可能不会出现秩缺或者只有 1~2 个列数有降秩,无法准确地确定独立列所在的位置,从而无法直接通过初等变换来获得秩的大小。观察发现,在误码的情况下,经过变换的分析矩阵中相关列比独立列含有

更多的“0”，可以定义每列中0的个数所占的比例为零值比 φ ，如式(2)所示，通过 φ 与预先设定的门限值 T^{th} 的比较即可判断该列是否为独立列，从而来获得矩阵秩的大小。

$$\varphi(c) = \frac{\varphi(c)}{r} \quad (2)$$

其中 $\varphi(c)$ 表示第 c 列中0的个数。

为实现分组交织和卷积交织的类型识别，定义分析矩阵中独立列所占的比例为归一化秩 p ，即

$$p = \frac{N(b)}{b} \quad (3)$$

其中 $N(b) = \text{card}(c \in \{1, 2, \dots, b\} | \varphi(c) < T^{\text{th}})$ 为独立列的数目， $\text{card}(\cdot)$ 表示集合的基数。

(1) 当截获数据的交织类型为分组交织时，在不需要考虑交织周期 S 和等价码长 mn_c 的倍数关系的情况下，只要当列数 b 满足式(4)时，分析矩阵中各行的码字就能保持对齐，此时由于校验码元与信息码元之间的线性相关性，分析矩阵就会出现秩缺失的情况；其他情况下，矩阵 \mathbf{A} 均为满秩，即 $p=1$ 。

$$b = \beta \text{lcm}(mn_c, S) = \beta \zeta \times mn_c \quad (4)$$

式中： β, ζ 为正整数($\beta, \zeta=1, 2, 3, \dots$)； $\text{lcm}(mn_c, S)$ 表示 mn_c 与 S 的最小公倍数。

根据分组交织的性质可知，每行含有 $\beta \zeta$ 个完整码字，通过计算可得矩阵的归一化秩如式(5)所示，为一个常数，与矩阵列数 b 无关，即有

$$p = \text{rank}(\mathbf{A})/b = \beta \zeta mk/b = \beta \zeta mk / \beta \zeta mn_c = k/n_c \quad (5)$$

(2) 当截获数据的交织类型为卷积交织时，同理可知，只要当列数 b 满足式(6)时，分析矩阵就会出现秩缺失的情况；其他情况下，矩阵 \mathbf{A} 均为满秩，即 $p=1$ 。

$$b = \kappa \text{lcm}(mn_c, B) = \kappa \eta \times mn_c \quad (6)$$

式中 κ, η 为正整数($\kappa, \eta=1, 2, 3, \dots$)。

根据卷积交织的性质可知，每行至少含有 $\lambda(\lambda < \kappa \eta)$ 个完整码字，计算可得此时矩阵的归一化秩为

$$p = \text{rank}(\mathbf{A})/b = \lambda mk + (mn_c(\kappa \eta - \lambda)) / \kappa \eta mn_c = \lambda k + n_c(\kappa \eta - \lambda) / \kappa \eta n_c \quad (7)$$

式中 κ, λ 为随 b 的变化而变化的量，故卷积交织下，矩阵的归一化秩随着分析矩阵的列数的变化而变化。

为了研究分组交织和卷积交织下矩阵的归一化秩随列数 b 的变化规律，首先假设 $b = \kappa \text{lcm}(mn_c, B)$ 和 $b' = (\kappa + 1) \text{lcm}(mn_c, B)$ 是连续出现秩缺失的分析矩阵所对应的列数，此时，分组交织下秩缺矩阵的归一化秩皆为 k/n_c ，保持不变；而卷积交织下秩缺矩阵的归一化秩分别如式(8,9)所示。

$$p = \lambda k + n_c(\kappa \eta - \lambda) / \kappa \eta n_c \quad (8)$$

$$p' = (\lambda + \eta)k + n_c[(\kappa + 1)\eta - (\lambda + \eta)] / (\kappa + 1)\eta n_c = (\lambda + \eta)k + n_c(\kappa \eta - \lambda) / (\kappa + 1)\eta n_c \quad (9)$$

定义两归一化秩的差值为 D ，则

$$\begin{aligned} D = p' - p &= \frac{(\lambda + \eta)k + n_c(\kappa \eta - \lambda)}{(\kappa + 1)\eta n_c} - \frac{\lambda k + n_c(\kappa \eta - \lambda)}{\kappa \eta n_c} = \\ &= \frac{[(\lambda + \eta)k + n_c(\kappa \eta - \lambda)]\kappa - [\lambda k + n_c(\kappa \eta - \lambda)](\kappa + 1)}{(\kappa + 1)\kappa \eta n_c} = \frac{\kappa \eta k - \lambda k - n_c(\kappa \eta - \lambda)}{(\kappa + 1)\kappa \eta n_c} = \\ &= \frac{(k - n_c)(\kappa \eta - \lambda)}{(\kappa + 1)\kappa \eta n_c} = -\frac{(n_c - k)(\kappa \eta - \lambda)}{(\kappa + 1)\kappa \eta n_c} \end{aligned} \quad (10)$$

由于在卷积交织中， $n_c > k, \kappa \eta > \lambda$ ，且 $\kappa, \eta, n_c, \lambda$ 为正整数，故 $D < 0$ ，即卷积交织中，归一化秩呈现递减的趋势，这样就可以通过观察秩缺矩阵的归一化秩的变化规律来实现交织类型的识别。

综上，交织类型盲识别的判别准则为：当归一化秩相等时，则识别为分组交织；当归一化秩依次递减，则识别为卷积交织。

2.3 算法流程

(1) 将截获到的编码交织数据按行放入 $r \times b$ 的分析矩阵 \mathbf{A} 中，其中 b 分别取 $b_{\min}, b_{\min} + 1, \dots, b_{\max} -$

1, b_{\max} 且满足 $r \gg b$ 。

(2) 选定门限值 T^{th} 。在无噪声时,校验列应为全零列,由于噪声的存在,校验列并不会是全零列,但所含“0”数目大于“1”的数目,因此,一般选取 $T^{\text{th}} > 0.5$ 来区分校验列与独立列。

(3) 在无噪声情况下直接求归一化秩,观察存在秩缺失时的归一化秩变化规律;在有噪声环境下,利用 GJETP 算法将矩阵 \mathbf{A} 转换为下三角矩阵 \mathbf{Q} ,并根据设定的门限值 T^{th} 计算 $N(b)$ 来求解归一化秩,同样观察存在秩缺失时的归一化秩变化规律。

(4) 当存在秩缺失时,若归一化秩相等,则识别为分组交织;若归一化秩依次递减,则识别为卷积交织。

3 实验仿真与性能分析

3.1 实验仿真与结果

仿真数据采用(8,6,4)RS码,在信道误码率(Bit error rate, BER)为 0.02 的条件下分别对交织深度 B 为 3、交织宽度 M 为 16 的卷积交织和 $N_r=3, N_e=16$ 的分组交织进行交织类型识别,其门限值 T^{th} 选取为 0.55。

当分析矩阵的列数分别为 192, 288, 384 和 480 时,卷积交织和分组交织下的分析矩阵经初等变换后均会出现秩的缺失,此时秩缺矩阵中各列的 φ 值分别如图 4 和图 5 所示,从图中可知,当门限值 T^{th} 为 0.55 时,可以通过各列的 φ 值与门限值的比较,来判断该列是否为独立列,从而根据式(3)计算出对应的归一化秩,分别如表 1 和表 2 所示。

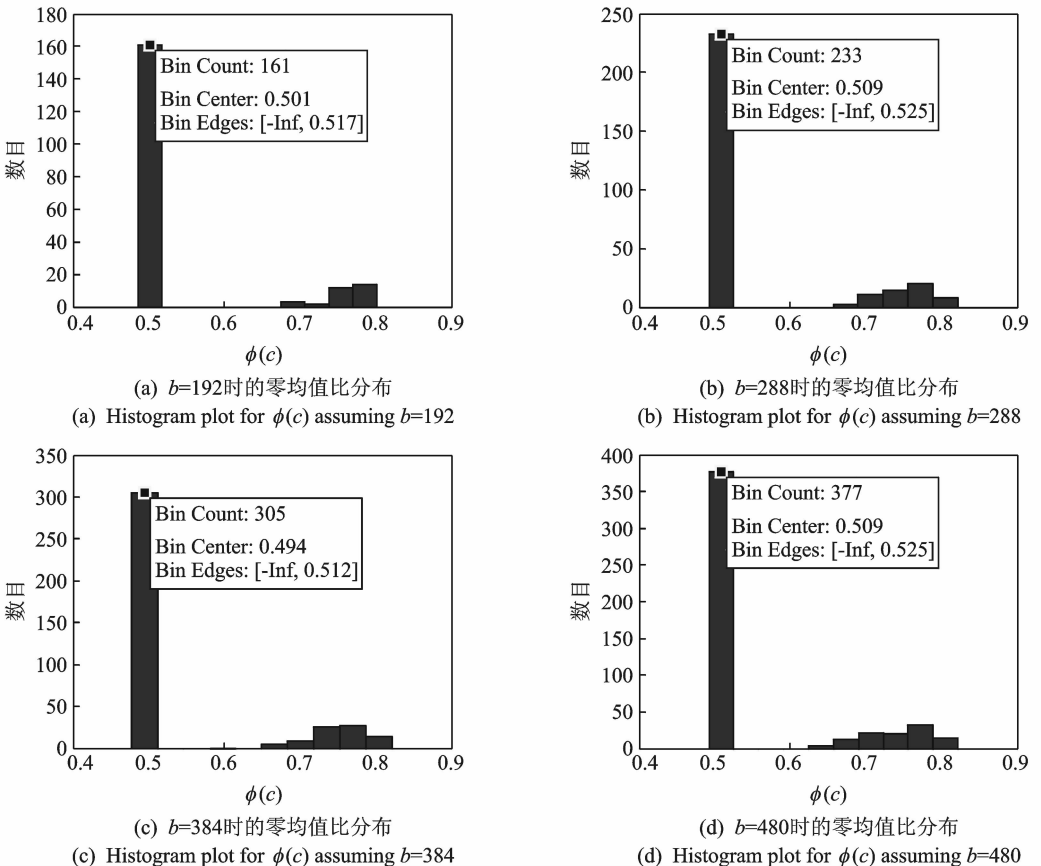


图 4 卷积交织下不同列数的零均值比分布

Fig. 4 Histogram plot for $\varphi(c)$ considering convolutional interleaver

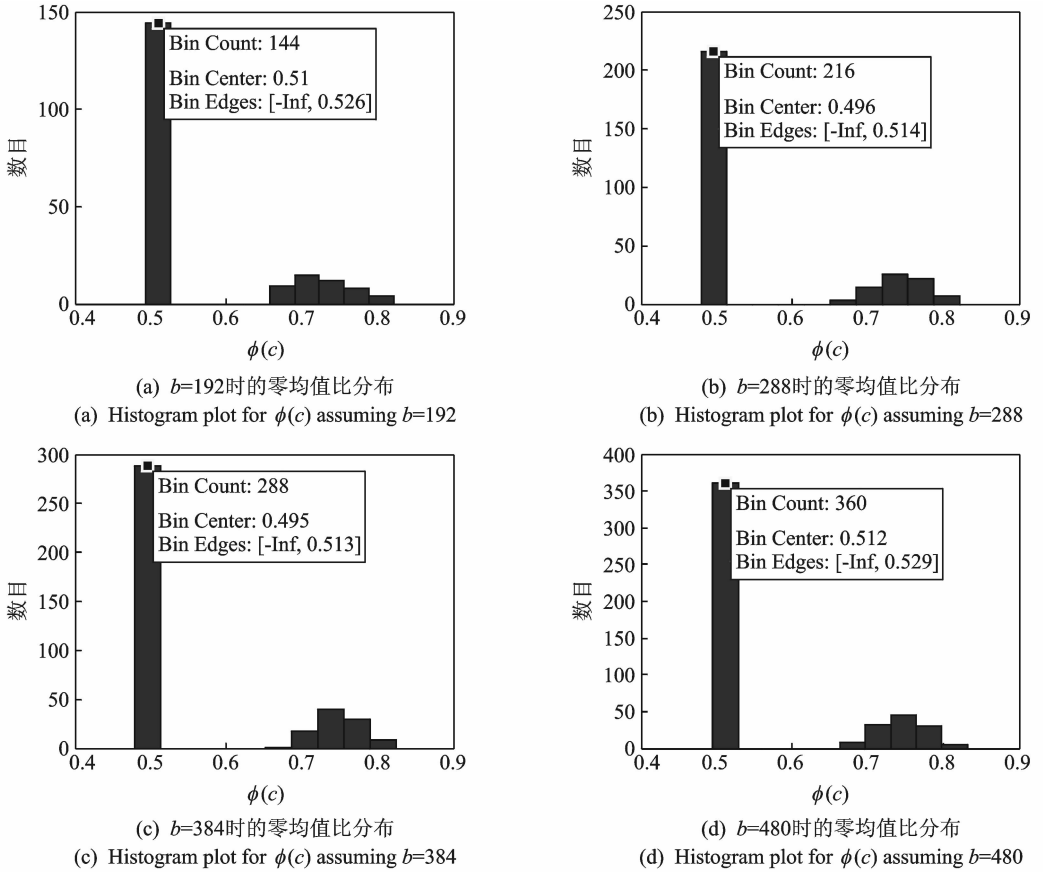


图5 分组交织下的不同列数的零均值比分布

Fig. 5 Histogram plot for $\varphi(c)$ considering block interleaver

表1 BER=0.02 时卷积交织的归一化秩

Tab. 1 Normalized rank considering convolutional interleaver assuming BER=0.02

列数 b	独立列数目 $N(b)$	归一化秩 p
192	161	0.838 54
288	233	0.809 03
384	305	0.794 27
480	377	0.785 42

表2 BER=0.02 时分组交织的归一化秩

Tab. 2 Normalized rank considering block interleaver assuming BER=0.02

列数 b	独立列数目 $N(b)$	归一化秩 p
192	144	0.75
288	216	0.75
384	288	0.75
480	360	0.75

不同列数下的分析矩阵归一化秩变化规律如图6和图7所示。从图6中可以看出,当RS码卷积交织序列在列数为等价码长和交织深度的倍数处出现秩缺失,即图中的192,288,384和480处,同理理论分析 $b = \kappa l c m(m n_c, B) = \kappa l c m(32, 3) = 96\kappa$ 保持一致,且秩缺矩阵的归一化秩由0.838 54依次递减为0.785 42;而图7中的结果表明;RS码分组交织序列也在同样的列数处出现秩缺失,且秩缺矩阵的归一化秩保持不变,皆为0.75,因此,根据秩缺矩阵归一化秩的变化规律就可以有效实现对截获序列的交织类型的判决。

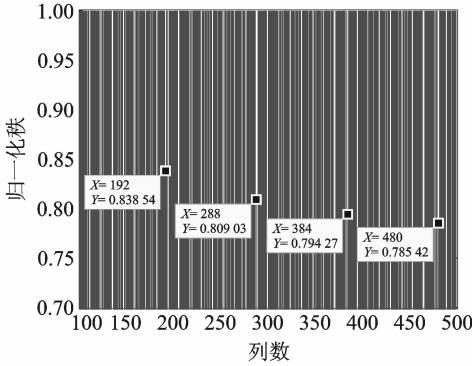


图 6 卷积交织下的归一化秩特征

Fig. 6 Normalized rank for convolutional interleaver

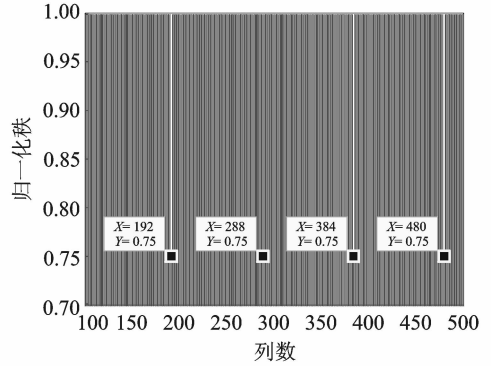


图 7 分组交织下的归一化秩特征

Fig. 7 Normalized rank for block interleaver

3.2 识别性能对比分析

3.2.1 门限值选取

为了进一步确定门限值的选取标准,对本文算法在不同误码率条件下,分别取不同门限值 T^{th} 时的成功识别概率进行了蒙特卡洛仿真,每种误码率条件下对每个门限值进行 1 000 次试验,记录能够成功识别出来的次数,仿真结果如图 8 所示。从图中可以观察到随着 T^{th} 的变化,成功识别出交织类型的概率也会随之变化,在误码率 0.02 到误码率 0.06 变化范围内,随之误码率的不断增大,能正确识别的门限值范围在不断减小,当误码率为 0.06 时,门限值取 0.57 下的识别正确率最高。

3.2.2 抗误码性能对比

为了更好地验证算法的容错性,信道误码率取 0.01 到 0.1,并针对不同的编码和交织参数组合进行 1 000 次蒙特卡洛实验。表 3 显示了采用 (7,3,3) RS 码, $N_r=7, N_c=4$ 的分组交织和 $B=5, M=3$ 卷积交织时的识别正确率及仿真结果;表 4 显示了采用 (31,11,5) RS 码, $N_r=5, N_c=9$ 的分组交织和 $B=7, M=6$ 卷积交织时的识别正确率及仿真结果。由表 3 和表 4 可以看出,当信道误码率小于 0.03 时,交织类型的识别准确率在 98% 以上;当信道误码率低于 0.04 时,交织类型的识别准确率在 80% 以上,表明了该识别方法的容错性能较好。

表 3 (7,3,3) RS 码, $N_r=7, N_c=4$ 的分组交织和 $B=5, M=3$ 卷积交织识别结果

Tab. 3 Recognition probability assuming $N_r=7, N_c=4$ block interleaver and $B=5, M=3$ convolutional interleaver considering (7,3,3) RS code

误码率	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
识别率	1.000	1.000	1.000	0.885	0.353	0.152	0.040	0.000	0.000	0.000

表 4 (31,11,5) RS 码, $N_r=5, N_c=9$ 的分组交织和 $B=7, M=6$ 卷积交织识别结果

Tab. 4 Recognition probability assuming $N_r=5, N_c=9$ for block interleaver and $B=7, M=6$ convolutional interleaver considering (31,11,5) RS code

误码率	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
识别率	1.000	1.000	0.985	0.847	0.302	0.135	0.000	0.000	0.000	0.000

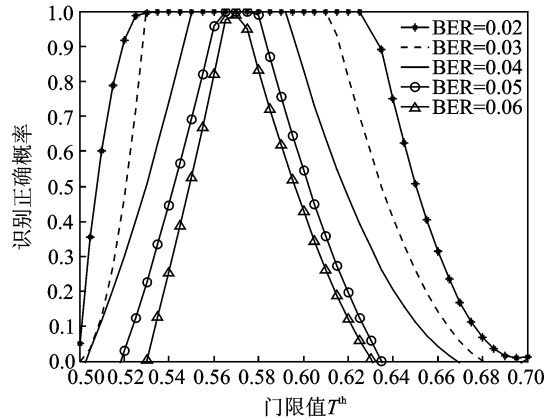


图 8 在不同参数下的识别性能分析

Fig. 8 Comparison of recognition performance among different parameters

图 9 给出了本文算法、广义码重分布分析算法^[13]以及逐一判断法^[14]在不同误码率情况下的识别正确概率,并在表 5 记录完成一次正确识别所需的运行时间。从图中可以看出,广义码重分布分析算法和逐一判断法随着误码率的增加,算法性能急剧下降,当误码超过 0.04 时,广义码重分布分析算法识别率下降到 50% 以下,而逐一判断法的识别率已不能正确识别出参数类型,但本文中提出的算法的识别概率仍高于 80%,能较好地识别,因此本文算法具有良好的抗误码性能。但从表 5 中可以看出,本文算法在计算时间上要稍逊于广义码重分布分析算法,算法复杂度较高。这是由于广义码重分布分析算法不需要对矩阵进行多次行列变换,减少了运行时间,但是该方法只能在分组码长恰好等于交织深度与交织宽度的乘积时的交织类型进行识别,在非合作通信中,由于缺少先验信息,方法具有较大局限性。本文所提出的算法可以较好地完成对系统交织类型的识别。

4 结束语

本文针对 RS 码,提出了一种基于归一化秩特征的交织类型盲识别方法,在不需要考虑码长约束的条件下,通过高斯约当算法对分析矩阵做初等变换,结合所得下三角阵中各列的零值比计算出秩缺矩阵的归一化秩,最后利用归一化秩的变化规律完成交织器类型盲识别,较以往的识别方法相比,本文识别方法不需要任何先验条件,弥补了以往交织类型识别方法的不足。仿真实验结果表明,本文所提方法可以较好地完成交织类型识别,且具有良好的抗误码能力,在误码率为 0.04 时,仍能够保证较高的识别正确概率,并通过不同门限值下的系统性能比较,确定了识别算法的最优门限值为 0.57,可为实际的工程应用提供一些参考。

参考文献:

- [1] 张岱, 张玉, 杨晓静. 一种高误码 (n, k, m) 非系统卷积码盲识别算法[J]. 数据采集与处理, 2015, 30(3):636-645. Zhang Dai, Zhang Yu, Yang Xiaojing. Algorithm for blind recognition of (n, k, m) non-systematic convolutional code with high BER[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2015, 30(3):636-645.
- [2] 曾辉, 黄鲁, 杨灿美. 基于 IR-UWB 系统的高速准循环 LDPC 编解码器设计[J]. 数据采集与处理, 2015, 30(3):599-605. Zeng Hui, Huang Lu, Yang Canmei. High-rate quasi-cyclic LDPC design for IR-UWB system[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2015, 30(3):599-605.
- [3] 相征. 数据链技术与系统[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2014:38-39. Xiang Zheng. *Data link technology and system*[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2014:38-39.
- [4] 崔琳, 杨俊安, 刘辉, 等. 通用数据链并行 Laguerre 盲均衡算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(2):216-223. Cui Lin, Yang Jun'an, Liu Hui, et al. Parallel laguerre blind equalization algorithm for common data link[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(2):216-223.
- [5] Lu G, Dan L, Liu Z H, et al. A low complexity algorithm of blind estimation of convolutional interleaver parameters[J]. *Science China*, 2013, 56(4):1-9.
- [6] Jeong J, Jeon Y, Yoon D. Blind estimation of block Interleaver parameters using statistical characteristics[C]// *Future Generation Information Technology*. Jeju Island, Korea; Springer-Verlag Berlin and Heidelberg K, 2016:51-56.

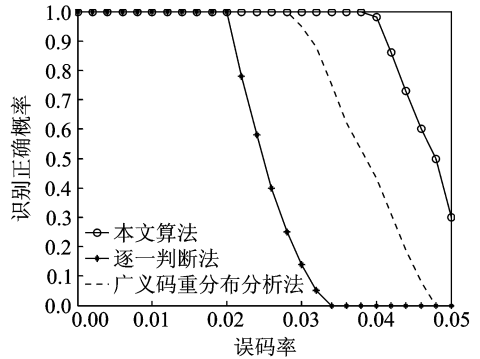


图 9 3 种算法误码性能分析

Fig. 9 Comparison of recognition performance among different three algorithms

表 5 不同算法的运行时间对比

Tab. 5 Comparison of run time among different three algorithms

算法	运行时间/s
广义码重分布分析算法	79.431
逐一判断法	148.328
本文算法	101.161

- [7] Choi C, Yoon D. Enhanced blind interleaver parameters estimation algorithm for noisy environment[J]. IEEE Access, 2017, 99(6): 5910-5915.
- [8] 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 Zonghui, Liao Hongshu, et al. Blind estimation of the parameters of convolutional interleaver[J]. ACTA Electronica Signal, 2011, 39(9): 2173-2177.
- [9] 黄丽, 谌稳固, 黄雨佳, 等. 信道编码中交织器的盲识别[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(10):252-257.
Huang Li, Chen Wengu, Huang Yujia, et al. Blind identification of interleaver in channel coding[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(10):252-257.
- [10] Choi C, Yoon D. Blind interleaver parameter estimation using Kullback-Leibler divergence[J]. Journal of Korean Institute of Information Technology, 2017, 15(12):109-115.
- [11] 解辉, 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 Fenghua, Huang Zhitao. A method for blind recognition of convolutional interleaver[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(8): 1952-1957.
- [12] 张玉, 郑鹏鹏, 杨晓静. 数字通信系统中基于线性分组码的交织器检测[J]. 电路与系统学报, 2013, 18(1):327-331.
Zhang Yu, Zheng Pengpeng, Yang Xiaojing. The detection of interleaver based on linear block codes in digital communication [J]. Journal of Circuits and Systems, 2013, 18(1):327-331.
- [13] 廖斌, 张玉, 杨晓静. 基于广义码重分布的交织类型盲识别研究[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(7):10-13.
Liao Bin, Zhang Yu, Yang Xiaojing. Recognition of interleaving style based on generalized code weight distribution[J]. Fire Control & Command Control, 2014, 39(7):10-13.
- [14] 刘宗辉. 交织和分组码参数盲估计与识别技术[D]. 成都:电子科技大学, 2011.
Liu Zonghui. Blind estimation of interleaver and block codes[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- [15] Jamshidi A, Keshavarz-Hadad A, Zare F. Estimation of convolutional interleaver parameters in the burst and BSC channels [J]. Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Electrical Engineering, 2016, 40(2/4):93-102.
- [16] 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, 2010:109-112.
Zhang Yongguang, Lou Caiyi. Channel coding and recognition analysis[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010:109-112.
- [17] Li W, Lei J, Wen L, et al. An improved method of blind recognition of RS code based on matrix transformation[C]// IEEE International Conference on Communication Technology. Beijing, China: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2014:196-200.

作者简介:



龙浪(1994-),女,硕士研究生,研究方向:信道编码识别分析、通信对抗, E-mail: 1244102522@qq.com。



杨俊安(1965-),男,教授,博士,研究方向:信号处理、智能计算等。



刘辉(1983-),男,讲师,博士,研究方向:通信对抗、智能信息处理等。



梁宗伟(1994-),男,硕士研究生,研究方向:卫星信号处理、通信对抗。