第38卷 第17期
Vol.38 No.17

计 算 机 工 程
Computer Engineering

2012年9月
September 2012

• 网络与通信 •

文章编号：1000—3428(2012)17—0084—03 文献标识码：A 中图分类号：TN919.3

基于矩阵模型的线性分组码及分组交织识别

郑鹏鹏，张 玉，杨晓静

(电子工程学院信息系，合肥 230037)

摘 要： 针对通信系统中错误不可避免的现状，在矩阵分析法的基础上，提出反向纠错思想。利用穷举法，穷举条件规定范围内所有可能的分组码和分组交织模式，在纠错译码后再进行判定，得出正确的交织参数。对该方法在不同的误码率条件下进行仿真，得出能够正确识别的误码范围。

关键词： 二进制线性分组码；分组交织；误码率；交织关系；交织长度

Identification of Linear Block Codes and Packet Interleaving Based on Matrix Model

ZHENG Peng-peng, ZHANG Yu, YANG Xiao-jing

(Information Department, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

【**Abstract**】Status for inevitable errors, this paper puts forward reverse correction ideas and lists all possible combination of block codes and packet interleaving modes using enumeration methods. And the decoding is used for correcting the errors. The right parameters of interleaving come out. This paper simulates the method in different Bit Error Rate(BER) and reaches an appropriate range of bit error rate.

【**Key words**】binary linear block codes; packet interleaving; Bit Error Rate(BER); interleaving relationship; interleaving length

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.17.024

1 概述

在数字通信系统中，为了提高抗突发错误的能力，引入了交织器，增加了编码识别的难度。编码识别之前需要先对交织进行识别，一些纠错码还将交织技术融合于编码过程中(如 Turbo 码[1])，使对其的识别更加困难。交织方式的识别已经成为纠错码识别的一个关键点。目前，关于这方面的研究有一定成果，较好的方法有矩阵分析法[2]等。矩阵分析法是在理想条件下进行的分析，不具有现实意义，本文对该方法进行改造，实现对误码序列的识别。

2 分组交织

交织方式分为分组交织、卷积交织和伪随机交织。分组交织又分为行列式分组交织和螺旋式分组交织[3]。行列式分组交织将序列分为若干块，每个块编为 $r \times m$ 的矩阵，采用以行写、列读的方式实现码元交织，其中行写有 LR (Left-to-Right)和 RL(Right-to-Left)2 种次序，列读有 LTB (Left Top-to-Bottom)、LBT(Left Bottom-to-Top)、RTB(Right Top-to-Bottom)和 RBT(Right Bottom-to-Top) 4 种次序，如果以行写和列读的方式自由组合会产生 8 种模式，但是这 8 种模式中有 4 种对原序列的置乱结果是一样的，故行列式分组交织可分为 4 种基本模式：LR/LTB(如图 1 所示), LR/LBT, LR/RTB[4], LR/RBT[5]。

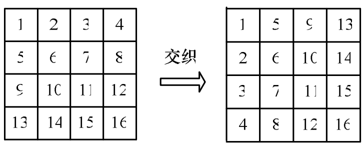


图 1 LR/LTB 行列式分组交织示意图

螺旋式分组交织规则[6]：首先将数据序列按行的顺序写入 $r \times m$ 矩阵。交织时从矩阵的左上角开始向下读取数据，每向下一行同时右移一位。

3 线性分组码分组交织识别方法

分组交织需要识别的参数包括：交织长度 L，交织起点 i，交织关系 $r \times m$。通常情况下，为保证编码和交织结合的最优性能，分组交织和 (n,k) 线性分组码(n 为线性分组码码长，k 为信息位位数)之间满足如下关系：

(1) $L = n \cdot t$, $t \geqslant 1$ 且为整数，即 L 为 n 的整数倍。

(2)交织块以分组码序列的一个分组起点为起点。

根据截获的数据选取合适长度的序列作为识别序列，将其按照行写(LR)的方式组成一个 $p \times q$ 的矩阵，行数 p 固定(识别序列长度应大于 p^2)，其至少应为未知交织长度的 2 倍，列数 q 取值小于行数 p。

3.1 交织长度 L 的确定

定理 1 在理想通信条件下，对经 (n,k) 线性分组码+

作者简介： 郑鹏鹏(1985－)，男，硕士研究生，主研方向：信号与信息处理；张 玉，教授；杨晓静，副教授

收稿日期： 2011-10-19 **修回日期：** 2011-12-22 **E-mail：** zhengpp12345@163.com

分组交织编码后的数据序列所构成的 $p\times q$ 矩阵，若列数 q 为交织块长 L 的整数倍，则标准化后左上角单位阵的维数相等，且此时矩阵的秩不等于列数 q[2]。

由定理 1 知，对于标准化后秩不等于列数的矩阵，其列数为块长 L 的整数倍，则对所检测出的秩不等于列数的矩阵的列数取最大公约数就可得到块长 L。

对含有误码的截获序列，进行标准化处理后，信息位的误码就会转嫁到校验位中，误码导致校验位发生错误，在一定程度上影响了码字的相关性，但是只要相关性不完全被破坏，矩阵的秩就小于列值。当然误码率较高情况下，有相关性完全被破坏的可能，这在仿真中的表现为：一部分列的丢失。所以在一定误码率条件下，交织块长仍可通过矩阵分析法得到，如表 1 所示。

表 1 (7,3)线性分组码 L=21 时交织长度识别

误码率 $P_e=0$		误码率 $P_e=10^{-3}$		误码率 $P_e=5\times10^{-3}$	
列值	标准化矩阵秩	列值	标准化矩阵秩	列值	标准化矩阵秩
21	9	21	13	42	41
42	18	42	27	84	81
63	27	63	41	168	166
84	36	84	51	189	187
105	45	105	66	231	230

3.2 交织起始位的确定

定理 2 对经线性分组码+分组交织编码后的数据序列所构成的 $p\times q$ 矩阵，当交织起点与矩阵每行起点重合时，其标准化矩阵的秩最小[2]。

构造的分析矩阵，列数取交织块长 L 的整数倍，然后将矩阵首位移位 $L-1$ 次，记录每次移位后矩阵标准形的秩，由定理 2 可知，秩最小时的矩阵的首位就是交织块的起点。

3.3 交织关系的确定

定理 3 理想通信条件下，对经 (n,k) 线性分组码+分组交织编码的数据序列所构成的 $p\times L$ 矩阵，如交织块的起点为矩阵首位时，其标准化矩阵的秩为 R，则有下述关系成立[2]:

$$\begin{cases} kt = R \\ nt = L \end{cases} \tag{1}$$

其中，t 为每个交织块所包含的完整码字数。

在误码条件下，式(1)并不成立，因为误码破坏了线性分组码的相关性，导致 $R>kt$。针对该问题，文中提出反向纠错思想，基本思路是：假设待识别码序列符合某种分组码和交织关系，利用分组码的译码规则将序列中误码纠正，然后对假设进行验证，得出结论。图 2 为识别框图，首先将待识别序列分为 u(u 为交织器的穷举次数)路，每路都是 $S1$，根据各路的交织关系对序列进行解交织得序列 $S2$。不同的解交织器得到的 $S2$ 序列是不同的，将 $S2$ 分为 v 路(v 等于分组码参数的穷举次数)，分别进行译码得 $S3$ 序列。译码过程只有交织关系和分组码参数都正确的一路将 $S1$ 序列中的误码纠正，其他支路不能分辨真正的误码，译码后序列的误码率会更高，最后 $S3$ 经交织器恢复 $S1$ 序列的结构，参与验证。

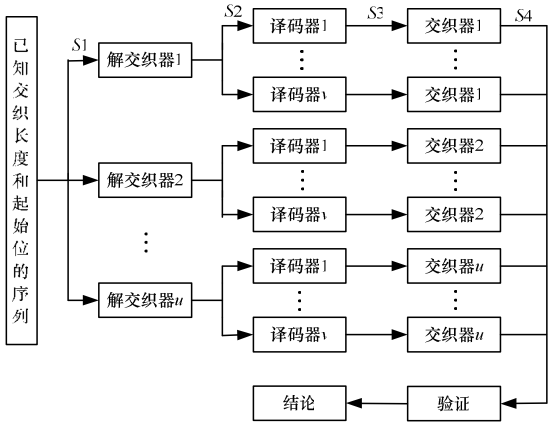


图 2 交织关系识别框图

3.3.1 穷举假设法

当交织长度 L 确定后，交织器的交织方式就会限定在一定的范围之内，这个范围是有限的。例如：假设 $L=21$，则其交织矩阵的行数 $r\in\{1,2,\cdots,21\}$，列数 $m\in\{1,2,\cdots,21\}$，根据 $r\times m=L$ 关系式，交织方式仅有 1×21、3×7、7×3、21×1 这 4 种可能，由于 m=1 或 21 相当于没有进行交织，则可能的交织方式只有 3×7 和 7×3。根据穷举的可能的交织方式将待识别码序列进行解交织。

序列完成解交织以后，就是分组编码序列。此时，利用分组码译码规则就可以将信道中的随机错误纠正，但问题是尚不知是哪种分组码。关于判定是什么分组码，同样可以采用穷举假设法。首先根据上文讲到的交织长度是码长整数倍的条件，大致确定码长 n 的范围，再根据 n 和实际中应用较多的分组码信息，穷举信息位 k，确定是哪种分组码。例：假设 $L=21$，则分组码有(7,3)码和(7,4)码等可能。

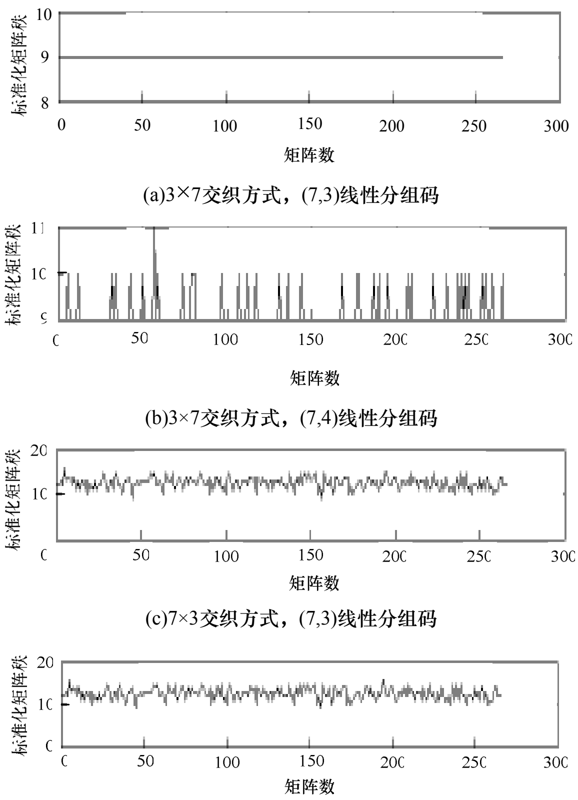
3.3.2 译码和交织还原

确定编码方式后，译码应该比较容易实现，本文采用伴随式译码[7]。译码一般包括纠错和还原信息序列 2 个部分。因尚不确定是哪种交织和分组码的组合，此处只需纠错以供识别所用即可，算法中译码只进行纠错。纠错后，利用与前面步骤中解交织相应的交织关系再对序列进行交织，还原序列截获时的结构，便于对其进行下面的处理。

3.3.3 验证

待识别序列，经过上文讲到的解交织、译码、再交织之后，假设有 i 种交织关系，j 种分组码，则会得到 $i\times j$ 种序列，这些序列不同的地方是对应分组码认为的误码。然后按照定理 3 的条件，将这些序列构造成 $p\times L$ 的矩阵 $(p>L)$，交织块的起点为矩阵的首位，判断此时矩阵标准化形的秩 R 是否满足定理 3 的结论，其中必有一个序列满足该结论，该序列对应的分组码和交织关系的组合即为所求。为了更具说服力，可以在序列中取多个矩阵，分别判定，相互验证。

图 3 为误码率=10^{-2} 条件下，(7,3)线性分组码经 3×7 分组交织序列反转纠错后几种可能组合的仿真图。



(a)3×7交织方式，(7,3)线性分组码

(b)3×7交织方式，(7,4)线性分组码

(c)7×3交织方式，(7,3)线性分组码

(d)7×3交织方式，(7,4)线性分组码

图3 组合验证仿真图

3.3.4 穷举算法复杂度分析

在上述方法中，都采用LR/LTB分组交织模式，过程中共进行了2次穷举假设。其实，在全盲状态下交织模式是不知道的，这就需要对交织模式进行穷举，那么，会有3次穷举假设，算法具有一定的复杂性。算法的复杂性由穷举次数决定。第1次穷举的是交织关系，由交织长度决定穷举次数的大小；第2次穷举的是交织模式，共有5种模式；第3次穷举的是分组编码参数，穷举次数也是由交织长度决定。

交织关系和分组编码参数n、k的穷举，理论上是相同的，都是寻找交织长度的因数，都随交织长度的增大而增大，且不具有规律性，很难简单地描述。此处，借助计算机对常用范围内的交织长度所需穷举次数进行了仿真，结果如图4所示。

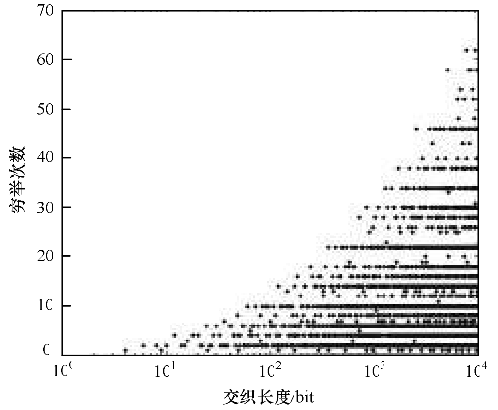


图4 交织长度与运算次数关系

从图4中可以看出，交织长度达到10^4 bit量级时，交织关系和分组编码参数n、k的穷举都是60次左右，再考虑5种交织模式的穷举，穷举次数将达到$60\times5\times60=18\,000$次。当然，这只是理论上的最高估计，实际中，各种交织器与编码参数的先验条件将大大缩小穷举次数。

为了减小算法的复杂度，可以将现有数字通信系统中所有的分组交织关系、交织模式和对应的分组编码方式存储到数据库中。在穷举运算时，首先验证数据库中对应交织长度的各种参数组合，如果不同码率在10^{-3}量级(实际信道误码率范围)或更小，则可判定正确，停止算法运算。

4 误码条件下的仿真分析

文中分3个步骤完成对分组交织参数的识别，每一步对误码率都有要求。在交织关系的识别中，用到的是伴随式译码，该译码方式可以将所有的禁用码字译为对应编码码字，因此，不论误码率多高，该方法都能完成对交织方式和编码方式的识别，即误码率的大小对交织方式和编码方式的识别结果没有影响。而在交织长度和起始位的识别中，误码率对识别结果的影响较大，经过多次仿真实验验证，不论误码率多大，只要能完成交织长度的识别就可以完成起始位的识别。所以，在分析误码率对矩阵分析法的影响时，主要是分析误码率对交织长度识别的影响。

交织长度的识别难度随着误码率的增大而变大，主要表现在所需截获序列长度和识别时间上。从图5可以看出，误码率达到8×10^{-3}时，所需截获序列长度已经无法在图上画出，即：无法实现交织长度的识别。但是在实际应用中，信道误码率在10^{-3}~10^{-4}之间，就可称为高误码率[2]，因此，算法的容错性能够满足一般信道的要求。

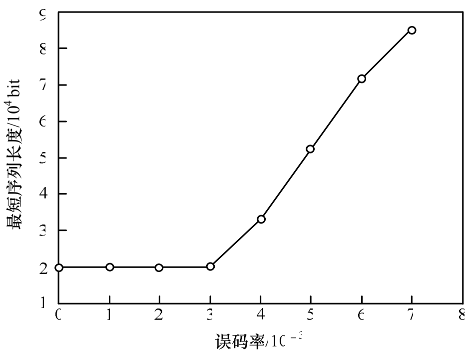


图5 最短截获序列长度与误码率关系

5 结束语

以上的论述及实验仿真，都采用的是行列式分组交织的LR/LTB模式，实际上，矩阵分析方法适用于分组交织的所有模式。分组交织的各种模式，最根本的区别在于交织块内码元的置乱规则不同，而矩阵分析法则是首先将矩阵模型进行标准化，标准化的过程去除了各种模式的置乱规则，标准化后各种模式的交织序列都是一样的。因此，上述观点在理论上是成立的。经过对各种模式分组交织的仿真实验，也验证了上述观点的正确性。

(下转第90页)