

文章编号:1001-893X(2011)05-0062-05

数字通信中卷积交织盲识别方法^{*}

张 玉,张伟杰,杨晓静

(解放军电子工程学院,合肥 230037)

摘 要:分析了卷积交织原理和交织器中移位寄存器的工作方式。在无任何辅助信息下,利用卷积交织器中移位寄存器所设初始值被交织后在交织序列中保持不变的特性,提出叠加法来确定交织序列中原移位寄存器初始值位置,并以此对卷积交织器支路数和每条支路增加的移位寄存器数这两个重要参数进行估计。为保证叠加结果的正确性,同时提出一种判决准则对叠加法的工作范围进行估计。仿真表明,叠加法 and 重要参数估计算法结合可在一定低信噪比下有效地实现关键参数估计和序列盲识别。

关键词:数字通信;卷积交织;盲识别;叠加法;信息截获

中图分类号:TN919.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-893x.2011.05.013

A Blind Recognition Method of Convolutional Interleaving in Digital Communication

ZHANG Yu, ZHANG Wei-jie, YANG Xiao-jing

(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: The principle of convolutional interleaver and the working mode of shift registers are analysed. Two parameters, including the numbers of branches and added shift registers in the every branch, can be estimated without any side information through an overlapping method. This overlapping method makes use of the invariability of the initial values in the shift registers which are added to the convolutional interleaving sequence and are not changed by any original information sequence. A decision criterion is also proposed to estimate the validity of overlapping result. The simulations show the overlapping method can estimate parameters and realize convolutional interleaving sequence without any side information at low signal-to-noise ratio (SNR) environment.

Key words: digital communication; convolutional interleaving; blind identification; overlapping; information intercepting

1 引 言

在数字通信中,传输信息不可避免要受到各种干扰而产生误码错误,其中包括随机错误和突发错误。工程实践中常用交织器来解决突发性错误,主要包括分组交织器、卷积交织器和随机交织器。其中卷积交织器与分组交织器的距离特性相似,但卷积交织器实现交织的端到端最大时延与存储空间和分组交织相比都少了一半^[1],缩短了交织的处理时

间,因此在数字电视地面广播系统、卫星通信和军事通信中有广泛应用。

在信息截获领域,卷积交织的识别已成为整个信息截获过程中不可缺少的一步,因此研究卷积交织的识别对于军事通信中截获和干扰都是有重要意义的。而且卷积交织要求卷积交织器与解交织器操作的输入和输出的转换器必须同步,增加对信息传输控制的复杂度。如果将盲识别技术引入到解交织过程中去,就可以克服同步所产生的限制,实现智能通信。关于卷积交织盲识别技术此类的文献属于信

^{*} 收稿日期:2010-11-03;修回日期:2011-03-07

息截获领域,目前可以找到的国内外公开的参考文献较少,本文从分析硬件构造的新角度出发,对此问题进行探索,提出盲识别方法。

2 卷积交织器原理

卷积交织器是一种连续工作的交织器^[2],如图 1 所示。

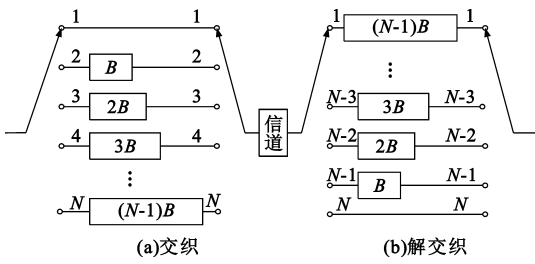


图 1 卷积交织器/解交织器的实现原理
Fig.1 Schematic diagram of convolutional interleaver and deinterleaver

如图 1,在交织器输入端,信息序列在切换开关的作用下依次进入 N 条支路,周而复始。每条支路的移位寄存器数以 B 的倍数增加,即第 i 条支路比第 $i-1$ 条多 B 个码字的存储空间,第一条支路无移位寄存器。交织器的输出端采用同步的切换开关,将交织序列发送到信道。而解交织器的结构与交织器相反,即各个支路的移位寄存器数与交织器相反,第一支路延迟 $(N-1)B$ 的符号周期,第二路延迟 $(N-2)B$ 的符号周期,第 N 路则无延迟。解交织器的输入端也要采用相同的切换开关,在同步的情况下解交织器进行相反操作便可得到原始信息序列^[3,4]。交织器的延时 d_i 与解交织器每条支路的延时 d'_i 分别为

$$d_i = (i-1)NB, i = 1, 2, 3, \cdots, N \tag{1}$$

$$d'_i = (N-i)NB, i = 1, 2, 3, \cdots, N \tag{2}$$

例如取 $N=3, B=2$, 信息序列为 $C = (c_1, c_2, c_3, \cdots, c_{21})$, 并取移位寄存器的初始值为 1, 经过卷积交织后得到交织序列为 $C = c_1, 1, 1, c_4, 1, 1, c_7, c_2, 1, c_{10}, c_5, 1, 1, c_{13}, c_8, c_3, c_{16}, c_{11}, c_6, c_{19}, c_{14}, c_9, 1, c_{17}, c_{12}, 1, c_{20}, c_{15}, 1, 1, c_{18}, 1, 1, c_{21}$, 转换成矩阵表示为

1

1

1

1

c_{19}

c_{16}

c_{13}

c_{10}

c_7

c_4

c_1

$C' =$

1

1

c_{20}

c_{17}

c_{14}

c_{11}

c_8

c_5

c_2

1

1

c_{21}

c_{18}

c_{15}

c_{12}

c_9

c_6

c_3

1

1

1

1

$$\tag{3}$$

通过卷积交织原理与例子来看,当卷积交织器确定时,支路数 N 与移位寄存器数 B 就被确定,卷

积交织便可形成。因此对 N 与 B 这两个重要参数的估计就成为对卷积交织序列盲识别的关键。

3 卷积交织盲识别理论分析

3.1 卷积交织序列对称性及 $N、B$ 与截获数据一般关系

分析上一节的例子发现,得到的交织序列 C' 是以码字 c_{11} 对称,即以 c_{11} 为对称点对折后,两端的原始信息序列的码字 c_i 相互重合,原移位寄存器的初始值“1”相互重合。这种现象对于卷积交织器是具有一般性的,产生对称的现象主要是因为交织器中硬件构造,尤其是移位寄存器的位置分布。利用此性质可实施对卷积交织重要参数的估计。上一节中的例子也反映出了 $N、B$ 与截获数据之间的具体关系。

下面分别从信息序列总码字长度为奇数和信息序列总码字长度为偶数两个方面论证卷积交织序列对称性具有一般性和 $N、B$ 与截获数据之间的一般关系。

设二进制随机 $\{0,1\}$ 信息序列长度 M 为

$$M = 2m + 1, m = 0, 1, 2, \cdots \tag{4}$$

此信息序列经过 N 与 B 确定的卷积交织器,得到的交织序列第一位码字为 c_1 , 之后的码字为 B 的原移位寄存器初始值“1”。根据卷积交织原理,可以得到在信息序列 c_2 被交织时, c_2 前一时刻被交织的码字为原信息序列码字,其在信息序列中的码位 i' 为

$$i' = (N-1)B + N \tag{5}$$

即信息序列的第 $(N-1)B + N$ 个码字于 c_2 前一时刻被交织。当 c_2 被交织后,交织序列中原移位寄存器初始值“1”由连续的 B 个变为 $B-1$ 个。同样在 $c_3、c_4$ 被交织后,移位寄存器初始值“1”的数目再次变化,以此类推,直至对称点 c_{m+1} 。

信息序列码字 c_{2m+1} 是最后一个被交织的码字,从后向前观察交织序列在 c_{2m} 被交织时,原理同上, c_{2m} 前一时刻被交织的码字为原信息序列码字,其在信息序列中的码位 i'' 为

$$i'' = 2m + 1 - [(N-1)B + N - 1] \tag{6}$$

当 c_{2m} 被交织后,交织序列中原移位寄存器初始值“1”由连续的 B 个变为 $B-1$ 个。同样在 $c_{2m-1}、c_{2m-2}$ 被交织后,移位寄存器初始值“1”的数目再次变化,以此类推,直至对称点 c_{m+1} 。这样就可以得到卷积交织序列通式:

$$C' = c_1, 1, \cdots, 1, c_{B+2}, 1, \cdots, 1, c_{2B+3}, 1, \cdots, 1,$$

$$\begin{aligned} &c_{(N-1)B+N}, c_2, 1, \cdots, 1, \cdots, c_{m+1}, \cdots, 1, \cdots, 1, \\ &c_{2m}, c_{2m+1} - [(N-1)B + N - 1], 1, \cdots, 1, \\ &c_{2m+1} - (2B+2), 1, \cdots, 1, \\ &c_{2m+1} - (B+1), 1, \cdots, 1, c_{2m+1} \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)的具体描述如图 2 所示。

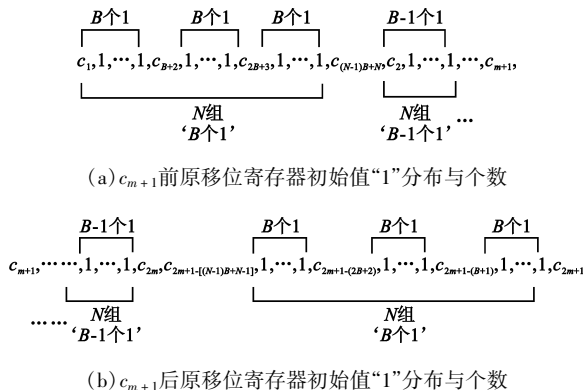


图 2 交织序列通式示意图

Fig. 2 Illustration of interleaving sequence formula

通过图 2(a)与(b)的对比后可以看出,交织序列中原移位寄存器初始值“1”是以 c_{m+1} 为对称点严格对称的,因此可以知信息序列长度为奇数时交织序列具有对称性。同理,当信息序列长度为偶数时,可得交织序列通式为

$$\begin{aligned} C'' &= c_1, 1, \cdots, 1, c_{B+2}, 1, \cdots, 1, c_{2B+3}, 1, \cdots, 1, \\ &c_{(N-1)B+N}, c_2, 1, \cdots, 1, \cdots, 1, \cdots, 1, \\ &c_{2m-1}, c_{2m} - [(N-1)B + N - 1], 1, \cdots, 1, \\ &c_{2m} - (2B+2), 1, \cdots, 1, c_{2m} - (B+1), 1, \cdots, 1, c_{2m} \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)反映出 N 、 B 与截获数据之间的一般关系。同样当信息序列长度为偶数时,交织序列也具有对称性,对称点在交织序列码字 c_m 与 c_{m+1} 之间。

通过对称性可以发现,移位寄存器初始值“1”在交织序列中的分布与 N 和 B 有着直接的关系,利用此性质便可进行卷积交织重要参数估计。

3.2 卷积交织重要参数估计算法

根据卷积交织原理可以得到如下结论:无论输入的信息序列是怎样的 0、1 组合,经过同一卷积交织器后,得到的多个卷积交织序列中总有一些码位上的码字是不变的。分析第 2 节的例子,当我们确定使用卷积交织器的规格后,即 N 与 B 确定后,在矩阵两侧的“1”不会随信息序列 C 的变化而改变。经过反复试验,在二进制信息序列下当选取不同的 C 时,矩阵 C' 中只有 c_i 在变化,而其它位置的码字不变。进一步分析可以得到这些不变的码字恰好是

移位寄存器的初始值,即没有被信息序列填充前的移位寄存器的值,例子中我们设移位寄存器的初始值为 1,所以没有变化的位置上的数始终保持为“1”。初始值理论上可以设定为任何实数,一般依据输入数据的类型来确定。这里讨论的信息序列为二进制,因此移位寄存器的初始值可以设为 0 或 1,为了全文讨论方便,这里统一设置为 1。

不变码字所对应的码位与支路数 N 和移位寄存器数 B 是有着一定的关联性,实际上这些码位可以反映出 N 与 B 的有关信息,原因在于卷积交织器的构造。为了保证原始信息序列在传输过程中具有连贯性和可控性,方便接收方实现解交织,交织器在设计时严格保证从上至下每条支路所增加的移位寄存器数 B 是固定的。我们可以具体化这种硬件构造,它与楼梯构造一样,交织方是“上楼”,解交织方是“下楼”,我们观察式(3)中“1”的部分和图 1 可得出此结论。因此,通过对“1”的分析可得到 B 。下面将上述分析转化成数学表示。

分析得到的卷积交织序列可以得到这样一种规律:交织序列的第 1 位总是信息序列的第 1 位,而从第 2 位开始便是连续的 $j(j \geq 1)$ 个 1(移位寄存器的初始值),事实上支路数 N :

$$N = j + 1, j = 1, 2, \cdots \quad (9)$$

然后继续向后观察,如果再次出现 $i(i \geq 0)$ 次连续的 j 个 1 出现,就可以得到每条支路增加的移位寄存器数 B :

$$B = i + 1, i = 0, 1, 2, \cdots \quad (10)$$

下面利用第 2 节中具体例子来说明这个规律,观察在第 2 节中提到交织序列矩阵 C' ,发现第 1 位交织序列为信息序列 c_1 ,然后连续的 $j = 2$ 个 1,后面是信息序列 c_4 ,再次跟着 $i = 1$ 次两个连续的 1,之后便没有两个 1 的出现。再向后跳过两个信息序列是一个单个的 1,再跳过同样数目的信息序列再次出现 $i = 1$ 次单个的 1。利用上述提到的算法,将数据套用到公式(9)与(10)中,就可以估计出 $N = 2 + 1 = 3, B = 1 + 1 = 2$ 。

3.3 移位寄存器初始值的确定以及判决叠加法应用范围的准则

通信中实际情况是信息序列 C 一般为 $\{0, 1\}$ 序列,因而在交织序列中就包含移位寄存器初始值 1 和信息序列的码字 1,而不是我们上述分析中用到的 c_i 。这里提出叠加法解决这个问题。所谓叠加法就是利用移位寄存器初始值 1 始终保持不变的特

性,进行多次交织数据采样后,将所有采样本进行叠加或‘与’运算,移位寄存器初始值就会随着叠加次数而凸现出来,得到相对稳定的最高幅值,通过最高幅值的位置就可得出交织序列中哪些 1 为原寄存器初始值,进而再对 N 与 B 值实施估计,最后再利用 N 与 B 实现各组交织序列的盲识别。

在对叠加法的分析与实际仿真中发现,在噪声干扰严重的环境中,叠加法所产生的移位寄存器初始值 1 位置处的最高幅值会因为噪声的原因,在多次叠加后也可以保持稳定,但是这些稳定的幅值所提供的码位并不能准确反应出原移位寄存器初始值在交织序列中的位置。

综上提出一种基于提高信噪比的判决方法来验证叠加法可工作的范围。判决步骤如下:

- (1)利用叠加法得到相关的波形后,观察经过多次改变信号源的发送数据后波形的最高幅值是否稳定;
- (2)若不稳定,增加叠加次数或信号个数,直至波形的最高幅值稳定;
- (3)若稳定,亦不能说明结果正确,需要在更好的信道信噪比环境中进行数据截获,观察波形的最高幅值是否还稳定;
- (4)在提高信道信噪比的情况下,若不稳定,最高幅值有变化,说明噪声干扰严重,叠加结果不可用,继续提高信噪比,直至最高幅值不随信噪比变化而变化,此时叠加结果可用;
- (5)在更好的信道信噪比环境中进行相同数据截获情况下,若稳定,说明叠加结果可用。

如果只是通过直接观测波形来进行叠加,会缺乏客观的指标,从而使其在实际系统中的应用大受限制,因此应将波形转换为具体指标。通用算法为将所得波形量化,设置门限 H ,门限 H 比最大值略小,大于 H 的值统一量化为 1,小于 H 的值统一量化为 0,再套用第 3.2 节给出的估计算法进行参数估计。

4 卷积交织盲识别仿真分析

在有噪环境下对卷积交织序列的盲识别中,采用 6 个伯努利二进制随机信号源,设信息序列长度均为 $M=21$,每个信号源采用不同的种子保证输出的信息序列为随机且均不相同;交织器采用 Simulink 自带卷积交织器^[5],每个交织器的参数均设为 $N=3, B=2$,作为信息截获方不知道 N 与 B 的

数值;移位寄存器初始值设为 1;并在每条线路添加一个加性高斯白噪声(AWGN)信道,并动态调整其中的信噪比(SNR);在信道两侧添加 BPSK 调制与 BPSK 解调,将经过此种处理的交织数据发送,截获方截获这 6 组交织数据。

因为有噪声影响,所以将截获的交织数据进行叠加运算,这里用加法器实现。设置一个门限来精确 1 与 0 的读取,门限设置原则是经过 H 次采样的话就可以设置门限为 H ,大于 H 取 1,小于 H 取 0。当信噪比 $R_{SNR} = -2$ 时,确定信号源所采用的种子后,输出的波形如图 3 所示。这时需要判断所得波形是否可以作为正确的叠加结果,进而可以给 3.2 节所提出的重要参数估计法提供数据。

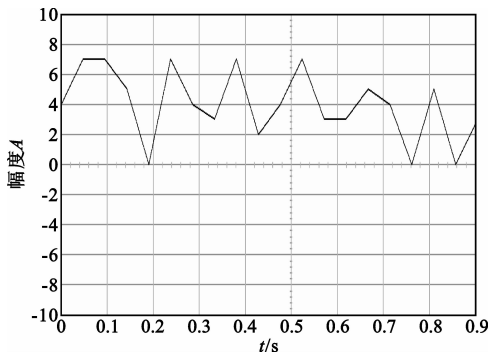


图 3 信噪比为 -2 dB 时通过叠加后的波形图
Fig.3 Waveform of overlapping when $R_{SNR} = -2$ dB

叠加结果的判决准则在第 3.3 节给出,为使讨论问题更具有针对性,假设截获信息方可以在更好的信噪比下截获使用相同卷积交织器的不同信息。如果再次截获的信息的最高幅值有变化,则此波形受噪声干扰过大不可用;反之,最高的幅值保持稳定,可利用波形图提供的信息,量化数据后进行 N 与 B 的估计。多次改变信号源所采用的种子后,即不断改变发送信息,发现波形图最高幅值的位置不变,但当 $R_{SNR} = -1$ dB 时,波形图如图 4 所示,与图 3 的最高幅值不同,说明 $R_{SNR} = -2$ dB 时的叠加结果不可用,此时判断出针对此交织器叠加法的应用范围为信噪比不小于 -1 dB。

此时如果第三方可截获到更多不同的交织序列进行叠加,并取较精确的门限,可以在更低信噪比下取得更好的盲识别效果。或者如果第三方可截获的交织序列数有限,则要首先进行降噪处理,获得更高信噪比下的交织序列,这样也可以达到预定的盲识别效果。

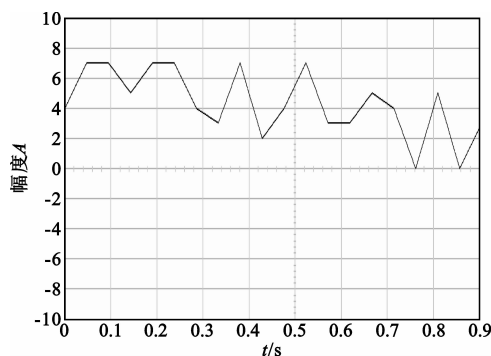


图 4 信噪比为 -1 dB 时通过叠加后的波形图
Fig.4 Waveform of overlapping when $R_{\text{SNR}} = -1$ dB

当信息序列长度均为 $N = 21$, 且 $R_{\text{SNR}} = -1$ dB 时, 采用 6 个信号源可完成对卷积交织序列的盲识别, 输出的波形如图 4 所示。

因为噪声的影响是加性的,所以移位存储器的初始值始终保持为 $1 \pm d_n$, d_n 是噪声在幅度上的影响,而且经过多次改变信号源所采用的种子和提高信噪比后,所得波形的最高幅值稳定,此时的叠加结果可用。本仿真可设置门限 $H=6$,将图形中信息直接转换为向量数据:(0,1,1,0,1,1,0,0,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0),这样可得到两个连续的两个1和两个连续的一个1,由此得出 $N=3, B=2$ 。与仿真中所用的卷积交织器的参数对比后发现一致,盲识别成功。

为了验证方法具有普遍性,将数据长度增加,均为 $M=64$;截获方截获 18 组相同交织器交织的数据;交织器的参数均设为 $N=4, B=3$,移位寄存器初始值设为 1,同样截获方不知 N 与 B 的数值。利用判决准则估计出此时叠加法的工作范围信噪比应不小于 5 dB,得到的波形图如图 5 所示。

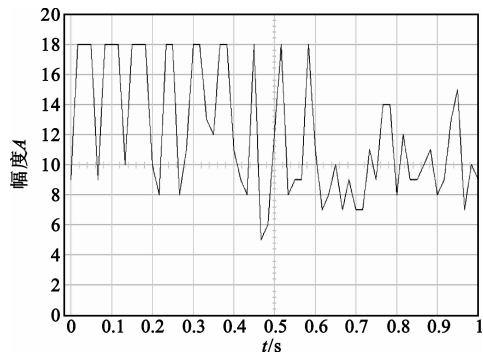


图5 更改数据长度和交织样式后, 信噪比为5 dB时通过叠加后的波形图

Fig.5 Waveform of overlapping when $R_{\text{SNR}} = 5$ dB after the length of data and the type of convolutional interleaving are changed

同样设置门限 $H = 18$, 转换为向量数据: $(0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0,$

0,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0), 结合重要参数估计算法分析此向量,可得到 3 个连续的 3 个 1、3 个连续的两个 1 和 3 个连续的一个 1, 由此得出 $N=4, B=3$ 。与仿真中信息发送端所用的卷积交织器的参数对一致,识别成功。

5 结 论

本文针对卷积交织识别提出了全新的解决方法。首先理论上证明了卷积交织盲识别的可行性,并给出了具体盲识别方法。仿真表明,在一定低信噪比环境下本文所提出的盲识别方法能有效地估计出支路数 N 和每条支路存储器的增加数 B 。因此,此卷积交织识别方法可为信息截获技术和智能化通信提供重要参考。

参考文献:

- [1] Proakis J G. Digital Communications [M]. 3rd ed. New York: McGraw - Hill, 1995.
- [2] 徐元欣,王匡,仇佩亮.实现卷积交织的几种实用方法[J].电路与系统学报,2001(1):7-12.
XU Yuan-xin, WANG Kuang, QIU Pei-liang. Several Applied Methods of Realization of Convolutional Interleaver[J]. Journal of Circuits and Systems, 2001(1):7-12. (in Chinese)
- [3] 张杭,张邦宁,郭道醒,等.数字通信技术[M].北京:人民邮电出版社,2008.
ZHANG Hang, ZHANG Bang-ning, GUO Dao-xing, et al. Digital Communications Technology [M]. Beijing: People's Posts and Telecom Press, 2008. (in Chinese)
- [4] John L Ramsey. Realization of Optimum Interleavers[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1970, 16(3): 338-345.
- [5] 李贺冰,袁杰萍,孔俊霞,等. Simulink 通信仿真教程[M].北京:国防工业出版社,2006.
LI He-bing, YUAN Jie-ping, KONG Jun-xia, et al. Simulink in Communication Simulations[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)

作者简介:

张 玉(1962—),男,安徽合肥人,教授、硕士生导师,主要研究方向为信号与信息处理;

ZHANG Yu was born in Hefei, Anhui Province, in 1962. He is now a professor and also the instructor of graduate students. His research direction is signal and information processing.

张伟杰(1985—),男,吉林省吉林市人,2008 年于吉林大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为信道编码盲识别;

ZHANG Wei-jie was born in Jilin, Jilin Province, in 1985. He received the B.S. degree from Jilin University in 2008. He is now a graduate student. His research direction is blind identification of channel coding.

Email: zhweijie521@yahoo.com.cn

杨晓静(1963—),女,湖北武汉人,副教授、硕士生导师,主要研究方向为信号与信息处理。

YANG Xiao-jing was born in Wuhan, Hubei Province, in 1963. She is now an associate professor and also the instructor of graduate students. Her research direction is signal and information processing.