

Turbo 码中一种基于混沌映射的 DRP 交织器设计

张卫党, 康惠平, 高 辉

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 针对 Turbo 码编译码结构的交织器的设计问题, 提出了一种有效降低突发错误的交织器的设计方法, 利用了混沌序列的伪随机性, 结合 Dithered Relative Prime (DRP) 的内部交织过程, 并将其应用于 Turbo 码中, 和传统交织器在相同环境下进行仿真比较. 结果表明: 在信噪比大于 1.5 dB 条件下, 该交织器有效地降低了 Turbo 码的误比特率, 达到改善系统性能的目的.

关键词: Turbo 码; 交织器; Logistic 混沌模型; DRP

中图分类号: TN911.22

文献标志码: A

0 引言

1993 年国际通信会议上, 法国教授 C. Berrou 等提出了新的 Turbo 码方案^[1]. Turbo 码已经成为一种新的通信系统信道编码技术. 目前, 美国空间数据系统顾问委员会把 Turbo 码作为深空通信的标准; 第三代移动通信系统的信道编码方案中也确定了 Turbo 码的位置. Turbo 码的独特性在于: 交织技术的使用和解码中的级联形式. 目前, 国内外诸多文献研究表明, 交织器对 Turbo 码性能起到显著作用. 文献[2-3]是针对交织器设计中信息序列需要的内在随机性, 把混沌映射关系引入交织技术的交织器构造方法, 其生成的随机序列之间的统计相关性和码字间最小距离是优于 M 序列的. 但是以混沌映射关系设计的交织器存在计算量大、系统延时增加、实现过程高复杂度等问题. 而文献[4-5]中介绍的 Dithered Relative Prime (DRP) 交织器具有存储数据量较低、高性能及复杂度低等特点, 被广泛使用.

笔者在借鉴混沌交织器的高随机特性的基础上, 综合了 DRP 交织器的独特之处, 设计出新的混沌 DRP 交织器, 旨在增加随机性的同时, 降低算法复杂度, 优化交织功能模块, 使 Turbo 码的误比特性能得以提升.

1 交织器及混沌理论

1.1 交织器

交织器构造的优异是能否从系统结构上提高 Turbo 码的编解码性能的一个重要方面. 本质上说, 交织器是在打乱原始信息数据的排列顺序的同时, 降低校验比特信息间的相关性, 防止编码后生成的低重码字的信息序列经过交织后生成的码字仍具有低码重性, 使码字间自由距离变小的功能模块, 在译码迭代过程中使误比特性能得以改善, 这样给信息数据带来了较可靠的传输性能, 避免和降低了信道中突发错误信息产生的干扰.

在 Turbo 码系统实现过程中, 交织器类似于单输入/单输出的功能模块, 输入和输出信息符号中符号集相同, 经过该模块后各元素在输出单元中的位置顺序与输入符号元素不同. 假设有集合 $Z, Z = \{1, 2, \dots, n\}$, 对应到交织器就存在映射关系, 即

$$\pi(Z \rightarrow Z): j = \pi(i), \quad i, j \in Z.$$

式中: i 表示交织前的序列 C 序列标号; j 表示交织后序列 C' 的序列标号.

交织器在 Turbo 码编码、译码结构中都有出现, 即交织与解交织过程. 因此设计出一种内在随机性强、实现容易的交织器对 Turbo 码很重要. 图 1 为 Turbo 码编码器的结构框图.

收稿日期: 2011-03-10; 修订日期: 2011-06-11

基金项目: 河南省教育厅自然科学研究计划项目(2010B510020)

作者简介: 张卫党(1958-)男, 河南商丘人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事通信方面的教学以及信道编码的研究,

E-mail: iewdzhang@zzu.edu.cn.

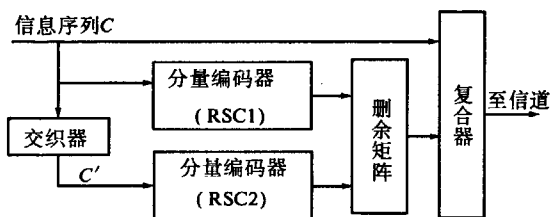


图1 Turbo码编码器结构框图

Fig. 1 Turbo code encoder structure diagram

1.2 混沌理论

当某一物体连续以某种变化规律重复上一阶段的运动形态,出现难以估计预测的随机效果,即混沌现象,该现象属于非线性动力系统范畴.文献[7-9]指出,工程上 Logistic 模型常被用到,其中二分类的回归映射是该模型中较简单常用的一种,数学表达式为:

$$x_{n+1} = ux_n(1 - x_n) \quad (1)$$

从图2系数 u 的特性图可知,参数 u 在 $[0, 3]$ 的取值区间内时呈现周期解,而 $u \in (1 + \sqrt{6}, 4)$ 时产生混沌.

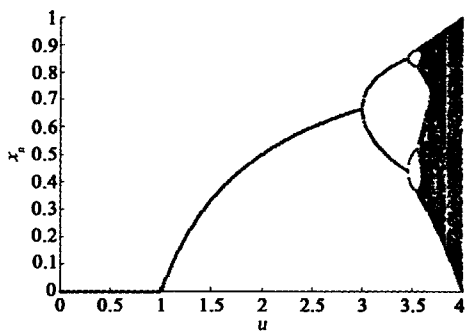


图2 Logistic映射函数变化关系图

Fig. 2 Logistic mapping function changes relationship chart

映射关系的变化特性图蕴含的混沌分布状态,包括从倍周期到混沌、分岔图等非线性理论的基本结构和形式.文献[7]提出该混沌映射的几个特征: $u \in (1 + \sqrt{6}, 4)$ 的范围内 Logistic 映射呈现出混沌状态和序列的随机性.

x_n 的初始化值 x_0 和 u 值的选取对曲线变化轨迹存在较大影响,初始化值任意小的变化都会给轨迹带来充分大的呈指数分离趋势.但是,混沌映射在一定取值范围内的高随机性正是交织器设计中扩散码字内在距离所需要的.

2 改进方案

2.1 Logistic-DRP 交织器

在初始条件下,把式(1)生成的迭代序列值

进行重新排列 $\{x_n\}$, 作为输出的交织矢量. 在交织中,当交织矢量序列间的码字重量偏小时,会引起码字的突发错误信息相关性较强(即离散程度不显著).这里可借助 DRP 交织加入抖动信息量来弥补.

依据混沌 Logistic 映射模型对 DRP 交织器进行改进可以得到一种性能更优的交织器,这就是 Logistic-DRP 交织器. 设帧长为 N 时,交织器可以表示为

$$\pi = [\pi(1), \pi(2), \dots, \pi(k), \dots, \pi(j), \dots, \pi(N)].$$

设计过程如下:①依据 Logistic 映射特性设定参数 u , 并对 $x(0)$ 进行初始化赋值;②由式(1)迭代得到随机序列 $x(i)$, 对 $x(i)$ 进行取整处理, $\pi(i) = \lfloor x(i) \times 10^{16} \rfloor \bmod N$, $\pi(i) \in [0, N-1]$, $i \in [1, \infty)$;③然后将随机数 $\pi(i)$ 与 $\pi(n)$ 进行比较,其中, $n \leq i$, 当出现重复时,则剔除重复值.笔者是以改变增量大小的方式来控制出现重复的随机数,增量值的选取要满足 $(q, N) = 1$, 即二者互素, q 代表增量值;④将生成去除重值的随机序列 $\pi(i)$ 作为 DRP 交织器的原始输入信息序列.

2.2 DRP 交织器改进

DRP 交织器^[8]的实现原理主要是把交织实现过程分解为3步.即

$$\pi(i) = \pi_a(\pi_b(\pi_c(i))), i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

在加入两个小交织模块 π_b 和 π_c 过程下,使 DRP 交织器获得更好的性能.这两个小交织器的作用是在没有降低第二步的 RP(Relative Prime)交织器性能的同时,削减相邻信息比特序列间的相关性,从而使交织器生成的信息序列随机化程度得到扩大.其主要思想是对于长度为 N 的输入数据 v_{in} , 采用 m 个长度为 R 的小交织器对每 m 个数据进行交织,其中 $N = m \times R$, 小交织器用矢量 r 定义.然后对得到的数据 v_a 进行 RP 交织,这时交织深度为 N .接着再对得到的数据 v_b 采用 n 个长度为 W 的小交织器对每 n 个数据交织, $N = n \times W$, 小交织器用矢量 W 来定义.

$$v_a(i) = v_{in}(\pi_a(i)), i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

$$v_b(i) = v_a(\pi_b(i)), i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

$$v_{out}(i) = v_b(\pi_c(i)), i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

其中,

$$\pi_a(i) = R[i/R] + r_{i \bmod R}, i = 0, 1, \dots, N-1;$$

$$\pi_b(i) = (s + ip) \bmod N, i = 0, 1, \dots, N-1;$$

$$\pi_c(i) = W[i/W] + w_{i \bmod W}, i = 0, 1, \dots, N-1.$$

式中: $[]$ 表示取整; \bmod 是求余运算;公式 $w_{i \bmod W}$ 表示 w 序列中的第 $i \bmod W$ 的值; $s, p \in \mathbf{R}^+$, N 为

交织深度, s 为初始序号(常取0), p 取 \sqrt{N} 临近的奇数且 $(P, N) = 1$.

由式(2)~(5)可知,DRP交织器利用小交织器逐步加以实现,其中的第一步,第三步加入的抖动信息,即 $r(i)$ 和 $w(i)$. 文献[8-9]中提到的抖动信息值形式固定,这样虽然减小了译码迭代的复杂度,但不能确保相邻序列之间信息比特的均匀分布. 笔者采用 Logistic 映射关系得到的随机序列 $\pi(i)$ 代替 DRP 小交织器中抖动信息值,这样在增加随机性的同时,也降低了信息序列之间的相关性. 同时,也对 DRP 交织器的第二步交织过程进行改进.

定义矢量:

$$v(i) = (s + iG + d(i)) \bmod N, i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6)$$

式中: G 是常量 ($G = 0.618^2 \times N$); N 为交织深度;参数 $d(i)$ 为 0 到 $N \times D$ (D 为抖动系数, $D = 0.01$) 的均匀分布.

3 仿真结果

笔者在 AWGN 信道下对交织器进行仿真,由混沌 Logistic-DRP 改进方案得到交织向量, Logistic 映射中参数选取为:初始值 $x_0 = 0.37$, $u = 4$;信源为随机分布的 01 序列,一帧长为 1 024;采用分量编码器结构 RSC(21, 37), 编码率为 1/3 (没有使用删余方案);采用 QPSK 调制方式,译码算法是 LOG-MAP 算法,迭代次数为 6 次.

图 3 是混沌随机交织器、DRP 交织器和改进后的 Logistic-DRP 交织器的性能仿真图. 当信噪比大于 1.0 dB 时, Logistic-DRP 交织器开始展现出优异性能. 另外,在信噪比大于 2.0 dB 的情况下,与混沌随机交织器相比较, Logistic-DRP 交织器性能曲线没有出现类似混沌随机交织器中变化趋于平缓的现象.

图 4 给出的是不同参数下的 Logistic-DRP 交织器的误比特率曲线. 图 4(a) 是在对于 $u = 4$, 初始值 x_0 不同时对 Logistic-DRP 交织器产生影响的 BER 性能仿真图. 由于 Logistic 映射中参数的选取没有理论上的支持,仅依据多次性能仿真来确定合适的初始值. 由文献[6-7]知, $[x_0, u] = [0.37, 4]$ 是参数中使用较多的组合. 从图 4(a) 可以看出,低信噪比时 Logistic 映射中初始值对交织器的作用不突出. 随着信噪比的增加,混沌映射中的参数 (u, x_0) 对交织器的影响越加显著,带来 BER 性能更好,信息序列纠错能力也有所提高.

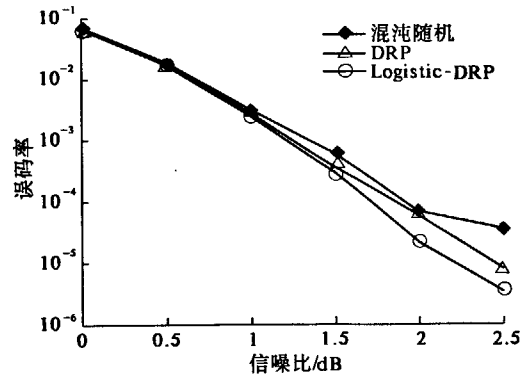
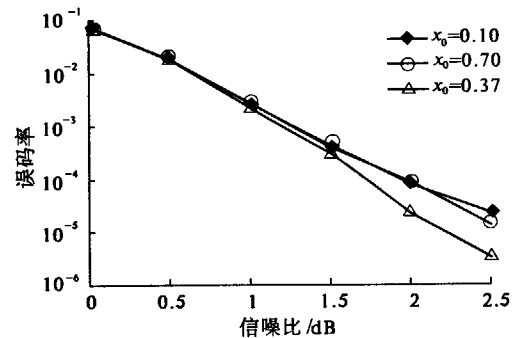
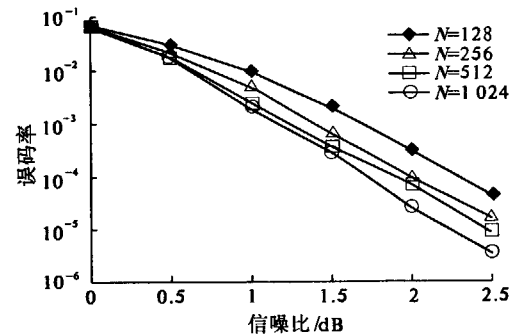


图 3 3 种不同交织器的性能曲线图

Fig. 3 The BER performance chart for three different interleavers



(a) $u=4$, 初始值 x_0 变化



(b) 交织长度 N 变化

图 4 Logistic-DRP 交织器下的误比特率性能曲线图

Fig. 4 The BER performance chart for the Logistic-DRP interleaver

当交织长度 N 不同时, Logistic-DRP 交织器在 Turbo 码中的误比特率性能也不同. 从图 4(b) 可知, 交织长度对交织器的性能有很大的影响. 但在仿真实现过程中, 不能无限制依靠扩大交织长度来提高交织器性能, 这样无形中增加了算法复杂度, 必然带来更多延时开销.

表 1 是当 u 值固定时, x_0 分别取不同的初始值, Logistic-DRP 交织器在仿真实现后, 与初始信源序列比对后出现错误的信息比特个数. 从表中可以看出, x_0 取值为 0.37 时在信噪比为 0 ~

2.5 dB 的范围内错误信息比特数目较少,信息纠错能力得以优化。

表 1 不同初始值下信息比特错误个数

Tab.1 The number of information wrong bit with different initial value

x_0	信噪比/dB					
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
0.10	643 615	169 015	24 550	3 635	699	221
0.37	639 388	158 369	21 162	3 237	637	157
0.70	644 297	168 398	24 672	4 116	854	130

可以看出,Logistic-DRP 交织器在给定的参数初始值条件下,大信噪比时 Turbo 码误码性能得到提升,而且信息序列的随机性实现尽可能最大化,系统时延没有过多增加。

4 结论

设计性能较优的交织器时应该尽可能使信息序列接近随机化,并且避免过多的增加算法复杂度和减小时延等。笔者利用 Logistic 映射提出了一种新的 DRP 交织器改进方案:混沌理论与 DRP 交织器相结合,提取混沌模型 Logistic 映射关系带来随机性数值的特性,运用到 DRP 交织器中进行了改进。仿真结果显示,笔者设计的交织器在有过多增加算法复杂度的基础上,随机性能增强,特别是在较大信噪比条件下 Turbo 码系统性能得到了改善。

参考文献:

[1] BERROU C, GLAVIEUX A, THITIMAJSHIMA P.

Near shannon limit error-correcting coding and decoding; turbo codes[C]//Proceedings of ICC'93. Geneva Switzerland; IEEE Press, 1993:1064 - 1070.

[2] ZHANG Hong-yu, WANG Lin, YUAN Qing-shen, et al. A Chaotic interleaver used in turbo codes[C]//Proc ICCAS 2004, Chengdu, China; New York; IEEE press, 2004:38 - 42.

[3] 韩力,魏耀,罗伟雄.基于混沌交织的 Turbo 码及其性能仿真[J].无线电通信技术,2005,31(5):25 - 33.

[4] CROZIER S, GUINAND P. High-performance low-memory interleaver banks for turbo-codes[C]//Vehicular Technology Conference; IEEE VTS 54th. Atlantic City, NJ, New York; IEEE Press, 2001:2394 - 2398.

[5] PEREZ L C, SEGHERS J, COSTELLO D J. A Distance spectrum interpretation of turbo codes[J]. IEEE Transactions On Information Theory, 1996, 42(6): 1698 - 1709.

[6] 王琳,罗庆霖.混沌交织器的实现[J].系统工程与电子技术,2002,24(6):112 - 115.

[7] ZHANG He, ZHOU Qiang, MIN Le-quan. Design scheme of interleaver based on chaotic map[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(13): 102 - 104.

[8] HUANG Yong, ZHU Qi, FENG Guang-zeng. Improved interleaver bases on DRP interleaver and the application in IEEE 802.16a[J]. Journal on Communications, 2005, 26(5): 79 - 85.

[9] 肖东亮,焦秉立,林春蕾,等.混沌理论在现代信道编码技术中的应用[J].电子学报,2007,35(10): 1961 - 1967.

A Design of DRP Interleaver for Turbo Code Based on Chaos Model

ZHANG Wei-dang, KANG Hui-ping, GAO Hui

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Since the design of interleaver of Turbo code is a crucial problem in coding and decoding structure in Turbo code, by analyzing the requirements of Turbo code on its interleaver, and combining with Dithered Relative Prime (DRP) of the process of internal interleaver, a new approach of interleaver using pseudo randomness of the chaos sequence is proposed and applied in Turbo code in order to reduce effectively unexpected errors. By simulating in comparison with the traditional interleavers in the same environment, the simulation results show that the interleaver which is designed in this paper has reduced more effectively Bit Error Rate (BER) and has improved the system performance of Turbo code when SNR (signal-to-noise ratio) is greater than 1.5 dB.

Key words: turbo code; interleaver; Logistic chaotic model; dithered relative prime (DRP)