

基于线性同余的 IDMA 交织器设计及分析

罗智峰¹, 王启新², 丘水生¹

(1. 华南理工大学电子与信息学院, 广东广州 510640; 2. 香港科技大学电子及计算机工程系, 香港)

摘要: 本文提出了一种新的基于线性同余的 IDMA 交织器设计方案, 并且给出了详细的交织器设计算法. 它能满足 IDMA 交织器设计中低存储量、容易产生交织序列、交织器同步数据少、交织器之间相关性小的要求. 本文的仿真结果证明了这种交织器性能优于伪随机交织器.

关键词: 交织分多址; 线性同余; 交织器设计

中图分类号: TN91 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 02-0489-04

Design and Analysis of IDMA Interleavers Based on Linear Congruences

LUO Zhi-feng¹, WONG Kai-sun², QIU Shui-sheng¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. Department of Electronic and Computer Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Hongkong, China)

Abstract: A novel interleaver design for IDMA is proposed in this paper. And we present the design algorithm in detail. The proposed interleaver design has the following properties: less memory requirement, easy to generate, small amount of data for synchronizations between interleavers and low correlation among interleavers. Simulation results show that the proposed interleaver design have better performance than random interleaver design for IDMA.

Key words: interleave-division multiple-access (IDMA); linear congruences; interleaver design

1 引言

近年来 交织分多址 (IDMA) 技术的引起了人们广泛的关注^[1~4]. 与 CDMA 技术相比, IDMA 采用交织器来区分用户, 所有用户使用的扩频序列都是相同的, 而 CDMA 则是采用不同的扩频序列来区分不同用户. 实际上, IDMA 技术可以看作是 CDMA 技术衍生出的一种特殊形式. 它继承了 CDMA 的抗信道衰落和有效抵抗多址干扰等优点, 而且还具有低复杂度的接收机结构. 交织器在 IDMA 通信系统中起着关键的作用, 它不但要用来对多用户系统中某一特定用户的数据进行交织, 使交织前后的用户数据相关性减少, 而且还要保证各用户的交织器之间有较小的相关性. 文献[5]提出了几种 IDMA 交织器的设计方法, 并指出最优的正交交织器的数量不大于扩频序列的长度. 这意味着, 如果 IDMA 系统中用户数超过扩频序列的长度, 我们必须采用次优的非正交交织器, 例如伪随机交织器和嵌套交织器 (nested interleaver)^[5]. 因此, 一般在实际的 IDMA 系统中采用的是次优交织器. 伪随机交织器采用本原多项式定义的伪随机序列发生器来产生伪随机交织序列. 不同的用户使用不同的本原多项式. 通常, 基站需要存储所有接入用户的

本原多项式参数. 当系统用户数量很大时, 基站需要存储的数据量随之增大, 并且有可能无法找到数量足够的本原多项式供大量用户使用. 嵌套交织器采用本原多项式重复利用的方式被提出来解决这个问题. 嵌套交织器的基本思想是用一个交织器依次对其自身进行再交织产生出新的交织器. 嵌套交织器的缺点是产生交织序列速度低, 它不能同时产生多个用户交织器, 只能依次产生. 本文提出了一种基于完全剩余系交织器的设计概念, 并且还提出了基于线性同余的 IDMA 交织器设计算法. 本文设计的 IDMA 交织器比伪随机交织器要求更少的存储容量, 同时, 与嵌套交织器相比, 它可以独立地并同时地产生各个用户的交织器. 由于算法的基本运算是线性同余, 算法的实现复杂度低. 并且本文的设计需要用于同步发射机与接收机的交织器数据量少, 可以有效减少用于传输同步数据所需要的带宽开销.

2 基于完全剩余系交织器的原理

交织器^[7]的输出为输入的置换, 可以用映射关系来表示 $\pi: Z \rightarrow Z$, Z 为整数集. 假设用 i 表示交织器的第 i 个输出, 则 $\pi(i)$ 表示交织器的第 $\pi(i)$ 个输入, 其中 $i, \pi(i) \in Z$. 通常, 我们将整数序列 $\{\pi(i), i = 1, \dots, N\}$ 称

交织长度为 N 的交织序列。

为首先,我们先介绍本文提出的基于完全剩余系交织器.关于基于完全剩余系交织器的基本理论知识为线性同余,关于线性同余深入详细的介绍可以参考本文的参考文献[6],本文不再加以叙述。

随着 IDMA 系统用户的数量增加,为了分配给用户更多的 IDMA 交织器,我们对一个种子交织器进行多个不同的交织模式,从而最终得到多个交织器.这不同于一个交织器用同一个交织序列多次自交织的方法产生多个交织器的设计,如嵌套交织器.同时,因为 IDMA 系统需要有多个不同的交织器分配给多个不同的用户,所以在 IDMA 交织器设计时,为了减少各用户交织器之间的相关性,不但要考虑单个用户的交织器,而且还需要统一考虑一组用户的情况.为了解决以上问题,这里提出一种基于完全剩余系交织器的设计概念。

下面我们给出基于完全剩余系交织器的定义:

定义 假设任意一个种子交织器为 π_{seed} .将不同用户对种子交织序列, $\{\pi_{seed}(j), j=0, \dots, p-1\}$, p 为交织长度,进行再交织时所使用的不同交织模式表示为 $ICRS_k(j), j=0, 1, \dots, p-1$, 其中 k 代表第 k 个用户.我们用一组 $\{ICRS_k(j), k=1, 2, \dots, M\}$ 交织 π_{seed} 产生一组 M 个用户的交织序列集 $\{\pi_k, k=1, 2, \dots, M\}$. 如果对于 $j \neq 0, \{ICRS_k(j), k=1, 2, \dots, M\}$ 是一个完全剩余系

	k-th user						
1	0	1	2	3	4	5	6
2	0	2	4	6	1	3	5
3	0	3	6	2	5	1	4
4	0	4	1	5	2	6	3
5	0	5	3	1	6	4	2
6	0	6	5	4	3	2	1
	0	1	2	3	4	5	6

(complete residue system) [6], 那么我们称交织器集 $\{\pi_k\}$ 为一组基于完全剩余系交织器.同时,称 $\{ICRS_k(j), k=1, 2, \dots, M\}$ 为完全剩余系再交织模式 (Re-interleaving patterns based on complete residue system). 例如,当 $p=7, M=6, \{ICRS_k(j), k=1, 2, \dots, M\}$ 如图 1 所示。

由以上定义可见,完全剩余系再交织模式是一组基于完全剩余系交织器的关键,本文提出以下定理用于设计和产生一组基于完全剩余系交织器,并且加以证明。

定理 令 $k \in [1, M], j \in [0, M]$, 如果 p 为素数并且 $p = M + 1$, 那么由以式(1)得出的完全剩余系再交织模式所产生的 M 个用户交织器是一种基于完全剩余系交织器。

$$ICRS_k(j) \equiv kj \pmod{p} \quad (1)$$

证明 给定条件 p 为素数, $p = M + 1$. 我们定义两个整数 k_1 和 k_2 分别代表 IDMA 系统的对第 k_1 个用户和第 k_2 个用户. 其中, $k_1, k_2 \in [1, p-1]$.

$$k_1 j \equiv k_2 j \pmod{p}, k_1 \neq k_2, j \neq 0,$$

$$\text{然后, } k_1 \equiv k_2 \pmod{p} \quad (2)$$

由于 p 是素数, $j=1, 2, \dots, p-1, \gcd(j, p)=1$.

因为 k_1 和 k_2 代表不同用户, 所以 k_1 和 k_2 必然对模 p 不同余. 可见, 式(2)与给定条件矛盾, 定理得证。

同时, 对于某个特定的第 k 个用户, 因为 $\gcd(k, p)=1$, 其中 $k \in [1, p-1]$, 由线性同余定理 [6] 可知 $\{ICRS_k(j), j=0, 1, \dots, p-1\}$ 中不会出现相同的元素. 这保障了不会产生重复的交织地址。

3 基于线性同余的 IDMA 交织器设计

本文提出的 IDMA 交织器设计算法如下:

假设 K 个用户的 IDMA 系统需要产生 K 个交织器. K 是系统用户数. 每个交织器的交织长度为 N . 并且假设 IDMA 系统分配给每个用户一个不同的整数作为用户识别编号用于区分用户, 例如第 k 个用户的识别编号为整数 k . 本算法的目标是生成某特定第 k 个用户的交织器 π_k .

(1) 首先, 产生种子交织序列 π_{seed} . 令 $j=0, 1, \dots, N-1$ 为交织长度为 N 交织序列的索引。

用线性同余随机数发生器产生种子交织序列 $\pi_{seed} = \{\pi_{seed}(j), j=0, 1, \dots, N-1\}$.

线性同余伪随机数发生器表示为:

$$\pi_{seed}(j+1) \equiv a_1 \pi_{seed}(j) + c_1 \pmod{N} \quad (3)$$

其中 $N=2^r$, r 为自然数. 根据文献[6]中关于线性同余伪随机数发生器的参数选择规则选择参数 a_1 和 c_1 .

(2) 接着由用户识别编号的大小来决定是否需要由 π_{seed} 进行下述第(5)步的并行分段扰乱。

令 $Num_scramble$ 表示对种子交织序列进行分段扰乱的次数, $Num_scramble$ 由以下式子计算得出:

$$Num_Scramble = \text{floor}\left(\frac{k}{p-1}\right) - 1 \quad (4)$$

其中 $\text{floor}(\cdot)$ 函数输出一个不大于输入的最大整数。

如果 $Num_scramble > 0$, 我们直接跳至第(5)步并执行第(5)步 $Num_scramble$ 次. 完成第(5)步的 $Num_scramble$ 次并行分段扰乱后, 我们得到新的种子交织序列 $\{V_{new_seed}(j), j=0, 1, \dots, N-1\}$, 然后跳回第(3)步和第(4)步. 在执行第(3)步和第(4)步时, 第(5)步得到的 V_{new_seed} 将用来代替第(1)步产生的 π_{seed} 成为种子交织序列, $\pi_{seed} = V_{new_seed}$.

如果 $Num_scramble \leq 0$, 执行第(3)步和第(4)步, 无需执行第(5)步。

(3) 将种子交织序列 π_{seed} 分割成 H 个子集 $\{T_h(m), h=1, 2, \dots, H\}, m \in \{0, 1, \dots, p-1\}$, 其中 p 表示每个子集中的元素个数. 用以下规则选择参数 p 和 H :

$p|2^r - 1, H = \frac{2^r - 1}{p}$ 并且 p 必须为素数.

(4) 构造基于完全剩余系交织器, 然后将其用于对种子交织序列的重新交织. 根据本文中第 1 节的定理, 我们可以通过式(5)产生完全剩余系再交织模式, 获得 $p - 1$ 个基于完全剩余系交织器.

$$ICRS_k(m) \equiv \text{index_crs} \times m \pmod{p}, \quad (5)$$

$$m \in \{0, 1, \dots, p - 1\}$$

其中 $\text{index_crs} = k \pmod{p - 1}$. 对于第 k 个用户, 使用 $\{ICRS_k(m), m = 0, 1, \dots, p - 1\}$ 对第(3)步得到的 H 个子集 $\{T_h(m), h = 1, 2, \dots, H\}$ 中的每个子集 $\{T_h(m), m = 0, 1, \dots, p - 1\}$ 同时进行再交织, 我们把这一步称为对种子交织序列的分段并行置换. 最后, 得到第 k 个用户的交织序列 π_k .

第(4)步的数学表达式如下:

$$V_{\text{seed}}(j) = V_{\text{input}}(\pi_{\text{seed}}(j)), j = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (6)$$

$$\pi_k(j) = V_{\text{seed}}(R(j)), \text{for } j = 0, 1, \dots, N - 2 \quad (7)$$

$$\pi_k(N - 1) = V_{\text{seed}}(N - 1), \text{for } j = N - 1 \quad (8)$$

$$R(j) = ICRS_k(j \pmod{p}) \quad (9)$$

其中, V_{input} 表示交织器的输入序列. V_{seed} 表示种子交织器的输出序列. π_k 为第 k 个用户的交织序列.

(5) 对第(1)步得到的种子交织序列进行分段并行扰乱得到一条新种子交织序列. 类似地, 我们将第(1)步产生的种子交织器 π_{seed} 分割成 Q 个子集 $L = (L_1, L_2, \dots, L_Q)$. 每个子集的元素个数为 Z . 在这里线性同余伪随机数发生器用作产生伪随机交织序列. 然后, 使用该伪随机交织序列对各个子集中 Z 个元素的顺序同时进行扰乱. 在实现中, 对每个子集的扰乱可以独立并行进行. 本步骤的数学表达式如下:

$$\{L_i(l), l = 0, 1, \dots, Z - 1\}, i \in \{1, 2, \dots, Q\} \quad (10)$$

$$V_{\text{new_seed}}(j) = V_{\text{seed}}(U(j)), j = 0, 1, \dots, N - 1$$

$$U(j) = L_i(LCG(l)), \text{for } i = 1, 2, \dots, Q \quad (11)$$

其中, $\{LCG(l)\}$ 由线性同余伪随机数发生器产生:

$$LCG(l + 1) = a_2 LCG(l) + c_2 \pmod{Z}, \quad (12)$$

$$l = j \pmod{Z}$$

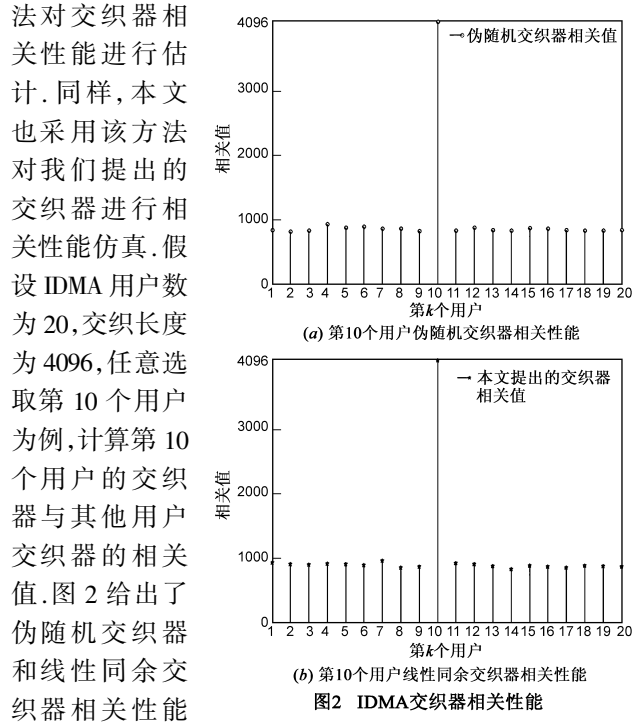
这里 $V_{\text{new_seed}}$ 表示最后得到的新种子交织序列. 同样, 线性同余伪随机数发生器的参数选择使用与第(1)步相同的方法. 在实现上, 我们可以选用用户识别编码作为线性同余伪随机数发生器的种子值, 例如当用户识别编号为: $p - 1 < k \leq K$, 有 $k = t(p - 1) + 1, LCG(0) = k$, 其中 $t \in [1, \text{floor}(\frac{K}{p - 1})]$, $LCG(0)$ 为线性同余伪随机数发生器的种子值.

由以上设计算法可见, 用于同步发射机与接收机交织器的数据只需要一个整数, 即用户识别编号, 这样

本交织器设计所要求的交织器同步数据量减少至最低. 第(4)步中对种子交织序列的分段并行置换和第(5)步中分段并行扰乱, 在实现上都可以采用并行的方式实行, 因为分段操作使得置换和扰乱的数据量大大减少, 这样可以缩短产生交织序列的时间, 又由于所有的计算都是基于线性同余运算的, 线性同余运算有硬件实现复杂度低, 运算速度快等特点, 这些都使本文算法可以在实际运行中快速产生交织序列.

4 仿真结果与分析

首先, 我们对本文提出的交织器进行相关性仿真分析. 尽管目前对于各种不同类型 IDMA 交织器的相关性分析还尚未有一种有效统一的方法, 但是人们目前一般采用文献[5]中计算伪随机交织器的相关值的方法对交织器相



关性能进行估计. 同样, 本文也采用该方法对我们提出的交织器进行相关性仿真. 假设 IDMA 用户数为 20, 交织长度为 4096, 任意选取第 10 个用户为例, 计算第 10 个用户的交织器与其他用户交织器的相关值. 图 2 给出了伪随机交织器和线性同余交织器相关性性能图. 由此可见, 本文的线性同余交织器与伪随机交织器具有同样良好的自相关性能. 在实现上, 线性同余交织器与伪随机交织器相比有自身的优势. 由以上的设计算法可见, 线性同余交织器不受伪随机交织器所依赖的本原多项式数量有限的问题限制, 并且要求更少的存储容量.

另外, 我们对采用 BPSK 为调制方式的 IDMA 系统在 AWGN 信道中进行误码率性能仿真. IDMA 的信息数据块长度为 256 比特, 扩频序列长度为 16. 用户数为 16 和 28 的 IDMA 接收机的迭代次数分别为 5 和 20. 我们将本文中基于线性同余的 IDMA 交织器性能与随机交织器的性能在相同系统配置的情况下进行比较. 在仿真中, 基于线性同余的 IDMA 交织器的参数配置为: a_1

$=9, c_1=17, p=13, Z=128, a_2=9$ 和 $c_2=3$. 从图 2 可见, 当用户数从 16 增加到 28 时, 本文提出的交织器性能优于伪随机交织器. 对于伪随机交织器, 由于一旦用户的交织器随机生成后不能改变, 当用户数量增加时, IDMA 系统中新用户的交织器与已有用户交织器有较

高相关性的可能性存在. 本文的线性同余交织器设计采用基于完全剩余系交织器的概念是一种基于用户组的设计, 并且当用户数量增大时采用了分段并行扰乱的方法. 它们的目的是在用户数量增加的情况下使得待检测信号的每个码片尽可能为不同用户的不同位置码片的叠加, 这样在接收机进行基于码片迭代多用户检测时, 就可以更容易地将特定用户信号从干扰信号中分离出来. 在高 SNR 区域, 由于本文提出的交织器可以更好的消除多址干扰, 保持了 IDMA 迭代多用户检测的优越性, 使 IDMA 系统性能可以接近单用户性能.

5 结论

本文提出了一种基于完全剩余系交织器的设计概念, 将其应用在基于线性同余的 IDMA 交织器设计算法中. 基于线性同余的 IDMA 交织器只要求存储少量的参数, 减少了对参数存储容量的要求, 同时只需要传送一个用户识辨编号就可以实现交织器同步. 从仿真结果可以看出这种交织器的性能优于伪随机交织器. 本文的交织器方案经日后进一步研究与适当改进后, 还有

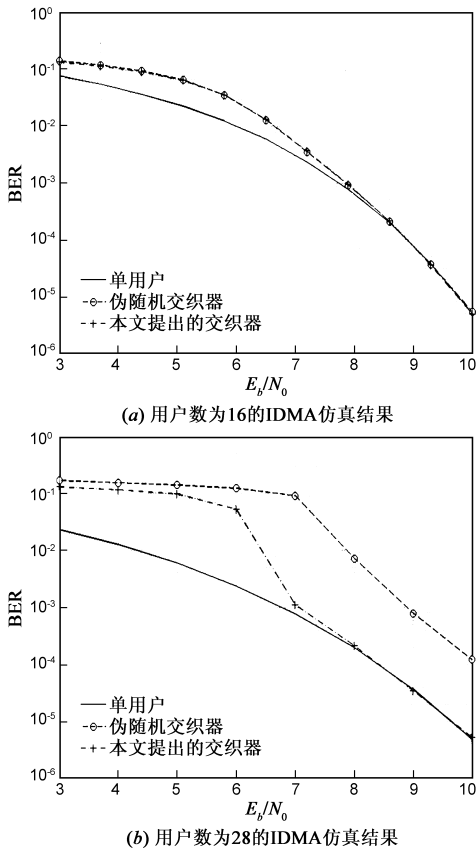


图3 线性同余的IDMA交织器与伪随机交织器性能比较

望应用于 IDMA 系统在多径衰落信道中分集技术的研究.

参考文献:

- [1] P Li, L H Liu, W K Leung. A simple approach to near-optimal multiuser detection; interleave-division multiple-access [A]. Wireless Communications and Networking[C]. New Orleans, US: IEEE, 2003: 391 - 396.
- [2] W K Leung, L H Liu, Li Ping. Interleaving-based multiple access and iterative chip-by-chip multiuser detection[J]. IEICE Transaction on Communications, 2003, E86-B(12): 3634 - 3637.
- [3] P Li, K Y Wu, L H Liu, W K Leung. A simple, unified approach to nearly optimal multiuser detection and space-time coding[A]. Information Theory Workshop[C]. Bangalore, India: IEEE, 2002: 53 - 56.
- [4] Li Ping, Lihai Liu, Keying Wu, W K Leung. Interleave division multiple-access[J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2006, 5(4): 938 - 947.
- [5] I Pupeza, A Kavcic, Li Ping. Efficient generation of interleaver for IDMA [A]. International Conference on Communications [C]. Istanbul, Turkey: IEEE, 2006. 11 - 15.
- [6] K Rosen. Elementary Number Theory and its Applications [M]. Addison Wesley, 1999.
- [7] 吴湛击, 吴伟陵. 交织器最优化设计的理论分析基础及其工程仿真[J]. 电子学报, 2002, 30(7): 1048 - 1052. Wu Zhan-ji, Wu Wei-ling. The theory fundament and engineering simulation of the optimum design for turbo-coding interleaver[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(7): 1048 - 1052. (in Chinese)

作者简介:



罗智峰 男, 1981 年出生. 华南理工大学电子与信息学院博士研究生. 目前研究方向为无线通信系统等.

E-mail: scutluozf@163.com

王启新 获美国麻省理工学院学士、硕士、博士学位. 现任香港科技大学电子及计算机工程系副教授. 1988 年至 2000 年历任美国贝尔实验室杰出研究员、网络分析研发部门经理, 美国朗讯科技市场及销售总经理. 曾在美国纽约理工大学和罗格斯大学兼任讲师等职. 在香港期间曾出任香港高科桥公司营运总裁、香港应用科技研究院副总裁和曾任教于香港中文大学讯息工程系. 目前研究领域包括 NGN 网络及应用, 无线定位等.