

异步码分多址通信中混沌扩频序列的选择

张 琪,郑君里

(清华大学电子工程系,北京 100084)

摘 要: 根据异步码分多址通信的特点,本文提出了扩频序列的优选准则,并给出了混沌序列的优选方法.计算结果表明,根据该方法优选的混沌序列伪随机特性得到了显著提高,与 Gold 序列相比较,更适于异步码分多址通信系统的应用.最后,对各种混沌码组的性能进行了比较.

关键词: 异步码分多址通信;混沌扩频序列;优选准则

中图分类号: TN929.533 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2001)07-0865-03

Choice of Chaotic Spreading Sequences for Asynchronous DS-CDMA Communication

ZHANG Qi, ZHEN G Jun-li

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper is devoted to the choice of chaotic spreading sequence for asynchronous DS-CDMA communication. Aiming at the characteristic of asynchronous DS-CDMA system, some criteria on optimizing spreading sequences are proposed. The method of choosing is also presented. According to the method, chaotic spreading sequences with better performance are obtained. Calculation shows that these optimized chaotic spreading sequences are much better than Gold sequences. At last, 5 kinds of chaotic sequences' performance are compared.

Key words: asynchronous DS-CDMA; chaotic spreading sequences; criteria

1 引言

码分多址技术已经被列为 IMT2000 关键技术之一.在码分多址通信中,扩频序列的选择会直接影响系统的性能.传统的扩频序列多由 m 序列和 Walsh 序列变换产生,其缺点为可用码组序列数目少,序列复杂度低.近年来,混沌序列的研究为选择扩频序列开辟了新的途径.由于混沌系统对初值的敏感性,混沌映射生成的序列码组非常大.数值模拟表明,在 Logistic 映射中,只要初值有 10^{-6} 的差别,产生的 2 个序列就可以做到完全不相关.因此混沌通信系统可以容纳非常多的地址.而且混沌系统是一种强非线性系统,所以混沌序列具有极高的复杂度,提高了传输的安全性.混沌序列的生成非常简单:序列码组的生成只需要一个映射方程和一组初值.

从理论上分析,周期无限长、精度无限高的混沌序列具有理想的自相关的互相关特性.但是,在实际应用中,扩频序列必须周期有限、精度有限,经过截取的混沌序列不可能达到上述理想性能.许多数值实验和仿真实验的结果指出^[1],这样的混沌序列在性能上比传统的线性扩频序列要稍差一点.

本文着重研究有限长混沌序列的伪随机特性,提出扩频序列的优选准则,给出混沌序列的优选方法.研究对象集中于异步码分多址通信系统.

2 异步码分多址系统的多用户干扰分析

与多径干扰相比,多用户干扰(MAUI)是影响码分多址通信系统用户数目的更重要的因素.通常,人们使用扩频序列的互相关函数及其均方值来表征多用户干扰的大小.

1977年 Pursley 推出了码分多址通信系统在假设相移、时延和数据符号统计独立情况下接收端的信噪比^[2]

$$SNR_i = \left\{ (6N^3)^{-1} \sum_{k=i}^K [r_{k,i}] + \frac{N_0}{2E} \right\}^{-1/2} \quad (1)$$

其中: N 为扩频比; K 为用户数;下脚 i 表示研究对象是用户 i ; $r_{k,i}$ 是用户 k 对用户 i 的多用户干扰,描述了当一个新用户进入 CDMA 通信系统时,系统性能降低的程度.

$$r_{k,i} = \sum_{l=1}^{N-1} [2C_{k,k}(l) \cdot C_{i,i}(l) + C_{k,k}(l) \cdot C_{i,i}(l+1)] \quad (2)$$

其中 $C_{k,i}(l)$ 为序列的非周期互相关函数

$$C_{k,i}(l) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{N-l-1} \begin{pmatrix} (k) \\ j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (i) \\ j+l \end{pmatrix}, & 0 \leq l \leq N-1 \\ \sum_{j=0}^{N+l-1} \begin{pmatrix} (k) \\ j-l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (i) \\ j \end{pmatrix}, & 1-N \leq l < 0 \\ 0, & |l| \geq N \end{cases} \quad (3)$$

Mazzini^[3]指出,当扩频序列为纯随机序列时,求和式中部分相关值 $C_{k,k}(l)$ 、 $C_{i,i}(l)$ 在所有 $l \neq 0$ 时均为零,此时 $r_{k,i} = 2N^2$. 因此定义性能指数为 $W = 2N^2/r$ (4) 其中 r 为 $r_{k,i}$ 的平均值. W 越大,说明系统性能越好. Rovatti 运用非线性动力系统理论对 W 进行了分析^[4],得到了一些理论界,并且指出某些混沌映射生成序列用于码分多址通信系统时性能不劣于传统序列.

文献[5,6]指出, Rovatti 只给出了 W 的下边界,不能准确评判混沌扩频序列在性能上的优越性. 他运用偏历理论重新分析了性能指数 W ,由于混沌序列的自相关函数 $C(l)$ 以指数衰减,这里给出一个相当精确的近似

$$1/W \cong 1 + 2|C(1)|^2 + \text{Re} \{C(1)\} \quad (5)$$

当 $C(1) = -1/4$ 时, W 达到最大值 1.14.

与此同时,文献[7]也对 W 的取值极限进行了分析,他首先定义了

$$I_r = 1/W = \frac{1}{2N^2} \sum_{l=1}^{N-1} [2C_{k,k}(l) \cdot C_{i,i}(l) + C_{k,k}(l) \cdot C_{i,i}(l+1)] \quad (6)$$

再把 I_r 分解为 4 项之和,然后通过数值计算对 4 项进行了比较,得到 I_r 值的近似表达式

$$\mu(I_r) \cong 1 + 2I_{r3}^2 + I_{r3} + o(I_{r3}) \quad (7)$$

对于这个二次函数,当 $I_{r3} = -0.25$ 时, $\min(\mu(I_r)) \cong 0.875$. 用这种方法得到的结果与文献[5]的结论是一致的. 文[7]同时指出这个极限是统计意义上的极限,真实的取值有可能出现统计上的涨落,但 I_r 值真正的极限不会偏离统计极限太远.

3 混沌序列的优选方法

在一般情况下,混沌序列的性能比传统的线性扩频序列要稍差一点. 但是按照一定方法对混沌序列进行选择,优选的序列性能能够得到极大的提高. 本文给出了一种混沌序列的优选方法. 根据扩频序列的理想特性和混沌序列的特点,本文定义以下优选准则:平衡性准则、自相关准则、互相关准则.

(1) 平衡性准则 如果序列的一个周期中,“0”和“1”的个数相差小于 1,称序列是平衡的. 所有平衡性准则可以定义阈值 $\Delta_1 = 1$,若混沌序列的“0”、“1”个数差值 $\leq \Delta_1$,则认为该序列满足平衡性准则. (2) 自相关准则 扩频序列的自相关函数会影响通信系统抗多径干扰的能力. 理想扩频序列的自相关函数是一个冲击函数,这在应用中是不可能达到的. 在研究过程中,为了与传统序列相比较,可以把阈值 Δ_2 定为某种传统序列自相关旁瓣的最大

值. (3) 互相关准则 准确的讲应该是多用户干扰 (MAI) 准则,但本文仍习惯采用互相关这个名字. 由式(2)可知,多用户干扰的大小不仅与序列的循环互相关函数有关,而且与序列的非循环相关函数有关. 根据上文的推导, I_r 很好的描述了多用户干扰与序列互相关函数之间的关系,所以本文采用 I_r 作为互相关准则的标准. 在阈值 Δ_3 的选择上也可以通过计算某种传统序列的 I_r 值作为度量,或者可以简单的取为 1. 但是必须强调指出的是,序列的 I_r 值是有起伏的,如果想选用传统序列 I_r 的平均值为阈值的话,必须留有一定的冗余.

本文采用如下形式的混沌序列发生器:序列码组由一维混沌映射 $x_{n+1} = f(x_n)$ 生成,其中 $x_n \in [-1, 1]$;迭代运算采用双精度浮点数;序列码组为 $\{x_n^v, n = 0, 1, \dots, N-1, v = 0, 1, \dots, M-1\}$,长度为 N ,按照周期重复使用;码组大小为 M ,分别由 M 个初值 $\{x_0^v, v = 0, 1, \dots, M-1\}$ 确定. 图 1 给出了混沌序列优选的过程. 首先由混沌映射生成 M 个序列,序列长度为 N . 然后进行平衡性准则判定,优选后序列数为 M_1 ;再对 M_1 个序列进行自相关准则判定,优选后序列数为 M_2 ,最后对 M_2 个序列进行互相关准则判定,最终优选序列数为 M_3 .

在互相关准则判定过程中,可将待选码看作节点,满足互相关准则的两个序列可以认为是互相连通的节点. 因此寻找 M_3 的过程就等价于图论中寻找最大连通集问题. 但是为了求图的最大连通集,目前还没有找到简便易行的算法. 在本文中采用一种递归、比较的算法解决这一问题,算法简要原理如下:若整个集合的节点数为 N ,则依次寻找含节点 1 的最大连通集,含节点 2 且不包括节点 1 的最大连通集,含节点 3 且不包括节点 1 和 2 的最大连通集,……,然后选取最大的即可. 寻找含节点 1 的最大连通集的方法为:寻找节点 1 连通的所有节点,节点数为 $N_1 (N_1 < N)$;在这 N_1 个节点中找最大连通集,此过程与在整个集合中寻找最大连通集是一致的. 在每次递归过程中,可以比较含前面点的最大连通集若已大于本层所剩下的切点数,则停止寻找,以节省计算量.

4 数值计算及实验结果

根据上述优选方法,本文计算了多种映射形式的混沌序列,并且与 gold 序列的性能进行了比较.

下面给出本文采用的 5 种混沌映射的形式:

- (1) Logistic 映射: $f_l(x) = 4x(1-x)$;
- (2) Hybrid 映射: $f_h(x) = \begin{cases} 1-2x^2, & -1 \leq x < 0 \\ 1-2x, & 0 \leq x \leq 1 \end{cases}$
- (3) Spuer-hybrid 映射: $f_s(x) = \begin{cases} 1-2x^2, & -1 \leq x < -0.5 \\ 1-(1/2)(-2x)^{1.2}, & -0.5 \leq x < 0 \\ 1-2x, & 0 \leq x \leq 0.5 \\ -(2x-1)^{0.7}, & 0.5 < x \leq 1; \end{cases}$

(4) N-way Bernoulli 映射:图 2 显示了 3-way Bernoulli 映射关系;

(5) N-way Tail 映射:图 3 显示了 3-way Tail 映射关系

表 1,2 给出了长度 $N = 31$ 和 $N = 63$ 的序列优选结果,初始混沌序列数 $M = 1000$. 为了与 gold 序列比较性能,本文

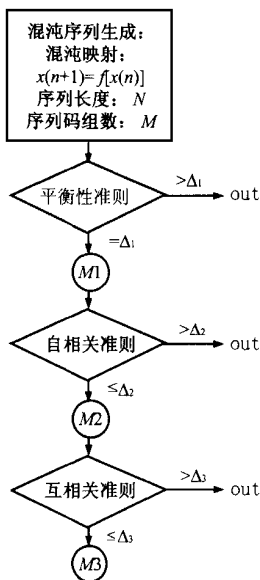


图 1 混沌扩频序列优选流程图

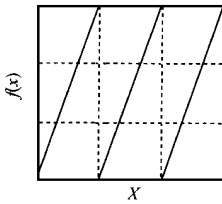


图 2 3-way Bernoulli Map

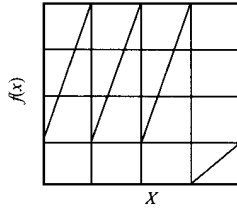


图 3 3-way Tail Map

选择平衡性准则 $1 = 1$. 自相关准则 $2 = 1 + 2^{L_x \lfloor (n+2)/2 \rfloor}$, $1 + 2^{L_x \lfloor (n+2)/2 \rfloor}$ 为 gold 序列自相关旁瓣的最大值^[8], 其中 L_x 表示取 x 的整数部分, n 为 gold 序列的阶数. 当 $N = 31$ 时, $1 + 2^{L_x \lfloor (n+2)/2 \rfloor} = 9$; $N = 63$ 时, $1 + 2^{L_x \lfloor (n+2)/2 \rfloor} = 17$. 相关准则 3 取 gold 序列 I_r 的平均值, 当 $N = 31$ 时, $\mu(I_r)_{\text{Gold}} = 0.970801$; $N = 63$ 时, $\mu(I_r)_{\text{Gold}} = 0.984875$. 为了留有冗余度, 将此平均值乘以 1.2.

表 1 长度 $N = 31$ 的混沌序列优选结果

Mapping	M1	M2	M3	Ave(I_r)	Max(I_r)	Var(I_r)
Gold			33	0.970801	1.797086	0.208422
Logistic	524	146	38	0.906501	1.164412	0.116442
Hybrid	532	146	59	0.894946	1.164412	0.104039
Super-hybrid	572	113	59	0.873219	1.164412	0.113734
99-way Bernoulli	511	159	42	0.921520	1.164412	0.113734
8-way Tail	605	157	59	0.884208	1.164412	0.117474

表 1、2 中给出了一次随机生成的混沌序列的优选结果, 其中

(1) Ave(I_r): 优选序列 I_r 的均值, 描述了通信系统多用户互扰的平均情况. (2) Max(I_r): 优选序列 I_r 的最大值, 描述了通信系统多用户互扰的最坏情况. (3) Var(I_r): 优选序列 I_r 的方差, 描述了通信系统多用户互扰的起伏.

表 2 长度 $N = 63$ 的混沌序列优选结果

Mapping	M1	M2	M3	Ave(I_r)	Max(I_r)	Var(I_r)
Gold			65	0.984875	1.945326	0.184398
Logistic	406	179	45	0.948098	1.180902	0.100505
Hybrid	346	137	72	0.903937	1.181406	0.102613
Super-hybrid	432	118	86	0.881018	1.181406	0.097047
99-way Bernoulli	367	180	50	0.931501	1.180902	0.108135
8-way Tail	427	160	83	0.894055	1.181406	0.100686

在表 1、2, 第一列为各种混沌映射函数. 为了便于比较, 在第一行给出了 gold 序列的相应数值, 不难看出

(1) 优选后的混沌序列抗多用户互扰的性能在上述 3 个方面都要优于 gold 序列. (2) 优选后的混沌序列码组数目高于 gold 序列, 而且随着初始混沌序列数目的增加, 优选序列码组数目会增大. 根据平衡性准则和自相关准则. (3) 优选后的混沌序列是完全平衡的, 而 gold 序列非完全平衡. (4) 混沌序列的自相关函数的最大值与 gold 序列相同. 根据混沌序列的自身特性. (5) 混沌序列的复杂度高. (6) 混沌序列生成简单. 综上所述, 经过优选的混沌序列更适合应用于异步码分多址通信系统.

比较以上各种混沌序列, 可以发现混沌映射的形式决定了混沌序列的伪随机特性. 在上述 5 种混沌映射中, Super-hybrid 映射和 8-way Tail 映射产生的优选码组数目多, 抗多用户互扰性能好, 优选序列的 I_r 已经接近了理论极限 $\mu(I_r) \cong 0.875$, 可以作为混沌扩频序列的首选; 而 Logistic 映射和 99-way Bernoulli 映射产生的混沌序列不太适用于扩频序列.

5 结论

本文根据混沌序列的特点, 给出了混沌序列的优选方法. 实验结果表明, 通过这种方法优选出的序列性能得到很大的提高, 适用于异步码分多址通信系统. 而且混沌序列的选择方法有很大的灵活性, 可以根据系统的要求, 变换优选准则, 获得性能最佳的序列.

参考文献:

[1] Kohda T, Tsuneda A. Pseudonoise sequences by chaotic nonlinear maps and their correlation properties [J]. IEICE Trans Commun., 1993, E76-B(8): 855 - 862.

[2] M B Pursley. Performance evaluation for phase-code spread-spectrum multiple-access communication—Part I: System analysis [J]. IEEE Trans Circuit Syst I, 1997, 44(10): 937 - 799.

[3] Mazzini G, Setti G, Rovatti R. Chaotic complex spreading sequences of asynchronous DS-SS-CDMA—Part I: system modeling and results [J]. IEEE Trans Circuit Syst I, 1997, 44(10): 937 - 947.

[4] Rovatti R, Setti G, Mazzini G. Chaotic complex spreading sequences for asynchronous DS-SS-CDMA—Part II: Some theoretical performance bounds [J]. IEEE Trans Circuit Syst I, 1998, 45(4): 496 - 506.

[5] Ling Cong, Wu Xiaofu, Sun Songgeng. Chaotic spreading sequences with multiple access performance better than purely random [J]. ICCT '98, Oct., S10-08.

[6] Ling Cong, Li Shaoqian. Chaotic spreading sequences with multiple access performance better than random sequences [J]. IEEE Trans Circuit Syst I, 2000, 47(3): 394 - 397.

[7] 贾占峰, 张琪, 郑君里. 异步码分多址通信中混沌扩频序列的研究 [J]. 清华大学学报. 1999, 39(7): 111 - 115.

[8] 朱近康. 扩展频谱通信及其应用 [M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1993.

作者简介:



张 琪 男, 1974 年生于河南, 1998 年清华大学电子工程系本科毕业, 同年在系内直接攻读博士. 主要研究方向为码分多址通信技术.