

Logistic 混沌扩频序列及其在 DS-CDMA 系统中的性能分析

张剑¹, 邵玉斌¹, 徐正福², 罗轶¹

(1. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650051; 2. 中国联通 云南分公司, 云南 昆明 650051)

摘要: 研究了一种混沌序列的产生方法——Logistic 映射法, 并对用该法产生的序列进行了自相关性、互相关性以及平衡性的分析, 另外也从理论上分析了扩频序列相关性对 DS-CDMA 系统中多址干扰的影响。计算机仿真结果表明, 在 DS-CDMA 系统中, 与伪随机序列相比混沌扩频序列明显地降低了系统的误码率, 提高了系统的性能。

关键词: 混沌序列; Logistic 映射; 多址干扰; 码分多址

中图分类号: TN 914.53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2006)02-0062-04

Logistic Chaotic Spread Spectrum Sequences and Its Function Analysis in DS-CDMA System

ZHANG Jian¹, SHAO Yu-bin¹, XU Zheng-fu², LUO Yi¹

(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

2. China Unicom Yunnan Branch, Kunming 650051, China)

Abstract A kind of chaotic spread spectrum sequences—Logistic map is studied, and its sensitivity, correlation and balance are analyzed. Based on the theory, the influence of spread spectrum sequence correlation on MAI (Multiple Access Interference) for DS-CDMA communication system is discussed. The result of computer simulation shows that the DS-CDMA communication system with chaotic sequence can sharply degrade the bit error ratio (BER) and improve the performance compared with the pseudorandom number sequence.

Key words chaotic sequence; Logistic map; multiple access interference; code division multiple access

0 引言

直接序列码分多址 (DS-CDMA) 通信系统的性能主要受限于同时接入的多个用户带来的干扰, 即多址干扰 (MAI)。为了尽量减小 MAI, DS-CDMA 系统需要使用具有优良相关性能的序列作为扩频码^[1]。现有的 DS-CDMA 系统中, 大都采用线性或非线性移位寄存器产生伪随机序列作为扩频序列, 如 m 序列, Gold 序列, 其缺点是可用码组序列数目少, 序列复杂度低, 容易被破译等, 而混沌序列则具有许多优于传统扩频序列的特性, 如: 易于产生, 数量多, 非周期性, 不收敛但有界, 对初值有及其敏感的依赖性等。本文着重论述了混沌序列的敏感性、平衡性以及相关性, 然后在此基础上选取了不同的混沌序列作为 DS-CDMA 系统的扩频码, 并与传统的 PN 扩频序列进行了性能仿真比较, 其结果表明采用混沌扩频序列的系统性能有明显的提高。

1 Logistic 混沌扩频序列

1.1 敏感性

Logistic 映射是被广泛研究的一种混沌映射, 其表达式为^{[2] 1525-1536}

收稿日期: 2005-07-20

第一作者简介: 张剑 (1970~), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 个人通信扩频通信。E-mail: zj0871@163.com
© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$x_{n+1} = rx_n(1 - x_n) \tag{1}$$

其中 $0 < x_n < 1$, $1 \leq r \leq 4$, r 称为分形参数, $3.5699 \wedge < r \leq 4$ 当时, 系统工作于混沌状态, $r = 4$ 时该映射为满映射. 所产生的序列均值为 0.5 由于混沌序列对初值的敏感性, 只要初值有 1×10^{-6} 的差别, 经过多次迭代之后, 它们的轨迹可以做到不相关^[3]. 图 1 给出了初值分别为 1×10^{-6} , 2×10^{-6} , 3×10^{-6} 的 3 个初值点经过 20 次迭代后的轨迹. 考虑到实际当中应用的需要, 还要采用量化函数

$$\text{sgn}(x - 0.5) = \begin{cases} 1 & 0.5 \leq x < 1 \\ -1 & 0 < x < 0.5 \end{cases} \tag{2}$$

将映射结果进行量化得到所需的 $\{+1, -1\}$ 扩频序列.

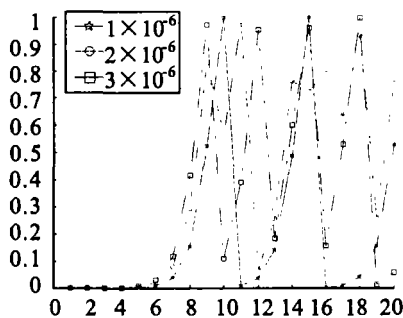


图1 Logistic映射迭代示意图

Fig.1 The iterative diagram of Logistic map

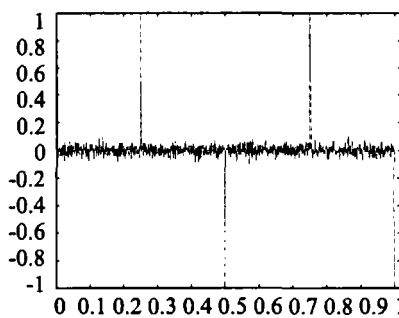


图2 平衡性示意图

Fig.2 Diagram of balance performance

1.2 平衡性

任何伪随机码的获取结果都需要所有可能的假设来确定正确的参数值, 在二进制相位转移参数方式发送二进制信息序列的扩频通信中, 扩频序列是取值为 ± 1 的二进制序列, 即将混沌映射的实值序列进行二值量化产生扩频序列^[4].

扩频序列的平衡性即序列内“1”与“-1”的分布平衡性定义如下: 设 K, M 分别表示混沌扩频序列中“1”与“-1”的个数, N 表示序列的长度, 则有 $E = |K - M| / N$, 其中 E 就是序列的平衡度^[4]. 图 2 示出了 $N = 1000$, $r = 4$ 取值从 0~1 之间相应的平衡度值. 由图可看出 x_0 对平衡度影响较小, 但当 $x_0 = 0.25, 0.5, 0.75$ 时平衡度 E 大于 0.5 所以构成序列要避免这几类点.

1.3 相关特性

对于扩频序列来说, 相关特性是最重要的, 相关特性的好坏直接影响着系统的抗 MAI 的性能. 计算得到的自相关函数为^[5].

$$AC(m) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (x_k - \bar{x}_0) (x_{k+|m|} - \bar{x}_{|m|}) \tag{3}$$

互相关函数为

$$CC_{12}(m) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (x_{1k} - \bar{x}_{10}) (x_{2(k+m)} - \bar{x}_{2|m|}) & m > 0 \\ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (x_{1k} - \bar{x}_{10}) (x_{2k} - \bar{x}_{20}) & m = 0 \\ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (x_{1(k-m)} - \bar{x}_{1|m|}) (x_{2k} - \bar{x}_{20}) & m < 0 \end{cases} \tag{4}$$

$$\bar{x}_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \quad \bar{x}_{|m|} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_{k+|m|} \tag{5}$$

图 3 给出了初值 $x_0 = 1 \times 10^{-6}$, 序列长度 $N = 4096$ 相关间隔的范围从 -1000 到 1000 的 Logistic 混沌扩频序列的自相关特性, 可看出在相关间隔零处的自相关值为 1, 自相关旁瓣在 0 左右. 同理图 4 示出了初值分别为 $x_0 = 1 \times 10^{-6}$ 与 $x_0 = 2 \times 10^{-6}$, $N = 4096$, $r = 4$ 的 Logistic 混沌扩频序列的互相关特性, 可看出互相关值几乎为零. 这正是 Ghobad 在 1994 年所指出的^{[2] 1524} Logistic 扩频序列的自相关性为 δ 函数,

互相关性几乎为零. 在这里得到了很好的验证.

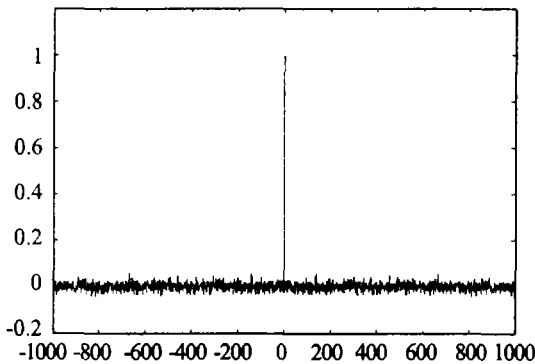


图3 Logistic混沌序列自相关性

Fig.3 Autocorrelation of Logistic chaotic sequences

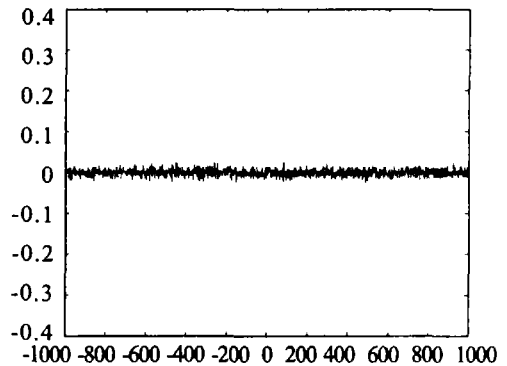


图4 Logistic混沌序列互相关性

Fig.4 Crosscorrelation of Logistic chaotic sequences

2 DS- CDMA 系统建模与仿真

在 DS- CDMA 通信系统中, 许多用户共享一个共同的信道带宽, 即在同一频带上多个 DS 信号可以彼此重叠覆盖, 这是 CDMA 通信系统与传统通信系统的区别所在, 然而也正是因为此优点为 CDMA 系统引入了不可避免的多址干扰, 图 5 是一个 DS- CDMA 系统多址干扰模型^[6].

现假设该系统中有两个用户在同一时刻占用同一频带. 若用户 0 的 PN 序列为 $a_0(t)$, 用户 1 的 PN 序列为 $a_1(t)$, 其中

$$a_k(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{i=0}^{M-1} a_{k,i} \Psi\left(\frac{t - (i + jM)T_c}{T_c}\right) \quad |a_{k,i}| = 1 \quad (6)$$

其中 $\Psi(t/T)$ 是单位脉冲函数

$$\Psi(t/T) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < T \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

如果 $\int_{j_s}^{(j+1)T_s} a_0(t) a_1^*(t) dt = 0$, 则信号在一个符号周期内被称为是正交的. 在用户 0 的接收机处收到的信号包括期望接收信号, 来自用户 1 的多址干扰, 以及噪声干扰

$$r_0(t) = A_0 b_0(t) a_0(t) \cos(\omega_c t) + A_1 b_1(t) a_1(t) \cos(\omega_c t + \alpha_1) + n(t) \quad (8)$$

令 $I_1 = A_1 b_1(t) a_1(t) \cos(\omega_c t + \alpha_1)$ 为第一个用户产生的多址干扰. 现假设系统同步, 则和干扰有关的分量为

$$\begin{aligned} & \int_{j_s}^{(j+1)T_s} A_1 b_1(t) a_1(t) a_0^*(t) \cos(\omega_c t) \cos(\omega_c t + \alpha_1) dt \\ &= A_1 b_{1,j} \left(\sum_{j=0}^{M-1} a_{1,j} a_{0,j}^* \right) \int_{j_s}^{(j+1)T_s} \cos(\omega_c t) \cos(\omega_c t + \alpha_1) dt \\ &\approx A_1 b_{1,j} \left(\sum_{j=0}^{M-1} a_{1,j} a_{0,j}^* \right) \frac{T_s}{2} \cos \alpha_1 \end{aligned} \quad (9)$$

因此如果用户 0 和用户 1 的扩频序列相互正交, 则判决统计中和干扰有关的分量为 0 同理若系统中

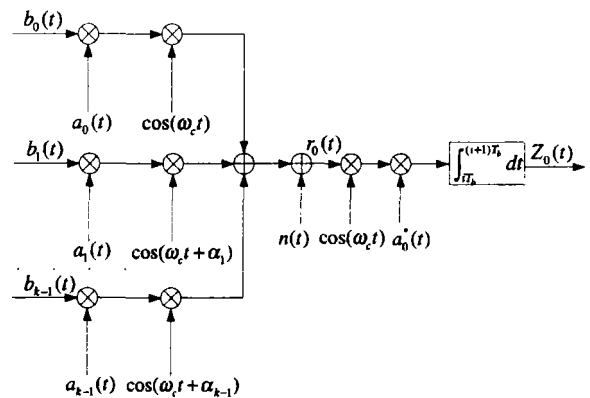


图5 DS-CDMA系统多址干扰模型

Fig.5 The MAI model of DS-CDMA communication system

有 k 个用户在同一时刻占用同一频带, 则其余 $k-1$ 个用户对用户 0 的干扰就为 $\zeta = \sum_{k=1}^{k-1} I_k$, 若 k 个用户的扩频序列满足两两正交, 则在对用户 0 的判决统计中中和干扰有关的分量就为 0 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特性和互相关特性, 但在实际应用中, 扩频序列必须周期有限, 精度有限, 经过截断的混沌序列也不可能达到上述的理想性能, 故多址干扰始终存在。

本文采用 Matlab 的 simulink 与 m 文件相结合的方法^[7], 对分别采用 Logistic混沌扩频序列与 PN 扩频序列的 DS-CDMA 系统进行了建模仿真, 得出图 6 所示的 BER 性能比较曲线。其中 DS-CDMA 系统的处理增益为 63 用户数为 4 Logistic混沌扩频序列在初值的选取上避开了不平衡点, 且不同用户对应的初值相差 $x_0 = 1 \times 10^{-6}$ 。

由图 6 可知在信噪比为 -16 dB 时, 采用两种扩频序列的系统误码率相同; 当信噪比逐渐增大时采用 Logistic扩频序列的系统的误码率开始逐渐低于采用 PN 扩频序列的系统, 当信噪比增大到 -6 dB 时这种差距开始越来越明显。这就充分地证明了在抗多址干扰上, 若采用混沌序列作为扩频码将得到比传统扩频码更优异的性能。

2 结束语

通过对 Logistic混沌扩频序列敏感性, 相关性以及平衡性的研究得出, 混沌扩频序列是一种优于传统扩频序列的扩频码。经计算机仿真表明, 在 DS-CDMA 系统中, 若采用混沌序列作为扩频码, 将能很好地抑制系统中的多址干扰, 并且能大幅度地提高系统的安全性。

参考文献:

- [1] LING C, LIS Q. Chaotic Spreading Sequences with Multiple Access Performance Better Than Random Sequences[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 2000, 47(3): 394-397
- [2] GHOBAD H B, CLARE D, MCG A. Chaotic Direct-Sequence Spread-Spectrum Communication System[J]. IEEE Trans on Comm, 1994, 42(2/3/4): 1524-1527
- [3] 张琪, 郑君里, 孙守宇. 混沌序列在准同步码分多址系统中的应用[J]. 清华大学学报, 2003, 43(4): 453-456
- [4] 于银辉, 马生忠, 刘卫东. Chebyshev 二相混沌扩频序列平衡性[J]. 吉林大学学报, 2004, 5(3): 228-231
- [5] 王亥, 胡健栋. 改进型 Logistic-Map 混沌扩频序列[J]. 通信学报, 1997, 18(8): 71-77
- [6] JOSEPH C, L BERT, THEODORE S R. 无线通信中的智能天线[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 12-19
- [7] 李建新. 现代通信系统分析与仿真[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000: 348-359

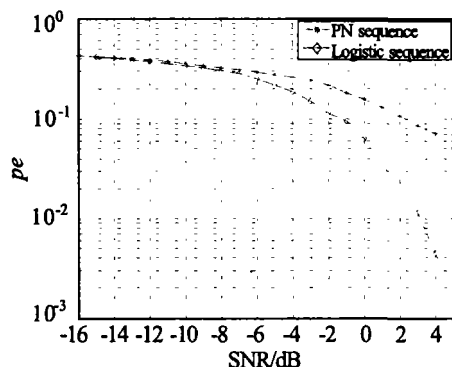


图6 不同扩频序列DS-CDMA系统性能比较
Fig.6 The comparison of DS-CDMA system with different spread spectrum sequences