

# 混沌序列用于 DS-CDMA 可行性研究

刘卫洪, 徐明远, 王庆平

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650051)

**摘要:** 阐述了 Chebyshev 混沌序列的产生, 在高斯白噪声环境下, 对基于多址干扰 (MAI) 最小准则的最佳 Chebyshev 混沌序列与传统 Gold 序列分别用于 DS-CDMA 系统的误码率性能进行了 Matlab 仿真。仿真研究表明, 基于 MAI 最小的最佳 Chebyshev 混沌序列与传统的伪随机序列具有类似的相关性, 而且, Chebyshev 混沌序列对初值极其敏感。通过给不同用户分配不同初值, 可以得到互不相关混沌序列, 满足码分多址的要求。加性高斯白噪声环境下, 使用优选 Chebyshev 扩频的异步 DS-CDMA 系统在单用户情况下的误码率性能与传统 Gold 序列相近, 而在多用户情况下, 优选 Chebyshev 混沌序列具有较优的抗多址干扰性能。

**关键词:** 多址接入; Chebyshev 混沌序列; 码分多址

**中图分类号:** TN 914.42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2006)02-0073-03

## Feasibility Study of the DS-CDMA System Using Chaotic Sequence

LU Weihong, XU Ming-yuan, WANG Qing-ping

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

**Abstract** An analysis is presented on the generation of chaotic sequences of the Chebyshev. Giving a simulative comparison of the error bit rate (EBR) performance in asynchronous DS-CDMA systems between traditional Gold sequences and optimal Chebyshev sequences based on the minimal multi-access interference using Matlab simulation. The results of the simulation indicate that the Chebyshev sequence and the pseudo noise sequence have the similar correlation performance, furthermore, the chebyshev sequences are sensitive to the initial values. Disrelated sequences fitting for the requests of the CDMA system by distributing different initial values can be obtained. Well choosing Chebyshev sequences have similar performance of error bit rate in asynchronous DS-CDMA systems at the signal user environment. While in multi-users environment, Chebyshev sequences have better resistance of the decreasing performance of the EBR caused by multi-access in asynchronous DS-CDMA.

**Key words** multi-access; Chebyshev chaotic sequence; code division multiple access

## 0 引言

混沌现象是指非线性动态系统中出现的确定性的、类似随机的过程。理论上, 混沌序列具有几大优点使它特别适用于扩频通信: 混沌序列是伪随机信号, 其自相关函数是  $\delta$  函数, 互相关函数为零; 混沌序列的产生可以由确定性系统决定, 并可以再生用于混沌扩频系统的解扩; 混沌序列对初值的依赖性很强, 在相同映射方案下, 初值的细微改变将产生两组完全不同的伪随机序列, 采用该方法, 将产生数目众多的混沌序列, 满足扩频通信系统对地址码的要求。而传统扩频通信系统中使用的地址码, 大多数是通过线性或非线性移位寄存器产生, 产生的地址码集中扩频码数目有限。基于混沌序列的以上优点, 近年来, 采用混沌序列作为扩频通信系统中的扩频序列受到了极大的关注。国内外研究表明, 采用混沌序列作为扩频序列其性能优于传统 Gold 序列扩频。于是关于混沌序列扩频在扩频通信中的应用受到了广泛关注。

收稿日期: 2005-08-10

第一作者简介: 刘卫洪 (1976~), 男, 硕士。主要研究方向: 通信信号处理。E-mail: hongkms@hotmail.com

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

### 1 Chebyshev混沌序列的产生

一个离散的时间混沌系统定义为  $x_{n+1} = f(x_n)$  ( $0 < x_n < 1, n = 0, 1, 2, \dots, N$ ), 其中,  $x_n$  是当前状态,  $f(x_n)$  把当前状态 映射到下一个状态  $x_{n+1}$ ,  $n$  表示混沌序列长度. 该混沌序列以初值  $x_0$  开始迭代, 可以得到序列  $\{x_n, n = 0, 1, 2, \dots, n\}$ , 称为该离散系统中的一条轨迹.  $k$ 阶 Chebyshev混沌序列映射规则为:

$$x_{n+1} = T_k(x_n) = \cos(k \cos^{-1} x_n) \quad -1 \leq x_n \leq 1 \tag{1}$$

对于阶数  $k$  的选择, 论文<sup>[1]</sup>中给出了详细推导, 当  $k = 3, 7, 9, \dots$  时较优. 改变产生该混沌序列的初值, 将得到不同的混沌序列, 如果要提高扩频通信系统的频带利用率或系统容量, 就必须提高扩频通信系统的抗多址能力, 而扩频通信系统的多址能力是与多址干扰 (MAI) 相关的. 研究<sup>[2]</sup>表明, 基于 MAI 最小准则的 Chebyshev混沌序列的产生可以在得到 Chebyshev混沌序列的基础上变换得到, 变换方法如下:

$$y_n = \frac{1}{\sqrt{A}} \sum_{i=1}^N (-r)^i T_k(x_n) \tag{2}$$

式中,  $A = \frac{1}{2} \cdot \frac{r^2(1-r^{2N})}{1-r^2}$ ;  $r = 2 - \sqrt{3}$ ,  $N$  为序列长度. 这样产生的序列  $\{y_1, y_2, \dots, y_N\}$  就是满足 DS-CDMA

系统 MAI 最小准则的最佳混沌序列. 一般, 当  $N$  较大时, 上式可以简化为  $y_{n+1} = -ry_n + \sqrt{2(1-r^2)} \cdot x_n$ , 如果直接用最佳 Chebyshev 实值混沌序列去扩频, 与现有的扩频体制不兼容, 要先将其采用二值量化法转化为数字序列. 量化函数为:

$$q(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \tag{3}$$

这样扩频序列  $\{a_n\}$  由轨迹  $\{y_n\}$  二值量化得到,  $a_n = q(y_n)$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ). 不同初值给出的扩频序列轨迹, 可以通过该量化函数得到不同用户的扩频地址码. 图 1 绘出了基于 MAI 最小的 3 阶最佳 Chebyshev 序列当初值为  $x_0 = -0.80$  序列长度  $N = 127$  的混沌序列的自相关曲线, 以及基于 MAI 最小的 3 阶最佳 Chebyshev 序列初值分别为  $x_{a0} = -0.84$  和  $x_{b0} = -0.80$  序列长度  $N = 127$  的两组序列之间的互相关曲线. 容易看出, 该方法产生的 Chebyshev 混沌序列具有类似理想扩频序列的性质.

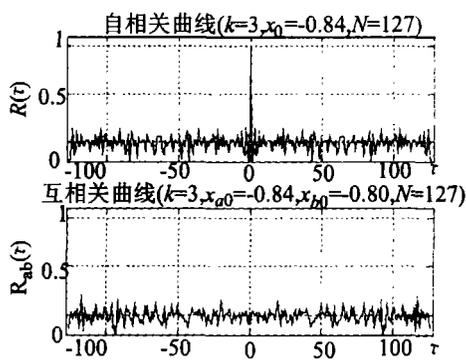


图1 Chebyshev混沌序列相关性  
Fig.1 Correlation of the Chebyshev chaotic sequence

### 2 混沌序列扩频 DS-CDMA 系统模型

混沌扩频异步 DS-CDMA 系统模型如图 2 所示, 发射机部分不同用户使用不同初值的混沌序列对用户信号进行扩频, 再通过高频调制将信号发射出去, 在信道中用户信号通过不同路径 (产生不同延迟) 到达接收端. 图中绘出了第  $j$  个用户对接收信号的解调过程.

考虑加性高斯白噪声信道具有  $K$  个用户的异步 DS-CDMA 系统, 采用 BPSK 调制, 接收端第  $j$  个用户输出信号为

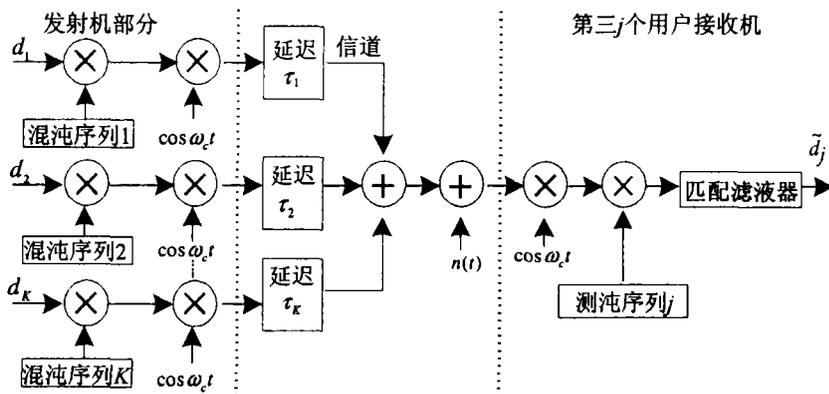


图2 混沌扩频异步DS-CDMA系统示意图  
Fig.2 Sketch map of the asynchronous DS-CDMA system based on chaotic sequence

$$\begin{aligned} \tilde{d}_j &= \int_0^{T_b} r(t) \cos(\omega_c t) dt \\ &= d_j + \sum_{k=1, k \neq j}^K I_k(b_k, \varphi_k, \tau_k) + \eta_j \end{aligned} \tag{4}$$

式中,  $r(t)$  为接收信号;  $s_j(t)$  是周期为  $T_b$  的第  $j$  个用户的混沌扩频特征序列;  $d_b, \varphi_k, \tau_k$  分别为第  $k$  个用户的发送数据、相位、以及信号延迟;  $\eta_j$  是均值为零, 方差  $E[(\eta_j)^2] = N_0$  的高斯白噪声;  $\sum_{k=1, k \neq j}^K I_k(b_k, \varphi_k, \tau_k)$  为第  $j$  个用户的 MAI 对于异步 DS-CDMA 系统, 采用 2 式中的最佳混沌序列产生方案, 第  $j$  个用户接收信号中, 来自其他用户的干扰的方差为<sup>[3]</sup>:

$$\sigma^2(j) = \frac{\sqrt{3}(K-1)}{6N} \cdot \frac{r^{-2N} - r^{2N}}{r^{-2N} + r^{2N} - 2} \tag{5}$$

式中,  $r = 2 - \sqrt{3}N$  为扩频序列长度, 当  $N$  很大时, 上式方差的极限可以简化表示为  $\sigma^2(j) = \sqrt{3}(K-1)/6N$ , 在高斯噪声信道中, 该 Chebyshev 混沌序列扩频 DS-CDMA 系统的误码率  $P_e(j) = Q((Q^2(j) + N_0)^{1/2})$  这里,  $Q(\bullet)$  表示误差函数. 该误码率的理论值与扩频通信系统的误码率  $P_e = Q((2E_b N_0)^{1/2})$  相近,  $E_b$  为 1 bit 信息数据的信号能量<sup>[4]</sup>.

### 3 混沌序列用于异步 DS-CDMA 系统性能仿真

用 Matlab 软件对 AWGN 噪声情况下, Chebyshev 混沌序列用于图 2 所示扩频通信系统的误码率进行分析. 仿真中, 发送数据速率  $T = 0.1 \text{ s}^{-1}$  或  $-1$  值随机分布的信号, 发送数据量为 10 000, 扩频序列选择阶数  $k = 3$  扩频序列长度  $N = 127$  的 Chebyshev 混沌序列, 载波频率选择为  $10^9 \text{ Hz}$  为了和传统的扩频序列性能进行比较, 在相同条件下, 同时考虑了相同扩频序列长度的 Gold 序列.

图 3 为加性高斯白噪声环境下, 异步 DS-CDMA 系统扩频序列分别采用初值  $x_0 = -0.84$  的最佳 Chebyshev 混沌序列与传统 Gold 序列时, 在不同信噪比情况下的误码率仿真比较, 图 3 中横坐标 SNR 为信噪比, 单位为分贝 (dB), 纵坐标为在给定信道比下的误码率 (EBR). 仿真结果表明, Chebyshev 混沌序列用于异步 DS-CDMA 系统时的误码率 (EBR) 性能略逊于 Gold 序列. 实际异步 DS-CDMA 系统是不同的用户共同存在的, 由于实际扩频系统中的扩频序列之间不是完全正交的, 因此存在多址干扰, 在对给定用户解调时, 式 (4) 中的 MAI 项总是存在的. 图 4 给出了在加性高斯白噪声环境固定信噪比 (1 dB) 情况下 Gold 序列、Chebyshev 混沌序列在不同用户数量存在情况下的误码率性能, 图 4 中, 横坐标  $U$  表示用户数量, 纵坐标仍为误码率 (EBR). 仿真中, 不同混沌扩频序列的初值在  $[-0.84, 0.84]$  中均匀取值. 实验表明, 随着

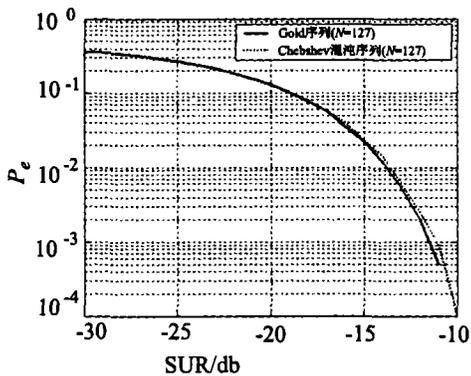


图3 AWGN信道异步DS-CDMA单用户系统BER  
Fig.3 BER of multi-user asynchronous DS-CDMA system in AWGN channels

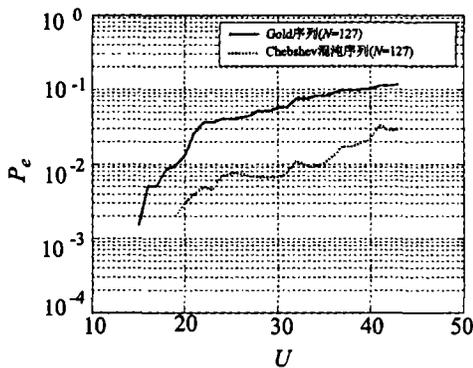


图4 AWGN信道异步DS-CDMA多用户系统BER  
Fig.4 BER of multi-user asynchronous DS-CDMA system in AWGN channels

(下转第 81 页)

实验得出四类逼近所对应的 PID 控制器的适用范围, 并指出全通逼近更具有通用性. 对于控制器参数的整定, 指出了要考虑控制器的非脆弱性.

#### 参考文献:

- [1] YAMAMOTO S, HASHIMOTO I. Present Status and Future Needs: The View from Japanese Industry[C] // Proceedings of the 4th International Conference on Chemical Process Control, 1991: 512-521.
- [2] GARCIA C E, MORARIM. Internal model control: a unifying review and some new results[J]. Ind Eng Chem. Proc Des, 1982, 21(2): 308-323.
- [3] RAY W M. Multivariable process control: A survey[J]. Computer and chemical Engineering, 1983, 7(2): 367.
- [4] 赵曜. 内模控制发展综述 [J]. 信息与控制, 2000, 29(6): 526-531.
- [5] RIVERA D E, MORARIM, SJGESTAD S. Internal model control- 4 PID controller design [J]. Ind Eng Chem Proc Des Dev, 1986, 25: 252-265.
- [6] MORARIM, ZAFRIU E. Robust process control[M]. Prentice Hall: Englewood Cliffs, NY, 1989.
- [7] 王福永. 基于 pade 逼近的纯滞后系统内模控制器的设计 [J]. 苏州大学学报: 工学版, 2004, 24(4): 26-29.
- [8] 刘开培. 基于 pade 逼近的纯滞后系统增益自适应内模 PID 控制 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2001, 34(4): 93-95.
- [9] 龚晓峰, 高衿畅, 周春晖. 时滞系统 PID 控制器内模整定方法的扩展 [J]. 控制与决策, 1998, 13(4): 337-341.
- [10] 龚建平, 朱凤成. MC-PID 控制器参数扩展整定方法的改进 [J]. 北京化工大学学报, 2000, 27(3): 75-76.
- [11] SILVA J G, DATTA A, BGATTACHARYYA S P. PID Tuning Revisited: Guaranteed Stability and Non-Fragility[C] // Proceedings of the American Control Conference, 2002: 5000-5006.
- [12] SHI J, LEE W S. MC-PID Controllers for First-Order Plus Dead-Time Processes: A Simple Design with Guaranteed Phase Margin[C] // Proceedings of IEEE TENCON'02, 2002: 1397.

(上接第 75 页)

用户数量的增加两种扩频序列方案下的 DS-CDMA 系统误码率均有所上升, 但 Chebyshev 在相同用户数量情况下的误码率低于传统 Gold 序列, 很显然其抗多址性能优于传统 Gold 序列.

#### 4 混沌序列用于 DS-CDMA 结论

仿真结果表明, 通过给不同用户分配不同初值, 可以得到为数众多的不相关混沌序列, 并具有和传统扩频序列类似的相关性能, 可以满足码分多址要求. 在加性高斯白噪声信道异步 DS-CDMA 系统中, 单个用户存在情况下, 基于 MAI 最小的最佳 Chebyshev 混沌序列与传统 Gold 序列具有相近似的误码率性能; 多个用户存在情况下, 基于 MAI 最小的最佳 Chebyshev 混沌序列抗误码率性能较优.

#### 参考文献:

- [1] LING C, LIS Q. Chaotic Spreading Sequences with Multiple Access Performance Better Than Random Sequences[J]. IEEE Transaction On Circuits And Systems, March 2001, 47(3): 394-396.
- [2] 夏明新, 卢凌. DS-CDMA 系统的最佳混沌序列研究 [J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2001, 25(3): 248-249.
- [3] CHEN C C, KUNG Y, KEN U, et al. Design of Spread-Spectrum Sequences Using Chaotic Dynamical and Ergodic Theory [J]. IEEE Transaction On Circuits And Systems September 2001, 48(9): 1110-1112.
- [4] 朱近康. 扩展频谱通信及其应用 [M]. 安徽: 中国科学技术大学出版社, 1993: 34-35.