

# 基于混沌序列的 DS-CDMA 相关解调系统

王 玫<sup>1,2</sup>, 仇洪冰<sup>1,2</sup>

(1. 西安电子科技大学, 陕西西安 710071, 2. 桂林电子工业学院, 广西桂林 541004)

摘 要: 本文从截断混沌序列的相关特性入手, 直接推导出混沌序列为地址码的异步 DS-CDMA 通信系统的相关解调结果, 仿真研究不同的混沌序列在异步 DS-CDMA 条件下的多址特性, 说明混沌序列优化的必要性并指出了优化的途径。

关键词: 混沌序列; 相关解调; 码分多址; 多用户干扰

中图分类号: TN914.53 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2001)12A-1897-03

## Correlated Demodulation for DS-CDMA System Based on Chaotic Spreading Sequences

WANG Mei, QIU Hong bing

(1. Xidian University, Xi'an, Shanxi 710071, China; 2. Guilin university of electronic technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: With the correlation of truncated chaotic sequences, the correlated demodulation for asynchronous DS-CDMA system in chaotic sequence is derived in the paper. It is shown that the system has multiple access and is robust by the theoretical analysis and computer simulations. Finally an optimization method of the chaotic spreading sequences is proposed.

Key words: chaotic sequences; correlated demodulation; code division multiple access; multiuser interference

### 1 引言

在码分多址通信系统中, 扩频序列码组的选取对系统的容量、抗扰性和复杂度有着至关重要的影响。传统的扩频序列是由  $m$  序列或 Gold 序列等线性序列变换后产生的。这类序列的缺点是码组数量有限, 选择余地小; 易于被复制, 降低了系统的保密性; 系统的复杂度随着序列长度的增加而增大等等。由于码分多址通信已经成为第三代移动通信系统的一种重要的通信方式, 如何选择一种性能好、数量大、不易被复制又易于产生的地址码已成为学术界关注的一个热点。而混沌序列恰好满足了上述特性, 受到越来越多学者的关注, 已经成为扩频序列的新选择。对混沌序列的研究以往大多集中在对其特性的研究上<sup>[1~4]</sup>, 本文将混沌序列应用到码分多址的通信系统中, 推导出混沌序列为地址码的异步 DS-CDMA 通信系统的相关解调结果, 仿真研究混沌序列在异步条件下的多址特性, 实际仿真结果表明混沌序列必须经过优化, 否则, 将直接影响系统的性能。最后, 给出了几种优化的方法。

### 2 基于混沌序列的 DS-CDMA 相关解调系统及性能分析

#### 2.1 相关解调系统

DS-CDMA 系统的多址特性是依靠地址码的相关特性而

实现的。本系统就是紧紧依靠混沌序列的相关特性解调出所发送信息的。扩频序列由混沌时间序列  $\{x(n)\}$  产生,  $x(n+1) = f(x(n))$ , 将其截短为周期  $N$  的序列。为了简便起见, 设扩频序列的周期等于扩频增益  $N$ 。考虑一个 DS-CDMA 通信系统, 设在发射端有  $m$  个动力学系统构成:

$$\dot{x}_i = f_i(x_i), i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

其中,  $x_i \in R^m$ , 接收端的  $m$  个系统与发射端一一对应,

$$\dot{x}'_i = f_i(x'_i), i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

第  $j$  个发射机产生信号  $y_j(k)$  为混沌序列  $z_j(k)$  与二进制消息信号  $s_j(k)$  进行扩频后得到的, 即:  $y_j(k) = s_j(k) \cdot z_j(k)$ 。由于不同的用户置于通信网的不同位置, 信号到达公用信道的时延不同, 设第  $j$  个用户时延为  $T_j = \tau_j \cdot T$ , 其中  $T$  为采样周期。考虑了各个用户的时延后, 信道中的信号表示为

$$y(k) = \sum_{j=1}^m y_j(k + \tau_j) = \sum_{j=1}^m s_j(k + \tau_j) z_j(k + \tau_j) \quad (3)$$

其中,  $s_j(k + \tau_j) = s_{j0} + b_j \delta$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ ,  $s_{j0}$  为一常数,  $N$  为扩频增益,  $m$  为用户数。  $y(k)$  经信道传输后接收端的信号变为

$$y'(k) = y(k) + n \quad (4)$$

式中,  $n$  为信道白噪声。设信道噪声  $n$  与接收端产生的混沌时间序列  $z_j(k)$  为互不相关的, 将接收到的信号分别与  $m$  路接收端产生的混沌序列之一进行相关运算, 并将式(3)代入得:

$$\begin{aligned}
 C_{y,z'_k}(i) &= \frac{1}{N} \sum_{p=0}^N y(p) z'_k(p+i) \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{p=0}^N \sum_{j=1}^m (s_{j0} + b_j \delta) z_j(p + \tau_j) z'_k(p+i) \\
 &= \sum_{j=1}^m (s_{j0} + b_j \delta) \left( \frac{1}{N} \sum_{p=0}^N z_j(p + \tau_j) z'_k(p+i) \right) \\
 &= \sum_{j=1}^m (s_{j0} + b_j \delta) C_{z_j, z'_k}(\tau_j - i) \tag{5}
 \end{aligned}$$

式中,  $b_j \in \{-1, 1\}, j = 1, 2, \dots, N$  为二进制消息,  $k$  为 0 到  $m$  间的任一整数, 代表  $m$  个信道中的任一路. 对式(5)化简, 将  $j = k$  和  $j \neq k$  的情况分开, 提出  $b_k \delta$ , 得出:

$$\begin{aligned}
 b_k \delta &= \frac{1}{C_{z_k, z'_k}(\tau_k - i)} (C_{y, z'_k}(i) - \sum_{j=1, j \neq k}^m s_{j0} C_{z_j, z'_k}(\tau_j - i) \\
 &\quad - \sum_{j=1, j \neq k}^m b_j \delta C_{z_j, z'_k}(\tau_j - i)) \tag{6}
 \end{aligned}$$

在系统设置中, 发射端的第  $k$  个混沌系统与接收端的第  $k$  个混沌系统其结构和初始条件基本一致时, 可以认为  $z_k \cong z'_k$ . 在式(6)中, 当  $j = k$  时为有用信号项. 经过滑动相关同步, 当  $\tau_j = \tau_k = i$  时,  $C_{z_k, z'_k}(0)$  为接近于 1 的正数. 这时, 二进制信息的解调完全取决于接收信号与混沌时间序列  $z'_j(k)$  的互相关函数  $C_{y, z'_k}(i)$  的符号. 从  $C_{y, z'_k}(i)$  的符号变化可得知二进制信息  $b_k$ . 当  $j \neq k$  时,  $C_{z_j, z'_k}(\tau_j - i)$  为接近于 0 的很小的数, 由式(5)时可知, 它对  $C_{y, z'_k}(i)$  的贡献为系统的多址干扰, 互相关特性越好, 多址干扰就越小. 一般情况下, 我们将  $s_{j0}$  置为零, 当系统相关性较为理想时, 对式(6)化简, 得出式(7), 从而实现了解调.

$$b_k \delta = C_{y, z'_k}(i) / C_{z_k, z'_k}(\tau_k - i) \tag{7}$$

### 2.2 性能分析

对于码分多址通信系统其主要干扰为多址干扰. 下面就来分析多址干扰对系统误比特率的影响. 由式(5)可知, 有用信号为:

$$\Omega_z^k = b_k \delta C_{z_k, z'_k}(0) \tag{8}$$

干扰信号为:

$$\Psi_z^k = \sum_{j=1, j \neq k}^m b_k \delta C_{z_j, z'_k}(\tau_k - i) \tag{9}$$

$\Psi_z^k$  是其他用户对第  $k$  个用户的多址干扰, 其值很难求出, 但根据其分布是零均值的高斯分布<sup>[1]</sup>, 可算得其方差为:

$$(\sigma^k)^2 = E[(\Psi_z^k)^2] \tag{10}$$

此时第  $k$  个用户端相关解调输出的信噪比为:

$$SNR_k = \frac{(\Omega_z^k)^2}{(\sigma^k)^2} \tag{11}$$

我们可以直接写出此系统的误码率公式

$$P_{err}^k = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \sqrt{\frac{SNR_k}{2}} \right] = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \sqrt{\frac{(b_k \delta)^2 |C_{kk}(0)|^2 / 2}{(\sigma^k)^2}} \right] \tag{12}$$

综合考虑  $m$  个用户,

$$P_{err} = E[P_{err}^k] = \frac{1}{2} E \left[ \operatorname{erfc} \left[ \sqrt{\frac{(b_k \delta)^2 |C_{kk}(0)|^2 / 2}{(\sigma^k)^2}} \right] \right] \tag{13}$$

假设已经采用了功率控制技术, 认为各用户到达接收端时的功率相等, 即  $b_k = b = 1$ . 并且对于扩频序列来说, 其间隔零处的自相关值  $C_{kk}(0) = 1$ . 由式(13)可以看到码分多址的混沌系统中, 地址码的自相关特性和互相关性直接影响系统的误码率, 地址码的优化是提高系统性能的关键.

### 3 计算机仿真

我们对本文所述系统进行仿真, 研究不同地址码在用户数、子码长度、噪声干扰等发生变化时的系统性能. 在地址码的选择上, 选用了典型的 Logistic 映射、Chebyshev 映射. 扩频增益为 16, 32, 64, 128, 256, 用户数为 1, 2, ..., 8, 模拟数据量在量级  $10^7$  以上. 所用 Logistic 映射和 Chebyshev 映射的表达式分别为:  $f_{\log} = 1 - 2 \cdot x^2, f_{che} = \cos(3 \cdot \arccos(x)), x \in [-1, 1]$ .

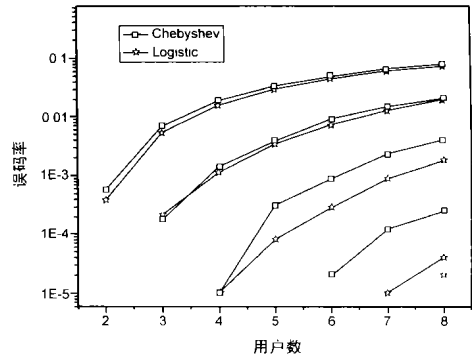


图 1 Logistic 和 Chebyshev 映射产生序列随用户变化曲线

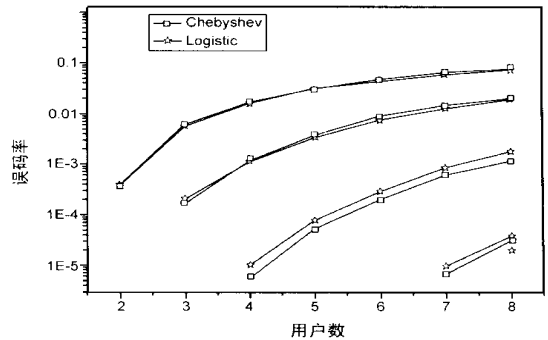


图 2 Logistic 和优化 Chebyshev 序列随用户变化曲线

(1)图 1、图 2 给出了 Logistic 映射、Chebyshev 映射在用户数变化时的特性曲线, 从图中可以看出用户数越多, 多址干扰越大, 这是由于地址码的相关特性决定的; 同时可以看出, 扩频增益越高, 系统的误码率越低. 但更为重要的是在同等条件下 Logistic 映射与 Chebyshev 序列的比较. 由式(13)代入具体序列的表达式经过理论推导可知<sup>[8]</sup> Chebyshev 映射产生的地址码其多址特性优于 Logistic 映射和  $m$  序列产生的地址码. 而在实际的系统仿真中并非完全如此. 我们首先选择了彼此仅相差 0.1% 一组初始条件经 Chebyshev 映射产生一组地址码给各个用户, 此时的系统误比特率并不低于 Logistic 映射产生地址码的系统如图 1 所示. 然后, 我们加大了产生地址码的 Chebyshev 映射初始条件的距离, 并进行了优化筛选, 此时的系统误比特率较 Logistic 映射产生地址码的系统要低, 如图 2

所示. 由此说明序列优化的必要性.

(2) 图 3 给出了扩频因子  $N$  变化时不同序列产生的误比特率. 从图中可以看出  $N$  越大, 误比特率越小, 但当  $N$  增加到一定值时, 系统误比特率的改善不明显, 说明码长  $N$  有一个最佳值.

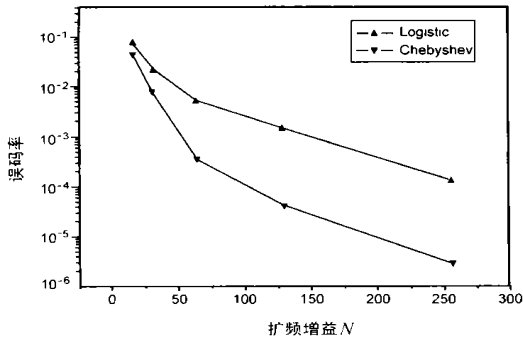


图 3 Logistic 和 Chebyshev 映射产生序列随扩频增益变化曲线

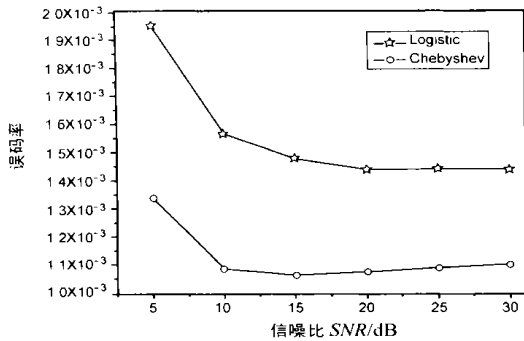


图 4 Logistic 和 Chebyshev 映射序列随信噪比变化曲线

(3) 图 4 给出了系统加入白噪声时, 信噪比变化时不同地址码的系统误比特率. 从图中可以看出, 当系统的信噪比较低时(低于 10dB), 白噪声对系统性能的影响较大; 当系统的信噪比较高时, 信噪比变化对系统误比特率的影响不是很明显. 说明码分多址系统的信噪比达到一定值以后, 系统的主要干扰为多址干扰.

## 4 序列优化方法

大量的实验表明, 序列优化是十分必要的. 优化方法大体可以分为以下几种:

(1) 拉大混沌映射初始条件之间的距离. 虽然混沌序列具有对初始条件的灵敏依赖性, 但初始条件相近时, 混沌映射的相轨迹有一定的相似性, 经过一段时间后才能互不相关; 拉大初始条件的距离以后, 这种相似性就不存在了, 自然就优化了地址码序列.

(2) 利用高维混沌映射产生的序列作为地址码. 可以证明高维混沌映射产生的序列, 其互相关性优于低维混沌映射产生的序列, 同时也提高了系统的保密性, 但系统的复杂性有所提高.

(3) 序列的正交化. 码分多址系统性能和容量取决于地址码的互相关性, 如果能将地址码正交化, 将从根本上降低多址干扰, 提高系统性能, 增加系统容量. 关于系统正交化的问题

将在另外的文章中加以论述.

## 5 结论

本文着重分析了基于混沌序列的异步 DS-CDMA 系统相关解调的结果, 经过计算机仿真说明混沌序列有较优越的多址特性, 给出了混沌序列优化的几种方法. 混沌序列实际应用到实际的通信系统中还有一段距离, 主要是混沌序列产生的硬件实现以及小型化、集成化的难度较大. 目前在国外有很多这一类的文章发表, 相信在不久的将来, 混沌序列将应用于实际的通信系统中.

## 参考文献:

- [1] Michael B Pursley. Performance evaluation for phase coded spread spectrum multiple access communication - Part I: System analysis [J]. IEEE Trans., 1997, Conr 25(8).
- [2] Michael B Pursley. Performance evaluation for phase coded spread spectrum multiple access communication - Part II: Code sequences analysis [J]. IEEE Trans., 1997, Conr 25(8).
- [3] G Mazzini, G Setti, R Rovatti. Chaotic complex spreading sequences for asynchronous DS-CDMA Part I: System modeling and results [J]. IEEE Trans., 1997, CAS F 44(10): 937- 947.
- [4] R Rovatti, G Setti, G Mazzini. Chaotic complex spreading sequences for asynchronous DS-CDMA Part II: Some theoretical performance bounds [J]. IEEE Trans., 1998, CAS F 45(4): 496- 506.
- [5] L Cong, S Songeng. Chaotic frequency hopping sequences [J]. IEEE Trans., 1998, Conr 46(11): 1433- 1437.
- [6] Giuseppe Grassi, Saverio Mascolo. Synchronizing hyperchaotic systems by observer design [J]. IEEE Trans., 1999, CAS IF 46(4): 478- 483.
- [7] J A K Suykens, T Yang, L O Chua. Impulsive synchronization of chaotic Lu' e systems by measurement feedback [J]. Int. J. Bifurc. Chaos, 1998, 8(6): 1371- 1381.
- [8] 胡文立, 王玫. 混沌扩频序列的多址性能分析 [J]. 西安电子科技大学学报, 2001, (6).

## 作者简介:



王 玫 女. 1963 年 5 月出生于山西太原. 副教授, 西安电子科技大学 电路与系统专业博士生. 主要研究领域包括: 扩频通信、混沌通信、多用户检测等.



仇洪冰 男. 1963 年出生于黑龙江鸡西, 副教授, 西安电子科技大学通信与信息系统专业博士生. 主要研究领域包括: 移动通信、宽带网络、进化算法、多用户检测等.