

文章编号:1001 - 893X(2004)06 - 0025 - 05

异步码分多址系统的最优混沌 二进制扩谱序列

李晓潮, 郭东辉, 吴伯僖

(厦门大学 物理系, 福建 厦门 361005)

摘 要:为了扩展适合异步 CDMA 系统的扩谱序列,提高系统的性能,利用混沌序列的类随机、理想的自相关和互相关、易于产生并且数量多的特性,来生成适合异步码分多址系统的混沌扩谱序列。根据异步 DS - CDMA 系统的模型,分析适合异步 CDMA 系统的最优混沌扩谱序列的性能优点,提出选择和构造最优二进制混沌扩谱序列的关键指标,并与传统的伪随机序列(如 Gold 序列)进行数值仿真比较。结果表明应用最优混沌扩谱序列可以增加 15% 的系统容量。

关键词:混沌扩谱序列;异步码分多址;最优二进制混沌扩谱序列

中图分类号: TN929; O414 **文献标识码:** A

Optimal Chaotic Binary Spreading Sequences for Asynchronous CDMA System

LI Xiao - chao, GUO Dong - hui, WU Bo - xi

(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In order to expand the group of sequences and improve the system performance of asynchronous CDMA communication, study on the characteristic of optimal chaotic sequence is conducted. On this base, some criteria on selecting spreading sequences are proposed and implemented to generate binary chaotic spreading sequences with optimal performance. Numerical simulation and statistical analysis show that these sequences are more adapted for asynchronous CDMA system than conventional Gold sequence.

Key words: Chaotic spread spectrum sequence; Asynchronous CDMA; Optimal binary chaotic spread spectrum sequence

一、引 言

在扩谱通信中,必须很好地区分经过不同路径时移的原始信号,从而可以利用 Rake 接收抑制多径干扰;而多址接入时,又要求区分具有不同时移的不同信号。这些信号的处理都是通过相关技术和利用

信号集具有符合具体应用的自相关和互相关性能来实现的^[1]。

由于混沌系统的类随机特性,具有快速衰落的相关函数和较宽的功率谱^[2],十分适合于扩谱通信的伪随机调制,被认为是构造扩谱序列的一个很好的选择。由于上行信道的非同步性,破坏了通用正

收稿日期:2004 - 06 - 02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60076015);福建省自然科学基金资助项目(A0010019);福建省高新技术项目

交码(如 Walsh、OVSF 码)的正交性,因此目前主要采用 Gold 或 Kasami 码序列。但是,它们的相关性往往无法满足现有系统的要求。利用混沌系统对初值和分支参数的敏感性,选择和构造适合各种需要的、性能较优的序列组,从而扩展适合异步 CDMA 系统的混沌扩谱序列,提高系统的性能,成为近年来研究的热点^[1,3~10]。

本文通过异步 CDMA 系统的信噪比和误码率模型^[11],比较伪随机序列和最优混沌序列作为扩谱序列所引入的多址干扰,证明本质上最优混沌序列优于伪随机序列族^[3,10]。然后,根据重新简化的异步 CDMA 的信噪比模型^[4],得到最优序列的筛选准则,并依此生成最优混沌二进制序列。数值仿真结果表明它的性能优于传统的扩谱序列。

二、异步 CDMA 中的随机序列和最优混沌序列的性能比较

K 个用户的异步 BPSK CDMA 系统,经过高斯白噪声信道(AWGN)后,每个用户接收信号为

$$r(t) = n(t) + \sum_{k=1}^K \sqrt{2} P a_k(t - \tau_k) \cdot b_k(t - \tau_k) \cos(\omega_c t + \phi_k) \quad (1)$$

其中, $n(t)$ 是噪声功率为 $N_0/2$ 的高斯白噪声, $\tau_k = \tau_c - \tau_k$, 相对延迟 $\tau_k = \text{mod}(\tau_k, T)$, $0 \leq \tau_k < T$, $a_k(t)$ 是扩谱序列,用户数据为 $b_k(t)$ 。当相位、时延和用户数据是相互独立的随机变量时,且 τ_k 均匀分布于区间 $[0, 2T]$, τ_k 均匀分布于区间 $[0, T]$ ($k = 1, \dots, K$), $b_{k,i}$ 取 $+1$ 或 -1 的几率相等,通过相关接收和积分后,用户信号的信噪比表示成^[10~11]:

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

其中, C_k, C_i 是扩谱序列的非周期自相关函数, N 是扩谱因子。上式中,除了 $N_0/2E_b$ 是由加性高斯白噪声引入之外,其余部分则是其他用户的干扰信号,也叫做多址接入干扰(MAI),是 CDMA 系统中的主要干扰部分,定义成 $\frac{\sigma_A^2}{A}$:

$$\frac{\sigma_A^2}{A} = \frac{1}{6N^3} \sum_{k=1, k \neq i}^K \sum_{l=1}^{N-1} [2C_{k,i}^2(l) + C_{k,i}(l)C_{k,i}(l+1)] \quad (3)$$

当扩谱序列 a_k 是随机独立等分布变量时,根据非周期自相关函数的定义,可以推出^[12]:

$$\begin{aligned} E[C_{k,i}(l)] &= E[a_j^{(k)} a_{j+l}^{(i)}] = 0 \\ E[C_{k,i}(l)^2] &= N - |l| \\ E[C_{k,i}(l)^3] &= 0 \\ E[C_{k,i}(l)^4] &= 3(N - |l|)^2 - 2(N - |l|) \end{aligned} \quad (4)$$

直接带入(3)式,得到:

$$\begin{aligned} E[\frac{\sigma_A^2}{A}] &= \frac{(K-1)}{6N^3} \sum_{l=1}^{N-1} E[2C_{k,i}(l)^2] \\ &= \frac{K-1}{3N^3} \left\{ 2 \sum_{l=1}^{N-1} E[C_{k,i}(l)^2] + E[C_{k,i}(0)^2] \right\} \\ &= \frac{K-1}{3N} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{var}[\frac{\sigma_A^2}{A}] &= \frac{K-1}{36N^6} (6N^3 - 8N^2 + 2N) \\ &= \frac{K-1}{6N^3} \end{aligned} \quad (6)$$

当 $N = 127, K = 30$ 时,波动为

$$10 \log_{10} \frac{E[\frac{\sigma_A^2}{A}] + \sqrt{\text{var}[\frac{\sigma_A^2}{A}]}}{E[\frac{\sigma_A^2}{A}] - \sqrt{\text{var}[\frac{\sigma_A^2}{A}]}} = 0.18 \text{ dB}$$

可以看到多址干扰项的方差相对较小,意味着随机序列的可优化量较小。

为了改善系统相关输出的信噪比,需要降低多址接入干扰部分。对于混沌序列,假设它们的非周期相关函数近似相等,即 $C_i(l) \approx C_k(l) \approx C(l)$ 对所有 i, k, l 成立,并归一化后(令 $C(0) = 1$),有

$$\frac{\sigma_A^2}{A} = \frac{K-1}{6N} \left[2 + 4 \sum_{l=1}^{N-1} C^2(l) + 2 \sum_{l=0}^{N-1} C(l)C(l+1) \right]$$

即要求最优序列必须具有以下性质:

$$C(l) = (-1)^{\lfloor \frac{l-N}{r} \rfloor} \frac{r^{1-N} - r^{N-1}}{r^{-N} - r^N}$$

式中 $l = 0, 1, 2, \dots, N-1, r = 2 \pm \sqrt{3}$ 。

从(3)式可以得到此时的最小多址干扰为^[3]

$$\frac{\sigma_{A-opt}^2}{A} = \frac{\sqrt{3}(K-1)}{6N} \cdot \frac{r^{-2N} - r^{2N}}{r^{-2N} + r^{2N} - 2} \cdot \frac{\sqrt{3}(K-1)}{6N}$$

(9)

以上近似是因为当 N 取较大值时 (N >= 7), $\frac{r^{-2N} - r^{2N}}{r^{-2N} + r^{2N} - 2} \approx 1$ 成立。比较(9)和(5)式,可以看到使用最优序列的多址干扰的改善因子为 $2/\sqrt{3} = 1.15$,即同等信噪比的条件下,可以增加 15%的用户。

而满足(8)式的序列可以通过混沌切比雪夫映射来构成^[3,10]:

$$y_j = \frac{1}{\sqrt{A}} G(x_j)$$

其中 $G(x) = \prod_{j=1}^N (-r)^j T_p^j(x)$, $x \in [-1, 1]$, $r = 2 \pm \sqrt{3}$, $T_p(x)$ 是切比雪夫映射。

三、最优混沌二进制序列

为了符合现有数字通信系统的要求,往往需要将混沌实数序列转化成实用的混沌二进制序列。通常通过阈值函数等变换后的混沌二进制序列的性能接近或差于传统的伪随机序列^[5-8]。但是,由于混沌系统的敏感性,可以通过变化初始值和分支参数可以产生大量的混沌二进制序列,然后根据一定的规则优化混沌序列集合,从而改善它的性能^[6]。

为了导出限制多用户干扰的主要的、简易实用的序列指标,可以将式(3)改写为^[4]

$$I_A = \frac{1}{3N} \sum_{k=1, k \neq i}^k \left\{ \frac{C_k(0) C_i(0)}{C_k(0)^2} + \frac{2}{\sum_{l=1}^{N-1}} \frac{C_k(l) C_i(l)}{C_k(0)^2} + \frac{C_k(0) C_i(1) + C_k(1) C_i(0)}{2 C_k(0)^2} + \frac{\sum_{l=1}^{N-1} [C_k(l) C_i(l+1) + C_k(l+1) C_i(l)]}{2 C_k(0)^2} \right\} \quad (11)$$

其中,设 $C_i(l) = C_k(l) = C(l)$;数值计算的结果表明, I_4 的取值要比 I_3 小一个数量级,可以忽略不计; I_2 和 I_3 的关系如下:

$$I_2 = \frac{2}{\sum_{l=1}^{N-1}} \frac{C_k(l) C_i(l)}{C_k(0)^2}$$

$$= 2 \left[\frac{C(1)}{C(0)} \right]^2 + \frac{2}{\sum_{l=2}^{N-1}} \frac{C(l) C(l)}{C(0)^2} = 2 I_3^2 + O(I_3) \quad (12)$$

上式说明 I_3 是限制多用户干扰的主要因素,且很容易得出多用户干扰的最小值发生在 $I_3 = -0.25$,而此时的多用户干扰为 $0.875 \times \frac{K-1}{3N}$ 。比较式(8)得到的最优序列的非周期相关函数(如图1),可以看到它的 $\frac{C(1)}{C(0)} = 0.268$,并且优化后的多用户干扰为 $\frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{K-1}{3N} = 0.866 \times \frac{K-1}{3N}$ 。两者的性能指标十分接近,同时也证明以上的简化是合理有效的。

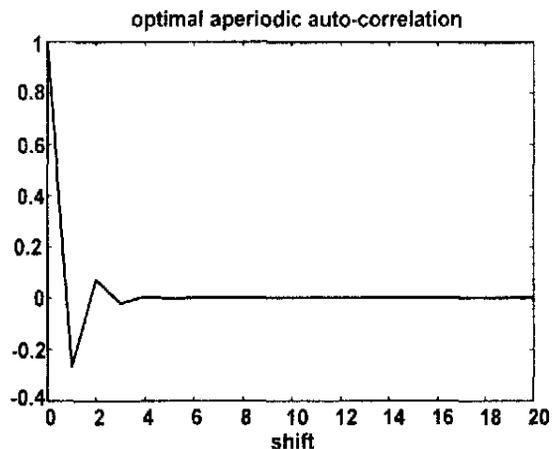


图1 最优序列的非周期自相关函数(相移0~20)

根据以上的分析,可以定义以下的混沌二进制序列的优化准则:

(1)平衡准则。即二进制序列中“+1”和“-1”的数目差不超过1;

(2)优化准则。根据(11)式的优化指标,我们设定归一化后的序列非周期自相关函数 $C(1) < -0.2$ 。需要注意的是, $I_3 = -0.25$ 是统计意义上的指标,因此在实际应用中,为了增加序列集的序列数目,可以适当放宽或收小准则的取值;

(3)周期自相关函数准则。对于序列识别和多径干扰的抑制,序列的自相关十分重要。设定周期自相关函数的取值上限为 Gold 序列的最大自相关值;

(4)周期互相关函数准则。设定为小于1,它主要确保序列集中的序列是不同的序列,而不是其中某个序列的时移,从而可以在异步的环境下使用。

以上准则的设定值之间是相互制约的。追求最

小自相关和互相关的序列集^[13~14](如 Gold、Kasami 序列)等无法满足 MAI 优化的指标,而优化指标对非周期自相关的要求,又需要放宽对自相关和互相关的要求。对序列集合的选择关键是符合具体应用对相关性能的要求。

本文选择 Chebyshev map 作为产生混沌序列的混沌系统,利用不同的初始值 x_0 和分支参数 p 来生成大量的混沌序列:

$$x_{n+1} = T_p(x_n) = \cos(p \cos^{-1} x_n), \quad -1 \leq x \leq 1 \quad (13)$$

然后利用简单的阈值函数 $f(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$ 转换为混沌二进制序列;最后应用上述定义的优化准则对得到的大量序列进行筛选,得到最优混沌二进制序列集合。

四、数值仿真的结果

根据第二节分析,我们利用数值仿真来比较分别应用最优混沌序列和伪随机 Gold 序列的异步码分多址系统的误码率。最优混沌实数序列是依照式(10)生成的。通过仿真得到的结果和统计理论值十分吻合,从而证明了我们在第二节分析。因此,本质上最优混沌序列优于伪随机序列族,并可以在同等信噪比的条件下,增加 15% 的用户。

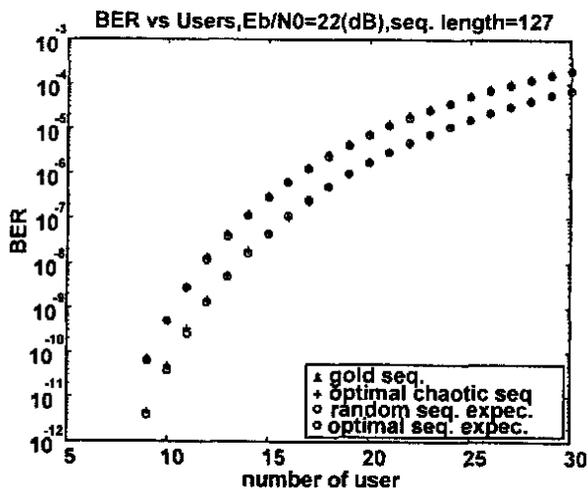


图 2 $N = 127, E_b/N_0 = 22 \text{ dB}$ 时异步系统误码率曲线 (序列仿真和理论值)

下面,根据提出的最优混沌二进制序列的生成步骤,计算和生成的最优混沌二进制序列结果如下:

- 总共生成的原始二进制序列数 :95,756;
- 符合平衡和优化准则的序列数 :348;
- 符合周期自相关函数准则的序列数 :227;
- 符合周期互相关函数准则的序列数 :56。

同时 $O(I_3)$ 的均值为 -0.0171 ,远小于 I_3 的值,符合式(11)中的条件。此序列集可以通过增加初始值 x_0 和分支参数 p 的取值范围得到进一步的扩展。

对应用最优混沌实数序列、Gold 序列和最优混沌二进制序列的异步码分多址系统误码率的数值仿真结果如图 3 所示。优化后的混沌二进制序列保持了和最优混沌实数序列十分接近的误码率指标,且好于传统的 Gold 序列。因此,它是具有平衡性、优良的周期相关性和适合最优序列要求的混沌二进制序列。

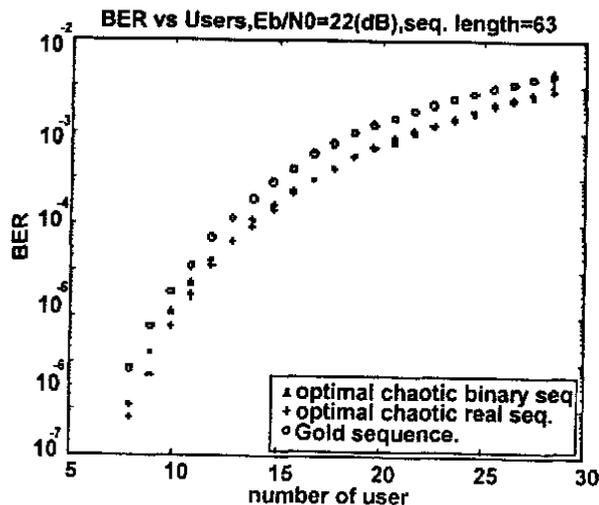


图 3 不同用户时的异步 CDMA 指标 (选取混沌二进制序列、Gold 序列和最优混沌实数序列, $E_b/N_0 = 20 \text{ dB}$,扩谱因子 N 为 63)

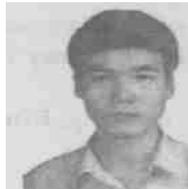
五、结 论

本文利用混沌序列的伪随机性、理想的相关性、易于产生并且数量多的特性以及异步 CDMA 的模型,推导并产生适合异步 CDMA 的最优混沌序列。研究表明序列的相关性要结合具体的应用,才能在特定的条件下取得更好的系统性能。数值仿真的结果表明经过优化的混沌二进制序列具有和混沌最优实数序列十分接近的误码率指标,优于传统的 Gold 序列,并且提高了异步码分系统的性能。

参考文献

- [1] D S Broomhead, J P Huke, M R Muldoon. Codes for spread spectrum applications generated using chaotic dynamical systems[J]. Dynamics and stability of systems, 1999, 14(1): 95 ~ 105.
- [2] U Parlitz, S Ergezinger. Robust communication based on chaotic spreading sequences[J]. Physics Letters A, 1994, 188: 146 ~ 150.
- [3] Chi - Chung Chen, Kung Yao, Ken Umeno, et al. Design of spread - spectrum sequences using chaotic dynamical systems and ergodic theory[J]. IEEE Trans. Circuits and Systems - I, 2001, 48(9): 1110 ~ 1114.
- [4] 贾占峰, 张琪, 郑君里. 异步码分多址通信中混沌扩谱序列的研究[J]. 清华大学学报自然科学版, 1999, 39(7): 111 ~ 115.
- [5] Y Soobul, K Chady, Harry C S Rughooputh. Digital chaotic coding and modulation in CDMA [A]. IEEE Africon 6th (Vol. 2) [C]. Oct. 2002. 841 ~ 846.
- [6] Qi Zhang, Junli Zheng. Choice of chaotic spreading sequences for asynchronous DS - CDMA [A]. Proc. of IEEE Asia - Pacific conference on circuits and systems [C]. Dec. 2000. 642 ~ 645.
- [7] T Kohda, A Tsuneda. Even and odd correlation functions of chaotic Chebyshev bit sequences for CDMA [A]. IEEE 3rd international symposium on spread spectrum techniques and applications (Vol. 2) [C]. July 1994. 391 ~ 395.
- [8] T Kohda, A Tsuneda, T Sakae. Chaotic binary sequences by Chebyshev maps and their correlation properties [A]. IEEE 2nd international symposium on spread spectrum techniques and applications [C]. Dec. 1992. 63 ~ 66.
- [9] K Umeno, K Kitayama. Spreading sequences using periodic orbits of chaos for CDMA [J]. Electronics letters, 1999, 35(7): 545 ~ 546.
- [10] 李晓潮, 郭东辉, 曾权, 等. 混沌扩谱 CDMA 的系统模型及其性能分析 [J]. 电讯技术, 2003, 43(6): 13 ~ 18.
- [11] M B Pursley. Performance evaluation for phase - coded spread - spectrum multiple - access communication - Part I: system analysis [J]. IEEE Trans. Commun., Aug. 1977, COM - 25: 795 ~ 799.
- [12] H F A Roefs, M B Pursley. Correlation parameters of random sequences and maximal length sequences for spread - spectrum multiple access communication [A]. IEEE Canadian Communications and Power Conference [C]. 1976. 141 ~ 143.
- [13] D V Sarwate, M B Pursley. Crosscorrelation properties of pseudorandom and realted sequences [J]. Proc. of the IEEE, 1980, 68(5): 593 ~ 619.
- [14] L R Welch. Lower bounds on the maximum cross correlation of signals [J]. IEEE Trans. inform theory, 1974, IT - 20: 397 ~ 399.

作者简介:



李晓潮 (1970 -), 男, 厦门大学物理系博士研究生。