文章编号:1671-5497(2006)05-0799-04

二相和四相过抽样混沌序列的平衡性

于银辉[1],刘 伟[2],朱 珺[1],范亚芹[1],刘志辉[3]

(1. 吉林大学 通信工程学院,长春 130021; 2. 吉林建筑工程学院 基础科学系,长春 130012; 3. 山东工商学院 数学与信息工程学院,山东 烟台 264000)

摘 要:针对平衡度函数只能考察二值序列平衡性的问题,提出了可以考察多值序列平衡性的序列最大平衡差函数,利用该函数分析了四相 OSCM 序列平衡性分别与序列长度和过抽样参数 p 的关系。仿真和分析表明:通过优选可以得到平衡性优异的 OSCM 序列,该序列可作为第三代移动通信 CDMA 系统扩频序列的一种待选方案。

关键词:通信技术;过抽样混沌映射序列;扩频;平衡性

中图分类号:TN914 **文献标识码**:A

Balance of binary-phase and quadric-phase oversampled chaotic map sequences

Yu Yin-hui[1], Liu Wei[2], Zhu Jun[1], Fan Ya-qin[1], Liu Zhi-hui[3]

(1. *College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun* 130021, *China*; 2. *Department of Basic Course, Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, Changchun* 130012, *China*; 3. *School of Mathematics & Information Science, Shandong Institute of Business and Technology, Yantai* 264000, *China*)

Abstract: In order to solve the problem that the degree of balance function can only indicate the binary sequence balance, a maximum balance difference function of the sequence for the consideration of multi-value sequences was proposed. The analysis for the relationship between the balance of quadric-phase over-sampled chaotic map (OSCM) sequence and sequence length and over-sampled parameter p was given by using this function. Both simulation results and the analysis show that through optical selection the good balanced performance OSCM sequence can be obtained and it could be used as one of the spreading spectrum sequence candidates for 3G mobile communication CDMA systems.

Key words: communication; over-sampled chaotic map sequence; spreading spectrum; balance performance

混沌是一种特殊的动力学系统,非周期、不收敛但有界,并且对初始值和外部参数有极其敏感的依赖性。目前,混沌序列在扩频通信方面的应用研究受到越来越多的关注[1-4]。针对 Logistic、Chebyshev、Tend 等一维混沌映射的深入研究表明,混沌序列具有理想的平衡性、相关性和良好的保密性[1,2,4,5]。基于这些优于传统扩频序列性质,混沌序列被普遍认为是可以作为第三代移动通信 DS/CDMA 系统扩频序列的一种待选方案[1-6]。

收稿日期:2005-10-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60272064).

作者简介:于银辉(1964-),女,副教授,博士. 研究方向:通信与信息系统,扩频通信理论与应用研究.
E-mail:yuyh@jlu.edu.cn

本文结合 Chebyshev 一维混沌映射和通信原理中的抽样理论,将一维映射推广到二维,提出过抽样混沌映射(OSCM)。OSCM 较一维映射具有更出色的保密性,非常适合用于保密通信。数字化的 DS/CDMA 系统对扩频序列的要求之一是应该具有良好的序列平衡性。如果序列不平衡,将使扩频通信系统产生载波泄露,破坏系统的保密、抗干扰和抗侦破能力[7,8]。因此,本文在产生二相和四相过抽样混沌序列的基础上,重点考察和分析序列的平衡性,提出了可以考察多值序列平衡性的最大平衡差函数,并论证了该函数的实用性。

1 OSCM 的定义及保密特性

定义 如果一个混沌映射符合式(1)的关系,则称其为过抽样混沌映射(Oversampled Chaotic Map)。

$$x_{n+1} = \underbrace{f(f\cdots(f(x_n,k)))}_{p} = f^{(p)}(x_n,k) \quad (1)$$

式中:$x_{n+1}=f(x_n,k)$ 是一维混沌映射(也称源映射),p 是不小于 3 的自然数。

称由这样的混沌映射迭代产生的序列为过抽样混沌序列。由此可知,过抽样序列是通过对源映射序列进行每隔 $p-1$ 点的抽样实现的新序列。过抽样是对时间离散的数字信号进行再取样,并将新的取样点按原顺序重新排列成新序列的过程。通信原理中要求被抽取的数字信号是对原始时间连续模拟信号进行高于奈奎斯特频率的抽样结果,这样进行合适的抽取可保证不会出现频谱混叠,并使原信号被还原。用来作为扩频序列的混沌序列,对其本身所包含的信息并不关心,也没有再还原的意义,所以只要序列能够保证仍是混沌的,新的 OSCM 序列就是可以利用的。经 Lyapunov 指数的分析可以知道,OSCM 序列不仅是混沌的,而且其混沌性强于源映射序列并随 p 的增大而增强。因此,过抽样混沌序列具有比源映射序列更强的对初值的敏感性[3]。这样的初值敏感性保证过抽样混沌序列拥有丰富的码源,可以利用过抽样混沌序列实现多址[1]提高系统的容量。

在通信中,窃听者要对直扩调制的信息进行解密,必须了解扩频序列的结构和变化规律。扩频序列的产生依赖的参数越多,系统的保密性就越好[2]。通过对式(1)的分析发现,OSCM 比一维混沌映射增加了一个参变量 p,这样就增加了混沌映射的复杂程度,迫使窃听者在解密过程中必须通过截短分析多掌握一个参数。然而 p 的变化范围可以很大,p 每变化 1 都会引起整个序列的巨大改变,很难通过对 OSCM 序列的截短分析找出其映射函数原形。这样的序列规律对于窃听者几乎是不可能完成的任务。因此,可以认为 OSCM 的最大特点是其强于源映射的保密性,非常适合用于保密通信和军事通信。

2 二相 OSCM 序列及其平衡度

Chebyshev 映射产生的混沌序列可以作为 CDMA 系统扩频码的优选方案[2,5],因此本文采用 Chebyshev 混沌映射作为源映射产生的 OSCM 序列进行分析。首先通过 Chebyshev 源映射产生二相混沌序列。

阶数为 2^k 的 Chebyshev 混沌映射为

$$x_{n+1} = \cos(2^k \cos^{-1} x_n) \quad (2)$$

$$x_n \in (-1,1);k = 1,2,3,4,\cdots$$

由式(2)所产生的混沌序列的概率分布密度函数为[2]

$$\rho(x) = \begin{cases} \dfrac{1}{\pi\sqrt{1-x^2}}, & x \in (-1,1) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,Chebyshev 混沌序列的概率密度函数关于原点偶对称,因此以门限函数

$$c_n(x) = \begin{cases} -1, & x < 0 \\ 1, & x \geqslant 0 \end{cases} \quad (4)$$

对混沌序列进行量化,得到由 ± 1 组成的二相序列 $\{\{c_n\} | c_n \in \{-1,1\}\}$,$-1$ 和 1 出现的概率相等,可以保证序列平衡性理想,即

$$\lim_{N\to\infty} \frac{L}{N} = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N} c_n(x) = \int_{-1}^{1} c_n(x)\rho(x)\,\mathrm{d}x = 0 \quad (5)$$

其中:设序列中 1 和 -1 的数目相差 L 个。

由于 OSCM 序列的迭代形式比较复杂,很难通过数学推导得到其序列的概率分布密度函数,因此通过仿真对比考察 OSCM 序列的概率分布。当 k 大于 3 时,二相 Chebyshev 序列的平衡性趋于稳定和理想[5-7]。因此本文选用 8 阶 Chebyshev 和 $p=4$ 的 8 阶 Chebyshev OSCM 序列进行分析。

通常利用平衡度函数考察二相序列的平衡性[5],如下式

$$E = | P - Q | / N \quad (6)$$

式中:P 为序列中 1 的个数;Q 为序列中 -1 的个数;N 为序列长度。

当 $E=0$ 时,表明序列达到平衡状态;当 $E=1$ 时,说明序列变为单值序列,即不平衡序列。E 的值越接近于 0,表明序列的平衡性越好。

图 1 是根据式(6)仿真得到的,显示了二相 OSCM 序列平衡度和序列长度的关系。其中 $p=4$,$k=3$,初值 $x_0=0.145$。由图可知,随着序列长度的增加,二相 OSCM 序列平衡度趋近于 0。当 $N>1500$ 时,E 接近于 0 且趋于稳定,N 对平衡度的影响变小。在实际系统应用中,可以通过对序列平衡度的考察进行优选,得到平衡质量更优的序列作为系统的扩频序列,从而提高系统性能,降低系统的负荷[4]。

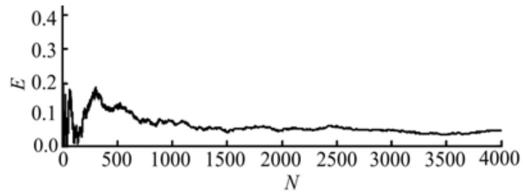

图 1　二相序列的平衡度 E 与序列长度 N 的关系

Fig. 1　Relationship between E and N of the binary-phase sequence

3　四相 OSCM 序列及最大平衡差

由于多进制调制具有提高频带利用率等优点,目前四进制相转键控方式(QPSK)已被广泛应用。与产生二相 OSCM 序列类似,需要通过对概率分布进行划分得到合理的量化标准才能得到平衡性较理想的序列。通过对图 1 分析可知,既然 OSCM 序列和 Chebyshev 源映射序列具有极其相似的概率分布规律,那么同样也可以按照产生四相 Chebyshev 的方法产生四相 OSCM 序列。依据文献[1]的方法,以 $d_1=-\sqrt{2}/2$,$d_2=0$,$d_3=\sqrt{2}/2$ 为划分点,把$(-1,1)$划分为 4 个子区间,使 x_n 落入各个子区间的概率相等。将各个子区间赋值,得到四值序列$\{\{c_n\} | c_n \in \{0,1,2,3\}\}$,便可产生基于复数的四相 OSCM 序列

$$u_n = j^{c_n},\ c_n \in \{0,1,2,3\} \quad (7)$$

平衡性对于四相扩频序列依然是重要的性能指标[4],然而未见有文献给出考察四相序列平衡性的函数。作者可以利用考察 m 值序列平衡性的最大平衡差函数

$$\delta_{\max} = | u_{c_n} - 1/m |_{\max},\ m \in \{2,3,4,\cdots\} \quad (8)$$

分析序列的平衡性。式中:$1/m$ 是 m 值平衡序列中一种符号所占的比例;u_{c_n} 是待考察序列中一种符号所占的比例;$|u_{c_n}-1/m|$ 为该符号的平衡差。序列的最大平衡差就是 m 个符号平衡差的最大值。当 $\delta_{\max}=0$ 时,序列为平衡序列,$\delta_{\max}$ 越趋近于 0,说明序列的平衡性越好;当 $\delta_{\max}=(m-1)/m$ 时,$u_{c_n}=1$,序列变为单值序列,为不平衡序列。

由式(8)得到四相序列最大平衡差函数为

$$\delta_{\max} = | u_{c_n} - 1/4 |_{\max} \quad (9)$$

根据式(9)仿真得到的图 2 显示了四相 OSCM 序列的最大平衡差随序列长度 N 的变化。其中 $p=4$,$k=3$,初值 $x_0=0.145$。由图可知,四相 OSCM 序列的平衡性随序列长度的增加趋于稳定。在序列长度大于 1000 后,长度对序列平衡性的影响减小,序列平衡性稳定并接近理想。因此可以利用长度为 1500—3500 的四相 OSCM 序列作为 CDMA 系统的扩频序列。

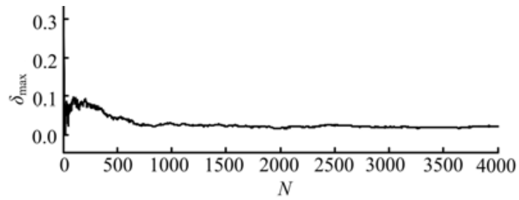

图 2　四相序列最大平衡差 $\delta_{\max}$ 与序列长度 N 的关系

Fig. 2　Relationship between $\delta_{\max}$ and N of the quadric-phase sequence

图 3 为四相 Chebyshev OSCM 序列最大平衡差与 p 的变化关系。其中 $N=2500$,$x_0=0.145$,$p \in \{1, 2, 3, \cdots, 250\}$。当 $p=1$ 时,序列变为 Chebyshev 源映射序列。由图 3 可知,随 p 的增加,序列的最大平衡差发生无规则的变化。源映

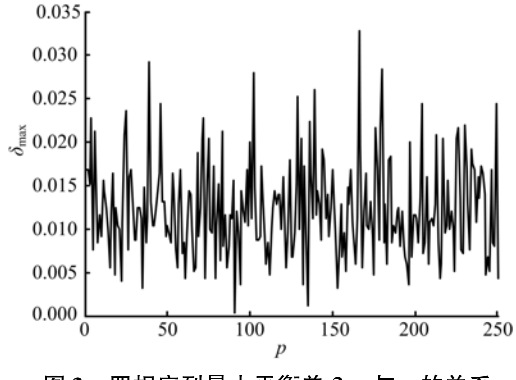

图 3　四相序列最大平衡差 $\delta_{\max}$ 与 p 的关系

Fig. 3　Relationship between $\delta_{\max}$ and p of the quadric-phase sequence

射序列最大平衡差值为 0.0168,OSCM 序列的最大平衡差值几乎都不超过 0.03,很多序列的最大平衡差值小于源映射序列。由此可见,p 的变化与序列的平衡性没有直接关系,只要选择恰当,OSCM 序列的平衡性可以比源映射序列更好。在实际的扩频系统中,可以通过优选得到平衡性优良的 p 值 OSCM 序列作为扩频码。

为了进一步考察最大平衡差的实用性,由式(8)得出二相序列的最大平衡差为

$$\delta_{\max} = | u_{c_n} - 1/2 |_{\max} \qquad (10)$$

根据式(10)可得到图 4。对比图 1 和图 4 可知,同样参数的二相过抽样混沌序列的最大平衡差与传统的平衡度函数具有很相似的函数轨迹。同样说明了在序列长度大于 1500 后序列平衡性趋于稳定,且序列长度越长,平衡性越好。由此得出,对于二相序列的平衡性,通过最大平衡差和平衡度函数可以得出同样的观察和分析结果;而用传统的平衡度只能研究二相序列的平衡性,用最大平衡差则可对 m(m 为大于 1 的整数)值序列进行分析。因此,本文提出的序列最大平衡差在分析序列平衡性时比传统的平衡度函数具有更强的普适性。

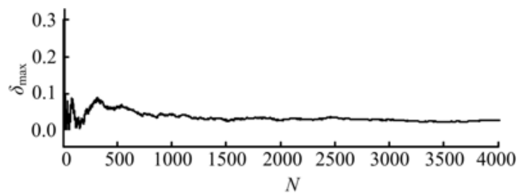

图 4 二相序列最大平衡差 $\delta_{\max}$ 与序列长度 N 的关系

Fig. 4 Relationship between $\delta_{\max}$ and N of the binary-phase sequence

4 结束语

阐述了 OSCM 的概念,经分析表明,产生 OSCM 序列所依赖的参数比一维源映射多,序列具有更强的保密性,适合用于保密通信。针对以往文献中没有分析四相序列平衡函数的问题[5-7],提出了可以考察多值序列平衡性的序列最大平衡差函数。分析表明,该函数可以替代传统的平衡度函数考察二相序列平衡性,同时具有更强的普适性。在产生二相和四相 OSCM 序列的基础上,利用序列最大平衡差分析了四相 OSCM 序列平衡性分别与序列长度和参数 p 的关系。结果表明,四相 OSCM 序列具有理想的平衡性,同时参数 p 对序列平衡性的影响没有规律。这为下一步的优选序列工作提供了依据,即在保证序列相关性的同时,可以通过优选得到平衡质量出色的 OSCM 序列作为 DS/CDMA 系统的扩频序列,从而提升系统的保密性。

参考文献:

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

[2] Mazzini G, Setti G, Rovatti R. Chaotic complex spreading sequence for asynchronous DS-CDMA-part I: system modeling and results[J]. IEEE Trans on CAS-I, 1997, 44(10):934-947.

[3] Zhang Hong-tao, Guo Ji-chang, Wang Hui-yun, et al. Oversampled chaotic map binary sequences: definition, performance and realization[C]//The 2000 IEEE Asia-Pacific Conference on Circuit and System. Tianjin, 2000.

[4] Heidari-Bateni G, Mcgillem C D. A chaotic direct-spread communication system[J]. IEEE Trans on Comm, 1994, 42(2/3/4):1524-1527.

[5] 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:信息科学版,2004, 22(3):228-231.
Yu Yin-hui, Ma Sheng-zhong, Liu Wei-dong. Performance of balance based on chebyshev 2-phasc chaotis spreading sequence[J]. Journal of Jilin University(Information Science Edition), 2004, 22(3):228-231.

[6] 蔡国权,宋国文,周利莉. 基于 Chebyshev 映射的四相扩频序列[J]. 电子学报,1999, 27(9):74-77.
Cai Guo-quan, Song Guo-wen, Zhou Li-li. Quadriphase spread-spectrum sequences based on chebyshev map[J]. ACTA Electronica Sinica, 1999, 27(9):74-77.

[7] 吴敏,丘水生. 一种混沌图像加密方法的研究[J]. 通信学报, 2003, 24(8):31-36.
Wu Min, Qiu Shui-sheng. Research on a chaotic image encrypted approach[J]. Journal of China Institute of Communications, 2003, 24(8):31-36.

[8] 张琪,郑君里,简相超. 采用混沌扩频序列的异步码分多址通信系统仿真[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2002, 42(7):901-904.
Zhang Qi, Zheng Jun-li, Jian Xiang-chao. A-CDMA system simulation with chaotic spreading sequences[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2002, 42(7):901-904.