

文章编号:1001-9081(2014)04-0963-06

doi:10.11772/j.issn.1001-9081.2014.04.0963

基于正交混沌多用户混沌通信及其误码率

李杜娟^{1*}, 周子峰², 吴成茂¹

(1. 西安邮电大学 电子工程学院, 西安 710121; 2. 西安电子科技大学 计算机学院, 西安 710071)

(* 通信作者电子邮箱 651832523@qq.com)

摘要:为了解决多用户混沌通信系统中由于通信用户数目的增多以及混沌序列间的准正交性所引起的信道干扰问题,对不同混沌信号采用施密特(Schmidt)正交化方法产生其对应的正交混沌序列作为扩频码在加性高斯白噪声(AWGN)和瑞利(Rayleigh)衰落信道下研究多用户混沌通信系统中的误码率(BER)。首先将其统计自相关和互相关特性作为刻画正交混沌扩频码序列性能的重要指标,测试并分析各正交混沌序列的统计相关特性,同时也对其互相关特性曲线的均值和方差进行了测试与分析;然后通过两种信道仿真实验获取各正交混沌扩频码的BER,并将其与对应统计相关特性作对比揭示其内在关联性;最后比较分析两种不同信道下多用户混沌通信系统的BER,并揭示信道对其的影响。仿真实验表明,两种信道下相空间混沌信号中的空时正交混沌序列都能获得较低BER,尤其是在Rayleigh衰落信道下的空时正交混沌序列能够获得更低的BER,说明所提方法能更有效地降低多用户通信中信道间的干扰,更有利于多用户通信需要。

关键词:多用户混沌通信;扩频码;误码率;正交混沌序列;施密特正交化

中图分类号: TN914 **文献标志码:**A

Multi-user chaotic communication and its bit error rate based on orthogonal chaos

LI Dujuan^{1*}, ZHOU Zifeng², WU Chengmao¹

(1. School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an Shaanxi 710121, China;

2. School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract: In the multi-user chaotic communication system, the increase in the number of communication users as well as the quasi-orthogonality between chaotic sequences cause channel interference. Therefore, the Bit Error Rate (BER) of multi-user chaotic communication system, in which different chaotic signals used Schmidt orthogonalization method to produce the corresponding orthogonal chaotic sequences as spreading code, was studied in Additive White Gaussian Noise (AWGN) and Rayleigh fading channel. Firstly, the statistical autocorrelation and cross-correlation characteristics of each orthogonal chaotic sequence were taken as an important index to measure the performance of orthogonal chaotic spreading code sequence, and the statistical correlated characteristics of each orthogonal chaotic sequence and both the mean and variance of the cross-correlation curve were tested and analyzed. Secondly, the BER of each orthogonal chaotic spreading code was obtained by two channel simulation experiments, and the intrinsic correlation found by contrasting the BER of orthogonal chaotic spreading code and its corresponding statistical correlated characteristics was revealed at that time. Lastly, the BERs of multi-user chaotic communication system of two different channels were compared and analyzed and the effect on BER caused by different channels was revealed. The simulation results show that the space-time orthogonal chaotic sequence of phase space chaotic signals can obtain low BER in the two channels, and especially, space-time orthogonal chaotic sequence can obtain lower BER in Rayleigh fading channel, and also show that the proposed method can effectively reduce the interference between the channels in the multi-user communication and is more conducive to the needs of multi-user communication.

Key words: multi-user chaotic communication; spreading code; Bit Error Rate (BER); orthogonal chaotic sequence; Schmidt orthogonalization

0 引言

随着计算机技术、信息技术和通信技术的快速发展,信息的保密性越来越受到人们的重视与关注。1990年,Pecora等^[1]对混沌同步的研究使混沌理论应用于通信系统成为可能^[2]。混沌作为一种非线性动力系统所特有的现象,近年来

已成为各学科领域关注的一个研究热点问题,被应用在信息安全中。由于混沌信号对初值非常敏感,具有随机行为,良好的相关特性以及非周期、连续宽带频谱、类噪声等特性^[3],使得它可以代替传统的载波应用于保密通信系统中对信号进行扩频传输^[4]。为了有效地利用通带带宽和混沌信号的频谱,已有学者提出了多用户混沌通信系统,设计出了基于差分混

收稿日期:2013-08-13;修回日期:2013-12-05。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61073106);解放军总装备部武器装备预研项目(9140A25030411HK339)。

作者简介:李杜娟(1985-),女,渭南富平人,,硕士研究生,主要研究方向:多媒体信息技术处理; 周子峰(1987-),男,安康石泉人,硕士研究生,主要研究方向:多媒体处理、嵌入式系统; 吴成茂(1968-),男,南充仪陇人,高级工程师,主要研究方向:图像处理。

混沌键控 (Differential Chaos Shift Keying, DCSK) 的多址通信^[5-6]等。但在实际的多用户混沌通信系统中,由于混沌扩频序列的准正交性,会产生同信道干扰问题,而且同一信道内存在很多通信用户,随着通信用户数目的增多不同用户信号间的相互干扰也会加强,同时限制了用户传递信息的数量。为了解决以上问题,文献[7]利用沃尔什 (Walsh) 正交函数作载波应用于非相干多用户通信系统中以便消除用户间的相互干扰;文献[8]根据施密特 (Schmidt) 正交化产生混沌载波的思想提出混沌正交调制通信系统,并以 Logistic 映射为例验证该系统的误码率 (Bit Error Rate, BER) 性能优于混沌键控 (Chaos Shift Keying, CSK) 和正交混沌键控 (Quadrature Chaos Shift Keying, QCSK) 混沌通信系统。但是上述方法只限于传统的特殊函数和经典的混沌映射信号,且都以曲线图的方式来直观进行比较,并没有对系统的 BER 作定量分析,不能完全满足多用户混沌通信系统中数据传输的可靠性要求。为了进一步解决以上多用户混沌通信中存在的问题,以 BER 作为刻画多用户混沌通信系统性能的重要指标,寻找适合多用户混沌通信需要的正交混沌载波信号,本文提出了将不同混沌信号利用 Schmidt 正交化原理产生其对应的正交混沌载波,并将其应用于多用户混沌通信系统中传播信息比特。

1 混沌通信系统

1.1 混沌扩频通信系统

混沌不仅具有高度的伪随机性,而且还具有确定性、冲激式的自相关特性以及对其初始值高度的敏感性^[9-10]。为了提高扩频通信质量,本文将不同混沌信号引入扩频通信系统,所得到的混沌扩频通信系统如图 1 所示。

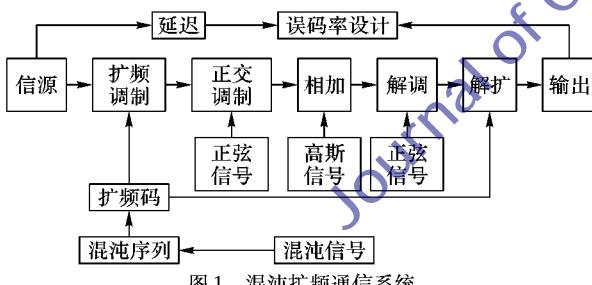


图 1 混沌扩频通信系统

1.2 多用户混沌通信系统

在多用户混沌扩频通信系统中,每个用户都使用与之相对应的异于其他用户的扩频码对自己所发送的信息进行扩频,其扩频码不同于扩频通信系统中的 m 序列、gold 序列等,它采用不同的混沌信号作为扩频码。经过扩频后的数据通过脉冲成形滤波器后通过衰落信道同时到达接收端,在接收端利用其相应的扩频码分别对不同的用户信息数据进行相关解扩,恢复各个用户的原始信息。其原理如图 2 所示。其中:用户 n 是第 n 个信道的发送端所发的原始数据信号,与其下面的扩频码一一对应,扩频码保持混沌序列的非周期性,并从其中依次截取固定位数(如 N)的码段分配给每个信息比特。至于单用户混沌扩频通信系统,就是将多用户混沌扩频通信系统中的多个用户及其对应扩频码都变为一个用户及其扩频码,将用户信息数据作为信源,其具体扩频过程如图 1 所示,本文不再赘述。

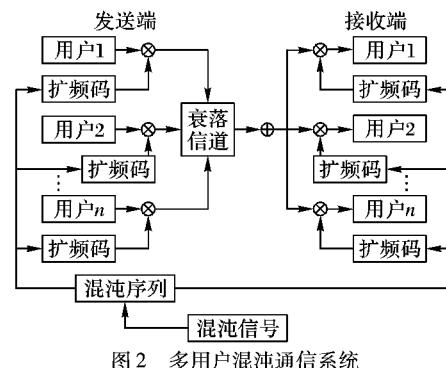


图 2 多用户混沌通信系统

2 正交混沌序列产生方式

多用户混沌通信的关键在于正交混沌扩频码,不同方式所产生的正交混沌扩频码使得扩频通信系统的性能存在显著差别。本文主要介绍 Logistic 映射及其改进映射以及相空间混沌信号产生正交混沌扩频码的基本原理。

2.1 Logistic 及其改进映射

2.1.1 Logistic 映射

Logistic 映射具有良好的混沌特性,在混沌保密通信的很多领域都被广泛应用。Logistic 映射表达式^[3]为:

$$a_{n+1} = \mu a_n (1 - a_n) \quad (1)$$

当该映射的控制参数为 $3.569946\cdots \leq \mu \leq 4, a_n \in (0, 1), n = 1, 2, \dots$ 时, Logistic 映射处于混沌状态。当 $\mu = 4$ 时, Logistic 映射为满射。

2.1.2 变形 Logistic 映射

Logistic 映射表达式可展开为 $a_{n+1} = \mu a_n - \mu a_n^2$, 若假定 $\mu a_n = 1$, 则可获得变形 Logistic 映射^[11]为:

$$a_{n+1} = 1 - \mu a_n^2 \quad (2)$$

当该映射的控制参数为 $1.5437 \leq \mu \leq 2, a_n \in (-1, 1)$ 时, 变换型 Logistic 映射处于混沌状态。当 $\mu = 2$ 时, 变形 Logistic 映射为满射。

2.1.3 改进 Logistic 映射

将 Logistic 映射进行第一次分段改进,得到第 1 种改进 Logistic 映射。其定义式^[3]为:

$$a_{n+1} = \begin{cases} 4\mu a_n (0.5 - a_n), & 0 \leq a_n < 0.5 \\ 4\mu (a_n - 0.5)(1 - a_n), & 0.5 \leq a_n \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

其中:该映射的控制参数为 $3.5699456\cdots \leq \mu \leq 4, a_0 \in (0, 1)$ 。当 $\mu = 4$ 时, 第 1 种改进 Logistic 映射为满射。

第 1 种改进 Logistic 映射曲线关于 X 坐标轴在 0.5 处具有对称性,不利于所产生离散二值序列 0、1 个数均衡性需要。于是文献提出了第 2 种改进 Logistic 映射,其表达式^[3]为:

$$a_{n+1} = \begin{cases} 4\mu a_n (0.5 - a_n), & 0 \leq a_n < 0.5 \\ 1 - 4\mu (a_n - 0.5)(1 - a_n), & 0.5 \leq a_n \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中:该映射的控制参数为 $3.569946\cdots \leq \mu \leq 4, a_0 \in (0, 1)$ 。当 $\mu = 4$ 时, 第 2 种改进 Logistic 映射为满射。

2.2 相空间法改良混沌信号

混沌信号具有良好的初值敏感性、相关特性等性能,是近年来扩频序列产生研究的重要方法。

文献[12]提出了 Autocorrelation of Phase-space Axial Symmetric (APAS) 定理,该定理为:对于一个平稳遍历的离散实动力学系统

$$x(n+1) = f[x(n)] \quad (5)$$

其值域为 $[-a, a]$, a 为正实数; $\{x(n)\}$ 的均值为0,且取值的正负具有统计平衡性。

APAS 定理主要是针对动力系统而言的,但可以将其推广到其他序列,如噪声序列、混沌序列等。由 APAS 定理知,相空间轨迹是轴对称的混沌序列,必然具有特性好的自相关函数;自相关特性差的混沌序列,相空间轨迹不具备轴对称的特点。而相空间法就是采用一定的方法使自相关特性不好的序列相空间轨迹具有轴对称特性,从而使其具有好的自相关特性。因此,利用相空间法改良混沌序列是有必要的。根据相空间的空间和时间的不同来定义混沌信号的维数和名称,分为低维混沌信号、高维混沌信号和空时混沌信号。下面介绍相空间混沌信号并将其用于获取正交混沌扩频码。

2.2.1 低维混沌信号

在低维混沌信号中,本文以改良 Henon 序列为例来对其特性作说明,其动力方程^[12]为:

$$\begin{cases} x_1(n+1) = y(n) + 1 - ax_1(n)^2 \\ y(n+1) = bx_1(n) \\ z(n+1) = c - d|z(n)| \\ x(n+1) = \begin{cases} hx_1(n+1), & z(n+1) \geq 0 \\ -hx_1(n+1), & z(n+1) < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

其中: $x(n) \in \mathbf{R}$ 是状态变量; a, b, c, d, h 是系统参数,且为正数。当 a, b, c, d, h 在合适的范围内取值时,如: $a = 1.4, b = 0.3, c = 0.5, d = 1.999, h = 0.36$,或 $h = 1, x(n)$ 在混沌态演化,满足 $x(n) \in [-0.5, 0.5]$ 。

2.2.2 高维混沌信号

在高维混沌信号中,序列在多个方向具有扩张性。本文选取耦合映像格子(Coupled Map Lattice, CML)序列作对称性改良,其动力方程^[12]为:

$$\begin{cases} x_1(n+1) = 1 - a[x_1(n)^2 + y(n)^2] \\ y(n+1) = -2a(1-2b)x_1(n)y(n) \\ u(n+1) = c - d|u(n)| \\ x(n+1) = \begin{cases} hx_1(n+1), & u(n+1) \geq 0 \\ -hx_1(n+1), & u(n+1) < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

其中: $x(n) \in \mathbf{R}$ 是状态变量; a, b, c, d, h 是系统参数,且为正数。当 a, b, c, d, h 在合适的范围内取值时,如 $a = 1.95, b = 0.01, c = 0.5, d = 1.999, h = 0.5, x(n)$ 在混沌态演化,满足 $x(n) \in [-0.5, 0.5]$ 。

2.2.3 空时混沌信号

在空时混沌系统中,其演化在空间和时间上都有耦合,其行为表现出极大的复杂性,如今已有了广泛应用。因此,利用空时混沌系统来改良基于 Logistic 映射的单向耦合映像格子(One-way Coupled Map Lattice, OCML)序列,其动力方程^[12]为:

$$\begin{cases} x_1[i, (n+1)] = (1-\xi)f[x_1(i, n)] + \xi f[x_1[(i-1), n]] \\ f[x_1(i, n)] = b[a^2 - x_1(i, n)^2] - a \\ u(n+1) = c - d|u(n)| \\ x(n+1) = \begin{cases} x_1[k, (n+1)], & u(n+1) \geq 0 \\ -x_1[k, (n+1)], & u(n+1) < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

其中: $x(i, n) \in \mathbf{R}$ 是状态变量; $f(x)$ 是 Logistic 映射; a, b, c, d, ξ, k 是系统参数; $i = 1, 2, \dots, L, L$ 是空时系统的尺度; $n = 1, 2, \dots, N, N$ 是序列的长度。当 a, b, c, d, ξ 在合适的范围内取值

时,如: $a = 0.5, b = 3.9998, c = 0.5, d = 1.999, \xi = 0.3, x(i, n)$ 在空时混沌态演化。任意选择 $i = k$,如 $i = k = 10$,选择合适的初值 $x(i, 0), u(0)$,能得到确定的具有空时混沌特性的序列 $x(n)$,满足 $x(n) \in [-0.5, 0.5]$ 。

3 正交混沌序列的产生

由于混沌扩频序列间的非零互相关性(准正交性)以及随着通信用户数量的增多,各用户间引起的干扰也将增加。欲消除各个用户间的干扰,只有使得多用户扩频通信系统中所采用的扩频序列完全相互正交。因此,根据 Schmidt 正交化原理的思想,利用此方法来产生正交的混沌序列作为载波信号传输信息比特。

3.1 Schmidt 正交化原理

Schmidt 正交化过程的目的是将线性无关的向量组化为与原向量组等价的正交向量组。

在线性代数中,假设线性无关的向量组 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_s$, 寻找与其等价的标准正交向量组 $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_s$ 的过程,称为 Schmidt 正交化原理。其方法如下:

1) 正交化过程。

令 $\mathbf{c}_1 = \mathbf{a}_1, \mathbf{c}_2 = \mathbf{a}_2 - \frac{(\mathbf{a}_2, \mathbf{c}_1)}{(\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_1)}\mathbf{c}_1, \dots, \mathbf{c}_s = \mathbf{a}_s - \frac{(\mathbf{a}_s, \mathbf{c}_1)}{(\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_1)}\mathbf{c}_1 - \dots - \frac{(\mathbf{a}_s, \mathbf{c}_{s-1})}{(\mathbf{c}_{s-1}, \mathbf{c}_{s-1})}\mathbf{c}_{s-1}$, 其中 $(\mathbf{a}_s, \mathbf{c}_{s-1})$ 表示向量的内积。

2) 规范化(规范化)过程。

取 $\mathbf{b}_1 = \mathbf{c}_1 / |\mathbf{c}_1|, \mathbf{b}_2 = \mathbf{c}_2 / |\mathbf{c}_2|, \dots, \mathbf{b}_s = \mathbf{c}_s / |\mathbf{c}_s|$, 则 $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_s$ 就是正交规范向量组,且显然 $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_s$ 仍然与 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_s$ 是等价的。其中: $\mathbf{c}_s \neq 0, |\mathbf{c}_s|$ 表示向量的模。

上述过程被称为 Schmidt 正交化过程。

3.2 正交混沌序列基函数的产生

本文将 Schmidt 正交化原理应用于混沌序列的产生过程中,使所得到的混沌序列正交化,其目的是产生两两相互正交的一系列正交基函数^[13]。

假设一个混沌系统,使其混沌信号分别取 H 个不同的初始值,各自分别迭代 L 步,其中所得某一变量 x 将会产生 H 个不同的弱相关的混沌序列集。则将每个长度为 L 的序列记为一个矢量 X ,这样便形成了 H 个矢量,记为 X_1, X_2, \dots, X_H 。若将该 H 个矢量视为 H 维空间的基,则令

$$\mathbf{M}_i = X_i - \bar{X}_i; i = 1, 2, \dots, H$$

其中 \bar{X} 是 X 的均值。

首先令 $\mathbf{f}_1 = \mathbf{M}_1, \mathbf{g}_1 = \mathbf{f}_1 / |\mathbf{f}_1|$;其次令 $\mathbf{f}_2 = \mathbf{M}_2 - (\mathbf{M}_2, \mathbf{g}_1)\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2 = \mathbf{f}_2 / |\mathbf{f}_2|$;以此类推,便可求得两两正交的单位向量 $\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_{j-1}$;最后求得

$$\mathbf{f}_j = \mathbf{M}_j - (\mathbf{M}_j, \mathbf{g}_1)\mathbf{g}_1 - \dots - (\mathbf{M}_j, \mathbf{g}_{j-1})\mathbf{g}_{j-1}$$

$$\mathbf{g}_j = \mathbf{f}_j / |\mathbf{f}_j|; j = 2, 3, \dots, H$$

即可证明 \mathbf{g}_j 与单位向量 $\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_{j-1}$ 都彼此正交,这样就得到 H 个两两正交的矢量 $\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_H$ 。记 \mathbf{g}_i 的第 s 个分量为 $\mathbf{g}_i^{(s)}$ ($i = 1, 2, \dots, H; s = 1, 2, \dots, L$),将它们作归一化,使得 $\sum_{s=1}^L (\mathbf{g}_1^{(s)})^2 = \sum_{s=1}^L (\mathbf{g}_2^{(s)})^2 = \dots = \sum_{s=1}^L (\mathbf{g}_H^{(s)})^2$ 。记 $\mathbf{g}_i = \mathbf{y}_i$ ($i = 1, 2, \dots, H$),它们将作为正交的混沌载波。

4 正交混沌序列性能分析

4.1 相关性

相关性是衡量正交混沌序列特性的一个重要技术指标,对多用户混沌通信系统的性能有着直接的影响。本文主要分析 Logistic 映射及其改进映射以及相空间混沌信号所产生正交混沌序列的自相关性和互相关性。

对于正交混沌序列,设 $\{a_i\}$ 与 $\{b_i\}$ 是周期为 N 的两个码序列,即 $a_{N+k} = a_k, b_{N+k} = b_k$,码字 $\{a_i\}$ 与 $\{b_i\}$ 的互相关函数 $r_{ab}(\tau)$ 的定义式^{[14]62}为:

$$r_{ab}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i b_{i+\tau} \quad (9)$$

若 $r_{ab}(\tau) = 0$,则 $\{a_i\}$ 与 $\{b_i\}$ 正交。

长度为 N 的码序列 $\{a_i\}$ 的自相关函数 $r_a(\tau)$ 的定义式^[14]为:

$$r_a(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i a_{i+\tau} \quad (10)$$

在 Matlab 下,对 Logistic 映射及其改进映射以及相空间混沌信号所产生正交混沌序列的相关特性进行仿真测试,所得结果如图 3~9 所示,其中为了能够直观地反映出混沌序列数 $Lc = 1000$ 的相关特性,故将其在 X 轴上作对称表示,即 X 轴表示正交混沌序列数, Y 轴表示脉冲高度。

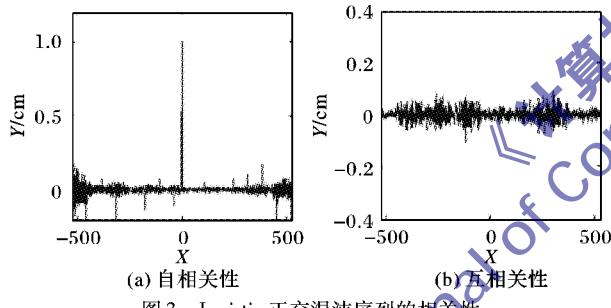


图 3 Logistic 正交混沌序列的相关性

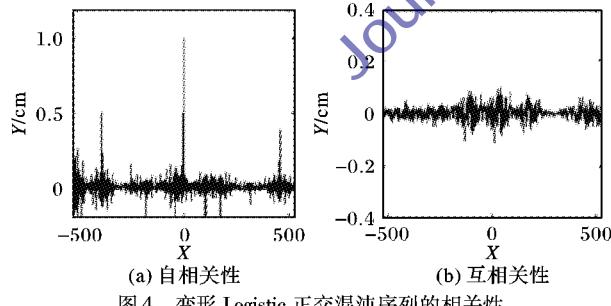


图 4 变形 Logistic 正交混沌序列的相关性

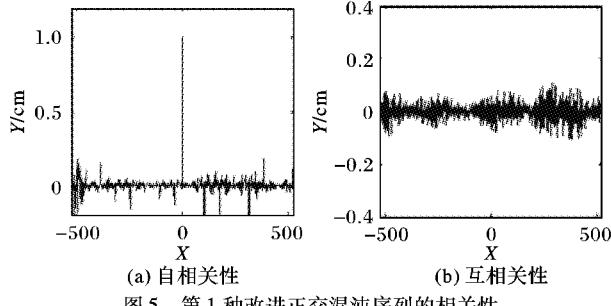


图 5 第 1 种改进正交混沌序列的相关性

将上述不同混沌信号所产生正交混沌序列的相关性测试

结果进行分析比较,详细结果如表 1 所示。

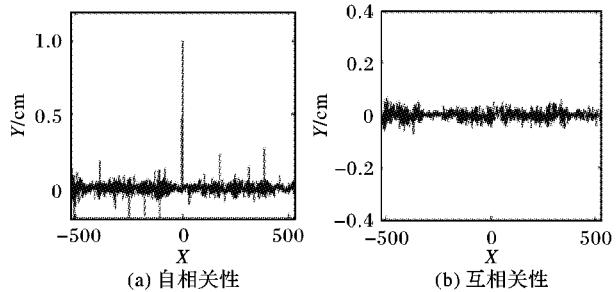


图 6 第 2 种改进正交混沌序列的相关性

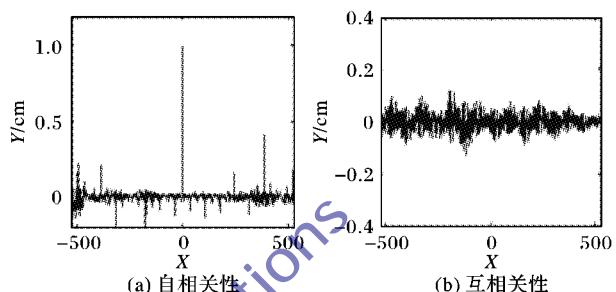


图 7 低维正交混沌序列的相关性

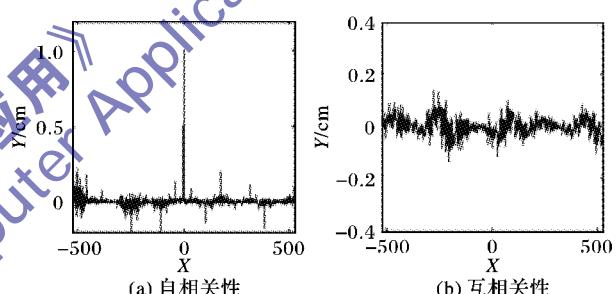


图 8 高维正交混沌序列的相关性

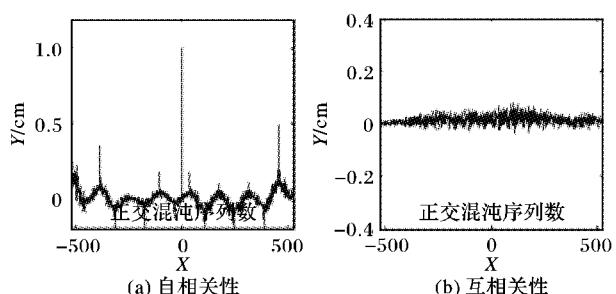


图 9 空时正交混沌序列的相关性

表 1 正交混沌序列的相关性测试比较

正交混沌序列	自相关性	互相关性
Logistic 序列	差	较差
变形序列	较差	一般
第 1 种改进序列	最差	差
第 2 种改进序列	较好	非常好
低维正交序列	一般	最差
高维正交序列	好	较好
空时正交序列	非常好	好

由上述不同正交混沌序列的相关性测试曲线可以看出,与单用户混沌序列相关性测试曲线明显不同,尤其是自相关性曲线,有多个激励脉冲。其原因在于本文所应用于多用户混沌通信系统的正交混沌序列,其内部是由多个两两相互正交的部分(行或列)正交混沌序列组成,而每一个部分正交混

沌序列相当于一个单用户通信的完整的混沌序列。因此,本文的正交混沌序列相关性曲线中,自相关性曲线中所产生的多个冲激脉冲和互相关性曲线的多波动是合理的。

4.2 均值和方差

概率论中,均值和方差是用来描述随机变量分布特点的两种最常用的数字特征。

均值又称为期望,是随机变量最基本的数字特征之一,它反映了随机变量平均取值的大小。而方差则用来度量随机变量和均值之间的偏离程度,方差越大,表明偏离程度越大,说明随机变量的取值越分散;反之,方差越小,表明偏离程度越小,说明随机变量的取值越集中。

为了对正交混沌序列的互相关性作进一步的定量分析,本文在仿真测试 Logistic 映射及其改进映射以及相空间混沌信号所产生正交混沌序列的互相关特性时,对其描述互相关特性曲线特征的均值和方差也作了测试,其测试结果如表 2 所示。

表 2 正交混沌序列互相关性曲线的均值和方差

正交混沌序列	均值	方差
Logistic 序列	4.3805×10^{-4}	7.4253×10^{-4}
变形序列	3.0407×10^{-4}	7.2554×10^{-4}
第 1 种改进序列	0.0019	8.6738×10^{-4}
第 2 种改进序列	4.0506×10^{-5}	2.9018×10^{-4}
低维正交序列	8.6504×10^{-4}	9.7425×10^{-4}
高维正交序列	0.0015	4.8023×10^{-4}
空时正交序列	0.0063	3.4256×10^{-4}

由表 2 可以看出,上述各正交混沌序列互相关性曲线的均值大小与其相应方差的大小基本上一致。均值表明各正交混沌序列互相关性曲线平均取值的大小,而方差则表明各正交混沌序列互相关性曲线的波动性。空时正交混沌序列的方差相对最小,而 Logistic 正交混沌序列的方差相对最大,表明空时正交混沌序列相对其均值的偏离程度最小,波动最小,即相对最为稳定。与表 1 相比,各正交混沌序列的方差与其互相关性性能的好坏程度一致,即若正交混沌序列的互相关性好,其对应的方差就小,说明正交混沌序列的互相关性曲线特性对方差的影响比均值更大,相对更为明显。总体来说,空时正交混沌序列互相关性曲线的均值和方差两个数字特征相对最好,其余各正交混沌序列的均值和方差与表 1 的互相关性性能基本上取得一致。

5 多用户混沌通信系统误码率

将不同正交混沌序列作为扩频码应用于多用户混沌通信系统中并测试其误码率(BER)。

5.1 多用户混沌通信系统误码率

误码率是衡量通信系统可靠性的一个重要指标。依据柯捷尔尼科夫理论知,扩频通信系统误码率计算公式为:

$$P_e = FE/N_0 \quad (11)$$

其中: F 为信号的频率, E 为信号能量, N_0 为噪声功率谱密度。而在实际的单用户混沌扩频通信中,其误码率的计算可采用如下计算公式:

$$P_e = E_b/T_b \quad (12)$$

其中:信号传输中出现错误的比特数为 E_b ,总的传输信号的

比特数为 S_b 。

在多用户混沌通信系统中,每个用户误码率的计算方法与单用户混沌扩频通信系统误码率的求解方法类似,即每个用户的平均误码率为:

$$P_{se} = \left(\sum_{i=1}^S E(i) \right) / S \quad (13)$$

其中: S 为信噪比的变化范围长度, $E(i)$ 为对应于 S 的误码率。若将第 j 个用户的误码率表示为 $P_{se}(j)$,则该多用户混沌通信系统的平均误码率为:

$$P_{se} = \left(\sum_{j=1}^H P_{se}(j) \right) / H \quad (14)$$

其中: H 为对混沌信号取不同初值经 L 步迭代正变化后得到的正交混沌载波 y_1, y_2, \dots, y_H 的个数,也表示用户数。

5.2 系统在加性高斯白噪声信道下的误码率

在加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道下的实验仿真测试中,多用户混沌通信系统在其发射端假设各用户的发射数据是由随机函数 `randsrc` 函数所产生的二进制二值序列,然后利用正交混沌序列对其进行相应扩频处理,最后将扩频信号通过脉冲成形滤波器并计算每个用户信号的功率,而在接收端对接收信号依据信噪比加入一定的 AWGN,然后通过脉冲成形滤波器对其进行滤波并作降采样处理,最后完成数据解扩恢复各用户的原始数据信息,并通过判决器来统计其误码率。其中信噪比 $E_b/N_0 = 0 : 2 : 10$, 表示 E_b/N_0 的变化范围,每种信噪比下发送的符号数为 $nSymbol = 1000$, 脉冲成形滤波器的参数中升余弦滤波器时延 $delay = 10$, 滤波器过采样数 $Fs = 8$, 升余弦滤波器滚降因子 $rolloff = 0.5$, 所设计的根升余弦滤波器为 $rrcfilter = rcosine(1, Fs, 'fir/sqrt', rolloff, delay)$ 。为了能够客观地研究不同正交混沌序列扩频码应用于多用户混沌通信系统中所对应的误码率,本文将在发射端采用随机产生各用户发射数据信息的方法产生二值序列作为发射信号,并重复多次求其误码率的算术平均值。

5.2.1 Logistic 及其改进误码率测试分析

在多用户通信中,将 Logistic 映射及其改进映射所产生正交混沌序列作为扩频码在 AWGN 信道下应用于多用户混沌通信系统中,其系统平均误码率结果如表 3 所示。

表 3 Logistic 等正交序列在 AWGN 信道下误码率

符号数	Logistic 序列	变形序列	第 1 种改进序列	第 2 种改进序列
1.0×10^2	0.1442	0.1387	0.1565	0.1231
3.0×10^2	0.1431	0.1392	0.1536	0.1228
5.0×10^2	0.1416	0.1376	0.1532	0.1234
7.0×10^2	0.1413	0.1382	0.1547	0.1256
9.0×10^2	0.1416	0.1402	0.1532	0.1221
1.0×10^3	0.1421	0.1399	0.1556	0.1245
1.0×10^4	0.1422	0.1411	0.1572	0.1217
均值	0.1423	0.1364	0.1548	0.1233

由表 3 可知,Logistic 及其改进映射中第 2 种改进 Logistic 映射所产生正交混沌序列的自相关和互相关特性相对最好,且其均值与方差的波动性相对最小,所以其误码率均值相对较小;而第 1 种改进 Logistic 映射所产生正交混沌序列混沌序列的自相关特性相对最差,且其均值与方差的波动性都相对偏大,所以其误码率均值相对较大(如表 1、2)。

5.2.2 相空间序列误码率测试分析

在多用户通信中,将相空间混沌信号所产生正交混沌序列作为扩频码在 AWGN 信道下应用于多用户混沌通信系统中,其系统平均误码率结果如表 4 所示。

表 4 相空间正交混沌序列在 AWGN 信道下误码率

符号数	正交混沌序列		
	低维	高维	空时
1.0×10^2	0.1346	0.1156	0.0872
3.0×10^2	0.1332	0.1161	0.0838
5.0×10^2	0.1337	0.1138	0.0845
7.0×10^2	0.1328	0.1130	0.0829
9.0×10^2	0.1345	0.1145	0.0836
1.0×10^3	0.1357	0.1156	0.0842
1.0×10^4	0.1323	0.1135	0.0836
均值	0.1337	0.1146	0.0842

由表 4 可知,相空间混沌信号中空时正交混沌序列的自相关和互相关特性最好,且其方差的波动性相对最小,所以其误码率均值相对较小;而低维正交混沌序列的自相关特性相对最差,且其方差的波动性相对偏大,所以其误码率均值相对较大(如表 1、2)。

5.3 系统在 Rayleigh 衰落信道下的误码率

在 Rayleigh 衰落信道下的实验仿真测试中,其多用户混沌通信系统的设计思路与在 AWGN 信道下的系统设计过程基本相似,下面不再赘述。不同的是加入了衰落信道,引入了衰落信道参数,即在发射端输出的信号需要通过 Rayleigh 衰落信道后才能抵达接收端被接收。此时在接收端接收到的信号是发射端经 Rayleigh 衰落后的信号,对该信号加入 AWGN,并进行理想信道估计,然后通过脉冲成形滤波器进行滤波并降采样,最后利用正交混沌序列扩频码进行相应的各用户数据解扩,并统计其误码率。其中:衰落信道参数中 fd 为多普勒频移, t 为每种信噪比下的符号传输时间,所设计的衰落信道为 $h = rayleigh(fd, t)$ 。

5.3.1 Logistic 及其改进误码率测试分析

在多用户通信中,将 Logistic 映射及其改进映射所产生正交混沌序列作为扩频码在 Rayleigh 衰落信道下应用于多用户混沌通信系统中,其系统平均误码率结果如表 5 所示。

表 5 Logistic 等正交序列在 Rayleigh 信道下误码率

符号数	Logistic 序列	变形序列	第 1 种改进序列	第 2 种改进序列
1.0×10^2	0.122	0.1135	0.1406	0.0976
3.0×10^2	0.122	0.1146	0.1412	0.0956
5.0×10^2	0.121	0.1127	0.1415	0.0969
7.0×10^2	0.121	0.1145	0.1409	0.0947
9.0×10^2	0.122	0.1142	0.1411	0.0952
1.0×10^3	0.122	0.1139	0.1421	0.0973
1.0×10^4	0.121	0.1151	0.1417	0.0959
均值	0.1215	0.1140	0.1413	0.0961

由表 5 可知,Logistic 及其改进映射中第 2 种改进 Logistic 映射所产生正交混沌序列的自相关和互相关特性相对最好,且其均值与方差的波动性相对最小,所以其误码率均值相对较小;而第 1 种改进 Logistic 映射所产生正交混沌序列的自相关特性相对最差,且其均值与方差的波动性都相对偏大,所以其误码率均值相对较大(如表 1、2)。

5.3.2 相空间序列误码率测试分析

在多用户通信中,将相空间混沌信号所产生正交混沌序列作为扩频码在 Rayleigh 衰落信道下应用于多用户混沌通信系统中,其系统平均误码率结果如表 6 所示。

表 6 相空间正交序列在 Rayleigh 信道下误码率

符号数	正交混沌序列		
	低维	高维	空时
1.0×10^2	0.1046	0.1072	0.0645
3.0×10^2	0.1039	0.1078	0.0643
5.0×10^2	0.1042	0.1082	0.0632
7.0×10^2	0.1059	0.1076	0.0651
9.0×10^2	0.1047	0.1069	0.0639
1.0×10^3	0.1031	0.1071	0.0633
1.0×10^4	0.1029	0.1066	0.0647
均值	0.1042	0.1073	0.0641

由表 6 可知,相空间混沌信号中空时正交混沌序列的自相关和互相关特性最好,且其方差的波动性相对最小(如表 1、2),所以其误码率均值相对较小;而低维正交混沌序列与高维正交混沌序列的误码率大小与其相关特性出现差异,其原因是由 Rayleigh 衰落信道对信号的衰减所引起的。总体来说,将上述正交混沌序列在不同信道下应用于多用户混沌通信系统中,其误码率大小与其相对应的相关特性基本保持一致。

比较上述不同正交混沌序列在 AWGN 信道和 Rayleigh 衰落信道下应用于多用户混沌通信系统中的误码率,实验结果表明,在 Rayleigh 衰落信道下的误码率基本上小于在 AWGN 信道下的误码率,且在 AWGN 信道下的误码率大小与其相对应的相关特性性能一致,而在 Rayleigh 衰落信道下的误码率大小与其相对应的相关特性性能基本上一致。说明信道的不同对正交混沌序列应用于多用户混沌通信系统中的误码率大小有一定影响,尤其是 Rayleigh 衰落信道对多用户混沌通信系统的误码率影响更为明显。

6 结语

本文通过仿真实验测试了 Logistic 映射及其改进映射以及相空间混沌信号所产生正交混沌序列作为扩频码在不同信道下应用于多用户混沌通信系统的误码率,表明不同信道下不同正交混沌扩频码的误码率与其统计自相关和互相关特性密切相关。一般而言,统计相关特性较为良好的伪随机序列作为扩频码的误码率相对较低,尤其是伪随机序列的自相关特性对其误码率的影响最为显著。实验发现,在 Rayleigh 衰落信道下由于受信道衰落的影响,其相空间混沌信号所产生的正交混沌序列作扩频码的误码率并未与其相对应的相关特性严格保持一致,说明信道对多用户通信系统的误码率是有一定影响的;同时发现两种信道下相空间混沌信号中的空时正交混沌序列作扩频码,都能够相对较好地降低多用户混沌通信系统的误码率,尤其是在 Rayleigh 衰落信道下的空时正交混沌序列更能很好地降低多用户混沌通信系统的误码率,也同时表明该方法可以很好地解决多用户混沌通信系统中的信道干扰问题,保证信号传输的准确率,提高了多用户混沌通信系统的可靠性和安全性,有利于多用户通信需要。

(下转第 972 页)

显。正如 2.3 节中的分析,对于总费用较大的最小费用路中的弧,MDFVA 算法可以大幅度降低计算量。

由数值分析可以看出,本文的改进算法 MDFVA 求解最大动态流关键弧的实际计算效果与自然算法和文献[4]算法相比有比较大的改进,特别是对于大规模的网络,效果更明显。

4 结语

本文对最大动态流的关键弧问题进行了全面的分析,首先将经典的 Ford-Fulkerson 算法进行细化,得到最大动态流的直接算法;然后根据算法分析最小费用增广路的性质,得到求解关键弧的 MDFVA 算法,并将 MDFVA 算法与自然算法以及文献[4]的算法 ($R = 1$) 进行对比。结果表明,MDFVA 算法比自然算法以及文献[4]的算法都要好。本文只研究了一条关键弧的算法,下一步研究可以考虑多条关键弧即关键弧集的算法;另一方面也可以将网络升级为多商品流的动态网络考虑求解关键弧的算法。

参考文献:

- [1] AHUJA R K, MAGNANTI T L, ORLIN J B. Network flows: theory algorithms and application [M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1993.
- [2] FORD L R, FULKERSON D R. Constructing maximal dynamic flows from static flows [J]. Operations Research, 1958, 6(3): 419–433.
- [3] PICARD J-C, QUEYARANNE M. On the structure of all minimum cut in a network and applications [C]// Combinatorial Optimization II: Mathematical Programming Studies. Berlin: Springer-Verlag, 1980: 8–16.
- [4] RAD M A, KAKHKI H T. Maximum dynamic network flow interdiction problem: new formulation and solution procedures [J]. Computer & Industrial Engineering, 2013, 65(4): 531–536.
- [5] LUNDAY B J, SHERALI H D. A dynamic network interdiction problem [J]. Informatica, 2010, 21(4): 553–574.
- [6] ROYSET J O, WOOD R K. Solving the bi-objective maximum flow network-interdiction problem [J]. INFORMS Journal on Computing, 2007, 19(2): 175–184.
- [7] ANEJA Y P, CHANDRASEKARAN R, NAIR K P K. Maximizing residual flow under an arc destruction [J]. Networks, 2001, 38(4): 194–198.
- [8] DU D, CHANDRASEKARAN R. The maximum residual flow problem: NP-hardness with two arc destruction [J]. Networks, 2007, 50(3): 181–182.
- [9] TAHMASBI R, NASRABADI E, HASHEMI S M. The value of information in stochastic maximum flow problems [J]. Computers & Operations Research, 2013, 40(7): 1744–1751.
- [10] SKUTELLA M. An introduction to network flows over time [C]// Research Trends in Combinatorial Optimization. Berlin: Springer-Verlag, 2009: 451–482.
- [11] XIE Z. Theory of network algorithm and complexity [M]. 2nd ed. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2003. (谢政. 网络算法与复杂性理论 [M]. 2 版. 长沙: 国防科技大学出版社, 2003.)
- [12] ZHANG L. The concept of maximum flow and its properties in dynamic networks [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2013, 26(7): 609–614. (张铃. 动态网络上最大流概念及其性质的研究 [J]. 模式识别与人工智能, 2013, 26(7): 609–614.)
- [13] STRANG G. Maximum flows and minimum cuts in the plane [J]. Journal of Global Optimization, 2010, 47(3): 527–535.

(上接第 968 页)

参考文献:

- [1] PECORA L M, CARROLL T L. Synchronization in chaotic systems [J]. Physical Review Letters, 1990, 64(8): 821–824.
- [2] DENG S, LIAO X. Chaos theory and its applied research in information security [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005. (邓绍江, 廖晓峰. 混沌理论及其在信息安全中的应用研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2005.)
- [3] FAN J, ZHANG X. Sectional logistic chaotic map and performance analysis [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 29(7): 720–725. (范九伦, 张雪峰. 分段 Logistic 混沌映射及其性能分析 [J]. 电子学报, 2009, 29(7): 720–725.)
- [4] ZHAO H, ZHU J. The research of multidimensional chaotic encryption communication system [D]. Harbin: Harbin Polytechnic University, 2010. (赵洪超, 朱建良. 多维混沌加密通信系统的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2010.)
- [5] KOLUMBAN G, KENNEDY M P, KIS G. Multilevel differential chaos shift keying [C]// Proceedings of the 5th International Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronics Systems. Moscow: [s. n.], 1997: 191–196.
- [6] LAU F C M, YIP M M, TSE C K, et al. A multiple-access technique for differential chaos-shift keying [C]// ISCAS 2001: Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Piscataway: IEEE, 2001: 317–320.
- [7] LIU X, QIU S. Multi-user chaotic non-coherent communication system with reducing inter-symbol interference [J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(19): 38–41. (刘雄英, 丘水生. 具有减少码间干扰的多用户混沌非相干通信系统 [J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(19): 38–41.)

生. 具有减少码间干扰的多用户混沌非相干通信系统 [J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(19): 38–41.)

- [8] CHEN H, FENG J. A quadrature modulation chaotic communication scheme [J]. Journal of Quantum Electronics, 2007, 24(1): 73–79. (陈宏滨, 冯久超. 一种正交调制的混沌通信方案 [J]. 量子电子学报, 2007, 24(1): 73–79.)
- [9] PARKER A T, SHORT K M. Reconstructing the keystream from a chaotic encryption scheme [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, 2001, 48(5): 624–630.
- [10] MATTHEWS R A J. On the derivation of a chaotic encryption algorithm [J]. Cryptologia, 1989, 8(1): 29–42.
- [11] LIU X. The research of chaotic spread spectrum communication system and its interference technique [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009. (刘雪松. 混沌扩频通信系统及其干扰技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.)
- [12] CHEN B, ZHOU Z. The correlation of chaotic waveform [M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2011. (陈滨, 周正超. 混沌波形的相关性 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011.)
- [13] FENG J. Chaotic signal and information processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012. (冯久超. 混沌信号与信息处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.)
- [14] TIAN R. Spread spectrum communication [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. (田日才. 扩频通信 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.)