

一种基于三维杜芬系统的混沌参数调制方法^{*}

韩建群 刘允峰

(渤海大学工学院 锦州 121000)

摘要: 杜芬方程是一种重要的动力系统,针对该系统的混沌参数调制解调问题,1)在研究三维杜芬系统基础上,通过对常量参数进行控制建立了一种新的杜芬参数调制系统;2)依据系统混沌状态在2个中心点出现的概率,设计了解调数学表达式,该解调方法具有不需要收发系统同步即可实现数字信息解调的优点;3)给出了新的杜芬系统运行轨迹和解调仿真结果,结果表明该系统在保持混沌状态不变的情况下,仍能有效地实现数字信息的调制和解调。

关键词: 杜芬系统;混沌;参数调制;仿真

中图分类号: TN911.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.401

Method of chaos parameter modulation based on three-dimensional Duffing system

Han Jianqun Liu Yunfeng

(Institute of Technology, Bohai University, Jinzhou 121000, China)

Abstract: Duffing equation is a kind of important power system. Aiming at modulation and demodulation of chaos parameters in this system, firstly, a new modulation system of Duffing parameter is established in this paper by controlling constant parameters based on three-dimensional Duffing system. Secondly, mathematical expressions are designed according to the probability of chaotic state appearing at two centre points. This kind of demodulation method has the advantage of realizing digital information demodulation without synchronization of transmit-receive system. Lastly, demodulation results and the new running track of Duffing system are given in this paper. Simulation results show that this new system can effectively realize modulation and demodulation of digital information under the chaotic state unchanged.

Keywords: Duffing system; chaos; parameter modulation; simulation

1 引言

随着混沌理论及其应用研究的不断发展,混沌现象得到研究人员的广泛关注^[1-11]。其中利用混沌同步进行保密通信就日益成为人们关注的通信技术研究热点^[5-11]。多种混沌同步方式方法不断得到证明和运用,混沌掩盖^[12-13]和混沌参数调制技术^[14-16]就是其中主要的2种方法。混沌掩盖通信都采用在发送端将有用信号加到混沌信号中形成混沌掩盖信号进行发送,在接收端采用混沌同步接收解调出被掩盖的有用信号。混沌参数调制作为混沌在通信应用研究领域中的热点之一,有着广阔的发展空间。它是用传送的模拟或数字信息信号对混沌系统的参数进行调制,通过混沌系统参数的变化改变系统的混沌状态。解调的过程就是在接收端根据接收到的混沌信号实现混沌参数的估计或

检测,从而解调出发送端所传送的信息。

本文基于三维杜芬(Duffing)系统模型,通过采用二进制数字信息影响 Duffing 系统参数,从而控制 Duffing 系统在 XOY 平面两个中心点附近出现的概率实现混沌保密通信,接收端不需要建立混沌同步就能够对二进制信息进行解调,因此该文方法同相关文献^[16]相比具有简化混沌接收器结构的优点。

2 Duffing 系统模型

Duffing 系统可以采用三维动力方程的形式,其方程式如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_1 - kx_2 - x_3 + b + r\cos\omega t \\ \dot{x}_3 = 3x_1^2x_2 \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2015-04

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(51277011)项目

式中: r 和 ω 是外加周期驱动力的幅度、频率, k 为阻尼比, $x_1 - x_1^3$ 为非线性恢复力。其中 x_1^3 是非线性量, b 是调整变量, 如果三维 Duffing 系统状态是非混沌的, 可以通过该参数的调整使系统产生混沌。

当取 $x_1(0) = 0, x_2(0) = 1, x_3(0) = 0, b = 0$ 时, 系统混沌相图如图 1 所示, 其在 $x_1 - x_2, x_2 - x_3$ 和 $x_1 - x_3$ 平面上投影分别如图 2、3、4 所示。由于当 $x_1(0) = 0, x_2(0) = 1, x_3(0) = 0, b = 1.8$ 时, Duffing 系统相图如图 5 所示。当 $b = 0$ 时, 混沌轨迹在 $+1$ 和 -1 处出现的概率是相同或相近的, 观察 Duffing 系统混沌相图 5 可以发现当 $b = 1.8$ 时, 混沌轨迹在 $+1$ 和 -1 处出现的概率不再是相同或相近的, 而是出现在 -1 处的概率大于出现在 $+1$ 处概率, 即通过改变 b 的参数值可以实现 Duffing 系统轨迹在中心点 $+1$ 和 -1 处出现的概率。上述现象可以被用来传送数字信息, 接下来证明通过二进制数字信息调制参数 b 实现混沌保密通信的方法。

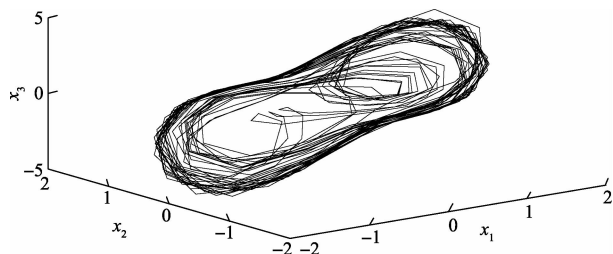


图 1 三维 Duffing 混沌系统相图 ($b = 0$)

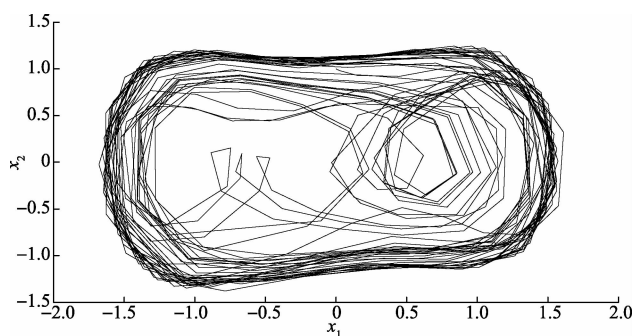


图 2 三维 Duffing 混沌系统在 $x_1 - x_2$ 平面上投影 ($b = 0$)

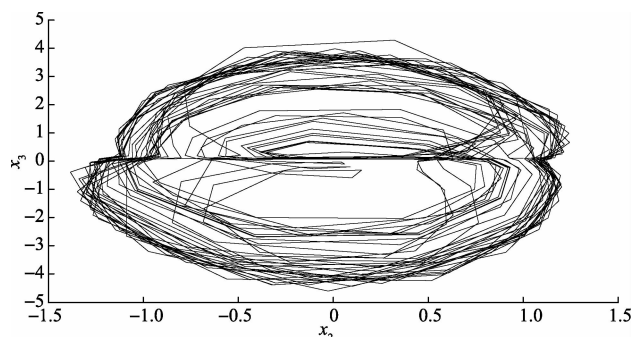


图 3 三维 Duffing 混沌系统在 $x_2 - x_3$ 平面上投影 ($b = 0$)

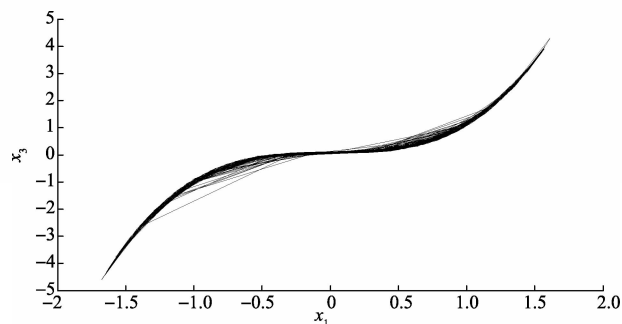


图 4 三维 Duffing 混沌系统在 $x_1 - x_3$ 平面上投影 ($b = 0$)

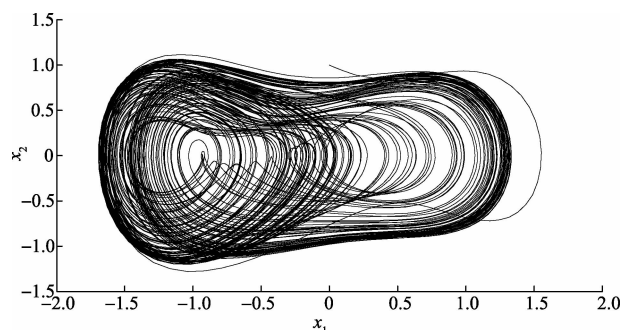


图 5 三维 Duffing 混沌系统在 $x_1 - x_2$ 平面上投影 ($b = 1.8$)

3 基于 Duffing 系统混沌参数调制法

设要发送的有用信号为数字信号 $\{s_k\}$, 其中 $s_k = 0, 1$; $k = 0, 1, 2, \dots$; 对 Duffing 系统中的参数 b 进行如下调制:

$$b(s_k) = \begin{cases} b + \Delta b, & s_k = 1 \\ b - \Delta b, & s_k = 0 \end{cases}$$

式中: Δb 为偏差量, 则发送系统为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_1 - kx_2 - x_3 + b(s_k) + r\cos\omega t \\ \dot{x}_3 = 3x_1^2x_2 \end{cases} \quad (2)$$

在接收端, 当收到来自发送端的信号 x_1 , 可以由 $\dot{x}_1 = x_2$ 确定 x_2 , 计算 $f(-1)$ 和 $f(1)$ 概率。

$$f(-1) = f(\sqrt{(x_1+1)^2 + x_2^2}) > \sqrt{(x_1-1)^2 + x_2^2}$$

$$f(1) = f(\sqrt{(x_1-1)^2 + x_2^2}) > \sqrt{(x_1+1)^2 + x_2^2}$$

再由逻辑判别式(3)确定接收到的信息。

$$\begin{cases} f(-1) > f(1), & \text{发 '0' 时} \\ f(1) > f(-1), & \text{发 '1' 时} \end{cases} \quad (3)$$

本文的解调方法在混沌同步方面是优于传统的混沌参数调制的, 因为本文方法不需要收发混沌系统同步来实现对掩盖信息的解调。

1) 噪声对误码的影响

在通信过程中, 一般考虑零均值的高斯白噪声 $n(t)$ 对误码率的影响, 当混沌信号 x_1 在传输过程中加入高斯白噪声后, 到达接收端就改变为 $x_1 + n(t)$, 接收判别式变为:

$$f(-1) = f(\sqrt{(x_1 + n(t) + 1)^2 + (x_2 + n(t))^2}) >$$

$$\sqrt{(x_1 + n(t) - 1)^2 + (x_2 + \dot{n}(t))^2}$$

$$f(1) = f(\sqrt{(x_1 + n(t) - 1)^2 + (x_2 + \dot{n}(t))^2}) >$$

$$\sqrt{(x_1 + n(t) + 1)^2 + (x_2 + \dot{n}(t))^2}$$

由 $f(-1)$ 和 $f(1)$ 的表达式可以知道 $x_2 + \dot{n}(t)$ 对 $f(-1)$ 和 $f(1)$ 的判断没有影响,所以 $f(-1)$ 的概率判别可以简化为 $|x_1 + n(t) + 1| > |x_1 + n(t) - 1|$ 。同理 $f(1)$ 的概率判别可以简化为 $|x_1 + n(t) - 1| > |x_1 + n(t) + 1|$ 。

由于混沌轨迹在整个相空间内均布,并且当混沌轨迹运行到 $x_1 = 0$ 附近才可能出现误判,所以可以设 x_1 在负零点附近的概率为 $kf(-1)$,在正零点附近的概率为 $kf(1)$,如果噪声产生的误判率为 Δn ,则发‘0’时产生的误判率为 $k(f(-1) - f(1))\Delta n$,同理发‘1’时产生的误判率为 $k(f(1) - f(-1))\Delta n$ 。

2) Duffing 混沌参数调制解调系统仿真

由判别式(3)知道,假设在码元周期 T 内取 N 个点,

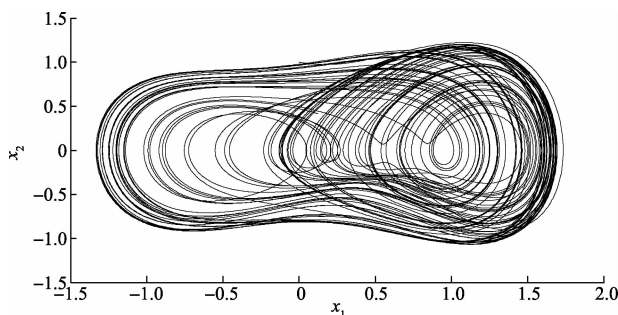


图6 发‘1’时混沌相图

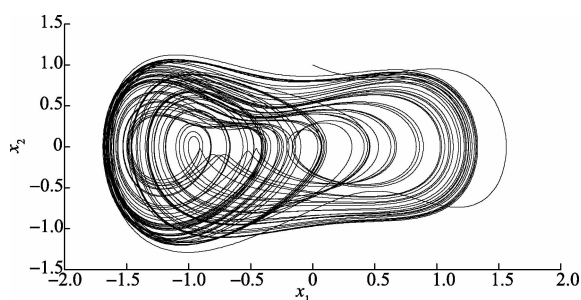


图7 发‘0’时混沌相图

发‘0’时 $f(-1) > f(1)$,则在中心点‘-1’处出现次数为 $Nf(-1)$;在中心点‘1’处出现次数为 $Nf(1)$;同理发‘1’时 $f(1) > f(-1)$,则在中心点‘-1’处出现次数为 $Nf(-1)$;在中心点‘1’处出现次数为 $Nf(1)$ 。图6是发‘1’时混沌相图,图7是发‘0’时混沌相图。

由于信息的解调是通过计算一个信号周期内混沌轨迹在中心点‘-1’和‘1’处出现的频次来实现对‘0’和‘1’信息的解调,并通过判断 $f(-1) > f(1)$,可以解调出信息‘0’,而 $f(-1) > f(1)$ 等效为 $Nf(-1) - Nf(1) > 0$,可以进一步等效为 $\int_0^T q(t)dt > 0$,同理当解调信息‘1’时 $f(-1) < f(1)$,可以等效为 $Nf(1) - Nf(-1) > 0$,并且也可以进一步等效为 $\int_0^T q(t)dt < 0$, $q(t)$ 取值仍如式(4)。

$$q(t) = \begin{cases} 0.02, & \text{中心点‘1’附近} \\ -0.02, & \text{中心点‘-1’附近} \end{cases} \quad (4)$$

在系统方程(1)中,当取 $k = 0.5, \omega = 1, r = 0.72$ 时,系统是混沌的。采用 MATLAB 数学仿真软件中的 SIMULINK 工具箱,根据方程(1)建立信息传送和接收仿真结构如图8所示。图9是信道中不存在噪声时,解调输出的结果,从仿真结果可以看出积分输出与二进制信息是对应的,为减少误判,解调输出抽判点选择在信元结束时刻 $nT, n = 1, 2, 3, \dots$ 。当抽判时刻输出值大于零时,可以判断传送信息‘1’;当抽判时刻输出值小于零时,可以判断传送信息‘0’。图9是无噪声解调输出结果,图10是有噪声解调输出结果,其中噪声采用功率为0.1的白噪声,比较图9和图10可以知道噪声会引起解调输出幅值减小,当噪声功率到达一定值时,会引起误判。由于系统解调信号的输出幅值与调制信号在‘1’和‘-1’两个中心点附近出现的概率成正比,并且白噪声的统计平均值为零,因此当出现误判时,通过降低传码率就可以减少误码,这与传统通信理论是一致的。图11是进行参数调制后的混沌信号,可以看到系统输出信号仍然是混沌的。由于本文方法的优点是解调器不是通过收、发系统同步实现解调的,所以在接收端通过其他现有混沌解调方法是不能解调数字信息的,因此具有一定的保密性。

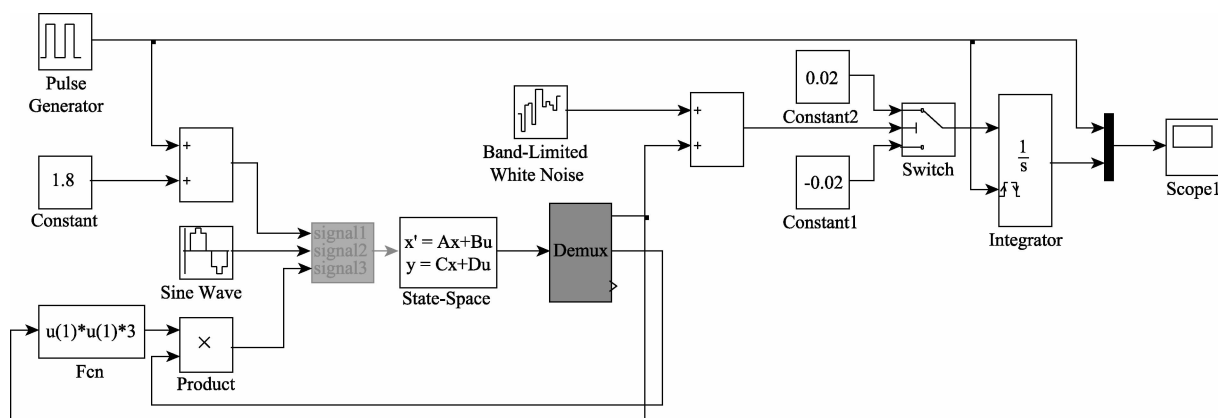


图8 Duffing 系统信息发送和接收仿真结构

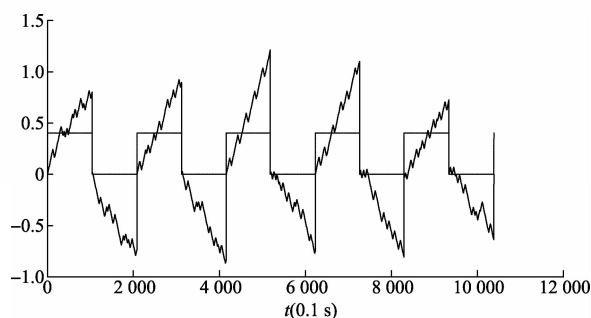


图9 无噪声解调输出

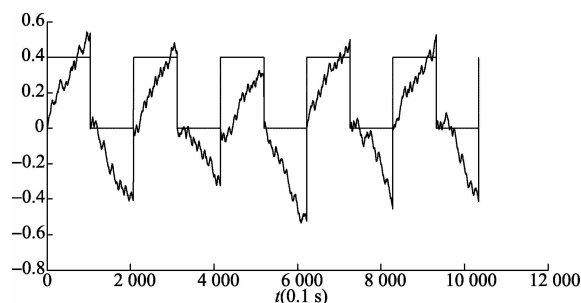


图10 有噪声解调输出

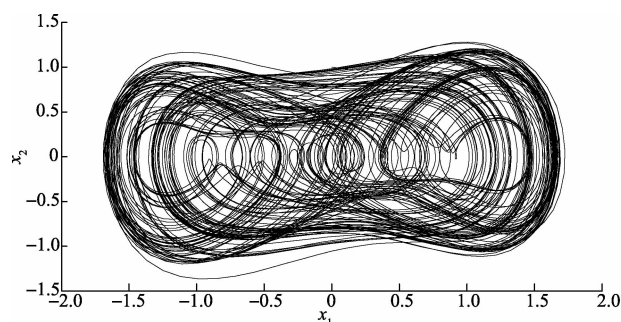


图11 Duffing 系统混沌参数调制相

4 结 论

该文研究了一种新的三维 Duffing 系统参数调制混沌通信方式,并设计了在接收端实现混沌参数调制信号解调出数字信息的方法,实际仿真的结果表明是可以实现混沌参数调制通信的。另外,由于本文方法采用传统的 Duffing 系统进行验证,所以传码率不高,如果采用改进的 Duffing 系统,可以进一步提高传码率。

参 考 文 献

- [1] 谢涛,魏学业,王钰. 基于混沌振子周期区域的微弱信号检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(6): 47-51.
- [2] 江东,张静,杨嘉祥. 磁悬浮振动测试系统的混沌运动[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(10): 2177-2183.
- [3] 徐兰霞,欧青立,崔力. 混沌超宽带通信调制方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(1): 33-35.
- [4] 孙文军,芮国胜,张嵩,等. 基于 TEO 的 Duffing 振子混沌相变瞬时频率判别研究[J]. 电子测量技术, 2012, 35(1): 43-45.

- [5] LU H, VAN LEEUWEN C. Synchronization of chaotic neural networks via output or state coupling[J]. Chaos Solitons & Fractals, 2006, 30(1): 166-176.
- [6] YUZHU X, WEI X. Complete synchronization between two bi-directionally coupled chaotic systems via an adaptive feedback controller[J]. Chinese Physics, 2007, 16(6): 1597-1602.
- [7] CHADLI M, ZELINKA I. Chaos synchronization of unknown inputs Takagi - Sugeno fuzzy: Application to secure communications[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2014, 68(12): 2142-2147.
- [8] KUETCHE MBE E S, FOTSIN H B, KENGNE J, et al. Parameters estimation based adaptive Generalized Projective Synchronization (GPS) of chaotic Chua's circuit with application to chaos communication by parametric modulation[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2014(61): 27-37.
- [9] FALLAHI K, LEUNG H. A chaos secure communication scheme based on multiplication modulation[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2010, 15(2): 368-383.
- [10] EISENCRAFT M, FANGANIELLO R D, GRZYBOWSKI J M V, et al. Chaos-based communication systems in non-ideal channels[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2012, 17(12): 4707-4718.
- [11] DWIVEDI A, MITTAL A K, DWIVEDI S. Adaptive synchronisation of diffusionless Lorenz systems and secure communication of digital signals by parameter modulation[J]. Communications, IET, 2012, 6(13): 2016-2026.
- [12] 刘玉民, 张雨虹, 杨金泉. 基于混沌掩盖改进方案的保密通信系统的电路实现[J]. 电路与系统学报, 2009, 14(1): 116-118.
- [13] 赵柏山, 朱义胜. 一种改进的混沌掩盖技术[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(3): 699-701.
- [14] 赵柏山, 朱义胜. 混沌频率调制系统设计[J]. 通信技术, 2009, 42(11): 84-86.
- [15] BOWONG S, MOUKAM KAKMENI F M, SIEWE M S. Secure communication via parameter modulation in a class of chaotic systems[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2007, 12(3): 397-410.
- [16] 曹鹤飞, 张若洵. 基于单驱动变量分数阶混沌同步的参数调制数字通信及硬件实现[J]. 物理学报, 2012, 61(2): 020508-1-020508-8.

作 者 简 介

韩建群, 1968 年出生, 工学博士。主要研究方向为混沌控制与通信。
E-mail: hanjianqun@126.com