

一种基于 Duffing 系统实现混沌掩盖通信的方法

韩建群 伦淑娴

(渤海大学工学院 锦州 121000)

摘要 Duffing 方程是一种重要的动力系统。研究了该系统的数学模型,通过变量分解的方法改变了系统的结构,并证明了运用新结构的 Duffing 系统实现混沌掩盖的合理性,最后给出了新 Duffing 系统的运行轨迹和混沌掩盖通信的解调结果。仿真结果表明,所提出的方法是正确有效的。

关键词 Duffing 系统,混沌,掩盖通信,仿真

中图分类号 TN911. T **文献标识码** A

Method of Realizing Chaotic Masking Communication Based on Duffing System

HAN Jian-qun LUN Shu-xian

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

Abstract Duffing equation is a kind of important power system. The mathematic model of this system was studied in this paper. Structure of this system was changed with the variable decomposition method, and it was also proved that applying Duffing system with new structure to realize chaotic masking is rational. At the end of this paper, the running tracks of new Duffing system and the demodulation results of chaotic masking were given. Simulation results show that the method proposed here is correct and effective.

Keywords Duffing system, Chaos, Masking communication, Simulation

1 引言

通信保密一直是通信技术发展的一个十分重要的目标,因此,长期以来,人们一直在寻求保密通信的方法。20 世纪 90 年代初,美国海军实验的 Pecora 和 Carroll 首次用电子线路实现了两个混沌系统的同步^[1],这一重要研究结果标志着混沌研究向应用研究发展,引发了研究混沌信号在数字信息传输、混沌掩盖保密通信、混沌扩频通信、混沌调频通信以及参数调制多路通信中的应用热潮。目前,人们对多种混沌通信技术进行了研究,包括:Kocarev 等人进行的混沌掩盖通信的研究实验^[2],Dedieu 等人对混沌键控通信进行的研究^[3],Kolumban 等人提出的 FM-DCSK 通信技术^[4,5],其中混沌掩盖通信属于混沌模拟通信,而其余则属于混沌数字通信。随着混沌通信理论的日益发展成熟,混沌通信技术已经开始向实际应用转变。

由于混沌掩盖通信都是基于 Lorenz 系统^[6]、Rossler 系统^[7]、蔡氏混沌系统^[8]以及超混沌系统^[9],本文探索通过对 Duffing 混沌系统结构进行改变,提出 Duffing 系统混沌掩盖通信数学模型,并给出了合理性证明和仿真结果。

2 Duffing 系统模型

对 Duffing 方程的研究都是采用二阶微分方程的形式或状态方程的形式^[10-12],本文通过对 Duffing 方程非线性恢复

力进行变量分解定义,建立了三阶 Duffing 状态方程,该方程有助于将 Duffing 方程中非线性变量信息分解出来。

Duffing 系统^[13-15]是在外部周期驱动力作用下产生混沌,其动力方程式如下:

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

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,式(1)是二维的状态方程,本文的目标是将其改变为三维的状态方程,这样就可以从方程中得到更多更直观的信息。

这里令 $\dot{x}_3 = 3x_1^2 x_2 - x_2$,如果对其两侧做积分可以得到式(2):

$$\int \dot{x}_3 dt = \int (3x_1^2 x_2 - x_2) dt \quad (2)$$

积分结果为式(3):

$$x_3 = x_1^3 - x_1 + c \quad (3)$$

式中, c 为待定常量, c 的值可以由系统初始状态值确定。但是如果要得到与式(1)相同的三维的 Duffing 混沌动力系统,就要求 $c=0$ 或者是一个较小的量,否则系统可能是非混沌的。由于 c 的值可以由系统初始状态值确定,根据式(3)可以知道,如果 Duffing 混沌动力系统初始状态 $x_1=0$ 和 $x_3=0$,那么 $c=0$ 。通过上述变量的定义,式(1)可以修改为方程(4):

到稿日期:2012-07-31 返修日期:2012-11-06 本文受国家自然科学基金项目(51277011),辽宁省教育厅科学技术研究项目(L2010005)资助。

韩建群(1968-),男,博士,副教授,主要研究方向为混沌通信与控制,E-mail:hanjianqun@126.com;伦淑娴(1971-),女,博士,教授,主要研究方向为自动控制。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -kx_2 - x_3 + r \cos \omega t \\ \dot{x}_3 = 3x_1^2 x_2 - x_2 \end{cases} \quad (4)$$

3 基本的混沌掩盖同步通信系统

混沌掩盖通信的基本原理是利用具有逼近于高斯白噪声统计特性的混沌信号 $y(t)$ 对有用的信息 $m(t)$ 进行混沌掩盖, 形成混沌掩盖信号 $s(t)$, 在接收端则利用同步后的混沌信号进行去掩盖, 从而恢复出有用的信息 $\hat{m}(t)$ 。本文以相加的混沌掩盖式(5)为研究对象:

$$s(t) = m(t) + y(t) \quad (5)$$

在接收端, 用同步后的混沌信号进行与之相应的逆运算, 则可恢复出有用的信息 $m(t)$ 。这种通信方式的基本思路如图 1 所示。

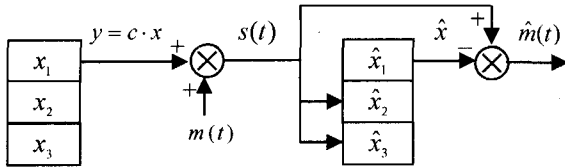


图 1 混沌掩盖通信系统示意图

这种通信方案主要应用了驱动—响应耦合混沌系统渐近同步的设计思想。混沌信号具有类随机的优良特性, 而且可由确定性系统产生, 信号的实现比较容易。将有限带宽的信息 $m(t)$ 隐藏在频带极宽的混沌信号中(例如两者之比为 1:100), 第三方即使截得信号 $y(t) + m(t)$, 在通信双方的混沌信号的形式或发生器参数保密的情况下, 第三方仍无法有效地恢复出 $m(t)$, 从而实现了信息隐藏。而在发射、接收系统的参数匹配的前提下, 通过同步设计使 $\hat{x}(t) \rightarrow x(t)$, 即可在接收系统中恢复信息 $\hat{m}(t)$ 。

驱动—响应耦合混沌系统渐近同步的条件是响应系统所有 Lyapunov 指数的值为负, 则响应系统的轨道是渐近稳定的。即同步是稳定的, 响应系统对初值已不具有敏感性, 它最终被驱动信号驱赶到与驱动系统中响应子系统相同的轨道上。Duffing 混沌动力响应系统虽然所有 Lyapunov 指数的值不全为负, 但是也可以通过在接收端加带通滤波器的方法来实现掩盖通信解调, 证明过程如下:

以 x_3 作为驱动变量。驱动和响应关系为:

$$\text{响应部分} \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -kx_2 - x_3 + r \cos \omega t \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{驱动部分} \quad \dot{x}_3 = 3x_1^2 x_2 - x_2 \quad (7)$$

复制的响应系统为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 \\ \dot{\hat{x}}_2 = -k \hat{x}_2 - s(t) + r \cos \omega t \end{cases} \quad (8)$$

以 $s(t) = m(t) + x_3$ 为混沌掩盖驱动信号驱动响应系统, 令 $e_{x_1} = x_1 - \hat{x}_1, e_{x_2} = x_2 - \hat{x}_2$, 以 x_3 作为驱动变量, 可得到关于 e_{x_1}, e_{x_2} 的差变量方程:

$$\begin{cases} \dot{e}_{x_1} = e_{x_2} \\ \dot{e}_{x_2} = -ke_{x_2} - m(t) \end{cases} \quad (9)$$

与式(9)相对应的微分方程为:

$$\ddot{e}_{x_1} + ke_{x_1} = -m(t) \quad (10)$$

式(10)所表示的微分方程的通解为:

$$e_{x_{1n}} = A_1 + A_2 e^{-kt} \quad (11)$$

式中, A_1 和 A_2 为根据初始状态条件确定的待定系数。

这里设 $m(t) = B \cos \omega t$, 式(10)所表示的微分方程的特解为:

$$e_{x_{1p}} = D_1 \cos \omega t + D_2 \sin \omega t \quad (12)$$

式中, $D_1 = \frac{-B}{k^2 + \omega^2}, D_2 = \frac{kB}{k^2 \omega + \omega^3}$ 。式(10)的微分方程的全解为:

$$e_{x_1} = A_1 + A_2 e^{-kt} + D_1 \cos \omega t + D_2 \sin \omega t \quad (13)$$

令 $C = A_1 + A_2 e^{-kt}, D = \sqrt{D_1^2 + D_2^2}, \phi = -\arctg \frac{D_2}{D_1}$, 则

$$e_{x_1} = C + D \cos(\omega t + \phi) \quad (14)$$

式(5)所表示的混沌掩盖通信的解调信号为 $s(t) - \hat{x}_3$ 。

$$\begin{aligned} s(t) - \hat{x}_3 &= x_3 + B \cos \omega t - \hat{x}_3 \\ &= x_3^3 - x_1 + B \cos \omega t - (x_1 + e_{x_1})^3 + (x_1 + e_{x_1}) \\ &= e_{x_1} [e_{x_1}^2 + 3x_1(x_1 + e_{x_1})] + B \cos \omega t + e_{x_1} \\ &= C + C^3 + \frac{3}{2} CD^2 + 3Cx_1^2 + 3C^2 x_1 + \frac{3}{2} x_1 D^2 + \\ &\quad (D + 3C^2 D + \frac{3}{4} D^3) \cos(\omega t + \phi) + (3x_1^2 D + \\ &\quad 6x_1 CD) \cos(\omega t + \phi) + \frac{3}{2} CD^2 \cos(2\omega t + 2\phi) + \\ &\quad \frac{3}{2} x_1 D^2 \cos(2\omega t + 2\phi) + \frac{1}{4} D^3 \cos(3\omega t + 3\phi) + \\ &\quad B \cos \omega t \end{aligned} \quad (15)$$

式(15)的运算结果分为 7 个部分。第 1 部分为 $C + C^3 + \frac{3}{2} CD^2 + 3Cx_1^2 + 3C^2 x_1 + \frac{3}{2} x_1 D^2$, 可以将其看作是包含了直流分量的随机过程; 第 2 部分 $(D + 3C^2 D + \frac{3}{4} D^3) \cos(\omega t + \phi)$ 是一个与所传送正弦波同频不同相的分量; 第 3 部分 $(3x_1^2 D + 6x_1 CD) \cos(\omega t + \phi)$ 是窄带随机过程; 第 4 部分 $\frac{3}{2} CD^2 \cos(2\omega t + 2\phi)$ 是一个传送正弦波 2 倍频不同相的分量; 第 5 部分 $\frac{3}{2} x_1 D^2 \cos(2\omega t + 2\phi)$ 是窄带随机过程; 第 6 部分 $\frac{1}{4} D^3 \cos(3\omega t + 3\phi)$ 是一个传送正弦波 3 倍频不同相的分量; 第 7 部分为 $B \cos \omega t$ 是与所传送正弦波相同的分量。由于当所传送正弦波角频率 ω 较大时, 第 3—6 部分近似为零, 从而系统解调输出包含直流量、随机量和所传送的正弦量。如果将输出量通过带通滤波器, 则可以得到相应的传送信号。

4 系统仿真

由文献[6]可以知道, 在 Duffing 动力系统中存在混沌带, 取 $k=0.5, \omega=1$, 则 $k_d=0.84$; 当 $k=k_d$ 时, 系统不是混沌的, 系统处于临界状态。在 $k < k_d$ 的条件下, 系统进入混沌状态, 本文取参数 $r=0.72$, 系统初始状态 $x_1=0, x_2=1, x_3=0$, 二维 Duffing 系统在正弦信号驱动下产生图 2 所示的混沌相图, 三维 Duffing 系统混沌相图如图 3 所示, 其在 x_1-x_2 即 xoy 平面、 x_2-x_3 即 yoz 平面、 x_1-x_3 即 xoz 平面上的投影如图 4—图 6 所示。

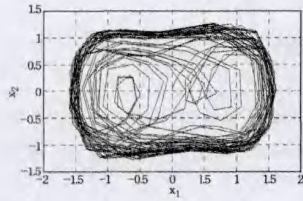


图2 二维 Duffing 混沌系统相图

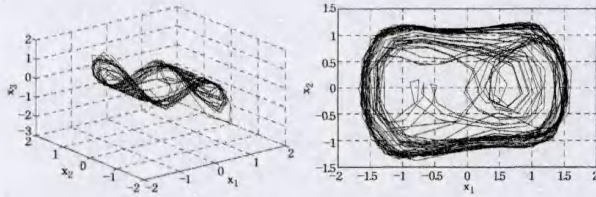


图3 三维 Duffing 混沌系统相图

图4 三维 Duffing 混沌系统在 x_1-x_2 平面上投影

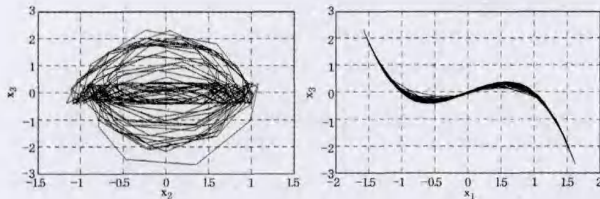


图5 三维 Duffing 混沌系统在 x_2-x_3 平面上投影

图6 三维 Duffing 混沌系统在 x_1-x_3 平面上投影

从图2和图4仿真结果可以看出,二维和三维混沌系统是一致的。图5和图6只是在三维 Duffing 混沌系统中才会出现的结果。本文所提出的 Duffing 混沌系统仿真方法要求系统初始状态 $x_1=0$ 和 $x_3=0$, 否则系统状态可能是非混沌的。图7是初始状态 $x_1=0, x_2=1, x_3=2$ 时的系统状态相图,可以看出系统不是混沌的。

在混沌掩盖通信中,设被传送的正弦信号为 $0.0001 \sin 80\pi t$, 混沌掩盖信号的方差约为 0.5, 根据式(6)一式(8)建立驱动响应系统。图8是 Duffing 混沌掩盖信号图,图9是 Duffing 混沌掩盖解调信号图,其中 data1 是被传送的正弦信号, data2 是解调的信号。为了清楚地给出仿真比较结果,对传送的正弦信号进行了 0.003V 的直流偏置,从图9的仿真结果图可以看到其存在幅度失真现象;图10是带通滤波后的 Duffing 混沌掩盖解调信号,其中 data1 是被传送的正弦信号, data2 是解调的信号,比较 data1 和 data2 可以看出,带通滤波器可以很好地消除幅度失真,带通滤波器的通频带是 3~300Hz。图9、图10的仿真结果同本文第3节的分析是一致的,从而说明该证明是正确的。

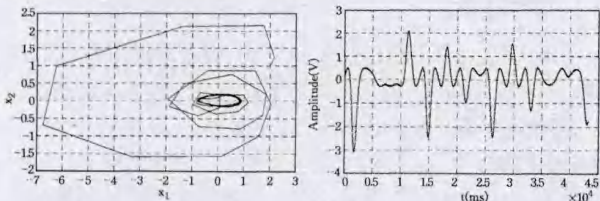


图7 三维 Duffing 混沌系统在 x_1-x_2 平面上投影 ($x_1=0, x_2=1, x_3=2$)

图8 Duffing 混沌掩盖信号

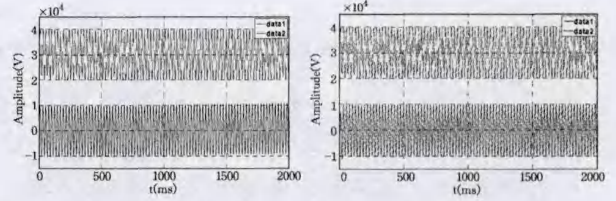


图9 Duffing 混沌掩盖解调信号 图10 带通滤波后的 Duffing 混沌掩盖解调信号

结束语 本文证明了二维 Duffing 系统转变为三维系统的方法,给出了 Duffing 系统的在三维状态方程下的运行结果,该三维 Duffing 系统与二维系统是等效的,但是其能够展现更多的信息。在新的三维 Duffing 系统基础上,运用混沌掩盖的通信方法实现了正弦掩盖信号的解调。本文所提出的 Duffing 系统值得在微弱信号检测和保密通信研究中进行深入探讨。

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] Kocarev L, Parlitz U. General Approach for Chaotic Synchronization with Application to Communication [J]. Physical Review Letters 1995, 74(25): 5028-5031
- [3] Dedieu H, Kennedy M P, Hasler M. Chaos shift keying: modulation and demodulation of a chaotic carrier using self-synchronizing Chua's circuits [J]. IEEE Transactions Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, 1993, 40(10): 634-642
- [4] Kolumban G, Kis G, Jako Z, et al. FM-DCSK: A robust modulation scheme for chaotic communications [J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 1998, E81-A(9): 1798-1802
- [5] Kolumban G, Kennedy M P, Kis G, et al. FM-DCSK: A novel method for chaotic communications [C] // Proceedings of The IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 1998, 4: 477-480
- [6] 梅蓉, 吴庆宪, 陈谋, 等. 时滞 Lorenz 混沌系统的同步电路实现及在保密通信中的应用 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(5): 830-840
- [7] 张文波, 吴晓平. 基于 Rossler 超混沌系统模糊同步的保密通信方案 [J]. 计算机与数字工程, 2011, 4(39): 90-93
- [8] 许碧荣. 蔡氏混沌系统网络的混沌同步及其保密通信 [J]. 信息与控制, 2010, 39(1): 54-58
- [9] 张小红, 王伟. 异维异构混沌系统同步及其在保密通信中的应用 [J]. 计算机科学, 2012, 39(4): 220-222
- [10] 李月, 杨宝俊. 混沌振子检测引论 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 55-56
- [11] Wang Guan-yu, He Sai-ling. A quantitative study on detection and estimation of weak signals by using chaotic Duffing oscillators [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2003, 50(7): 945-953
- [12] 聂春燕, 石要武. 基于互相关检测和混沌理论的弱信号检测方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(1): 32-35
- [13] Hu Jin, Wang Ke-ren. Carrier detection method of binary phase-shift-keyed and direct-sequence-spread spectrum signals based on Duffing oscillator [C] // 6th International Conference on ITS Telecommunications Proceedings, 2006: 1338-1341
- [14] Wang Yong-sheng, Ma Xiang-ling, Wei Yu, et al. A new method of weak signal detection using chaos phase change [C] // 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, 2007: 812-816
- [15] 赵文礼, 黄振强, 赵景晓. 基于 Duffing 振子的微弱信号检测方法及其电路的实现 [J]. 电路与系统学报, 2011, 16(6): 120-124