

一种新的混沌调制和线性解调方法

卢元元¹, 胡庆彬¹, 丘水生²

(1. 深圳大学信息工程学院, 广东深圳 518060; 2. 华南理工大学电子与信息学院, 广东广州 510640)

摘 要: 提出一种新的用于保密通信的混沌调制和线性解调方法. 发送端和接收端各有一个相同的混沌电路, 将有用信号接入发送端混沌电路的线性子电路, 使其对该混沌电路进行调制. 调制后的混沌信号传送到接收端的混沌电路, 检测该电路中某一电流或电压变量, 经线性滤波器解调可恢复原始有用信号. 基于这一调制、解调方法的混沌通信系统保密性强且电路简单. 对两个混沌保密通信系统的仿真实验取得了满意的结果.

关键词: 混沌调制; 线性解调; 保密通信

中图分类号: TN918 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 10-1508-03

A New Approach to Chaotic Modulation and Linear Demodulation

LU Yuan yuan¹, HU Qing bin¹, QIU Shui-sheng²

(1. College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

2. College of Electronic and Information, South China Univ. of Tech., Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract: A new approach of chaotic modulation and linear demodulation for secure communication is proposed. The transmitter and the receiver have the same chaotic circuit respectively. An information signal is introduced into the linear subcircuit of the chaotic circuit in the transmitter to modulate the chaotic circuit. One of the chaotic signals modulated is transmitted to the chaotic circuit of the receiver. A certain current or voltage variable in the chaotic circuit of the receiver is detected and demodulated by a linear filter and the information signal can be recovered. The chaotic communication system based on the new modulating and demodulating approach is highly secure and simple in circuit. The simulation results of two secure communication systems designed by this approach are quite satisfactory.

Key words: chaotic modulation; linear demodulation; secure communication

1 引言

近年来, 混沌保密通信越来越受到人们的重视, 发表了许多研究文章. 混沌调制技术用于模拟通信方面大致可分为信息掩埋技术^[1,2]和参数调制技术^[3,4]. 信息掩埋技术将有用信号与混沌信号叠加后发送, 在接收端再将该信号减去同步的混沌信号, 恢复原始有用信号. 这种保密通信较易通过滤波或状态重构等方法破密, 而且需同时传送同步信号和叠加后混沌信号, 占用较多信道资源. 参数调制技术是在发射端用有用信号对混沌系统的某个参数进行调制, 使有用信号有机地融合于混沌信号中. 它只需发送一个调制后的混沌信号, 该信号既控制同步又传递有用信息. 在接收端, 利用同步的混沌信号和非线性滤波器, 可解调出有用信号. 该方法占用较少信道资源且保密性更强, 但被调制参数不能是线性子系统内的参数, 否则无法实现两个混沌系统的同步. 该方法需非线性解调器, 电路较为复杂.

本文提出一种新的混沌调制方法. 将混沌电路分为线性子电路和非线性子电路, 有用信号接入发送端混沌电路的线

性子电路中, 对混沌电路进行调制. 将调制后的一个混沌信号发送到接收端. 在接收端混沌电路中检测某一电流或电压变量并通过线性滤波可恢复原始有用信号. 与参数调制一样, 该方法有很强的保密性且只需传送一个混沌信号. 此外, 该方法调制、解调电路的设计和实现都非常简单. 本文对柯匹兹振荡器和蔡氏混沌电路保密通信系统用 PSPICE 软件进行仿真实验, 取得了满意的结果.

2 一种新的混沌调制和线性解调方法

2.1 混沌调制

如图 1 所示, 设混沌电路 S 可分为一个线性子电路 S_L 和非线性子电路 S_N . S_N 的端电流或电压 $x_a = f(v_c)$, 其中 $f: R^+ \rightarrow R$ 是一非线性代数或微分函数, v_c 是 S_L 内部或端口电压.

将原始有用信号 $e(t)$ 作为电压源(电流源)与 S_L 中某一支路串联(并联), 只要 $e(t)$ 幅值不是太大, 电路仍可维持在混沌状态. 混沌吸引子的形状将随着 $e(t)$ 的变化而变化, 混沌电路中所有变量都受到 $e(t)$ 的调制, $e(t)$ 有机地融合于混沌信号之中.

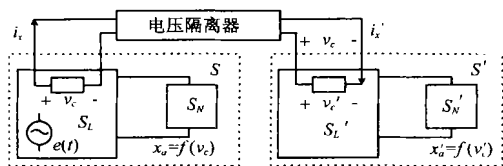


图 1 混沌保密通信系统示意图

2.2 线性解调

接收端有一个与发送端相同的混沌电路 S' ，将发送端调制后的混沌变量 v_c 通过电压隔离器传送到接收端，通信系统如图 1 所示。

定理 1 图 1 中，将 S_N 用一电流源或电压源（视其端口变量 x_a 是电流还是电压而定）置换，将电压隔离器用两个电压源置换并分别与 S 和 S' 相连。置换后的 S 成一线性电路。若该线性电路的所有特征根均有负实部，则图 1 通信系统中，测量接收端的 i'_x ，经线性滤波后，可恢复原始有用信号 $e(t)$ 。

证明 图 1 中，设发送端 v_c 已知，则 x_a, v'_c, x'_a 已知， S 和 S' 中的非线性子电路可用源值为 x_a 及 x'_a 的电流源或电压源（视 x_a 是电流还是电压而定）置换，电压隔离器等可等效为源值为 v_c 的两个电压源分别与 S 及 S' 相联接。系统 S, S' 等效为两个线性电路，其中 S 中含电源 v_c, x_a 和 $e(t)$ ， S' 中含电源 v_c 和 x'_a 。因为两个等效线性电路所有特征根均有负实部，故经短暂的过渡过程时间后，由初始状态引起的零输入响应衰减到零，只剩下零状态响应。发送端的零状态响应为

$$i_x = h_1(t) \odot e(t) + h_2(t) \odot x_a(t) + h_3(t) \odot v_c(t) = 0 \quad (1)$$

式中 $i_x = 0$ 是由电压隔离器的输入特性决定的。式 (1) 中 $h_i(t) (i = 1, 2, 3)$ 分别为以 i_x 为输出，以 $e(t), x_a, v_c$ 为输入时 S 等效线性电路的单位脉冲响应函数。接收端的零状态响应为

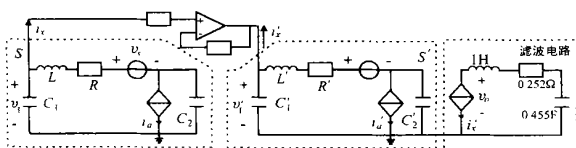


图 2 柯匹兹振荡器保密通信系统

由式 (5) 很容易得出图 2 中的滤波电路。

图 3 是该通信系统的 PSPICE 仿真结果。其中 (a)、(b) 分别是调制前后 v_1 波形及其低频段频谱，(c) 是原始有用信号

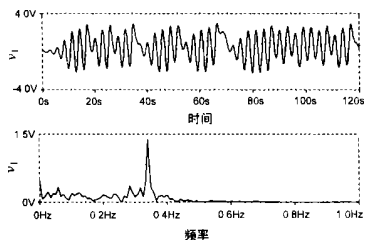
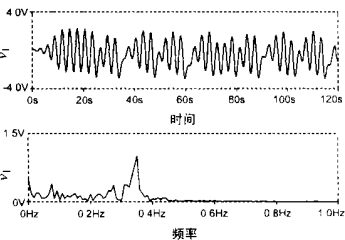
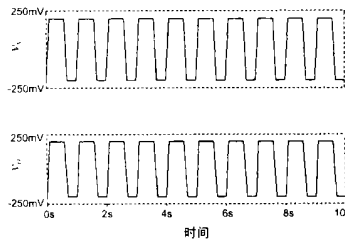
(a) 调制前 v_1 波形及其频谱(b) 调制后 v_1 波形及其频谱(c) 原始信号 v_1 及解调信号 v_1 波形

图 3 柯匹兹振荡器保密通信系统仿真结果

$$i'_x = h'_2(t) \odot x'_a(t) + h'_3(t) \odot v_c(t) \quad (2)$$

由于 $e(t)$ 为零时， S 与 S' 相同，故有 $h'_2(t) = h_2(t), h'_3(t) = h_3(t)$ ；又由于 $x'_a = x_a$ （因为 $v'_c = v_c$ ），比较式 (1)、(2)，有

$$i'_x = -h_1(t) \odot e(t) \quad (3)$$

式 (3) 两边取拉氏变换，可求得

$$E(s) = -1/H_1(s) I'_x(s) = \Phi(s) I'_x(s) \quad (4)$$

式 (4) 中， $\Phi(s) = -1/H_1(s)$ 是一线性系统传函。可见，在接收端将检测信号 i'_x 送入一线性滤波器，可得到原始有用信号 $e(t)$ 。

式 (4) 表明，只要求出混沌电路 S 等效线性电路的以 $e(t)$ 为输入、 i_x 为输出的传函 $H_1(s)$ ，即可得到接收端线性滤波器的传函 $\Phi(s)$ 。应用线性电路理论， $\Phi(s)$ 的求取和实现是容易的。

如果混沌电路非线性子电路 S_N 的控制变量不是电压 v_c 而是 S_L 端口或内部某一电流 i_c ，也可采用类似的混沌调制和线性解调方法。将调制后的 i_c 传送到接收端并通过一受控电流源使 $i'_c = i_c$ ，在接收端检测该受控电流源的电压并通过线性滤波可解调出原始有用信号 $e(t)$ 。限于篇幅，不赘述。

3 混沌保密通信系统的数字仿真

3.1 柯匹兹振荡器混沌保密通信系统

柯匹兹振荡器^[5]可用图 2 中 S 电路实现，其中 $C_1 = 0.417\text{F}, C_2 = 0.455\text{F}, L = 1\text{H}, R = 0.252\Omega, i_a = f(v_1) = v_1 - 0.2v_1^3$ ， v_s 是串入的有用信号电压源。图 2 为柯匹兹振荡器混沌保密通信系统原理图。 S 中非线性受控源的控制量 v_1 被传送到接收端 S' ，检测 S' 中的 i'_x ，经线性滤波电路可解调出有用信号 v_o 。滤波器的传函由 S 电路不难求得

$$\Phi(s) = -1/H_1(s) = -(sL + R + 1/sC_2) \quad (5)$$

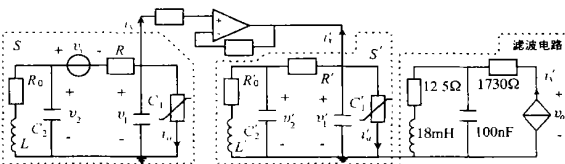


图 4 蔡氏混沌电路保密通信系统

v_s 和解调得到的输出 v_o 。由图可见，输入信号 v_s 改变了发送端混沌变量的波形及其频谱。接收端经线性解调得到的输出变量 v_o 很好地复现了 v_s 。

3.2 蔡氏混沌电路保密通信系统

蔡氏混沌电路^[6]保密通信系统如图4所示,其中 $C_1=10\text{nF}$ 、 $C_2=100\text{nF}$ 、 $R=1.73\text{k}\Omega$ 、 $R_0=12.5\Omega$ 、 $L=18\text{mH}$ 、 $i_d=f(v_1)=-0.409v_1-0.1743(|v_1+1|-|v_1-1|)$.由发送端混沌电路 S 可求得

$$\Phi(s)=-1/H_1(s)=R+(sL+R_0)(1/sC_2)/(sL+R_0+1/sC_2) \quad (6)$$

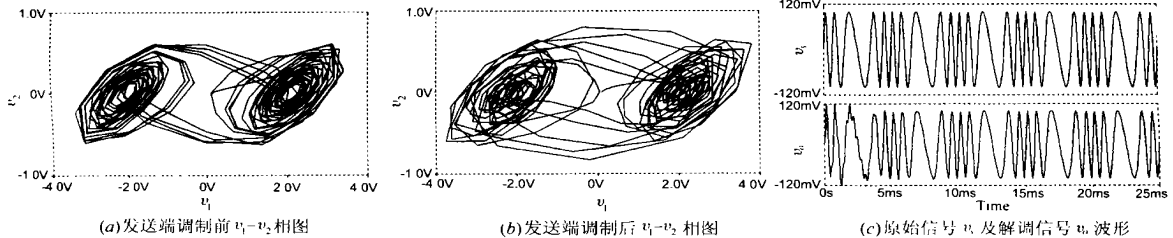


图5 蔡氏混沌电路保密通信系统仿真结果

4 结束语

本文提出了一种新的用于保密通信的混沌调制和线性解调方法.该方法与传统的参数调制技术不同,它无需调制电路某一参数,而是直接将有用信号接入混沌电路中,使其对混沌变量产生影响.与混沌掩埋通信相比,该方法保密性强、占用信道少;与参数调制方法相比,它不需非线性解调器,调制及解调电路的设计和实现都非常简单.本文对柯匹兹振荡器和蔡氏混沌电路保密通信系统的仿真实验取得了满意的结果.

参考文献:

- [1] 尹元昭.混沌同步和混沌保密通信的实验研究[J].电子科学学刊,1998,20(1):93-97.
- [2] 张玉慧.混沌保密通信的研究[J].北方交通大学学报,1999,23(2):35-39.
- [3] N J Corron, D W Habs. A new approach to communications using chaotic signals [J]. IEEE Trans. on CAS I, 1997, 44(5):373-382.
- [4] 蔡新国,丘水生.基于斜率调制的混沌通信系统[J].电子科学学刊,1999,21(3):416-419.
- [5] 钟晓旭.三阶混沌系统的仿真与分析[D].广州:华南理工大学,1998.

由式(6)容易得出图4中滤波电路.

图5是该通信系统的PSPICE仿真结果.其中(a)、(b)分别是调制前后发送端混沌吸引子在 v_1-v_2 平面的投影,(c)是原始有用信号 v_s 和解调得到的输出 v_o .由图可见, v_s 改变了发送端混沌吸引子的形状.经短暂的过渡过程时间后, v_o 能很好地复现 v_s .

- [6] Michael Peter Kennedy. Three Steps to Chaos Part II: A Chua's Circuit Primer [J]. IEEE Trans on CAS I, 1993, 40(10):657-674.

作者简介:



卢元元 女,1955年9月生于湖南衡阳市,工学硕士,深圳大学信息工程学院副教授,主要研究方向为混沌及保密通信、线性及非线性系统理论、模拟电路故障诊断.



胡庆彬 男,1955年6月生于广东中山市,工学博士,深圳大学信息工程学院教授,主要研究方向为计算机理论及其应用、系统仿真、功率电子学.