

# 基于相空间对称 Lorenz 阵子群的混沌保密通信研究

刘林芳, 芮国胜, 张洋, 吴前龙

(海军航空大学信号与信息处理山东省重点实验室, 山东 烟台 264001)

**摘 要:** 针对大规模并发式保密通信对混沌阵子的需求, 以 Lorenz 混沌阵子为例, 提出了相空间对称混沌阵子群模型, 研究了该对称阵子群的同步问题, 得到了 Lorenz 阵子与对称阵子群同步的条件, 利用该条件构建了基于对称混沌阵子群的通信模型并对其进行仿真验证。该对称阵子群能提供无限多个对称混沌阵子, 可满足其在大规模保密通信中的应用, 又能保持原混沌阵子的优良特性, 具有较好的应用前景。

**关键词:** Lorenz 阵子; 保密通信; 混沌同步; 相空间对称

**中图分类号:** TN918

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2019117

## Research on the chaotic secure communication of the phase-space symmetric Lorenz oscillator group

LIU Linfang, RUI Guosheng, ZHANG Yang, WU Qianlong

Signal and Information Processing Provincial Key Laboratory in Shandong, Naval Aviation University, Yantai 264001, China

**Abstract:** To meet the demand of chaotic oscillators for large scale secure communications, the Lorenz oscillator was taken as an example, a phase-space symmetric chaotic oscillator group model was proposed and the synchronization problem was studied. According to the condition of synchronization, a communication model based on symmetric chaotic oscillator was constructed and verified by simulation. The symmetrical oscillator group can provide an infinite number of symmetric chaotic oscillators, which can satisfy the application in large-scale secure communication and maintain the excellent characteristics of the original chaotic oscillator, and has a good application prospect.

**Key words:** Lorenz oscillator, secure communication, chaos synchronization, phase-space symmetry

### 1 引言

混沌运动是自然界中存在的一类复杂的非线性运动, 具有初值敏感性、有界性、类随机性、连续宽带频谱等特征<sup>[1-4]</sup>, 因此在保密通信、信号检测、自动控制等诸多领域获得了广泛的应用<sup>[5-8]</sup>。早在 1990 年, 数学家 Pecora 等<sup>[9]</sup>就提出了基于混沌理论的加密方法。混沌同步的理论和方法出现后, 混沌保密通信便成为保密通信领域研究的热点, 其研究主要集中于混沌同步控制、混沌加密算法等方面。

目前, 国内外已提出的混沌同步控制方法有线

性反馈法<sup>[10]</sup>、自适应控制法<sup>[11]</sup>、主动控制法<sup>[12]</sup>、非线性控制法<sup>[13-14]</sup>、滑模控制法<sup>[15]</sup>等。文献[16]研究了混沌系统与超混沌系统的脉冲同步, 文献[17]实现了超混沌系统的完全同步及时延同步, 文献[18]实现了不确定分数阶混沌系统的自适应神经网络同步控制。混沌保密通信主要有混沌掩盖通信<sup>[19]</sup>、混沌键控通信<sup>[20]</sup>、混沌调制通信<sup>[21]</sup>等。混沌掩盖通信的原理是在发送端将待发送信息隐藏在混沌系统所产生的混沌信号中, 在接收端通过混沌同步去掉接收信号中的混沌信号, 实现对原始信息的恢复。混沌键控通信的原理是在发送端利用 2 种不同的混沌信号分别代表 0 和 1, 接收端由与发送端相

收稿日期: 2018-06-02; 修回日期: 2019-04-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.41606117, No.41476089, No.61671016)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.41606117, No.41476089, No.61671016)

同的 2 个混沌阵子组成，通过判断每个码元内接收信息与混沌阵子的同步与否来解调出有用信息。混沌调制通信的原理是在发送端将待发送信息调制到混沌系统参数中，在接收端通过混沌系统的同步来恢复出混沌系统的参数，从而解调出有用信息。为满足混沌阵子在大规模通信中的应用需求，文献[22]研究了新的六阶混沌电路，文献[23]在现有混沌阵子的基础上构建了混沌阵子的沿坐标轴转动的模型。

综上，目前的混沌保密通信主要是基于混沌同步理论，利用混沌阵子的类随机性、不可预测性实现保密通信。虽然混沌阵子具有优良的特性，但是现有的混沌阵子数目有限、结构已知，且在大规模并发式混沌保密通信中需要用到大量的混沌阵子，针对这些问题，本文进行了以下研究：1)建立了混沌阵子的相空间对称模型，可由某一个混沌阵子得到混沌阵子群，阵子群中包含数目众多的对称阵子，能满足大量使用的需求；2)研究了阵子群的同步特性，得到了相空间对称阵子群的同步条件；3)设计了基于相空间对称混沌阵子的保密通信系统并对其进行理论分析和仿真验证，结果表明该方法具有较好的保密性能。

## 2 混沌阵子相空间对称模型

Lorenz 混沌系统状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\sigma(x_1 - x_2) \\ \dot{x}_2 = \gamma x_1 - x_2 - x_1 x_3 \\ \dot{x}_3 = x_1 x_2 - b x_3 \end{cases} \quad (1)$$

其中， $\dot{x}_1$  为  $x_1$  的一阶导数， $\sigma$ 、 $\gamma$ 、 $b$  为系统参数，当  $\sigma=10$ ， $\gamma=28$ ， $b=\frac{8}{3}$  时，系统进入混沌状态，本文以 Lorenz 混沌阵子为例进行研究，其结论可应用于任意混沌系统。

### 2.1 理论模型

记三维空间直线  $l$  的参数方程为

$$\begin{cases} x = x_0 + lt \\ y = y_0 + mt \\ z = z_0 + nt \end{cases} \quad (2)$$

其中， $(x_0, y_0, z_0)$  为三维空间直线上的任意一点， $S=(l, m, n) \neq 0$  为空间直线的方向向量。

记混沌系统方程为

$$\dot{x} = Ax + f(x) \quad (3)$$

其中， $x=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  为混沌系统的状态变量，本文以 Lorenz 混沌阵子为例进行研究，所以取  $n=3$ ； $A$  为  $n \times n$  维系数矩阵； $f(x)$  为系统状态变量  $x$  的非线性函数。

**定义 1** 将式(3)的混沌系统相空间中任意一点  $x$  关于相空间中任意直线  $l$  对称的点记为点  $y$ ，所有的关于直线  $l$  对称的点组成的系统称为混沌阵子相空间中关于直线  $l$  的对称系统，所有的对称系统组成混沌系统的相空间对称系统群。

由定义 1 可知，相空间对称系统的相轨迹仅仅在相空间发生了位置变化，其相轨迹图的形态、系统特性并未发生改变。以 Lorenz 系统为例，其系统相图和关于任意直线  $l_1$  对称的系统相图如图 1 所示。其中，直线  $l_1$  的参数式方程为

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = 1 \\ z = 2 + t \end{cases} \quad (4)$$

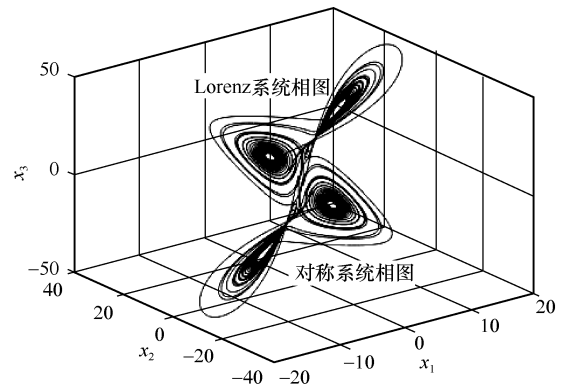


图 1 Lorenz 系统相图及其关于直线  $l_1$  对称的系统相图

混沌理论应用于保密通信主要是利用了混沌阵子处于混沌状态时信号类随机特性，并通过混沌同步来解调信号。Lyapunov 指数是判断混沌系统状态的重要参数之一，若最大 Lyapunov 指数大于 0 则可以判断系统处于混沌状态。通过计算可得，Lorenz 系统关于直线  $l_1$  的对称系统的最大 Lyapunov 指数为 0.885 0，这验证了对称后的系统仍处于混沌状态，保持了混沌系统的优良特性。

### 2.2 相空间对称系统群的同步

**定义 2** 混沌系统(1)关于相空间中直线  $l_m$  对称的系统表达式为

$$\dot{y}_{l_m} = B_{l_m} y_{l_m} + g_{l_m}(y_{l_m}) \quad (5)$$

其中， $y_{l_m}=[y_{l_{m_1}}, y_{l_{m_2}}, \dots, y_{l_{m_n}}]^T$  为相空间对称系统的

状态变量,  $B_{l_m}$  为  $n \times n$  维系数矩阵,  $g_{l_m}(y_{l_m})$  为系统状态变量  $y_{l_m}$  的非线性函数。

令相空间对称系统(5)为驱动系统, 原系统(1)为响应系统, 则有

$$\dot{x} = Ax + f(x) + u_{l_m}(x, y_{l_m}) \quad (6)$$

其中,  $u_{l_m}(x, y_{l_m})$  为同步控制器, 则驱动系统(5)与响应系统(1)的同步误差为

$$e = x - y_{l_m} \quad (7)$$

**定义 3** 若存在同步控制器  $u_{l_m}(x, y_{l_m})$ , 使式(7)中误差满足

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \|x - y_{l_m}\| = 0 \quad (8)$$

则称原系统(1)与空间对称系统(5)达到同步。

**定理 1** 存在同步控制器

$$u_{l_m}(x, y_{l_m}) = -(A + \Delta)e - (A - B_{l_m})y_{l_m} - f(x) + g_{l_m}(y_{l_m}) \quad (9)$$

使驱动系统与响应达到同步, 其中,  $\Delta$  为  $n \times n$  维正定矩阵。

**证明** 由式(5)~式(7)和式(9)可知

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{x} - \dot{y}_{l_m} = [Ax + f(x) + u_{l_m}(x, y_{l_m})] - \\ & [B_{l_m}y_{l_m} + g_{l_m}(y_{l_m})] = -\Delta e \end{aligned}$$

因此有

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= \dot{x}_1 - \dot{y}_{l_{m1}} = -\Delta_1 e \\ \dot{e}_2 &= \dot{x}_2 - \dot{y}_{l_{m2}} = -\Delta_2 e \\ &\vdots \\ \dot{e}_n &= \dot{x}_n - \dot{y}_{l_{mn}} = -\Delta_n e \end{aligned}$$

其中,  $\Delta_n$  为  $1 \times n$  维矩阵。构造 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2}(e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_n^2) > 0, \text{ 则有}$$

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= e_1 \frac{de_1}{dt} + e_2 \frac{de_2}{dt} + \dots + e_n \frac{de_n}{dt} = \\ e_1(-\Delta_1 e) + e_2(-\Delta_2 e) + \dots + e_n(-\Delta_n e) &= -e^T \Delta e \end{aligned}$$

因为  $\Delta$  为正定矩阵, 故有  $\frac{dV}{dt} < 0$ 。

由 Lyapunov 稳定性定理可得该系统渐进稳定, 即存在同步控制器

$$u_{l_m}(x, y_{l_m}) = -(A + \Delta)e - (A - B_{l_m})y_{l_m} - f(x) + g_{l_m}(y_{l_m})$$

使原系统与混沌相空间对称系统达到同步。

### 2.3 仿真实证

对上述相空间对称混沌系统同步问题进行仿真验证, 任取直线  $l_2$ 、 $l_3$ , 其参数式方程为

$$l_2 : \begin{cases} x = t \\ y = 1 \\ z = 2 \end{cases} \quad l_3 : \begin{cases} x = 1 \\ y = t \\ z = 3 \end{cases}$$

根据定义 1, 求得 Lorenz 系统关于直线  $l_2$ 、 $l_3$  的相空间对称系统的方程分别为

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = -\sigma(y_1 + y_2 - 2) \\ \dot{y}_2 = (4 - \gamma)y_1 - y_2 - y_1y_3 + 2 \\ \dot{y}_3 = -2y_1 - by_3 + y_1y_2 + 4b \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = \sigma(-y_1 - y_2 + 2) \\ \dot{y}_2 = (6 - \gamma)y_1 - y_2 + 2y_3 \\ \dot{y}_3 = -2y_2 - by_3 + y_1y_2 + 6b \end{cases} \quad (11)$$

根据式(1)、式(10)、式(11)及定理 1 设计同步控制器, 选取  $\Delta$  为三维单位矩阵, 符合定理 1 的约束条件, 即  $\Delta = I_3$ , 则同步控制器为

$$u_{l_2}(x, y_{l_2}) = -(A + I_3)e - (A - B_{l_2})y_{l_2} - f(x) + g_{l_2}(y_{l_2}) \quad (12)$$

$$u_{l_3}(x, y_{l_3}) = -(A + I_3)e - (A - B_{l_3})y_{l_3} - f(x) + g_{l_3}(y_{l_3}) \quad (13)$$

任选系统(10)初始值为(1,-3,4), 系统(11)初始值为(-2,3,5)。根据上述条件进行仿真, 得到 2 个相空间对称系统相图及同步误差分别如图 2 和图 3 所示。从图 2(a)和图 3(a)可以看出, 对称系统相图仍保持了 Lorenz 阵子的相图特性, 但空间位置发生了变化; 从图 2(b)和图 3(b)可以看出, 在同步控制器作用下, 驱动系统 5 s 后与响应系统完全同步。

## 3 基于相空间对称阵子群的混沌掩盖保密通信

混沌保密通信主要有混沌掩盖通信、混沌键控通信、混沌调制通信<sup>[19-21]</sup>, 利用第 2 节提出的相空间对称混沌阵子群的混沌特性及同步特性设计混沌保密通信系统。本文仅设计了基于相空间对称阵子群的混沌掩盖保密通信模型, 但是该对称阵子群也可应用于其他混沌保密通信模型中。

### 3.1 系统模型

基于相空间对称混沌阵子群的保密通信模型如图 4 所示。发送端首先在相空间对称混沌阵子群中选择某一对称阵子, 利用该对称阵子产生信号的

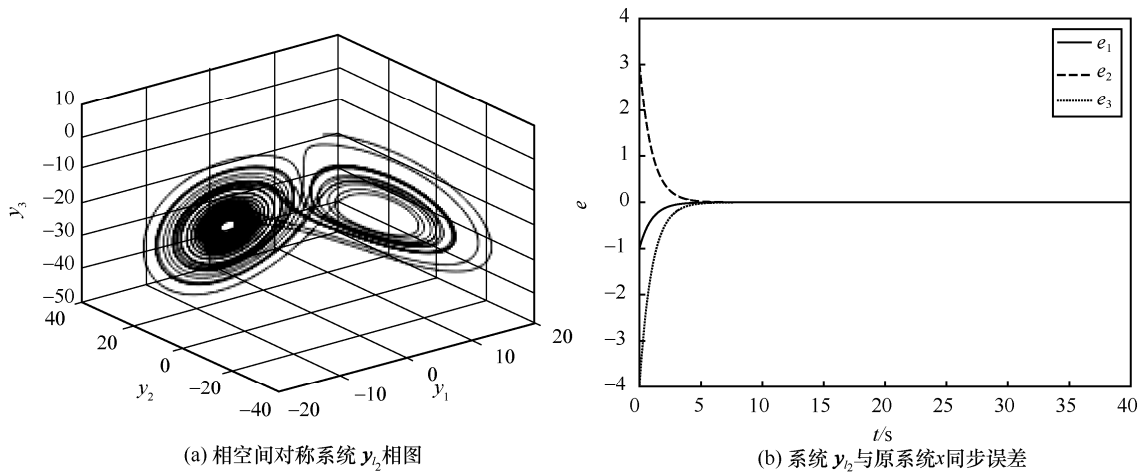


图 2 相空间对称系统  $y_2$  相图及同步误差

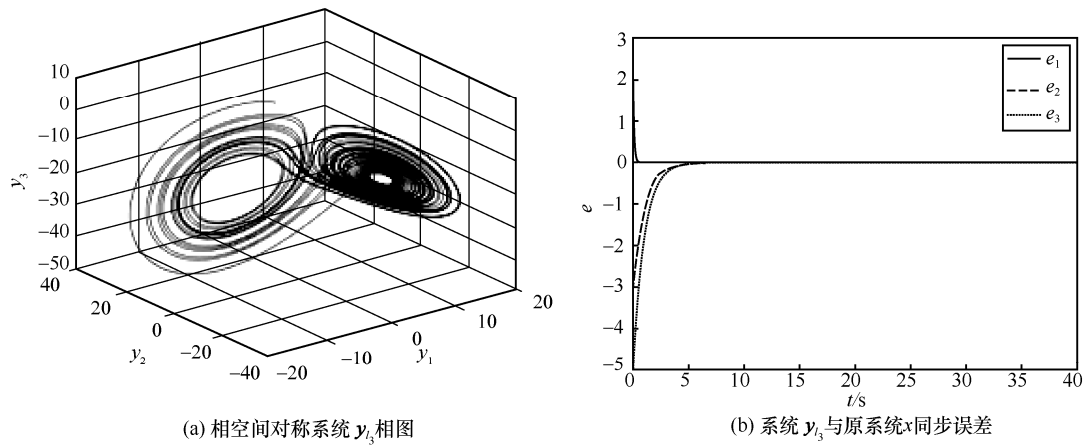


图 3 相空间对称系统  $y_3$  相图及同步误差

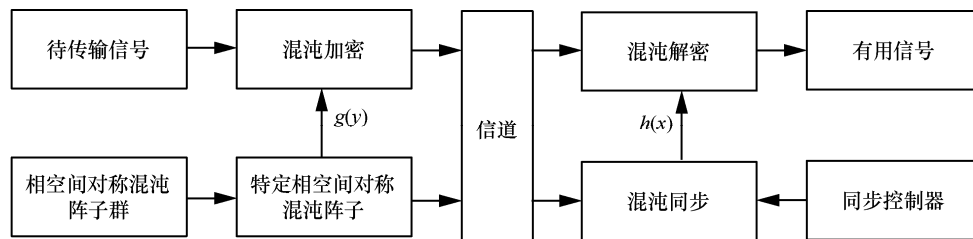


图 4 基于相空间对称混沌阵子群的保密通信模型

随机特性生成加密函数  $g(y)$ ，再利用函数  $g(y)$  对待传输信号进行混沌掩盖；接收端在混沌同步控制器的控制下产生与发送端对称混沌阵子同步的信号，在此基础上生成解密函数  $h(x)$ ，利用解密函数  $h(x)$  对接收到的信号进行解密得到有用信号。加密函数  $g(y)$ 、解密函数  $h(x)$  的计算式分别为

$$g(y) = \frac{y_{l_{m_1}} + y_{l_{m_2}} + y_{l_{m_3}}}{3} \quad (14)$$

$$h(x) = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} \quad (15)$$

采用混沌掩盖的方式对待发送信号  $m(t)$  进行加密，加密后的信号记为  $s(t)$ ，加密算法如式(16)所示，其中  $k$  为比例系数，调节待加密信号幅度，一般使待加密信号幅度小于混沌信号幅度的  $\frac{1}{4}$ ，以达到混沌掩盖的效果。接收端的解密算法如式(17)

所示，解调出的信号记为  $m'(t)$ 。

$$s(t) = g(y) + km(t) \tag{16}$$

$$m'(t) = \frac{s(t) - h(x)}{k} \tag{17}$$

现有的基于 Lorenz 混沌阵子的混沌保密通信中的密钥主要为 Lorenz 阵子的初始值和计算步长，在本文方法中，密钥除了 Lorenz 系统初始值及计算步长外，还包括阵子对称时的直线方程参数：点  $(x_0, y_0, z_0)$  和方向向量  $S = (l, m, n)$ 。由于对称后的 Lorenz 阵子仍处于混沌状态，具有混沌系统的初值敏感性，因此本文方法在不降低现有方法性能的基础上密钥空间更大，保密性更强。

### 3.2 仿真验证

利用相空间对称阵子对常用的正弦信号进行加密传输验证实验，根据图 4 的传输模型，分别设计 2 个实验。

1) 利用式(10)的对称阵子加密信号  $m_1(t) = \sin t$

后进行传输，接收端经过同步后解密出原始信号。

2) 利用式(11)的对称阵子加密信号  $m_2(t) = \sin 2t$  后进行传输，接收端经过同步后解密出原始信号。

其余参数与 2.3 节和 3.1 节相同，信号  $m_1(t)$  和  $m_2(t)$  加密传输的仿真结果分别如图 5 和图 6 所示。

从图 5(a)和图 6(a)可以看出，待传输信号经过加密后完全被掩盖在混沌信号中，达到了混沌掩盖保密通信的效果；从图 5(b)和图 6(b)可以看出，接收端在 5 s 内迅速达到混沌同步，经过混沌同步后正确解密出了原始信号。

在图 4 的传输模型中，每次发送信号时选用不同的对称阵子进行加密，假设窃听者窃取了传输信号  $m_1(t)$  时所用的对称混沌阵子式(10)的信息，并利用该信息解密信号  $m_2(t)$ ，其结果如图 7 所示。从图 7 可以看出，窃听者并不能利用该信息正确解密出信号  $m_2(t)$ ，因为每个对称混沌阵

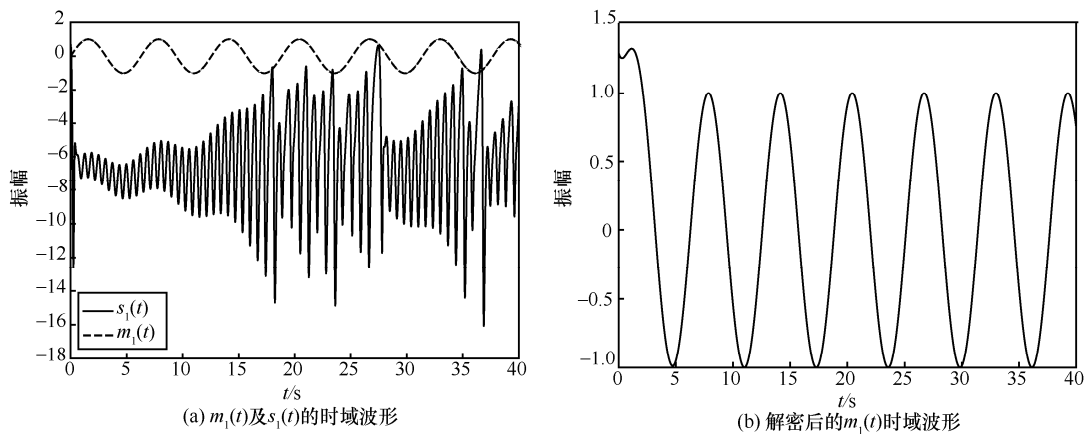


图 5 信号  $m_1(t)$  传输实验时域波形

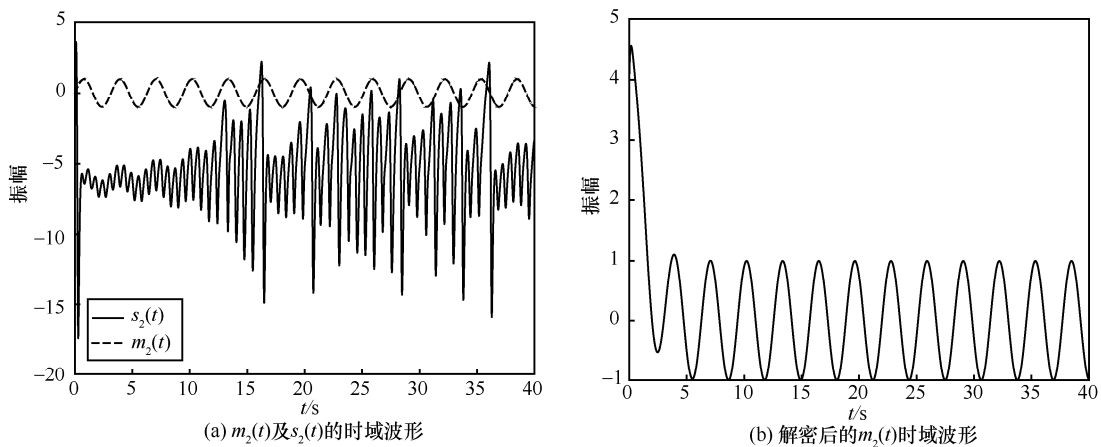


图 6 信号  $m_2(t)$  传输实验时域波形

子在相空间的位置各不相同,即便窃取了某一对称阵子的信息也无法解密出由其他对称阵子加密的信号。

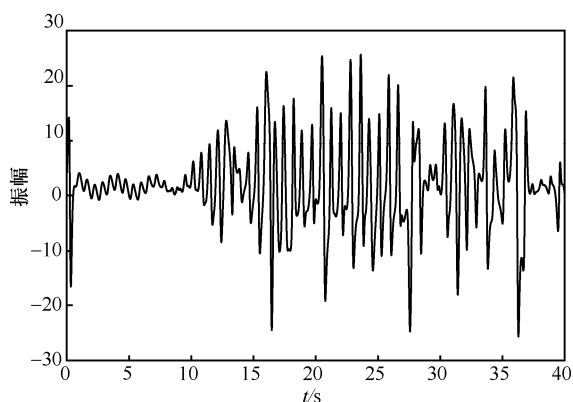


图7 对称阵子  $y_2$  解密信号  $m_2(t)$  的时域波形

综上所述,本文方法具有以下优点:空间对称混沌阵子群理论上包含无数多个对称阵子,可对不同的信号采用不同的对称阵子进行加密,且各阵子只能解密自己加密的信号,具有较好的保密性;同时,与使用大量不同种类混沌阵子进行保密通信的方法相比,本文方法在不降低保密性能的前提下降低了实现的复杂度,实用性更强。

#### 4 结束语

本文首先研究了混沌阵子相空间对称模型,该模型中对称阵子既能保持原有的混沌特性,又能提供大量可用于保密通信的对称阵子;然后研究了相空间对称阵子群的同步问题,实现了对称阵子系统与原系统的同步;最后在同步的基础上提出了基于相空间对称阵子群的保密通信模型,并对其进行仿真验证。仿真结果表明,本文方法能有效实现混沌掩盖保密通信,具有较好的应用前景。数目众多的对称阵子可在多信道并发通信中使用,在与MIMO等其他技术相结合发挥其保密功能方面也具有较好的应用前景。

#### 参考文献:

[1] AGHABABA M P, AGHABABA H P. A general nonlinear adaptive control scheme for finite-time synchronization of chaotic systems with uncertain parameters and nonlinear inputs[J]. Numerical Heat Transfer Part A Applications, 2012, 29(6): 575-597.

[2] CHENG C J. Robust synchronization of uncertain unified chaotic systems subject to noise and its application to secure commu-

tion[J]. Applied Mathematics and Computation, 2012, 219(5): 2698-2712.

[3] GUO L, HU M, XU Z, et al. Synchronization and chaos control by quorum sensing mechanism[J]. Nonlinear Dynamics, 2013, 73(3): 1253-1269.

[4] 张刚, 孟维, 张天琪. 多用户分段移位差分混沌键控通信方案[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(5): 1219-1225.

ZHANG G, MENG W, ZHANG T Q. Multiuser communication scheme based on segment shift differential chaos shift keying[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2017, 39(5): 1219-1225.

[5] 付宏睿, 董永刚, 张建刚. 基于三维自治系统复杂网络的混沌保密通信系统[J]. 吉林大学学报(理学版), 2018, 56(2): 420-425.

FU H R, DONG Y G, ZHANG J G. Chaotic secure communication of complex networks based on three-dimensional autonomous system[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2018, 56(2): 420-425.

[6] 薛薇, 谭东程, 张妹, 等. 基于FPGA的四翼超混沌系统同步及其保密视频通信[J]. 山东大学学报(工学版), 2019, 49(2): 1-7.

XUE W, TAN D C, ZHANG M, et al. A four-wing hyperchaotic system synchronization and its secure video communication based on FPGA[J]. Journal of Shandong University (Engineering science), 2019, 49(2): 1-7.

[7] RASAPPAN S, VAIDYANATHAN S. Hybrid synchronization of n-scroll chaotic Chua circuits using adaptive backstepping control design with recursive feedback[J]. Malaysian Journal of Mathematical Sciences, 2013, 7(2): 219-246.

[8] YANG H, JIANG G P. High-efficiency differential-chaos-shift-keying scheme for chaos-based noncoherent communication[J]. IEEE Transaction on Circuits System-II: Express Briefs, 2012, 59(5): 312-316.

[9] PECORA L M, CARROLL T L. Synchronization in chaotic systems[J]. Physical Review Letters, 1990, 64(3): 821-824.

[10] WU X F, CAI J P, WANG M H. Master-slave chaos synchronization criteria for the horizontal platform systems via linear state error feedback control[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 29(5): 378-387.

[11] WANG Z, HUANG X. Synchronization of a chaotic fractional order economical system with active control[J]. Procedia Engineering, 2011, 15(5): 516-520.

[12] TU J J, HE H L, XIANG P. Adaptive backstepping synchronization between chaotic systems with unknown Lipschitz constant[J]. Applied Mathematics and Computation, 2014, 23(6): 10-18.

[13] CHEN H H, SHEN G J, LIN Y L. Chaos synchronization between two different chaotic systems via nonlinear feedback control[J]. Nonlinear Analysis Theory: Methods and Applications, 2009, 70(12): 4393-4401.

[14] YU J, HU C. Synchronization of nonlinear systems with delays via periodically nonlinear intermittent control[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2012, 17(7): 2978-2989.

[15] PAI M C. Global synchronization of uncertain chaotic systems via discrete-time sliding mode control[J]. Applied Mathematics and

Computation, 2014, 22(7): 663-671.

- [16] ITOH M, YANG T, CHUA L O. Condition for impulsive synchronization of chaotic and hyperchaotic systems[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2001, 11(2): 551-560.
- [17] LI C D, LIAO X F. Complete and lag synchronization of hyperchaotic systems using small impulses[J]. Chaos, Solitons and Fract, 2004, 22(4): 857-867.
- [18] 林飞飞, 曾喆昭. 不确定分数阶时滞混沌系统自适应神经网络同步控制[J]. 物理学报, 2017, 66(9): 401-410.  
LIN F F, ZENG Z Z. Synchronization of uncertain fractional-order chaotic systems with time delay based on adaptive neural network control[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(9): 401-410.
- [19] FRISCH A, MARK M, AIKAWA K, et al. Quantum chaos in ultracold collisions of gas-phase erbium atoms[J]. Nature, 2014, 50(7): 475-479.
- [20] KENNEDY M P, KOLUMBAN G, KIS G, et al. Performance evaluation of FM-DSSS modulation in multipath environments[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems I Fundamental Theory & Applications, 2001, 48(12), 1702-1717.
- [21] MAGGIO G M, RULKOV N, REGGIANI L. Pseudo-chaotic time hopping for UWB impulse radio[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems I Fundamental Theory & Applications, 2001, 48(12): 1424-1435.
- [22] 王伟, 曾以成, 孙睿婷. 含三个忆阻器的六阶混沌电路研究[J]. 物理学报, 2017, 66(4): 201-211.  
WANG W, ZENG Y C, SUN R T. Research on a six-order chaotic circuit with three memristors[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(4): 201-211.
- [23] 孙广明, 黄金杰, 刘乔. 分布式大规模多信号系统的混沌族群保密通信研究[J]. 通信学报, 2017, 38(3): 201-209.  
SUN G M, HUANG J J, LIU Q. Research on the chaotic group secret communication of the distributed, large-scale and multi-signal system[J]. Journal on Communications, 2017, 38(3): 201-209.

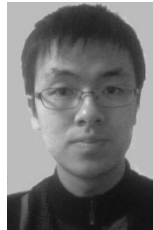
### [作者简介]



刘林芳(1990-), 男, 山东滕州人, 海军航空大学博士生, 主要研究方向为混沌弱信号检测、混沌保密通信。



芮国胜(1968-), 男, 江苏南京人, 海军航空大学教授, 主要研究方向为现代通信系统、小波理论及应用、混沌弱信号检测等。



张洋(1983-), 男, 山东烟台人, 海军航空大学讲师, 主要研究方向为混沌与非线性滤波技术等。



吴前龙(1994-), 男, 湖北当阳人, 海军航空大学硕士生, 主要研究方向为混沌弱信号检测。