

激光广义同步化混沌系统及其应用*

罗利国 聂得真

(山东大学光电子信息工程系, 济南 250100)

提要 以一个激光器混沌子系统和两个或多个非线性稳定响应子系统组成激光广义同步化混沌系统。以一个简单的系统模型,在原理上实验了该类系统的同步化混沌运转。对该系统应用于保密通信进行了讨论。

关键词 同步化混沌,激光,应用

1 引言

1993 年,美国 MIT 的 Cuomo 和 Oppenheim 利用 Lorenz 方程的电路模拟,在原理上初步实现了同步化混沌及其密码通信应用演示^[1]。该电路的设计原理是基于同步化混沌系统的特性。当一个混沌系统可以分成一个驱动子系统和一个稳定响应子系统时,两个或多个相同的稳定子系统可以给出同步的混沌信号^[2],并可称之为同步化混沌系统。

实际上,同步化混沌系统可以由两个人为使之有机结合在一起的混沌驱动子系统和稳定响应子系统组成^[3],可称之为广义同步化混沌系统。我们以一个简单的混沌激光器子系统,与 Lyapunov 指数为负的非线性光学响应子系统一起,在原理上构造出一个激光广义同步化混沌系统。以计算机数值模拟分析了这种同步化混沌的工作过程,并讨论了将该系统应用于保密通信的可能性。有关激光同步化混沌的研究,尚未见报道。

2 系统模型及工作过程模拟

我们构造的广义激光同步化混沌密码通信系统如图 1 所示。由激光源子系统发射出的混沌激光 $E_L(t)$ 作为驱动信号,分别驱动两个稳定的非线性响应子系统 R_1 和 R_2 。 R_1 与 R_2 能给出同步化的混沌信号 $E_{R_1}(t)$ 和 $E_{R_2}(t)$ 。利用 $E_{R_1}(t)$ 加载有用信号 $S_i(t)$ 使之变成 $M(t) = E_{R_1}(t) + S_i(t)$ 。当到达目的地后,与在目的地产生的信号 $E_{R_2}(t)$ 相减,即可得到有用信号 $S_0(t) = S_i(t)$ 。

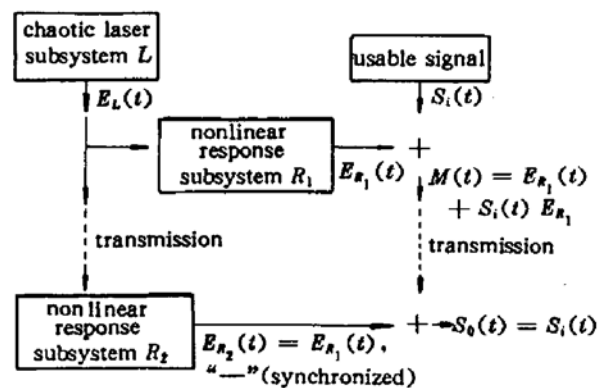


Fig. 1 The diagram of a general synchronized chaotic laser system and its possible application to private communication

* 国家自然科学基金资助项目。

作为初步的原理性验证,我们分析了如下的一种简单的理论模型,以计算机模拟了该模型的同步化混沌的工作过程。激光源子系统采用单模均匀加宽 Haken-Lorenz 激光方程^[4],使之工作于混沌输出状态。响应子系统采用有注入信号的绝热消去介质极化变量的激光器或者非线性光学系统。在共振状态下,描述整个系统的动力学方程为

$$\dot{X} = 16(Y - X) \quad (1a)$$

$$\dot{Y} = -XZ + 45X - Y \quad (1b)$$

$$\dot{Z} = -4Z + XY \quad (1c)$$

$$\dot{E}_{R_1} = -K_a(E_{R_1} - C_a X) - \alpha_a E_{R_1} D_{R_1} \quad (1d)$$

$$\dot{D}_{R_1} = -\gamma_a(D_{R_1} - 1 + E_{R_1}^2 D_{R_1}) \quad (1e)$$

$$\dot{E}_{R_2} = -K_b(E_{R_2} - C_b X) - \alpha_b E_{R_2} D_{R_2} \quad (1f)$$

$$\dot{D}_{R_2} = -\gamma_b(D_{R_2} - 1 + E_{R_2}^2 D_{R_2}) \quad (1g)$$

上式中“·”代表“d/d τ ”,且有 $\tau = \gamma_{\perp} t$, γ_{\perp} 为激光源子系统介质极化变量弛豫速率。 X 为激光源的慢变化光场振幅。根据已给定的参数,激光源已工作于混沌状态。 C_a, C_b 表示激光源光场耦合进入响应子系统的光场耦合系数,它们包括两组子系统方程间固有的常量因子和外加的耦合因子。为使两响应子系统保持同步化特性,须有 $C_a = C_b, \alpha_a = \alpha_b, K_a = K_b, \gamma_a = \gamma_b$, 即保持两响应子系统的完全相同。 E_{R_1}, E_{R_2} 分别属于两个响应子系统的慢变化光场振幅, D_{R_1}, D_{R_2} 为粒子数反转变量。当 $\alpha_a = \alpha_b > 0$ 时,响应子系统为纯被动非线性光学腔。当 $\alpha_a = \alpha_b < 0$ 时,响应子系统变为有注入信号的激光系统。注意应使响应子系统处于稳定响应范围内,响应子系统本身不产生混沌,仅对来自于混沌激光源的信号进行非线性调制。

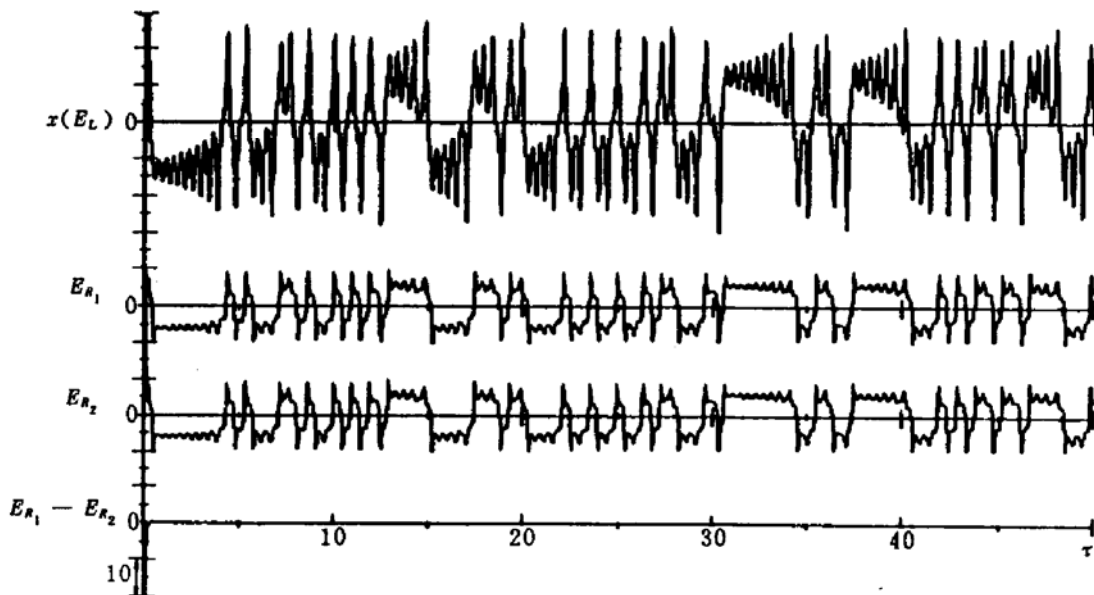


Fig. 2 The synchronized chaos behaviours of $E_{R_1}(t)$ and $E_{R_2}(t)$. The driving chaos is $X(E_L)$. $E_{R_1}(t)$ and $E_{R_2}(t)$ go into synchronization after a very short period although we give $E_{R_1}(t)$ and $E_{R_2}(t)$ much different initial values.

$$C_a = C_b = 0.2, K_a = K_b = 20, \alpha_a = \alpha_b = -400, \text{ and } \gamma_a = \gamma_b = 1$$

采用四阶龙格-库塔法,以计算机数值模拟求解方程组(1)。步长 0.0001, E_{R_1}, E_{R_2} 给定不同的初始值。计算结果如图 2 所示:由 Haken-Lorenz 激光源给出的混沌激光 E_L ,在响应子系统

R_1, R_2 上产生另一种形式的混沌输出 E_{R_1}, E_{R_2} 。图 2 中的最后一条曲线为 $E_{R_1} - E_{R_2}$ 随时间 τ 的变化关系曲线。虽然在初始时, 给定 E_{R_1}, E_{R_2} 不同的初值 ($E_{R_1}(0) = 2, E_{R_2}(0) = 50$), 但它们很快就归于等值同步。由图 2 还可看出, E_{R_1}, E_{R_2} 与激光源混沌输出 E_L 在位相和幅度上都是极其不同的, 这是响应系统 R_1, R_2 的双稳非线性产生的作用结果。调节响应系统的各参量, 可以改变 E_{R_1} 和 E_{R_2} 的位相与幅度等输出行为。

以同步化混沌系统加载有用信号的方法可有多种。最简单的方法以加法器实现, 即

$$M(t) = E_{R_1}(t) + S_i(t) \quad (2)$$

上式中, $S_i(t)$ 为有用信号, $M(t)$ 为合成后用于传输的信号。加载的有用信号 $S_i(t)$ 的幅度与频带宽度应小于混沌信号 $E_{R_1}(t)$ 的幅度与带宽。显然, 最后的有用信号的解码由

$$S_0(t) = M(t) - E_{R_2}(t) = E_{R_1}(t) + S_i(t) - E_{R_2}(t) = S_i(t)$$

来得到。其中 $E_{R_2}(t)$ 为激光源混沌输出 E_L 经传输后, 与目的地的响应子系统 R_2 作用产生的同步化混沌输出。由此可见, 非线性响应系统起到了密钥的作用。如果需要, 还可以挂接更多的响应系统, 以实现多地点的保密通信。

3 结论与讨论

我们提出一种激光广义同步化混沌系统。该系统将混沌激光子系统与稳定响应子系统组合在一起, 形成可用来进行保密通信的应用混沌系统。以一个简单的模型, 实现了该系统工作流程的原理性运转。实际应用中, 我们可以在较大范围里选择两种子系统的构成。例如, 利用现在已得到的多种混沌激光器和非线性的稳定响应系统, 来制作真正实用化的同步化混沌保密信息传输系统。如利用调制型 CO_2 混沌激光器作为混沌源, 驱动稳定响应的 CO_2 激光器或者 CdHgTe 双稳非线性器件。以 CO_2 激光器同步化混沌系统实现大气通信的保密传输是有重要实际意义的。又如研制适于光纤传输的混沌激光器和非线性响应子系统组成的同步化混沌光纤通信系统, 也具有十分重要的实用价值。实际的实验系统中, 两响应子系统的各个参数器件应选用相同, 但并不十分苛刻, 这是我们在进行电路同步化混沌与密码传输实验时得到的经验。

参 考 文 献

- 1 Kevin M. Cuomo, Alan V. Oppenheim. Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communications. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 71:65~68
- 2 L. M. Pecora, T. L. Carrol. Synchronization in chaotic systems. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, 64:821~824
- 3 L. M. Pecora, T. L. Carrol. Driving systems with chaotic signals. *Phys. Rev.*, 1991, A44:2374
- 4 H. Haken. *Light*. 2, Elsevier Science Publishers B. V., 1985, 1~326

The General Synchronized Chaotic Laser System and Its Application

Luo Liguó Nie Dezhen

(Department of Optics, Shandong University, Jinan 250100)

Abstract A general synchronized chaotic laser system is formed by a chaotic laser subsystem and two or more stable nonlinear response subsystems. The general synchronized chaotic laser system achieved theoretically was predicted to operate. The application to private communication of this system was discussed.

Key words synchronized chaos, laser, application