

电光双稳系统中混沌控制的动态存储

郑植仁 李建斌 张 英 姜 云 高锦岳

(吉林大学物理系, 长春 130023)

摘 要 报道了在电光双稳系统输出振荡混沌区的二次反分岔区域中使用连续自反馈控制的方法实现动态存储的实验研究。李雅普诺夫指数分析和计算机数值模拟表明这种方法是可行的, 混沌控制前后输出振荡分岔图的对比显示了使用这种方法实现稳定动态存储的物理机制。实验结果与理论模拟一致, 直至 55 次谐波的二进制信息码被稳定存储。

关键词 混沌控制, 动态存储, 电光双稳系统。

1 引 言

混沌的控制及其应用是当前混沌研究的一个重要课题, 九十年代以来混沌同步及混沌控制研究的突破性进展, 激发了理论与实验研究的蓬勃发展, 展示了十分诱人的应用前景。本文报道的利用连续自反馈控制方法在电光双稳系统混沌区中实现稳定动态存储的实验研究就是一项混沌控制的应用研究。

延时反馈双稳系统的理论和实验研究显示, 随着系统输入光强的增加, 系统的输出振荡会经历多次倍周期分岔后进入混沌状态, 随着系统输入光强的进一步增加, 进入混沌状态后系统的输出振荡还要经历一系列反分岔过程, 如图 1 所示。无论是在有序分岔区还是在混沌反分岔区, 系统的输出都存在大量的分岔谐波振荡模, 可以用来进行大容量的动态信息存储^[1-9]。Davis 和 Aida 等人使用种子信号注入法在半导体激光泵浦的混合型延时反馈光学双稳系统输出振荡的二次分岔区中从实验上实现了 21 位二进制信息码的动态存储^[6], 他们还在该系统中开展了利用混沌搜寻的方法实现动态存储的研究^[7], 本文作者则在氦氛激光泵浦的混合型延时反馈电光双稳系统输出振荡的二次分岔区中进行了动态存储的实验和理论研究^[8, 9], 从实验上实现了 51 位二进制信息码的动态存储。

种子信号注入法是通过事先从系统外部向系统内

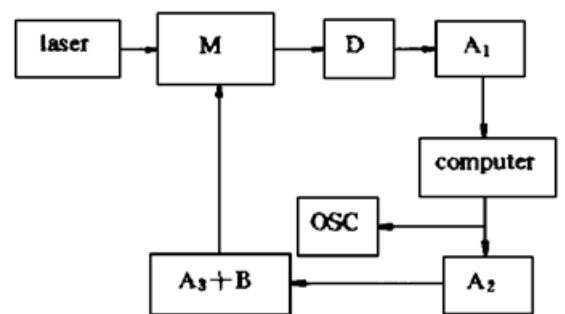


Fig. 1 Schematic diagram of an electro-optical bistable system. M: LiNbO₃ crystal modulator; D: detector; A₁, A₂, A₃: amplifier; B: bias voltage; Osc: oscilloscope; Laser: He-Ne laser source; Computer: delay and chaos control system

注入确定信息码的种子信号来实现所需信息的动态存储，混沌搜寻的方法是利用系统混沌区中信息码不断自转换的特性首先在二次反分岔区中搜寻到所需的信息码，然后通过改变系统的参数迅速将系统调回二次分岔区来实现信息码的稳定动态存储。种子信号注入法的不足是每次转换信息码时都必须事先从系统外部向系统注入所需信息码的种子信号，混沌搜寻的方法虽然在转换信息码时不需要从外部向系统注入所需信息码的种子信号，但需要不断改变系统的运行参数来实现信息码的转换和稳定存储，这不但不易操作，而且有时可能给系统带来不利的附加影响。本文报道的利用连续自反馈控制实现稳定动态存储的方法是一种既不需要事先从系统外部向系统注入种子信号也不需要不断调整系统参数就可以在系统中实现稳定动态存储和信息码转换的一种好方法。

2 连续自反馈混沌控制的动态存储理论模拟和李指数分析

由图 1 所示的氦氖激光泵浦的混合型延时反馈电光双稳系统的动态行为可作如下描述^[10],

$$dV(t)/dt = f(t) \tag{1}$$

式中, $f(t) = -V(t) + I_1\{1 - k \cos [V(t - T) + \theta]\}/2$; I_1 为与系统的输入光强相对应的量; $V(t)$ 为与系统的输出光强经过光电转换、放大后反馈到系统上的电压相对应的量, 因为它与系统的输出光强成正比. 因此在本文中也用来表示系统的输出强度; T 、 k 和 θ 分别为反馈回路中的有效延迟时间、消光系数和与系统的偏置电压相对应的量; 时间 t 和有效延迟时间 T 都是以系统的响应时间为单位的量. 由(1)式可以得到系统输出振荡的峰谷值随输入光强增加的分岔图, 如图 2 所示. 图 2 中标出的 $m = 2$ 和 $m^* = 2^*$ 的区域分别是系统输出振荡有序区中的二次分岔区域和混沌区中的二次反分岔区域. 在系统 $m = 2$ 的分岔区中存在大量的二次分岔谐波振荡模^[6], 如果用 n 来表示输出振荡的谐波次数, 用 1 和 0 来表示 $2T$ 间隔内输出振荡的两个峰值, 则由任意一个 n 和 $m = 2$ 组成的一组数值, 就对应系统输出的某一类独立振荡模, 比如 $(n = 7, m = 2)$ 对系统中的 $(n = 7, m = 2)$ 一类的十个独立振荡模^[8] 图

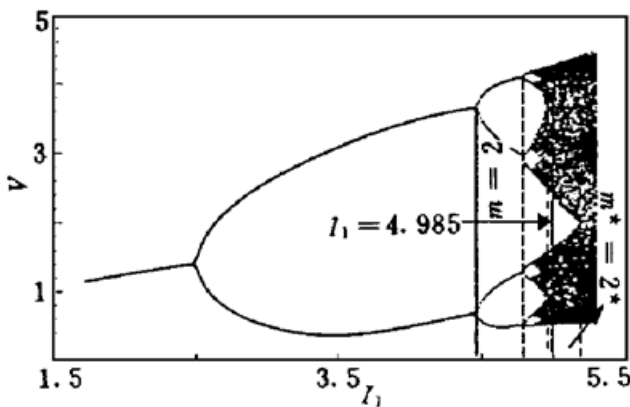


Fig. 2 Bifurcation diagram of output oscillation levels without chaos control, The parameters used are: $k = 0.8$, $\theta = \pi$, $T = 100$, $X = 0.0$. $I_1 = 4.985$ is the operating point of dynamic memory

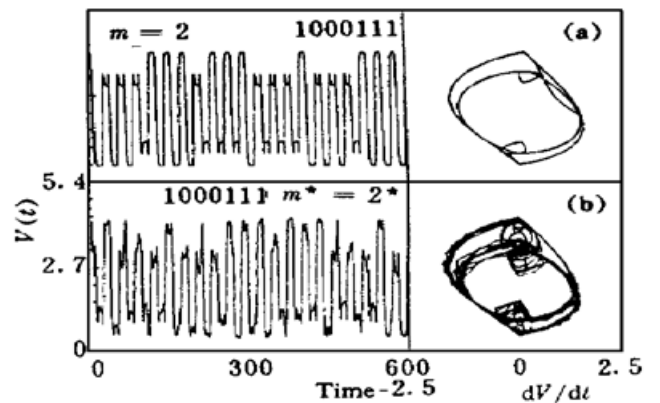


Fig. 3 Waveforms and phase diagrams of output oscillations in the bifurcation regions of $m = 2$ and $m^* = 2^*$. The parameters used are: $k = 0.8$, $\theta = \pi$, $T = 100$, $I_1 = 4.985$, $X = 0.05$, $n = 7$

3(a) 给出了其中的一个 1000111 振荡模及其相应的相图。在系统 $m^* = 2^*$ 的反分岔区中也存在大量的二次分岔谐波振荡模^[7], 如果给出一组由 n 和 $m^* = 2^*$ 组成的数值, 比如 $(n = 7, m^* = 2^*)$ 也对应系统输出的 $(n = 7, m^* = 2^*)$ 一类的十个独立振荡模, 图 3(b) 也给出了其中的一个 1000111 振荡模及其相应的相图。比较图 3 中的两套图可知, 系统 $m = 2$ 分岔区中的振荡模是有序的, 系统 $m^* = 2^*$ 反分岔区的振荡模是混沌的, 进一步的研究还可知, 系统 $m = 2$ 分岔区中的振荡模是稳定的, 系统 $m^* = 2^*$ 反分岔区的振荡模是不稳定的, 而且随着时间的发展, 系统 $m^* = 2^*$ 反分岔区中这些不稳定的混沌振荡模之间还在不断地互相转换^[7]。本文正是利用系统输出振荡的上述特性, 在系统的混沌区域里使用自反馈的方法对某一个不稳定的独立混沌振荡模实施连续的混沌控制使其变为稳定的振荡模, 并利用该区中同一类独立振荡模之间不断互相转换的特性来实现信息码之间的转换的。

图 4 是连续自反馈混沌控制方法的方块图, 连续自反馈控制变量为 $F(t) = X[-V(t)]$, 其中 X 为混沌控制的权重因子。控制过程是将系统的输出与权重因子相乘, 再负反馈到系统上。当对系统实施这样的混沌控制后该系统输出振荡的动态方程由控制前的(1)式变为:

$$dV(t)/dt = f(t) + F(t) \quad (2)$$

利用(2)式对系统实行连续自反馈混沌控制的理论模拟显示, 较小的权重因子 X 就可以把系统的混沌振荡控制为有序振荡。为了弄清实施这种控制的效果和最佳控制参数, 在进行理论模拟之前, 首先进行了李雅普诺夫指数分析。令

$$0 < \tau \leq T, \quad t = (N - 1)T + \tau$$

其中 $N = 1, 2, 3 \dots$, 设 $V_N(\tau)$ 是第 N 个延迟时间间隔中 τ 时刻系统的输出, 则有 $V_N(\tau) = V(t)$, 当延迟时间 T 很大时, 有 $dV(t)/dt \approx 0$, 此时(2)式可以改写成如下的表示系统输出的迭代公式,

$$V_{N+1}(\tau) = \frac{I_1 \{1 - k \cos [V_N(\tau) + \theta]\} / 2}{1 + X} \quad (3)$$

由(3)式可以推导出第一李雅普诺夫指数公式。公式的推导过程大致如下, 首先在第一个延迟时间里设相邻的任一时间间隔 $(\tau, \tau + d\tau)$ 对应的系统输出相互分离的程度为 $|dV_1(\tau)|$, 然后随着时间的发展, 按(3)式迭代计算出第 $(N + 1)$ 个延迟时间中任一相邻时间间隔 $(\tau, \tau + d\tau)$ 对应的那个系统输出相互分离或接近的变化值 $|dV_{N+1}(\tau)|$, 并找出在 T 间隔里无数个相邻时间间隔 $(\tau, \tau + d\tau)$ 的无数个 $|dV_{N+1}(\tau)|$ 中对应的指数分离最大的那个指数值, 把它定义为第一李雅普诺夫指数。很明显, 如果随着时间的推移系统相邻输出的发展是相互分离的, 则相应的第一李雅普诺夫指数就是正的, 系统的运动状态将是混沌的。相反, 如果随着时间的推移系统相邻输出的发展是相互接近的, 则相应的第一李雅普诺夫指数就是负的, 系统的运动状态就将是有序的。推导给出的与本系统对应的第一李雅普诺夫指数公式如下面的(4)式所示^[3], 由下式给出的第一李雅普诺夫指数的正或负可以确定本系统输出振荡的状态是有序的还是无序的。

$$\lambda_1 = \text{Max}_{(0 < \tau \leq T)} \left\{ \text{Lim}_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln \left| \frac{(1/2) I_1 k \sin [V_N(\tau) + \theta]}{1 + X} \right| \right\} \quad (4)$$

图 5 给出了在系统 $m^* = 2^*$ 反分岔区里施加混沌控制前后输出振荡的第一李雅普诺夫

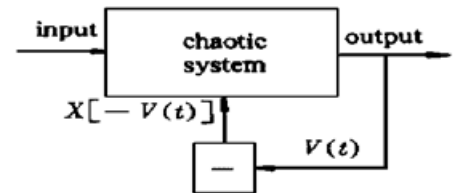


Fig. 4 Block diagram of continuous self-feedback control system, $F(t) = X[-V(t)]$, X is the control weight

指数随输入光强发展的变化图，图中显示出施加混沌控制后第一李雅普诺夫指数由控制前的正值变为负值，从图中还可以得到控制后第一李雅普诺夫指数为负值时输入光强的取值范围，这说明对系统施加如上连续自反馈的混沌控制是有效的。

按(2)式进行连续自反馈混沌控制的理论模拟显示出如图3(b)所示的混沌振荡在施加如上控制后变为如图3(a)所示的稳定有序振荡，这就进一步说明对由(1)式描述的系统通过施加 $F(t) = X[-V(t)]$ 的混沌控制进行稳定动态存储是可行的。

为了揭示这种混沌控制方法的物理机理，绘制了施加如上控制后系统输出振荡的分岔图，如图6所示。将图6和图2相比较就可以看出，施加如上控制后系统输出振荡的分岔区右移了，使控制前原本处于系统混沌振荡的 $m^* = 2^*$ 反分岔区中的操作点 $I_1 = 4.985$ 在控制后变成处于系统稳定振荡的 $m = 2$ 分岔区中的操作点。所以系统控制前的混沌振荡就变为控制后的有序稳定振荡了。对系统施加如上控制后混沌振荡变为有序稳定振荡的现象也可以由迭代方程(3)出发从另一个角度来理解。在长延时条件下(3)式与(2)式是等价的，由(3)式也可以得到类似图2和图6的系统控制前后的分岔图。如果注意一下控制前后(3)式的差别，就会发现施加控制后(3)式的变化仅仅是等式右边多了 $[1/(1+X)]$ 的相乘项。这可以理解为相当于对系统并未施加控制，只是输入光强由 I_1 变为 $[I_1/(1+X)]$ 了，即在控制前后系统的工作点 $I_1 = 4.985$ 虽然未变，但控制后系统的状态等效于对系统未施加控制时输入光强为 $[I_1/(1+X)]$ 的状态。若 $X = 0.066$ (在图6中使用的参数值)，则 $[I_1/(1+X)] = 4.676$ ，这正是图2所示的控制前系统在 $m = 2$ 分岔区中的一个稳定振荡工作点。因此，也可以说系统控制前的混沌振荡变为控制后的有序稳定振荡是由于施加如上控制后系统的等效输入光强变小了。

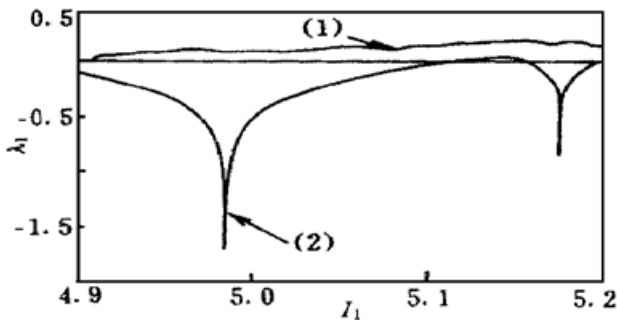


Fig. 5 Lyapunov exponent versus input intensity I_1 in the inverse bifurcation region of $m^* = 2^*$, The parameter used are: $k = 0.8$, $\theta = \pi$, $T = 100$, (1) Without chaos control, $X = 0.0$, (2) With continuous self-feedback control of $F(t) = X[-V(t)]$, $X = 0.066$

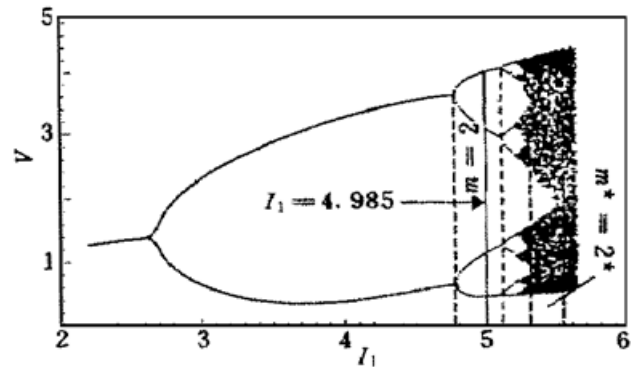


Fig. 6 Bifurcation diagram of output oscillation levels with continuous self-feedback control of $F(t) = X[-V(t)]$ in the inverse bifurcation region of $m^* = 2^*$, The parameter used are: $k = 0.8$, $\theta = \pi$, $T = 100$, $X = 0.066$, $I_1 = 4.985$ is the operating point of dynamic memory

3 连续自反馈混沌控制的实验及讨论

在图1所示的氦氛激光泵浦的混合型延时反馈电光双稳实验系统中。输入光源是 He-Ne 激光器，输入光信号通过 LiNbO₃ 调制晶体 M 后由光电倍增管 D 转换成电信号，电信号经放

大器 A_1 放大、计算机延时后, 再经过两级放大器 A_2 、 A_3 放大连同固定偏压 B 一起反馈到调制晶体 M 上, 构成闭合回路。与此同时, 经放大器 A_1 放大的输出信号进入计算机后不经过延时即由计算机使其与控制权重因子 X 结合成负反馈信号、再经两级放大器 A_2 、 A_3 放大后成为 $F(t)$ 控制信号也施加到调制晶体 M 上对系统实施混沌控制。计算机还被用来注入信息码数据、存储实验数据和显示控制前后系统输出的波形。系统的动态输出振荡波形由示波器监视。首先测量了系统的弛豫时间。让系统开路, 方波发生器产生方波, 经 A_1 放大器放大后进入计算机, 从计算机输出的信号再由 A_2 、 A_3 放大后连同直流偏压一起施加到调制晶体 M 上, 从调制晶体出射的光信号经光电倍增管转换成电信号后输出到示波器上。由于系统的弛豫响应, 示波器显示的输出波形已由方波发生器产生的标准方波变成上下沿成倾斜状的方波。读出倾斜状方波上升沿 0.63 倍处与下沿起始处的时间间隔, 即为反馈系统的弛豫时间, 测量时置延迟时间为零, 测量出系统的弛豫时间为 $\tau = (0.11 \pm 0.01)$ ms。还测量了计算机的采样时间, 测量结果为 0.038 ± 0.001 ms。

混沌控制的具体实验过程是这样进行的。首先设置系统的实际延迟时间, 比如设为 $T_r = 5.32$ ms(其中有效延迟时间 T 与实际延迟时间 T_r 的关系为 $T = T_r/\tau = 48.36$), 然后在系统的 T 延迟时间间隔内, 按 $n = 1$ 、 $m = 2$ 时系统的输出振荡方波波形的峰谷平台高度取值, 将任意一组初始振荡码波形数据, 比如 $n = 7$ 、 $m = 2$ 中的任意一组码数据存入计算机内^[8]。接着闭合系统的回路、运行系统, 调整输入光强和偏置电压, 让系统工作在 $m^* = 2^*$ 的反分岔区。然后再次断开系统, 将事先存入系统的那组初始码波形数据注入系统, 并再次闭合、运行系统。此时系统的输出波形就是 $n = 7$ 、 $m^* = 2^*$ 的混沌码波形了, 而且这些码波形将在 $n = 7$ 、 $m^* = 2^*$ 的十个独立码波形之间不断转换。当系统的输出振荡呈现出所需要的某一个信息码波形时, 立即对系统施加 $F(t) = X[-V(t)]$ 的混沌控制, 系统就由混沌振荡状态转变为稳定振荡状态, 稳定地以被控制时的信息码波形振荡了。如果需要转换系统运行的信息码, 则只要撤销控制, 系统就又开始以某一混沌码波形振荡并不断相互转换。当系统的输出振荡转换到所需要的新信息码波形上时, 立即再次对系统施加上述混沌控制, 系统就又稳定振荡在那个新的信息码波形上了。图 7 中的(a, b, c, d)分别是由计算机记录的系统在 $m^* = 2^*$ 反分岔区内当 $(n = 5, m^* = 2^*)$ 、 $(n = 7, m^* = 2^*)$ 、 $(n = 9, m^* = 2^*)$ 、 $(n = 11, m^* = 2^*)$ 时其中的一种信息码控制前后输出振荡的实验波形图。由这些实验图可以看出连续自反馈控制的效果是很好的, 实验结果也与理论模拟结果符合得很好。实验中稳定的最高存储谐波数达到了 55 次, 图 8 所示为其控制前后输出振荡的实验波形图。

综上所述, 作者在系统 $m^* = 2^*$ 的反分岔区通过连续自反馈的混沌控制成功地将一个混沌码控制为需要的稳定振荡码, 本项实验不但把动态存储的区域由 $m = 2$ 的分岔区扩大到 $m^* = 2^*$ 的反分岔区, 而且给出了方便的动态码转换的新方法。也就是只要施加混沌控制就可以实现

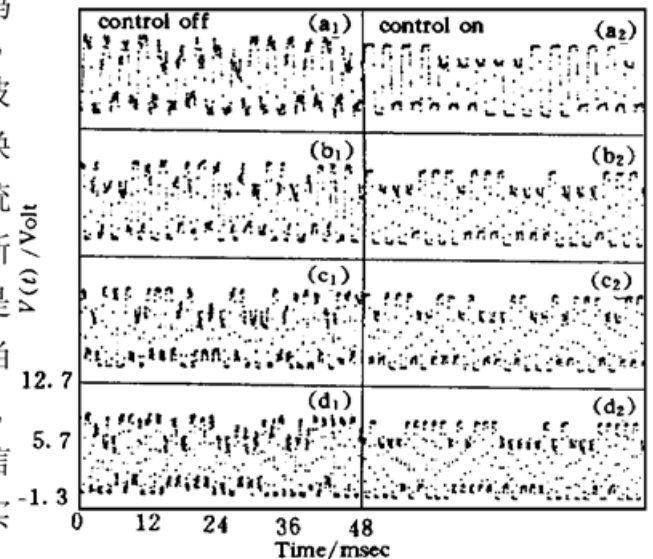


Fig. 7 Four examples of experimental results of dynamic memory by chaos control in the inverse bifurcation region of $m^* = 2^*$. The parameter used are: (a) $T_r = 3.99$ ms, $n = 5$, (b) $T_r = 5.32$ ms, $n = 7$, (c) $T_r = 6.84$ ms, $n = 9$, (d) $T_r = 8.36$ ms, $n = 11$

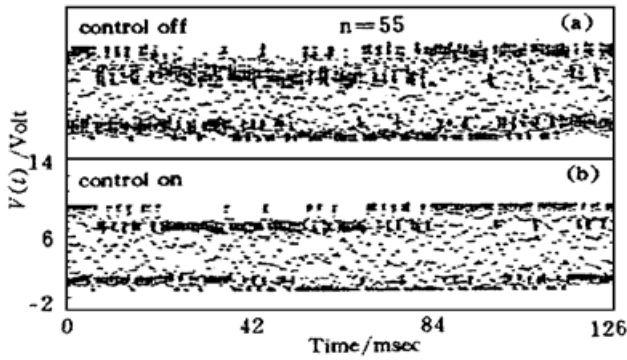


Fig. 8 Another example of experimental results of dynamic memory in the inverse bifurcation region of $m^* = 2^*$. ($T_r = 41.80$ ms, $n = 55$)

混沌区中所需码的稳定动态存储, 只要撤销控制就可以依靠混沌码的自转换特性找到所需的新码, 然后再次施加混沌控制就可以实现新码的稳定动态存储。

由于激光光源不够稳定, 放大器和检测器也是一些旧设备, 限制了实验中能够达到的动态存储的最高谐波次数和存储的稳定性。混沌控制下动态存储的自动搜寻和自动控制的实施也受到影响, 将通过改进设备和系统来逐渐解决这些问题, 为动态存储的实用化作出努力。

参 考 文 献

- [1] K. Ikeda, K. Kondo, Successive higher-harmonic bifurcation in systems with delayed feedback. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, **49**(20) : 1467~ 1470
- [2] J. Y. Gao, L. M. Narducci, L. S. Schulman *et al.*, Route to chaos in a hybrid system with delay. *Phys. Rev. (A)*, 1983, **28**(5) : 2910~ 2914
- [3] K. Ikeda, K. Matsumoto, High-dimensional chaotic behavior in systems with time-delayed feedback. *Physica*, 1987, **29D**(1, 2) : 223~ 235
- [4] P. Davis, Application of optical chaos to temporal pattern search in a nonlinear optical resonator. *Jap. J. Appl. Phys.*, 1990, **29**(7) : L1238~ L1240
- [5] T. Aida, P. Davis, Storage of optical pulse data sequences in loop memory using multistable oscillation. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(17) : 1544~ 1546
- [6] T. Aida, P. Davis, Oscillation modes of laser pumped hybrid bistable system with large delay and application to dynamical memory. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **QE-28**(3) : 686~ 699
- [7] T. Aida, P. Davis, Oscillation mode selection using bifurcation of chaotic mode transitions in a nonlinear ring resonator. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **QE-30**(12) : 2986~ 2997
- [8] J. Y. Gao, J. H. Huang, Z. R. Zheng *et al.*, Hybrid bistable system and its application to dynamic memory. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(3) : 790~ 794
- [9] 郑植仁, 刘俊业, 李建斌等, 电光双稳系统中动态存储最高谐波数的研究. *光学学报*, 1996, **16**(1) : 63~ 67
- [10] 高锦岳, L. M. 那都奇, 袁建民等, 一个混合型双稳系统的非稳特性及其无序过渡分析. *光学学报*, 1984, **4**(8) : 737~ 744

Dynamic Memory Function by Chaos Control in an Electro-Optical Bistable System

Zheng Zhiren Li Jianbin Zhang Ying Jiang Yun Gao Jinyue
(Physics Department, Jilin University, Changchun 130023)
(Received 8 March 1997; revised 28 June 1997)

Abstract A method of continuous self-feedback chaos control is proposed for the dynamic memory which has been realized in an electro-optical bistable system pumped by a He-Ne laser. Experimental results are agreed with the theoretical simulations and the Lyapunov exponent analysis. Up to 55 bits codes oscillations have been successfully demonstrated.

Key words chaos control, dynamic memory, electro-optical bistable system.