

延时线性反馈法控制双环掺铒光纤激光器混沌

王 荣 沈 柯

(长春光学精密机械学院理学院, 长春 130022)

(2000 年 10 月 27 日收到)

根据线性反馈法控制混沌的理论及实践成果, 提出了延时线性反馈法控制双环掺铒光纤激光器混沌的具体方案. 计算机模拟结果表明, 适当调节反馈系数和延时时间, 可以实现对双环掺铒光纤激光器混沌的稳定控制.

关键词: 混沌控制, 延时线性反馈, 双环掺铒光纤激光器

PACC: 0545, 4255N, 4260

1 引 言

20 世纪 80 年代, 随着光纤技术及其器件和光通讯的发展, 掺铒光纤激光器的研究及应用受到了国际科技界的广泛重视. 以半导体激光器为抽运的掺铒光纤激光器, 其激射波长在 $1.5 \mu\text{m}$, 正处在光纤通讯的第三传输窗口上, 因此掺铒光纤激光器可作为可靠的信号光源, 在光纤通讯系统中具有十分广阔的应用前景. 由于混沌系统在保密通讯中具有重要意义, 从 90 年代开始, 人们从理论和实验上对掺铒光纤激光器的动力学行为进行了大量研究^[1-10], 并且在实验上利用掺铒光纤激光器的混沌系统的同步实现了保密通讯^[11, 12]. 到目前为止, 还未见关于控制掺铒光纤激光器混沌的报道, 而混沌控制是非线性动力学领域中的重要内容.

从 1990 年 Ott 等^[13]提出 OGY (Ott-Grebogi-Yorke) 法控制混沌以来, 相继出现了其他一些混沌控制的方法和技术. 人们借助于这些方法实现了二氧化碳、半导体等激光器混沌系统的稳定控制^[14-17]. 目前, 对于光纤激光器混沌控制的研究只有一篇报道, 是通过 OGY 法在实验上对掺铒光纤激光器混沌系统的控制^[18]. 本文利用延时线性反馈法, 通过定向耦合器的耦合提出一种控制掺铒环形光纤激光器混沌系统的具体方案. 数值模拟结果表明, 在一定的反馈强度和延时范围内, 可以实现掺铒环形光纤激光器混沌系统的稳定控制.

2 延时线性反馈法控制混沌的方案

根据 Chen 的线性反馈的控制理论^[19], 将混沌系统的某一状态变量以适当强度反馈到系统中, 以实现系统的稳定控制, 则混沌系统中描述该状态变量的动力学微分方程中增加了一个反馈项 $F(t) = \gamma y(t)$. 其中, γ 为控制强度; $y(t)$ 为系统的状态变量. 据此, 我们将某状态变量的延时项以一定的强度反馈到混沌系统中, 从而对混沌系统进行控制. 这样, 反馈项变成这样一种形式, $F(t) = \gamma y(t - \tau)$. 其中, τ 为延时时间. 在该方案中有两个量可作为系统的控制参数, 即反馈强度 γ 和延时时间 τ . 据此我们提出了应用延时线性反馈法控制单模双环掺铒光纤激光器混沌的具体方案, 其原理框图如图 1.

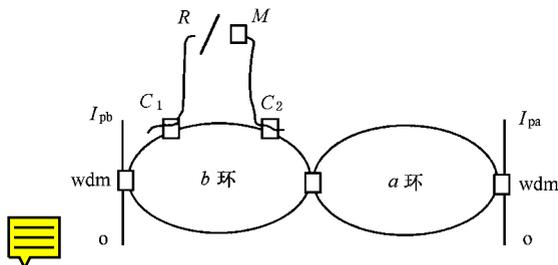


图 1 延时线性反馈控制掺铒环形激光器原理图
(I_{pa} , I_{pb} 为光抽运, wdm 为波分复用器; C_1 , C_2 为定向耦合器;
 R 为反光镜; M 为物镜; o 为输出)

系统中 b 环的部分光由定向耦合器 C_1 耦合出来, 经延时后由定向耦合器 C_2 反馈到系统中, 从而实现对系统的稳定控制. C_1 , C_2 之间光纤的长度决定延时的长短, 满足关系式 $\tau = L/cn$, 其中, L 为光

纤长度, c 为光速, n 为光纤的折射率. 反射镜 R 相当于一控制开关, 当 R 插入光路中时, 从 C_1 耦合出来的光由于被反射镜反射出光路而对系统不产生控制, 而当把 R 从光路中移出时, 则经延时的光将通过物镜进入光纤并进而耦合到系统中, 从而实现对该系统的稳定控制.

考虑到定向耦合器的特性^[19], 耦合到另一光纤中的光场与原光纤中的光场存在 $\pi/2$ 的相移, 我们用复数形式将描述单模双环掺铒光纤激光器混沌系统的方程^[10] 表示成

$$E'_a = -\kappa_a(E_a - j\eta_0 E_b) + g_a E_a D_a, \quad (1)$$

$$E'_b = -\kappa_b(E_b - j\eta_0 E_a) + g_b E_b D_b, \quad (2)$$

$$D'_a = -(1 + I_{pa} + |E_a|^2) D_a + I_{pa} - 1, \quad (3)$$

$$D'_b = -(1 + I_{pb} + |E_b|^2) D_b + I_{pb} - 1. \quad (4)$$

其中, E_a, E_b 分别为 a 环和 b 环激光器中的光场强度; D_a, D_b 分别为两激光器的反转粒子数; I_{pa}, I_{pb} 分别为两激光器的抽运参数; κ_a, κ_b 分别为两激光器的损耗系数; η_0 为定向耦合器的耦合系数; g_a, g_b 分别为两激光器的增益系数. 当对系统进行控制时, 由于定向耦合器使光场的位相后置 $\pi/2$, 同时考虑到经过两个定向耦合器的延时反馈, 则受控系统方程用光场的实部和虚部表示为

$$E'_{ai}(t) = -\kappa_a(E_{ai}(t) + \eta_0 E_{bi}(t)) + g_a E_{ai}(t) D_a, \quad (5)$$

$$E'_{bi}(t) = -\kappa_b(E_{bi}(t) - \eta_0 E_{ai}(t)) + g_b E_{bi}(t) D_b, \quad (6)$$

$$E'_{br}(t) = -\kappa_b(E_{br}(t) + \eta_0 E_{ar}(t) + \gamma E_{br}(t - \tau)) + g_b E_{br}(t) D_b, \quad (7)$$

$$E'_{ar}(t) = -\kappa_a(E_{ar}(t) - \eta_0 E_{br}(t) + \gamma E_{ar}(t - \tau)) + g_a E_{ar}(t) D_a, \quad (8)$$

$$D'_a = -(1 + I_{pa} + |E_a|^2) D_a + I_{pa} - 1 \quad (9)$$

$$D'_b = -(1 + I_{pb} + |E_b|^2) D_b + I_{pb} - 1 \quad (10)$$

$E_{ar}(t), E_{ai}(t)$ 分别表示 a 环激光器中光场强度的实部和虚部; $E_{br}(t), E_{bi}(t)$ 分别表示 b 环激光器中光场强度的实部和虚部; $E_{br}(t - \tau), E_{bi}(t - \tau)$ 分别表示 b 环激光器中延时的光场强度的实部和虚部; 反馈强度由定向耦合器 C_1, C_2 的耦合系数 η_1, η_2 决定, 即

$$\gamma = \eta_1 \eta_2. \quad (11)$$

其他参数的物理意义同上. 另外, 上述方程都是对 $t' = t/\tau_2$ 的微分, τ_2 是激光上能级的寿命.

3 数值模拟

双环掺铒光纤激光器在一定条件下可经过倍周期分岔进入混沌. 模拟中采用四阶龙格-库塔法求解方程(5)~(10), 所用到的各参数见表^[10]. 模拟计算得到的吸引子在光场的实部和虚部平面上的投影图及相应的时间序列见图2和图3.

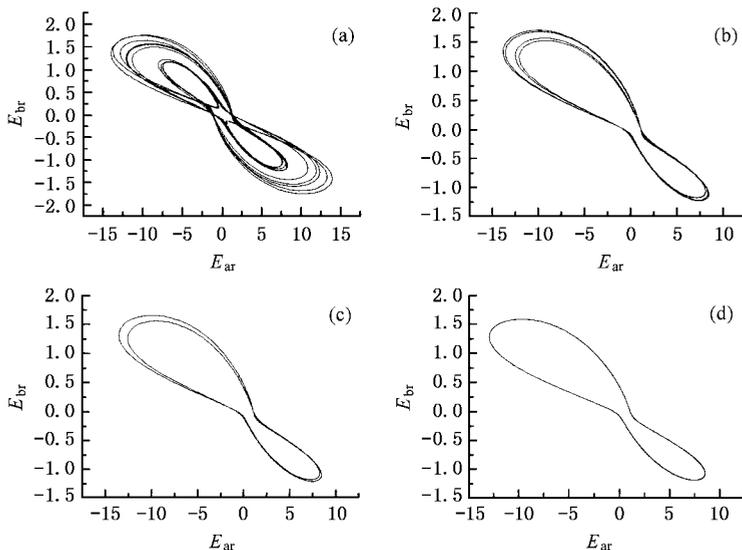


图2 吸引子在相空间中的投影图(任意单位) (a) $k=0$ 系统在没加控制时的混沌吸引子; (b) $k=0.048$ 系统被控制在周期4 (c) $k=0.06$ 系统被控制在周期2 (d) $k=0.08$ 系统被控制在周期1

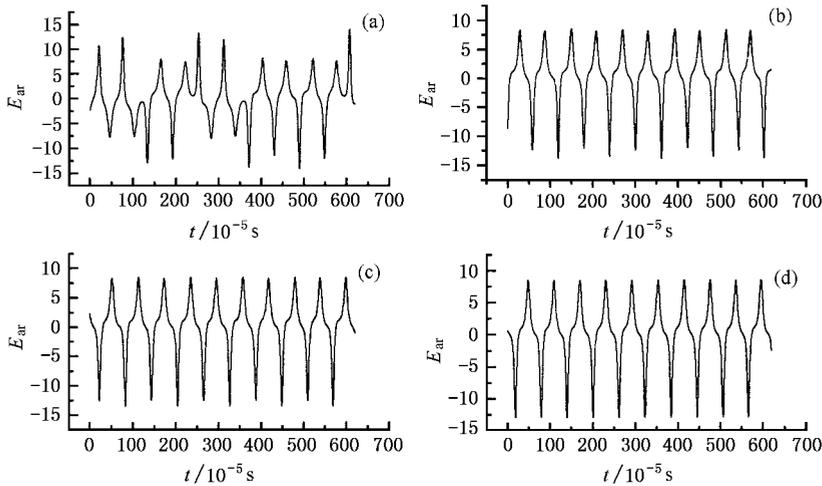


图 3 相应于图 2 的电场强度实部的时间序列(电场任意单位)

表 1 模拟中用到的掺铒光纤激光器的参数

参 数	符 号	数 值
损耗系数	κ_a, κ_b	1000
增益系数	g_a, g_b	4800, 10500
定向耦合器的耦合系数	η_0	0.2
抽运光强	I_{pa}, I_{pb}	4

在模拟过程中,首先使系统处于混沌状态,即将反射镜插入系统中(反馈不起作用,亦即 $\gamma = 0$)。从图 2(a)和图 2(b)可以发现,此时系统处于混沌状态。其次,将反射镜取出($\gamma \neq 0$)使输出光反馈到系统中,从而对混沌系统进行控制。

由控制理论可知,该方案具有两个控制参数。在此首先取 $\tau = 10 \text{ ns}$,而把反馈强度作为控制参数进行数值模拟,从图 2(c)中可发现,当反馈强度分别为 $\gamma = 0.048, 0.06$ 和 0.08 时系统被稳定控制到周期 4、周期 2 和周期 1 的状态上。然后取 $\gamma = 0.04$,而

把延时时间作为控制参数,结果表明,当延时时间分别为 $\tau = 2 \mu\text{s}, 4 \mu\text{s}$ 和 $6 \mu\text{s}$ 时,系统同样可以被控制到周期 4、周期 2 和周期 1 的状态上。其混沌吸引子及时序同图 2 和图 3 中相应的各图。

3 结 论

本文提出了利用延时线性反馈法控制双环掺铒光纤激光器混沌系统的具体方案。该方案有两个控制参量。数值模拟结果表明,适当调节任意一参量都可实现对混沌系统的稳定控制。在实际应用中,定向耦合器的耦合系数可根据(11)式适当选取。另外,根据我们模拟结果可知,两定向耦合器间用于延时的光纤长度不超过 3 m 时即可实现稳定控制的要求,这一长度在实际中还是能够做到的。

[1] E. Lacot, F. Stoeckel, M. Chenevier, *Phys. Rev.*, **A49**(1994) 3997.
 [2] P. Le Boudec, C. Jaouen, P. L. Francois, J. R. Bayon, F. Sanchez, P. Besnard, G. Stephan, *Opt. Lett.*, **18**(1993) 1890.
 [3] F. Sanchez, P. Le Boudec, P. L. Francois, G. Stephan, *Phys. Rev.*, **A48**(1993) 2220.
 [4] F. Sanchez, M. Le Flohic, G. M. Stephan, P. Leboudec, P. L. Francois, *IEEE J. Quantum Electron.*, **21**(1995) A81.
 [5] F. Sanchez, G. Stephan, *Phys. Rev.*, **E53**(1996) 2110.
 [6] Q. L. Williams, R. Roy, *Opt. Lett.*, **21**(1996) 1478.
 [7] Q. L. Williams, J. Garcia-Ojalvo, R. Roy, *Phys. Rev.*, **A55**(1997), 2376.

[8] J. Garcia-Ojalvo, R. Roy, *Phys. Lett.*, **A229**(1997) 362.
 [9] H. D. I. Abarbanel, M. B. Kennel, M. Buhl, C. T. Lewis, *Phys. Rev.*, **A60**(1999) 2360.
 [10] L. Luo, T. J. Tee, P. L. Chu, *J. Opt. Soc. Am.*, **B15**(1998) 972.
 [11] G. D. Van Wiggeren, R. Roy, *Phys. Rev. Lett.*, **81**(1998) 3547.
 [12] G. D. Van Wiggeren, R. Roy, *Science*, **279**(1998) 1198.
 [13] E. Ott, C. Grebogi, J. A. Yorke, *Phys. Rev. Lett.*, **64**(1990) 1196.
 [14] Y. Liu, J. Ohtsubo, *Opt. Lett.*, **19**(1994) 448.
 [15] Chun-ming Gu, Ke Shen, *Acta Physica Sinica*, **18**(1999) 733.
 [16] C. Simmendinger, O. Hess, *Phys. Lett.*, **A216**(1996) 97.

- [17] A. T. Ryan , G. P. Agrawal , G. R. Gray , E. C. Gage , *IEEE Journal of Quantum Electronics* **30**(1994) 668. R2492.
- [18] S. Bielawski , D. Derozier , P. Glorieux , *Phys. Rev.* , **A47**(1993) ,
- [19] G. Chen , *IEEE Inst. Symp. on Circuits and Systems* **1**(1993) , 139.

CONTROLLING CHAOTIC BEHAVIOUR IN ERBIUM-DOPED FIBER DUAL-RING LASER WITH LINEAR TIME-DELAYED FEEDBACK

WANG RONG SHEN KE

(Department of Optical Physics , Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics , Changchun 130022 , China)

(Received 27 October 2000)

ABSTRACT

A method of chaos control with linear time-delayed feedback based on the scheme of linear feedback is presented in this paper. By using the method, we propose a scheme of controlling chaotic behavior in erbium-doped fiber dual-ring laser with one polarized mode. The results of the computer simulation show that controlling the chaos into the stable states could be realized by adjusting the feedback coefficient and delay time.

Keywords : chaos control , linear time-delayed feedback , erbium-doped fiber dual-ring laser

PACC : 0545 , 4255N , 4260