

一种控制掺铒光纤激光器超混沌的方法 ——非线性延时反馈参数调制法

张胜海[†] 杨 华 钱兴中

(中国人民解放军信息工程大学理学院数理系, 郑州 450001)

(2004 年 2 月 2 日收到; 2004 年 3 月 8 日收到修改稿)

提出一种非线性延时反馈参数调制法来控制混沌/超混沌, 给出了利用这种方法控制处于超混沌状态的双环掺铒光纤激光器的方案. 数值模拟表明, 只要延时时间和反馈强度合适就可以把双环掺铒光纤激光器从超混沌状态成功地控制到不同的周期状态.

关键词: 掺铒光纤激光器, 超混沌, 非线性延时反馈参数调制, 混沌控制

PACC: 0545, 4255

1. 引 言

自从 1990 年 Ott 等人^[1]提出混沌控制以来, 混沌和超混沌的控制已经成为混沌领域的一个重要课题. 众多学者对不同混沌系统的控制方法进行了深入研究^[2-5]. Biolanski 等人^[6]于 1993 年提出了直接把系统的输出变量经非线性函数作用后, 再作用于系统参数的控制方法. 而 de Sousa Veira 和 Lichtenberg^[7]于 1996 年在线性反馈控制法的基础上提出了非线性反馈控制混沌的方法, 其基本思想是把系统的某一输出变量与其前一时刻的输出变量的差经非线性函数作用后, 反馈到系统中去, 从而达到控制混沌的目的. 基于这两种方法, 本文提出非线性延时反馈参数调制法, 其基本思想是, 把系统某一变量的输出和其前一时刻的输出经非线性函数作用后, 作为控制信号作用于系统的某一参数, 来达到控制混沌和超混沌的目的. 掺铒光纤激光器由于其工作波长(约为 1.55 μm)恰处于光纤损耗的最低窗口附近而倍受重视. 众多学者^[8-12]对掺铒光纤激光器的混沌和超混沌进行了研究. 然而, 对掺铒光纤激光器的混沌/超混沌的研究并不多, 就我们所知, Wang 等人^[13]采用延时反馈法成功控制了双环掺铒光纤激光器的混沌. 文献[14]采用参数调制法研究了双环掺铒光纤激光器的超混沌控制. 本文利用非线性延时反馈参数调制法对双环掺铒光纤激光器的超混

沌进行了有效控制.

2. 非线性延时反馈参数调制法

为了方便, 结合双环掺铒光纤激光器系统的混沌/超混沌控制来介绍非线性延时反馈参数调制法, 图 1 为其控制原理图. 由双环掺铒光纤激光器 a 环输出的激光由耦合器 C 耦合出一部分作为反馈信号, 这一部分再分为两小部分, 其中一部分经过延时器 D 进入光电接收器 H_1 , 另一部分直接进入光电接收器 H_2 , 然后这两路电信号通过减法器后的输出信号加在 a 环上的损耗调制器来控制 a 环中光场的损耗. 在这一过程中, 光电接收器所获得的信号由光强决定. 双环掺铒光纤激光器的动力学方程^[9]为

$$\frac{\partial E_a}{\partial \tau} = -\kappa_a(E_a + \Gamma_b E_b) + g_a E_a D_a, \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_b}{\partial \tau} = -\kappa_b(E_b - \Gamma_b E_a) + g_b E_b D_b, \quad (2)$$

$$\frac{\partial D_a}{\partial \tau} = -(1 + I_{pa} + |E_a|^2) D_a + I_{pa} - 1, \quad (3)$$

$$\frac{\partial D_b}{\partial \tau} = -(1 + I_{pb} + |E_b|^2) D_b + I_{pb} - 1, \quad (4)$$

其中 E_a, E_b 分别表示 a 环和 b 环中的规格化激光场强, D_a, D_b 分别表示 a 环和 b 环中规格化的粒子反转数, I_a, I_b 分别表示 a 环和 b 环中的抽运光光强, κ_a, κ_b 分别表示 a 环和 b 环中的损耗系数, $g_a,$

[†] E-mail: ceshez@163.com

g_b 分别表示 a 环和 b 环中的增益系数, η_0 为定向耦合器 C_0 对 $1.55\mu\text{m}$ 波长光的耦合系数, τ 为归一化时间, $\tau = t/\tau_2$, τ_2 为 Er^{3+} 离子亚稳态寿命, $\tau_2 \approx 10\text{ms}$. 本文把亚稳态寿命当作 10ms 来处理, 即 $\tau_2 = 10\text{ms}$.

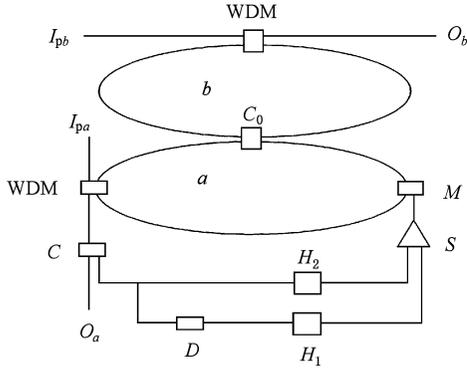


图1 非线性延时反馈参数调制法控制双环掺铒光纤激光器原理图 C_0, C 为定向耦合器; WDM 为波分复用耦合器; I_{pa}, I_{pb} 为抽运光光强; D 为延时器; H_1, H_2 为光电接受器; S 为减法器; M 为损耗调制器

实施反馈控制后, 激光器的 a 环损耗系数变为

$$\kappa_a = (1 + mF(\tau)) \kappa_{a0}, \quad (5)$$

其中 m 为反馈强度, κ_{a0} 为系统没有反馈时的损耗系数, $F(\tau)$ 为反馈控制信号,

$$F(\tau) = I_a(\tau - \tau_d) - I_a(\tau) = |E_a(\tau - \tau_d)|^2 - |E_a(\tau)|^2. \quad (6)$$

本文采用对损耗系数进行调制, 也可以对其他参数(如抽运参数等)进行调制来达到控制混沌/超混沌的目的. 在这种控制方法中, 有两个可调参数, 即反馈强度 m 和延时时间 τ_d . 对系统进行控制后, 此函

数为光场的非线性函数, 其中 τ 为延时时间. 当然, 非线性函数的形式可以不同, 本文采用方程(6)所描述的函数.

3. 数值模拟

由文献[14]可知双环掺铒光纤激光器在没有非线性反馈控制时, 其参数取值为 $\eta_0 = 0.2$, $\kappa_{a0} = \kappa_b = 1000$, $I_{pa} = I_{pb} = 4$, $g_a = 10500$, $g_b = 4700$ 时, 系统的

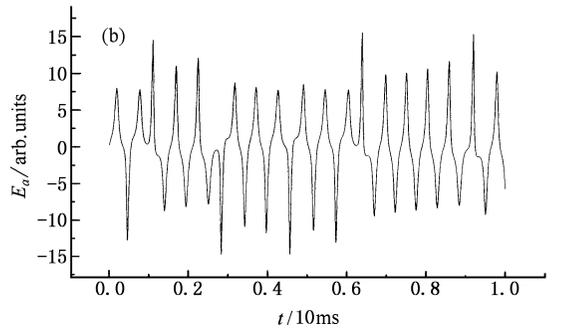
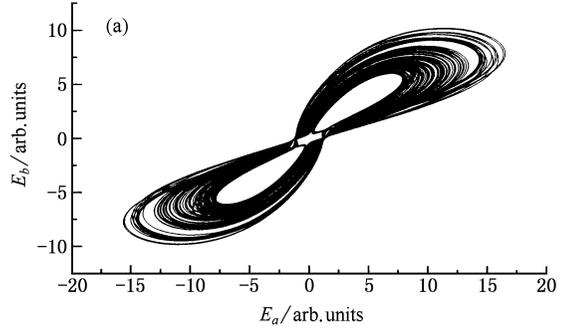


图2 双环掺铒光纤激光器的奇怪吸引子在 E_a-E_b 平面上的投影和 E_a 的时间序列 $\eta_0 = 0.2$, $\kappa_a = \kappa_b = 1000$, $I_{pa} = I_{pb} = 4$, $g_a = 10500$

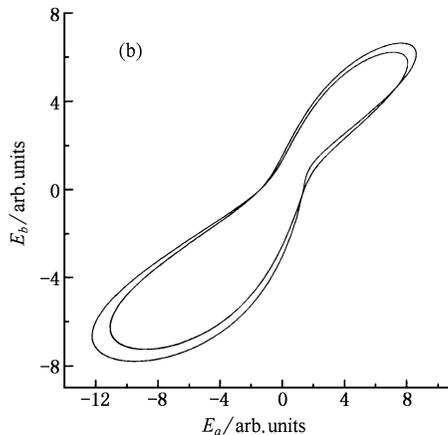
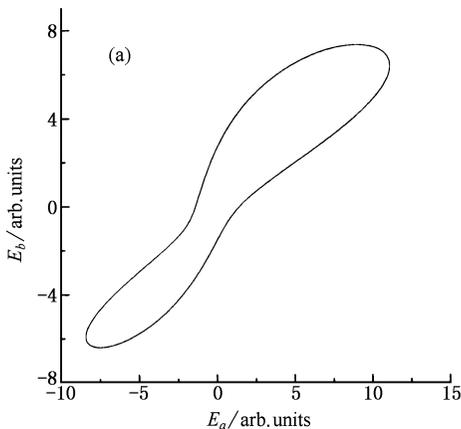


图3 双环掺铒光纤激光器被控制到周期1和周期2的吸引子在相平面 E_a-E_b 上的投影 (a) 为 $m = 1.0 \times 10^{-4}$, $\tau = 9.6 \times 10^{-5}\text{s}$, (b) 为 $m = 1.0 \times 10^{-4}$, $\tau = 3.6 \times 10^{-5}\text{s}$

Lyapunov 指数谱为 (11.0443, 0.0264, - 49.4674, - 69.2164), 因此系统处于超混沌状态. 图 2 为系统的超混沌吸引子在相平面 E_a-E_b 上的投影和光场 E_a 的时间序列. 加上控制后, 其他参数不变, K_a 受到调制, $K_{a0} = 1000$. 图 3 为处于超混沌状态的双环掺铒光纤激光器系统被控制到周期 1 和周期 2 的吸引子在相平面 E_a-E_b 上的投影. 图 3(a) 为系统被控制到周期 1 状态, 此时两个控制参数为 $\tau_{d1} = 9.6 \times 10^{-4}$ s, $m = 6.5 \times 10^{-4}$. 图 3(b) 的控制参数则为 $\tau_{d1} = 3.6$

$\times 10^{-4}$ s, $m = 6.5 \times 10^{-4}$, 可以把系统控制到周期 2 状态. 图 4 为与图 3 相应的 E_a 的时间序列及其功率谱. 因此, 在不同的控制参数条件下, 只要控制参数合适, 就可以把双环掺铒光纤激光器控制到不同的周期状态. 在数值模拟中我们发现, 利用这种非线性延时反馈参数调制法来控制系统的超混沌, 其效率很高, 不需要太大的控制信号, 反馈强度很小就能达到控制混沌的目的. 本文是以控制系统的超混沌为例来验证这种方法的有效性, 当然对于控制混沌系统, 则一定有效, 因为超混沌系统比混沌系统更不稳定. 在数值模拟中发现, 只要延时时间合适, 就能把系统从混沌状态控制到周期态, 但是, 延时时间并不等于所控制到的周期态的周期, 这就决定了当系统的混沌/超混沌被控制后, 反馈信号并不为零, 也就使得系统的动力学发生了改变, 这也是该方法和连续反馈控制法的不同.

4. 结 论

非线性延时反馈参数调制法是一个有效且操作起来很方便的方法. 因为在实验中, 它不需要知道系统的具体动力学方程, 也不需要像连续反馈控制法那样需要一个特殊的信号发生器, 只要把反馈强度和延时时间调整到合适的匹配值, 就可以把混沌/超混沌控制到某些周期状态. 但是, 这种方法最大的缺点就是它带有一定的盲目性, 因为不知道目标信号, 也就无从知道要把混沌/超混沌信号控制到怎样的周期状态, 只是知道通过调整反馈强度和延时时间, 可以把系统从混沌/超混沌状态控制到某一周期态, 具体怎样的周期态, 并不知道. 尽管如此, 这种方法对于控制光学混沌仍然十分有用, 特别是对于那些只需要把混沌/超混沌控制到周期态的情况, 它更是一个方便、有效、快捷的方法.

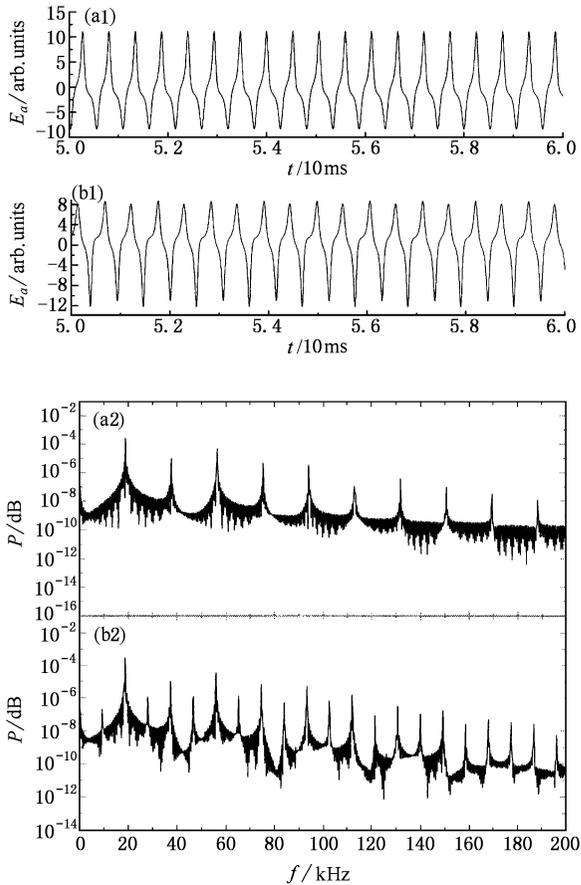


图 4 与图 3 相应的 E_a 的时间序列及其功率谱

- | | |
|--|---|
| [1] Ott E, Gbogi C and Yorke J A 1990 <i>Phys. Rev. Lett.</i> 64 1196 | [8] Luo L G and Chu P L 1997 <i>Opt. Commun.</i> 135 116 |
| [2] Roy R et al 1992 <i>Phys. Rev. Lett.</i> 68 1259 | [9] Luo L G and Chu P L 1998 <i>J. Opt. Soc. Am. B</i> 15 972 |
| [3] Dykstra R, Tang D Y and Heckenberg N R 1998 <i>Phys. Rev. E</i> 57 6576 | [10] Sanchez F and Stephan G 1996 <i>Phys. Rev. E</i> 53 2110 |
| [4] Zhang J S 2000 <i>Chin. Phys.</i> 9 408 | [11] Vanweiggem G D and Roy R 1998 <i>Science</i> 279 1198 |
| [5] Lü J H and Zhang S C 2002 <i>Chin. Phys.</i> 11 12 | [12] Vanweiggem G D and Roy R 1998 <i>Phys. Rev. Lett.</i> 81 3541 |
| [6] Biłarski S, Derozier P and Glorieux P 1993 <i>Phys. Rev. A</i> 47 3276 | [13] Wang R and Shen K 2001 <i>Acta Phys. Sin.</i> 50 1024 (in Chinese) [王荣、沈珂 2001 物理学报 50 1024] |
| [7] de Sousa Veira M and Lichtenberg A J 1996 <i>Phys. Rev. E</i> 54 1200 | [14] Zhang S H and Shen K 2003 <i>Chin. Phys.</i> 12 149 |

A method for controlling hyperchaos of Er-doped fiber laser ——Nonlinear time-delay feedback modulating-parameter

Zhang Sheng-Hai Yang-Hua Qian Xing-Zhong

(Department of Mathematics and Physics, Institute of Science, Chinese People's Liberation Army Informational Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

(Received 2 February 2004; revised manuscript received 8 March 2004)

Abstract

We present a method of nonlinear time-delay feedback modulating-parameter to control chaos/hyperchaos. A scheme of controlling the hyperchaotic dual-ring Er-doped fiber laser by using this method is proposed. Numerical simulation shows that a hyperchaotic dual-ring Er-doped fiber laser can be successfully controlled into different periodic states by this method only when the delay time and feedback intensity are suitably matching.

Keywords: Er-doped fiber laser, hyperchaos, nonlinear time-delay feedback modulating-parameter, controlling chaos

PACC: 0545, 4255