

基于反馈参数调制的掺铒光纤激光器混沌同步^{*}

范文华¹⁾ 田小建^{1)†} 于永力¹⁾ 陈菊芳^{1)‡} 罗红娥¹⁾

1) 吉林大学电子科学与工程学院, 长春 130012)

2) 东北师范大学物理学院, 长春 130024)

(2005 年 9 月 1 日收到, 2006 年 1 月 6 日收到修改稿)

提出了一种基于反馈参数调制控制超混沌同步的方法, 并应用于双环掺铒光纤激光器系统. 针对此种方法所具有的相位模糊问题, 设计出了自动消除反相位的电路. 数值模拟表明只要适当选择反馈强度值, 就能实现两双环掺铒光纤激光器系统的精确同步.

关键词: 超混沌同步, 双环掺铒光纤激光器, 反馈参数调制法, 反相位

PACC: 0545, 4255

1. 引言

自从 1990 年 Pecora 和 Carroll 提出混沌同步以来^[1], 混沌同步及其在保密通信中的应用引起了人们的广泛关注, 并进行了大量的研究^[2-7]. 由于光通信速度和容量的明显优势, 人们越来越多地把目光从电子通信系统转向光通信系统^[8,9]. 其中掺铒光纤激光器因工作波长(约为 1.55 μm)恰处于光纤损耗的最低窗口而备受重视, 人们对掺铒光纤激光器的混沌和超混沌动力学特性的研究较多^[10,11], 而对掺铒光纤激光器的混沌、超混沌同步的研究相对较少. 1998 年 Luo 等人^[12]采用调制单环掺铒光纤激光器损耗的方法实现了混沌同步, 奠定了利用掺铒光纤激光器实现保密通信的基础; 随后出现了利用调制抽运功率和调制损耗系数实现两个单环掺铒光纤激光器混沌同步的方法^[11]; 文献[13]则利用驱动两个双环系统的方法实现了双环掺铒光纤激光器混沌系统的同步. 本文利用非线性反馈参数调制法对双环掺铒光纤激光器进行了超混沌同步的研究, 不仅实现了两双环掺铒光纤激光器系统的同步, 而且克服了系统本身所固有的相位模糊问题.

2. 非线性反馈参数调制法

由文献[13]可知, 双环掺铒光纤激光器结构如

图 1 左侧所示, 动力学方程式可表示为^[10]

$$\dot{E}_a = -k_a(E_a + \mu_0 E_b) + g_a E_a D_a, \quad (1a)$$

$$\dot{E}_b = -k_b(E_b - \mu_0 E_a) + g_b E_b D_b, \quad (1b)$$

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

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

环 a 和环 b 各有一个波分复用器(WDM)和一段掺铒光纤. (1)式中 I_{pa} 和 I_{pb} 分别为环 a 和环 b 的抽运光强, E_a , E_b 分别为环 a 和环 b 的输出激光场强, D_a , D_b 分别表示两环中归一化反转粒子数, k_a , k_b 分别表示环 a 和环 b 中的损耗系数, g_a , g_b 分别表示环 a 和环 b 中的增益系数, μ_0 为定向耦合器 C_0 对 1.55 μm 波长光的耦合系数. 字母上的点表示 $d/d\tau$, τ 为归一化时间, $\tau = t/\tau_2$, τ_2 为 Er^{3+} 亚稳态寿命, $\tau_2 \approx 10\text{ms}$, 本文取 10ms. 两环通过耦合器 C_0 耦合在一起. 当两环中的激光强频率锁定以后, 一个环中的激光经过 $\pi/2$ 相移进入到另一环中.

为了实现同步, 我们复制一个完全相同的接收(响应)系统, 动力学方程式(2)为

$$\dot{E}'_a = -k'_a(E'_a + \mu'_0 E'_b) + g'_a E'_a D'_a, \quad (2a)$$

$$\dot{E}'_b = -k'_b(E'_b - \mu'_0 E'_a) + g'_b E'_b D'_b, \quad (2b)$$

$$\dot{D}'_a = -(1 + I'_{pa} + E'^2_a)D'_a + I'_{pa} - 1, \quad (2c)$$

$$\dot{D}'_b = -(1 + I'_{pb} + E'^2_b)D'_b + I'_{pb} - 1. \quad (2d)$$

将驱动系统和响应系统对应信号的非线性之差作为反馈信号来控制环 a' 的损耗调制器, 结构如图 1 所

^{*} 国家自然科学基金项目(批准号 60372061)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: yangyue@mail.jlu.edu.cn

示.图中驱动系统的输出光信号 E_a 和响应系统的输出光信号 E'_a 经过光电探测器 D 后变为光电流信号 $I_a(t) = RP = R\kappa\mu_0^2 |E_a(t)|^2$ 和 $I_b(t) = RP' = R\kappa\mu_0^2 |E'_a(t)|^2$,其中 R 为光电探测器响应度, P 和 P' 为入射光功率, κ 为系数.光电流再经过电流电压转换器得到电压信号 $V(t) = rR\kappa\mu_0^2 |E_a(t)|^2$ 和 $V'(t) = rR\kappa\mu_0^2 |E'_a(t)|^2$,其中 r 表示电流电压转换系数.两路电压之差 $\Delta(t) = V'(t) - V(t)$ 可以作为反馈信号来控制损耗调制器 M ,从而改变响应系统的损耗系数 k'_a .此时损耗系数可以表示为

$$\begin{aligned} k'_a &= k'_{a0}[1 + n\Delta(t)] \\ &= k'_{a0}\{1 + n[V'(t) - V(t)]\} \\ &= k'_{a0}\{1 + nrR\kappa\mu_0^2[|E'_a(t)|^2 - |E_a(t)|^2]\} \\ &= k'_{a0}(1 + m f(t)), \end{aligned} \tag{3}$$

其中 k'_{a0} 为响应系统未加调制时的损耗系数, n 为反馈系数, $m = nrR\kappa\mu_0^2$ 为反馈强度, $f(t) = |E'_a(t)|^2 - |E_a(t)|^2$ 为反馈控制信号.显然此函数为激光场强 E_a, E'_a 的非线性差函数.适当选择 m 值即可实现非线性反馈参数调制法的混沌同步.这就是基于反馈参数调制同步法的基本原理.

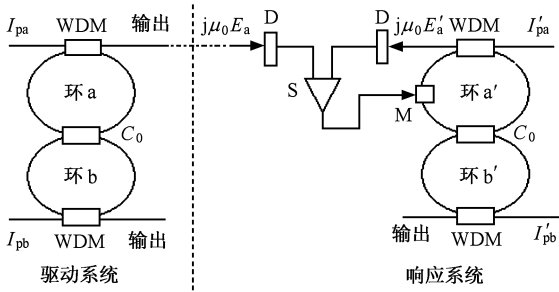


图1 非线性反馈参数调制法同步结构图 C_0 表示定向耦合器,WDM表示波分复用器, I_{pa}, I_{pb}, I'_{pa} 和 I'_{pb} 表示抽运光强, D 表示光电探测器, S 表示减法器, M 表示环 a' 的损耗调制器

3. 数值计算

由文献 [14] 可知,当双环掺铒光纤激光器的参数取值 $k_a = k_b = 1000, I_{pa} = I_{pb} = 4, \mu_0 = 0.2, g_a = 10500, g_b = 4700$ 时,系统(1)的 Lyapunov 指数为 $(11.0443, 0.0264, -49.4674, -69.2164)$,由于有两个 Lyapunov 指数大于 0,因此系统处于超混沌状态.利用 Rung-Kutta 法进行仿真分析,得到了如图 2 所示系统的相图和功率谱图.由功率谱图可见系统的频谱是噪声频谱和周期频谱的叠加,具有类噪声频谱的性质,这正是典型的混沌运动特征.

构造如图 1 所示的同步系统,响应系统与驱动系

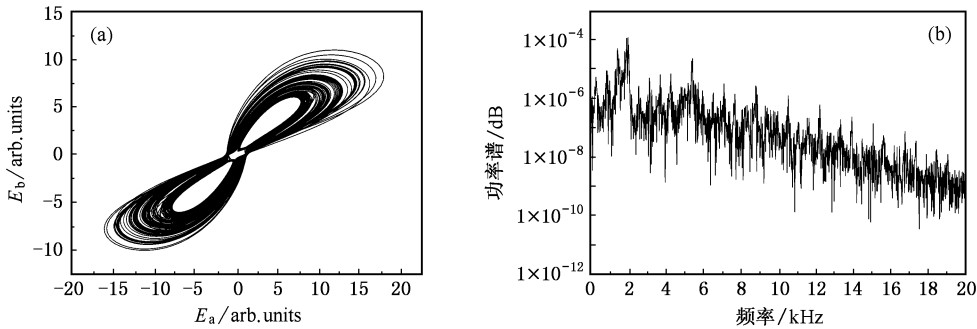


图2 双环掺铒光纤激光器(a)相图和(b)功率谱

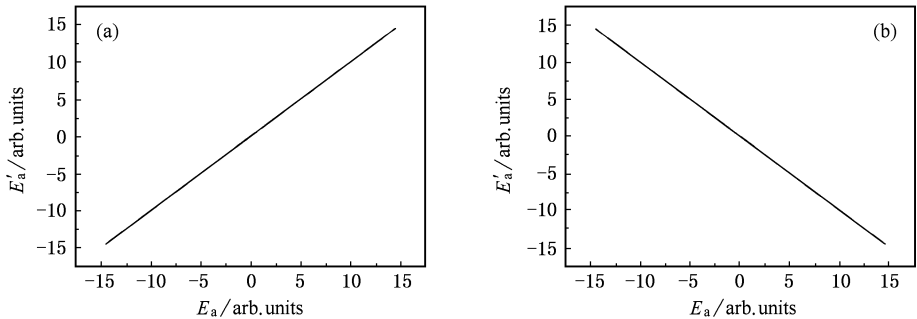


图3 驱动系统和响应系统的同步相图 (a) 同相位同步(初值 $E_a = 2.4, E_b = 1.2, D_a = 0.15, D_b = 0.16, E'_a = 8, E'_b = 1.4, D'_a = 0.15, D'_b = 0.11$) (b) 反相位同步(初值 $E_a = -2.4$ 其他初值同(a))

统参数取值相同,初始值不同,仿真结果表明,当 $0.01 < m < 0.052$ 时,两系统能实现同步.但值得注意的是:当系统取某些初值时(如图 3(a)),响应系统与驱动系统实现同相位同步,而当系统取另一些初值时(如图 3(b)),驱动系统与响应系统处于反相位同步状态.由此可知,利用本文提出的非线性反馈参数调制法实现混沌同步会出现相位模糊的问题,对于应用混沌同步进行保密通信来说,其可靠性必然会大大降低,下面我们分析如何消除或者避免反相位的出现.

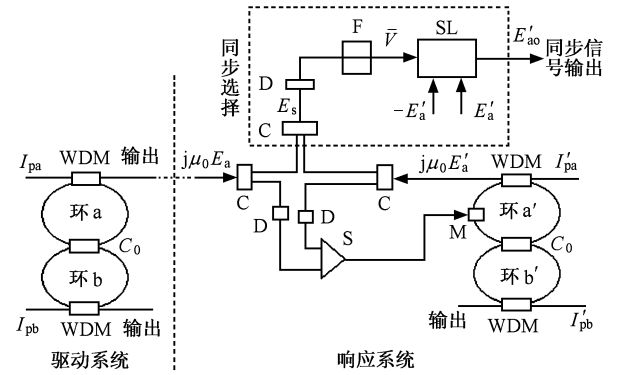


图 4 反馈电路和反相位消除电路 SL 为选择器件,它根据输入电压 \bar{V} 的不同选择 E'_a 或者 $-E'_a$ 作为输出, F 表示平滑滤波器; E'_{ao} 表示同相位同步信号

4. 消除反相位实现精确同步

由于驱动系统和响应系统是靠 $|E_a|^2$ 联系,因

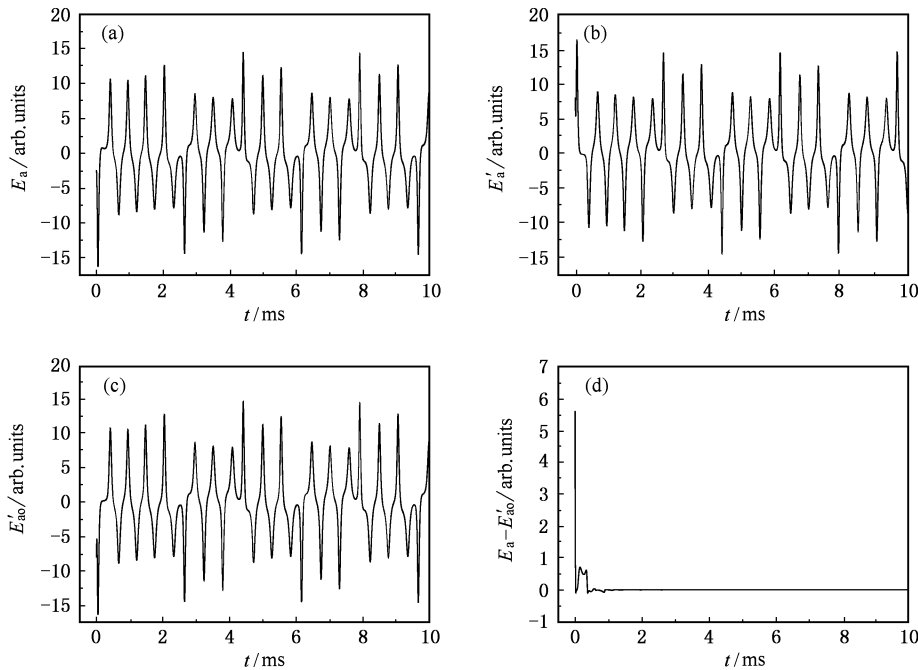


图 5 消除反相位混沌同步(初值与图 3(b)相同)(a)驱动系统 E_a ;(b)响应系统 E'_a ;(c)抑制反相位的输出 E'_{ao} ;(d)差信号 $E_a - E'_{ao}$

此损耗系数的调制不能体现出 E_a 的相位特性,当两个双环掺铒光纤激光器系统的初值处于同一收敛方向时,表现为同相位同步,反之则表现为反相位同步.当两系统的初值取任意值时,其相位特性就很难确定.考虑到这种同步方法只出现同相位同步和反相位同步两种情况,采取如下方法即可消除反相位而实现同相位同步.同步选择电路如图 4 所示:驱动系统激光场强 E_a 和响应系统激光场强 E'_a 经耦合器 C 的作用后得到

$$E_s = \eta \mu_0 (E_a + E'_a), \tag{4}$$

其中 η 为耦合系数. E_s 经光电探测器 D 、电流电压转换器、平滑滤波器得电压信号

$$\bar{V} = r\bar{I} = rR\bar{P} = rRk\eta^2\mu_0^2 |E_a + E'_a|^2, \tag{5}$$

式中各参数含义同(3)式.若经过一段暂态时间 E_a 和 E'_a 实现同相位同步,即 $E_a = E'_a$,则 $\bar{V} = 4rRk\eta^2\mu_0^2 |E_a|^2$;反之若 E_a 和 E'_a 反相位同步,即 $E_a = -E'_a$,则 $\bar{V} \approx 0$.以此为根据构造以下选择电路

$$E'_{ao} = \begin{cases} E'_a & \bar{V} > \Delta \\ -E'_a & \bar{V} < \Delta \end{cases}$$

$$\text{取 } 0 < \Delta < 2rRk\eta^2\mu_0^2 |E_a|_{\max}^2, \tag{6}$$

仿真结果表明当 $0.01 < m < 0.052$ 时,不论系统初值如何变化都能实现 E'_{ao} 与 E_a 的同相位同步.取 $m = 0.038$ $\Delta = 0.4$,仿真结果如图 5 所示,此时两个双环掺铒光纤激光器系统真正实现了超混沌的精确同步.

5. 结 论

本文利用非线性反馈参数调制法实现了两个双环掺铒光纤激光器系统的超混沌同步. 在此方法中利用驱动系统环 a 的激光场强 E_a 和响应系统的激

光场强 E'_a 的探测电压信号之差来调制响应系统中环 a' 的损耗系数, 通过反相位自动消除电路, 成功避免了相位模糊问题, 实现了真正意义上的超混沌同步, 同时也为利用双环掺铒光纤激光器系统进行保密通信提供了良好的途径.

[1] Pecora L M , Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821

[2] Pyragas K 1993 *Phys. Lett. A* **181** 203

[3] Lai J W , Zhou S P , Li G H *et al* 2001 *Acta. Phys. Sin.* **50** 0021 (in Chinese) [赖建文、周世平、李国辉等 2001 物理学报 **50** 0021]

[4] Chen J F , Zhang R Y , Peng J H 2003 *Acta. Phys. Sin.* **52** 1589 (in Chinese) [陈菊芳、张入元、彭建华 2003 物理学报 **52** 1589]

[5] Chen S H , Li J H 2002 *Chaos, Solitons and Fractals* **14** 643

[6] Li J F , Li N , Lin H 2004 *Acta. Phys. Sin.* **53** 1694 (in Chinese) [李建芬、李 农、林 辉 2004 物理学报 **53** 1694]

[7] Yu H J , Liu Y Z 2005 *Acta. Phys. Sin.* **54** 3029 (in Chinese) [于洪洁、刘延柱 2005 物理学报 **54** 3029]

[8] Yan S L 2005 *Acta. Phys. Sin.* **54** 1098 (in Chinese) [颜森林 2005 物理学报 **54** 1098]

[9] Uchida A , Kinugawa S , Yoshimori S 2003 *Chaos, Solitons and Fractals* **17** 363

[10] Luo L G , Tee T J , Chu P L 1998 *J. Opt. Soc. Am. B* **15** 972

[11] Imai Y , Murakawa H , Imoto T 2003 *Opt. Commun.* **217** 415

[12] Luo L G , Chu P L 1998 *J. Opt. Soc. Am. B* **15** 2524

[13] Wang R , Shen K 2001 *Phys. Rev. E* **65** 016207

[14] Zhang S H , Shen K 2003 *Chinese Physics* **12** 0149

Synchronizing erbium-doped fiber dual-ring lasers by using the method of feedback modulating-parameter^{*}

Fan Wen-Hua¹⁾ Tian Xiao-Jian^{1)†} Yu Yong-Li¹⁾ Chen Ju-Fang¹⁾²⁾ Luo Hong-E¹⁾

1) *College of Electronic Science And Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China*

2) *College of Physics, Northeast Normal University, Changchun 130024, China*

(Received 1 September 2005 ; revised manuscript received 6 January 2006)

Abstract

A method of feedback modulating-parameter is presented to synchronize hyperchaotic systems, and is applied to the hyperchaotic erbium-doped fiber dual-ring laser systems. A circuit is designed in the laser synchronization system to avoid phase-vagueness automatically. Numerical simulation shows that two hyperchaotic erbium-doped fiber dual-ring lasers can be identically synchronized, when the feedback intensity is suitably selected.

Keywords : hyperchaotic synchronization, erbium-doped fiber dual-ring laser, feedback modulating-parameter, antiphase

PACC : 0545, 4255

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60372061).

[†] Corresponding author. E-mail : yangyue@mail.jlu.edu.cn