

doi:10.13756/j.gtxyj.2021.05.009

光电器件研究与应用

基于半导体激光器的信号有限时同步传输技术

赵丽娜, 魏庆涛, 吕 翎

(大连科技学院 电气工程学院, 辽宁 大连 116052)

摘要:针对电流调制半导体激光器的信号有限时同步传输问题设计了技术方案。文章首先对电流调制半导体激光器的特性进行了理论分析。在此基础上,利用滑模控制方法设计了独特的滑模面和滑模控制器,完成了电流调制半导体激光器对目标信号的有限时同步传输。研究表明,该项技术不但能够保证电流调制半导体激光器在有限的时间内完成对目标信号的同步传输,而且通过简单调节滑模面中的参量便可控制滑模面收敛的快慢。同时,该项技术对目标信号没有任何限制。

关键词: 同步传输; 有限时; 滑模控制; 电流调制半导体激光器

中图分类号: O439

文献标志码: A

文章编号: 1005-8788(2021)05-0057-04

Finite-time Synchronization Transmission Technology of Signal based on Semiconductor Laser

ZHAO Li-na, WEI Qing-tao, Lü Ling

(School of Electrical Engineering, Dalian University of Science and Technology, Dalian 116052, China)

Abstract: A new method is proposed to solve the problem of finite-time synchronization transmission of signal in the current modulated semiconductor laser. Firstly, the characteristics of current modulated semiconductor laser are analyzed theoretically. Then, the unique sliding mode surface and sliding mode controller are designed to achieve the finite-time synchronization transmission of the target signal by using sliding mode control method. The results show that the technology can not only ensure that the current modulated semiconductor laser can complete the synchronization transmission of the target signal in a finite time, but also control the convergence speed of the sliding surface by simply adjusting the parameter in the sliding surface. In the meantime, the technology has no restrictions on the target signal.

Key words: synchronization transmission; finite-time; sliding mode control; current modulated semiconductor laser

0 引 言

半导体激光器除了具有其他各类激光器的共同特点以外,还具有制作过程简洁易于调制、驱动功率和电流较低、工作效率高、可以直接电调制以及易于与各种光电子器件实现光电子集成等独特优势。基于这些优势,半导体激光器被广泛应用于光信息处理、保密通信和光传输等领域,涌现出许多富有成效的研究成果^[1-6]。

一般来说,利用半导体激光器进行光信号传输,理论上相当于对半导体激光器的光输出加以控制或通过施加控制输入,使半导体激光器的光输出与人们期望的目标信号一致。典型的工作,如颜森林研究了两个不同半导体激光器的相互耦合与其他激光器之间混沌信号的同步传输问题,并展望了其在保密通信中的应用^[7];孙军伟等人基于自适应控制技术完成了多混沌系统信号的多级组合传输^[8];张文亮和卢社阶利用半导体激光器建立了双信道的光纤

保密通信模型,并利用该模型加密传输信息,实现了光纤保密通信^[9];张依宁等人将单路光反馈的半导体激光器的输出按比例注入到另一个双路滤波光反馈的半导体激光器中,用于抑制混沌激光的带宽^[10]。

随着研究的不断深入,人们针对半导体激光器进行光信号传输已设计了多种技术方案,典型的技术有驱动响应法、主动被动法、耦合控制法以及反馈控制法等^[11-14]。这些成熟有效的同步传输技术拓宽了半导体激光器原有的应用范围,并在诸多领域发挥着重要作用。然而,目前的同步传输技术判定光信号完成了同步传输,在理论上要求时间在趋于无穷的情况下才能够渐进稳定,这显然不是我们所需要的。在实际应用过程中,人们常常需要在尽可能短的时间内或可估算的时间内完成光信号的同步传输,这便是光信号的有限时同步传输问题。迄今,这方面的研究还鲜有报道。鉴于以上讨论,本文基于滑模控制技术设计了电流调制半导体激光器的信号

收稿日期: 2021-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11747318)

作者简介: 赵丽娜(1982—),女,辽宁本溪人。副教授,博士,主要研究方向为光电通信与网络控制研究。

通信作者: 吕翎(1960—),教授。E-mail: lldust@aliyun.com

有限时同步传输方案。

1 半导体激光器的特性分析

半导体激光器的光振荡和放大主要是通过半导体中的电子跃迁引起光子受激发射来加以实现的。研究表明,通过电流调制、注入外部光场以及光学反馈这 3 种手段均可以使半导体激光器的输出由单一的稳态输出转化为周期振荡以及混沌等多种丰富的输出行为。电流调制半导体激光器的动力学模型可由以下方程组来描述^[15] :

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = \frac{1}{\tau_e} \left(\frac{I}{I_{th}} - N - \frac{N - \delta P}{1 - \delta} \right) \\ \frac{dP}{dt} = \frac{1}{\tau_p} \left[\frac{N - \delta}{1 - \delta} (1 - \epsilon P) P - P + \beta N \right] \end{cases}, \quad (1)$$

式中: N 为载流子的密度; t 为时间; P 为光子数密度; τ_e 和 τ_p 分别为载流子和光子的寿命; δ 为标准系数; β 为自发辐射因子; ϵ 为非线性增益系数; I_{th} 为激光器的阈值电流; I 为调制电流, 且 $I = I_b + I_m \sin(2\pi f_m t)$, I_b 为偏置电流, I_m 为调制电流的振幅, f_m 为调制电流的频率。这些参量的数值为 $\tau_e = 3 \times 10^{-9}$, $\tau_p = 6 \times 10^{-12}$, $\delta = 0.692$, $\beta = 5 \times 10^{-5}$, $\epsilon = 1 \times 10^{-4}$, $I_{th} = 26 \times 10^{-3}$, $I_b = 1.5 I_{th}$, $I_m = m I_{th}$ (m 为 I_m 与 I_{th} 的比值), $f_m = 8 \times 10^8$ 。由于进行了标度变换, 所以式(1)中的所有变量和参数均是无量纲的。

由此可见, 调制电流的振幅 I_m 与激光器的阈值电流 I_{th} 的比值 m 是一个可调参量。 m 的取值不同将影响激光器输出态的改变。这里取 $m = 0.30$ 和 0.55 , 分别模拟出电流调制半导体激光器的动力学模型相图和状态变量随时间的演化曲线如图 1~4 所示。由图可知, 经过初始振荡后, 电流调制半导体激光器在参量取 $m = 0.30$ 时的输出稳定在周期振荡态, 而在 $m = 0.55$ 时的输出稳定在混沌态。

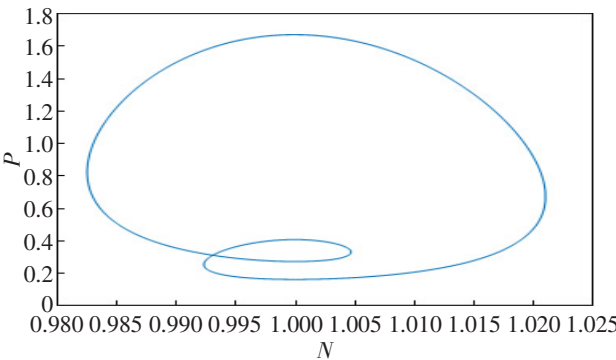


图 1 电流调制半导体激光器的相图 ($m = 0.30$)

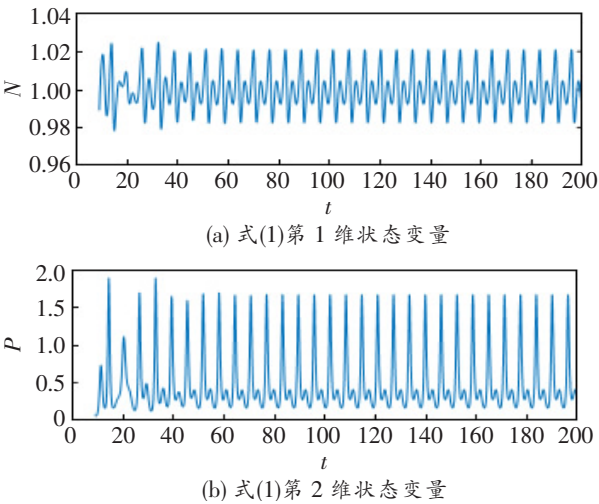


图 2 状态变量随时间的演化曲线 ($m = 0.30$)

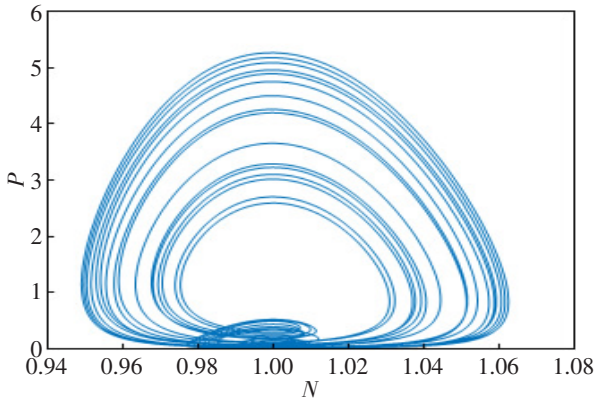


图 3 电流调制半导体激光器的相图 ($m = 0.55$)

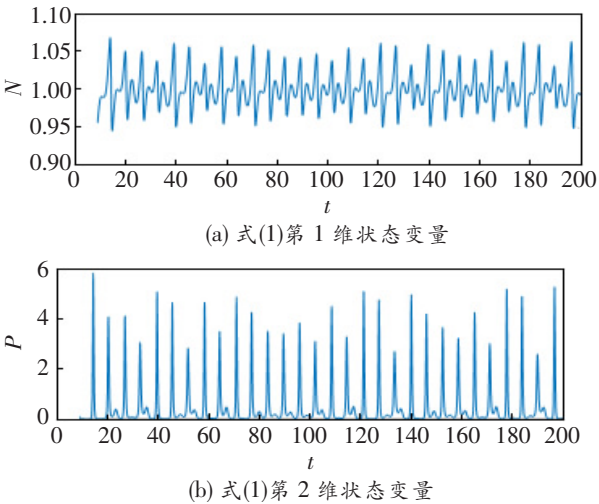


图 4 状态变量随时间的演化曲线 ($m = 0.55$)

2 半导体激光器信号的有限时同步传输

为了能够使我们设计的有限时同步传输技术具有普适性, 把电流调制半导体激光器的动力学模型式(1)改为如下形式:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x, \theta) + \varphi_i(t), \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (2)$$

式中: $f_i(x, \theta)$ 为非线性函数; $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$, 这里 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为状态输出变量, R 为实空间, n 为状态输出变量的维数, 本文中 $x = (N, P) \in R^2$; θ 为非线性函数 $f_i(x, \theta)$ 中的参量; $\varphi_i(t)$ 为滑模控制器。

假设目标信号采用的是下列方程的输出

$$\frac{dx_{di}}{dt} = g_{di}(x_d, \theta_d), \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (3)$$

式中: $g_{di}(x_d, \theta_d)$ 为非线性函数; $x_d = (x_{d1}, x_{d2}, \dots, x_{dn}) \in R^n$, 这里 $x_{d1}, x_{d2}, \dots, x_{dn}$ 为状态输出变量; θ_d 为非线性函数 $g_{di}(x_d, \theta_d)$ 中的参量。

设定电流调制半导体激光器与目标信号输出的误差函数 $e_i = x_i - x_{di}$, 由式(2)和(3)可知:

$$\frac{de_i}{dt} = f_i(x, \theta) - g_{di}(x_d, \theta_d) + \varphi_i(t). \quad (4)$$

引理^[16]: 假设一个正定的连续函数 $V(t)$ 使下列不等式成立: $dV/dt \leq -\rho V^\eta(t)$, $t \geq 0$, $V(0) \geq 0$, 且 $0 < \eta < 1$ 和 $\rho > 0$ 为常数. $V(t)$ 满足不等式 $V^{1-\eta}(t) \leq V^{1-\eta}(0) - \rho(1-\eta)t$, $0 \leq t \leq T$ 以及 $V(t) = 0, t > T$ 所用的时间为 $T \leq \frac{V^{1-\eta}(0)}{\rho(1-\eta)}$.

利用滑模控制技术来完成半导体激光器对目标信号的有限时同步传输。为此, 本文设计下列滑模面 $s = \left(\frac{d}{dt} + \sigma\right)^{n-1} e_1$, 式中, σ 为任意大于零的调节参量, 其可以调节滑模面的收敛快慢。

$$\begin{aligned} \frac{dV(t)}{dt} &= s \frac{ds}{dt} = s \left[\left(\frac{n-1}{0}\right) \frac{de_n}{dt} + \left(\frac{n-1}{1}\right) \sigma e_n + \dots + \left(\frac{n-1}{n-2}\right) \sigma^{n-2} e_3 + \left(\frac{n-1}{n-1}\right) \sigma^{n-1} e_2 \right] = \\ &= s \left[\left(\frac{n-1}{0}\right) (f_n(x, \theta) - g_{dn}(x_d, \theta_d) + \varphi_n(t)) + \left(\frac{n-1}{1}\right) \sigma e_n + \dots + \left(\frac{n-1}{n-2}\right) \sigma^{n-2} e_3 + \left(\frac{n-1}{n-1}\right) \sigma^{n-1} e_2 \right] = \\ &= -\omega s \operatorname{sign}(s), \end{aligned} \quad (8)$$

利用引理, 上式可以表示为

$$\begin{aligned} \frac{dV(t)}{dt} &= -\omega s \operatorname{sign}(s) \leq -\sqrt{2} \omega \left(\frac{1}{2} s^2\right)^{1/2} = \\ &= -\sqrt{2} \omega V^{1/2}(t), \end{aligned} \quad (9)$$

显然, 在时间 $T \leq \frac{\sqrt{2}}{\omega} V^{1/2}(0)$ 内, 半导体激光器完成了对目标信号的有限时同步传输。

3 仿真验证与讨论

在这一部分, 给出数值模拟的实例来验证上一节中设计的有限时同步技术的有效性。采用电流调制半导体激光器的动力学模型式(1)作为传输系统。加入滑模控制器后, 式(1)变为

利用二项式定理展开滑模面的表达式, 可以得到:

$$\begin{aligned} s &= \left(\frac{d}{dt} + \sigma\right)^{n-1} e_1 = \binom{n-1}{0} \frac{d^{n-1} e_1}{dt^{n-1}} + \\ &+ \binom{n-1}{1} \sigma \frac{d^{n-2} e_1}{dt^{n-2}} + \dots + \binom{n-1}{n-2} \sigma^{n-2} \frac{de_1}{dt} + \\ &+ \binom{n-1}{n-1} \sigma^{n-1} e_1. \end{aligned} \quad (5)$$

当滑模控制器被设计为 $\varphi_i(t) = -f_i(x, \theta) + g_{di}(x_d, \theta_d) + e_{i+1}$, ($i = 1, 2, \dots, n-1$) 时, 由式(5)可得:

$$\begin{cases} s = \binom{n-1}{0} e_n + \binom{n-1}{1} \sigma e_{n-1} + \dots + \\ \quad \binom{n-1}{n-2} \sigma^{n-2} e_2 + \binom{n-1}{n-1} \sigma^{n-1} e_1 \\ \frac{ds}{dt} = \binom{n-1}{0} \frac{de_n}{dt} + \binom{n-1}{1} \sigma e_n + \dots + \\ \quad \binom{n-1}{n-2} \sigma^{n-2} e_3 + \binom{n-1}{n-1} \sigma^{n-1} e_2 \end{cases}. \quad (6)$$

构造 Lyapunov 函数 $V(t) = \frac{1}{2} s^2$, 并设计滑模控制器:

$$\begin{aligned} \varphi_n(t) &= -f_n(x, \theta) + g_{dn}(x_d, \theta_d) - \\ &\quad \binom{n-1}{1} \sigma e_n - \dots - \binom{n-1}{n-2} \sigma^{n-2} e_3 - \\ &\quad \binom{n-1}{n-1} \sigma^{n-1} e_2 - \omega \operatorname{sign}(s), \end{aligned} \quad (7)$$

式中, ω 为大于 0 的调节系数。

可以获得下列关系式:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = \frac{1}{\tau_e} \left(\frac{I}{I_{th}} - N - \frac{N-\delta P}{1-\delta} \right) + \varphi_1(t) \\ \frac{dP}{dt} = \frac{1}{\tau_p} \left(\frac{N-\delta}{1-\delta} (1-\epsilon P) P - P + \beta N \right) + \varphi_2(t) \end{cases}, \quad (10)$$

目标信号任意取为正弦信号 $\frac{dN_d}{dt} = \frac{dP_d}{dt} = \sin t$, 设定电流调制半导体激光器与目标信号输出的误差函数 $e_1 = N - N_d, e_2 = P - P_d$ 。这样可以得到本文设计的滑模面 $s = e_2 + \sigma e_1$ 。滑模控制器依据式(8)和(10)来设计。取参量值 $\sigma = 1.5, \omega = 0.1, m = 0.55$ 。电流调制半导体激光器与目标信号输出的误差及其随时间的演化分别如图 5 和 6 所示。

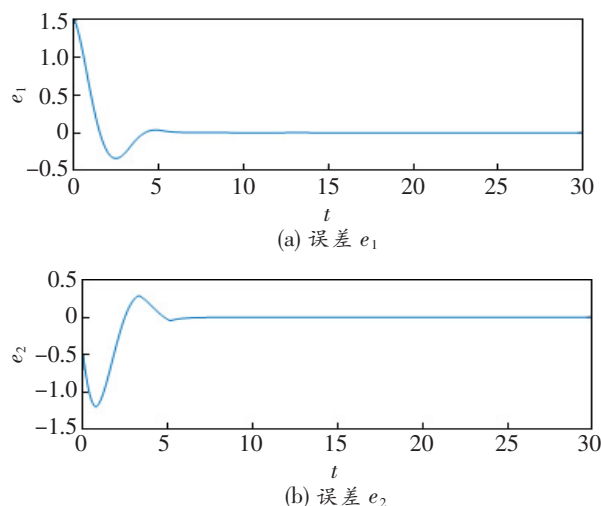


图5 半导体激光器与目标信号输出的误差

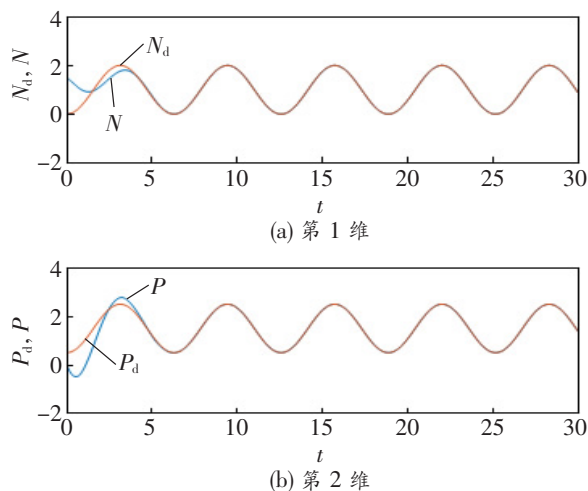


图6 半导体激光器与目标信号输出随时间的演化

由图5可知,一旦滑模控制器作用在电流调制半导体激光器上后,电流调制半导体激光器与目标信号输出的误差能够快速地趋于零,这意味着电流调制半导体激光器完成了对目标信号的有限时同步传输。图6清楚地显示了这一点。未加滑模控制器时,取参量 $m=0.55$,电流调制半导体激光器状态变量随时间的演化如图4所示,是随机性的混沌态。施加滑模控制器后,电流调制半导体激光器与目标信号状态变量随时间的演化达到完全一致,变成了正弦曲线输出,说明本文设计的有限时同步传输技术是有效的。

在模拟过程中还发现,所设计的滑模面中的调节参量 σ 取值不同,电流调制半导体激光器与目标信号状态变量随时间的演化达到完全一致的速率是不同的,说明 σ 确实可以调制滑模面收敛的快慢。另外,这个有限时同步传输技术对同步目标没有任何限制,可以随意选取,这非常有利于实际应用。

4 结束语

本文基于滑模控制技术完成了电流调制半导体激光器对目标信号的有限时同步传输,并通过数值计算验证了有限时同步传输技术的有效性。研究表明,本文所设计的滑模面和滑模控制器是有效的。该项技术不但能够保证电流调制半导体激光器在有限的时间内完成对目标信号的同步传输,而且通过简单的调节滑模面中的参量便可以控制滑模面收敛的快慢。同时,该项技术对目标信号没有任何限制。利用该项技术进行远程通信中信号的有限时同步传输将是我们下一步的工作。

参考文献:

- [1] Liu S, Jiang N, Zhao A, et al. Secure Optical Communication based on Cluster Chaos Synchronization in Semiconductor Lasers Network [J]. IEEE Access, 2020, 8(1):11872—11879.
- [2] 刘蓬勃,张胜海,张晓旭,等.三种混沌半导体激光系统的延时特性和有效带宽分析[J].激光与光电子学进展,2020,57(13):233—239.
- [3] Jiang N, Zhao X, Zhao A, et al. High-Rate Secure Key Distribution based on Private Chaos Synchronization and Alternating Step Algorithms[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2020, 30(2):2050027.
- [4] 王识,邢甜甜,王俊华,等.基于双向混沌同步的保密光通信系统研究[J].光通信研究,2019(2):1—5,28.
- [5] 钟东洲,肖珍珍,杨广泽.延迟耦合三节点 VCSEL 网络的全局性完全混沌同步判定[J].量子电子学报,2019,36(5):575—583.
- [6] Bayati B M A, Ahmad A K, Naimee K A M A. Effect of Control Parameters on Chaos Synchronization by Means of Optical Feedback[J]. Optics Communications, 2020, 472(19):126032.
- [7] 颜森林.激光混沌并行串联同步及其在中继器保密通信系统中的应用[J].物理学报,2019,68(17):170502.
- [8] 孙军伟,李楠,王延峰.基于自适应控制的八个混沌系统的多级组合同步[J].计算机应用研究,2020,37(1):188—192.
- [9] 张文亮,卢社阶.光纤通信系统的数据保密方法研究[J].激光杂志,2020,41(5):149—152.
- [10] 张依宁,冯玉玲,王晓茜,等.半导体激光器混沌输出的延时特征和带宽[J].物理学报,2020,69(9):090501.

(下转第66页)

nealing of Gold Coated Fiber Optic Surfaces for Improved Plasmonic Biosensing[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 229:678—685.

[9] Zhao J, Cao S, Liao C, et al. Surface Plasmon Resonance Refractive Sensor based on Silver-Coated Side-polished Fiber[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 230:206—211.

[10] Al-Qazwini Y, Noor A S M, Yaacob M H, et al. Experimental Realization and Performance Evaluation of Refractive Index SPR Sensor based on Unmasked Short Tapered Multimode-fiber Operating in Aqueous Environments[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 236:38—43.

[11] Sai V V, Kundu T, Mukherji S. Novel U-bent Fiber Optic Probe for Localized Surface Plasmon Resonance based Biosensor[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2009, 24(9):2804—2809.

[12] Cennamo N, Zuppella P, Bacco D, et al. SPR Sensor Platform based on a Novel Metal Bilayer Applied on D-Shaped Plastic Optical Fibers for Refractive Index Measurements in the Range 1.38—1.42[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(12):4822—4827.

[13] Zhao J, Wang Y, Wang Y P. Graphene-oxide-enhanced Surface Plasmon Resonance Fiber Sensor[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2019, 56(23):230601.

[14] Nemova G, Kashyap R. Fiber Bragg Grating Assisted Surface Plasmon-polariton Sensor[J]. Optics Letters, 2006, 31(14):2118—2120.

[15] He Y J, Lo Y L, Huang J F. Optical-fiber Surface-plasmon-resonance Sensor Employing Long Period Fiber Gratings in Multiplexing[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2006, 23(5):801—811.

[16] Wei F H, Zhang X J, Tang S F. Design and Analysis of Photonic Crystal Fiber Refractive Index Sensor based on Surface Plasmon Resonance[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(1):65—69.

[17] Li Z, Chen T, Zhang Z, et al. Highly Sensitive Surface Plasmon Resonance Sensor Utilizing a Long Period Grating with Photosensitive Cladding[J]. Applied Optics, 2016, 55(6):1470—1480.

[18] Zhan Q. Cylindrical Vector Beams: From Mathematical Concepts to Applications[J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2009, 27(5):899—910.

[19] Mathews C B, Libish TM, Kaushalkumar B, et al. A Fiber Optic Biosensor for the Detection of Cholesterol Levels based on Chitosan Coated Long Period Grating[J]. Optoelectronics Letters, 2016, 12(1):23—26.

[20] Rao Y J, Wang Y P, Ran Z L, et al. Novel Fiber-optic Sensors based on Long-period Fiber Gratings Written by High-frequency CO₂ Laser Pulses[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(5):1320—1327.

(上接第 60 页)

[11] 米朝伟, 孙亚威, 张胜海. 双区半导体激光器的超混沌及同步[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(7):52—56.

[12] 冯立军. 单模激光驱动的超混沌系统的完全同步[J]. 光学技术, 2011, 37(4):479—482.

[13] 李森. 激光混沌耦合下映射序列扩频通信效率分析[J]. 激光杂志, 2020, 41(9):107—110.

[14] Yan S L, Chi Z Y, Chen W J. Chaotic Laser Synchronization and Its Application in Optical Fiber Secure Communication[J]. Science in China Series F, 2004, 47(3):332—347.

[15] Agarwal G P. Effect of Gain Nonlinearities on Period Doubling and Chaos in Directly Modulated Semiconductor Lasers[J]. Appl. Phys. Lett., 1986, 49(16):1013—1015.

[16] Mobayen S, Majd V J, Sojoodi M. An LMI-based Composite Nonlinear Feedback Terminal Sliding-Mode Controller Design for Disturbed MIMO Systems[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2012, 85(3):1—10.