

# 基于压电陶瓷与光纤光栅的快速激光波长锁定系统

司纪宗<sup>1,2</sup>, 朱韧<sup>1\*</sup>, 赵思伟<sup>1</sup>, 肖仁亮<sup>1</sup>, 钟朝阳<sup>1</sup>, 侯霞<sup>1</sup>, 陈卫标<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光工程技术实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 窄线宽、大调谐带宽的本振激光种子源是空间相干光通信系统中的核心组件之一, 通过窄线宽种子源结合外电光调制和窄带光栅滤波的方案, 可以实现窄线宽和大调谐带宽, 但通过温度控制的光纤光栅难以适应空间动平台间存在的高速多普勒频移。采用压电陶瓷控制的光纤光栅, 结合梯度下降算法的闭环系统, 实现了光纤光栅和注入激光波长的相对锁定。所提方案可适应 40 MHz/s 以上的空间多普勒频移。

**关键词** 光通信; 空间相干光通信; 压电陶瓷; 光纤光栅

中图分类号 TN242

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1201002

## Fast Laser Wavelength Locking System Based on Piezoelectric Ceramics and Fiber Bragg Grating

Si Jizong<sup>1,2</sup>, Zhu Ren<sup>1\*</sup>, Zhao Siwei<sup>1</sup>, Xiao Renliang<sup>1</sup>, Zhong Chaoyang<sup>1</sup>,  
Hou Xia<sup>1</sup>, Chen Weibiao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A local oscillation laser seed source with narrow linewidth and large tuning bandwidth is one of the core components of space coherent optical communication systems. Using the narrow linewidth seed source in combination with external electro-optical modulation and narrowband grating filtering, narrow line width and high tuning bandwidth can be achieved, but the fiber Bragg grating controlled by temperature is difficult to adapt to the high-speed Doppler frequency shift between moving platforms. In this paper, a closed-loop system of a fiber Bragg grating controlled by piezoelectric ceramics in combination with the gradient descent algorithm is used to realize the relative locking of the fiber grating and the injected laser wavelength. The proposed scheme can adapt to spatial Doppler shift above 40 MHz/s.

**Key words** optical communications; spatial coherent optical communication; piezoelectric ceramics; fiber Bragg grating

**OCIS codes** 060.3735; 140.3500; 140.3510

## 1 引言

近年来,空间相干光通信技术因其通信速率高、抗干扰能力强、资源消耗少等优点<sup>[1]</sup>,成为了空间通信技术中的研究热点。其中,零差相干光通信理论上具有最好的抗干扰能力和较高的灵敏度,但是需要复杂的闭环锁相系统,这对本振激光器的线宽和调谐带宽提出了很高的要求。目前常用的 1550 nm 波段窄线宽激光器主要有单频外腔半导体激光器和

分布式反馈(DFB)光纤激光器<sup>[2-4]</sup>,但这些激光器的调谐带宽基本都在 30 kHz 以内,不能完全满足本振闭环锁相的需要。

2010 年, Kanno 等<sup>[5]</sup>采用单频激光器结合外电光调制的方案实现了超快的激光频率调谐,但该方案  $\pm 1$  阶调制边带的强度一致,在需要单频激光的应用场合仍会降低输出激光的光谱信噪比。为了克服多边带的问题,2019 年,古建标等<sup>[6]</sup>采用光纤光栅滤波的方案来滤除信号光外的其他边带,实现了

收稿日期: 2020-06-04; 修回日期: 2020-07-03; 录用日期: 2020-07-13

\* E-mail: zrzsiom@163.com

28 dB 的光谱信噪比和 1.5 MHz 的调谐带宽;采用温度调谐控制的方案,实现光栅与注入激光波长的对准。但是受限于光栅温度调谐的速度,该方案并不适用于空间动平台间快速多普勒频移的应用场合。本文设计采用压电陶瓷对光纤光栅进行调谐控制,通过压电陶瓷对外加电场快速响应的压电特性实现对光栅波长的快速控制,从而实现光栅对注入光波长的快速响应。采用该方案实现的激光波长锁定系统可以满足频率范围为 5.85 GHz、变化率 >40 MHz/s 的多普勒频移。

## 2 工作原理

本方案主要通过控制光纤光栅来实现对激光器输出波长的控制,光纤光栅的布拉格波长  $\lambda_B$  可表示为

$$\lambda_B = 2\Delta n_{\text{neff}}, \quad (1)$$

式中: $\lambda_B$  为光纤光栅的布拉格波长; $n_{\text{neff}}$  为光纤光栅的有效折射率; $\Delta$  为光纤光栅的栅格周期。当光纤光栅的温度或所受的应力发生改变时,中心波长  $\lambda_B$  的变化量  $\Delta\lambda_B$  为

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta\Delta n_{\text{neff}} + 2n_{\text{neff}}\Delta\Delta, \quad (2)$$

式中: $\Delta n_{\text{neff}}$  为光栅有效折射率的变化量; $\Delta\Delta$  为栅格周期变化量。将光纤光栅固定在压电陶瓷上,通过电压控制压电陶瓷伸缩,进而控制光纤光栅周期的伸缩,同时受弹光效应的影响,光纤光栅的折射率分布也会发生变化<sup>[7]</sup>。

假定光纤光栅的温度不变、其只受压电陶瓷轴向应力的影响且应力在光纤光栅上均匀分布,则应力变化对光纤光栅中心透过波长的影响可表示为<sup>[8]</sup>

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left\{ 1 - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [P_{12} - (P_{11} + P_{12})\nu] \right\} \epsilon_z = (1 - P_z)\epsilon_z, \quad (3)$$

式中: $\epsilon_z$  为光纤光栅轴向应变的大小; $P_z = \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [P_{12} - (P_{11} + P_{12})\nu]$  代表光纤光栅轴向有效弹光系数,其中  $P_{11}$ 、 $P_{12}$  代表光纤光栅应变张量分量, $\nu$  为光纤光栅的泊松比。对于一般的石英光纤, $n_{\text{neff}}$  的典型值约为 1.456, $P_{11}$  的典型值约为 0.121, $P_{12}$  的典型值约为 0.27, $\nu$  的典型值约为 0.17,据此可得有效弹光系数  $P_z$  约为 0.216<sup>[9]</sup>。

光纤光栅轴向应变大小  $\epsilon_z$  可用光纤光栅形变量  $\Delta L$  和光纤光栅受力长度  $L$  表示,即  $\epsilon_z = \Delta L/L$ 。因此  $\Delta L$  和  $L$  即为压电陶瓷的形变量和压电陶瓷原长。本文所用的压电陶瓷为堆叠式压电陶瓷, $\Delta L$  可以表示为  $\Delta L = nd_{33}U$ ,其中  $d_{33}$  为压电陶瓷的压电常数, $n$  为堆叠的压电陶瓷片数量, $U$  为压电陶瓷所加电压。可见形变量与电压呈线性关系,因此可通过改变加在压电陶瓷上的电压来调节光纤光栅的中心透过波长,以调节输出波长。

## 3 实验研究

### 3.1 系统结构

系统结构如图 1 所示,主要由种子激光器、窄带光栅滤波器、压电闭环控制系统和掺铒光纤放大器组成。种子激光器选择 DFB 半导体激光器,其线宽约为 1 MHz,选择该激光器的原因是其电流/波长调谐系数大,通过对激光器进行电流调谐可以实现大范围多普勒频移的模拟。

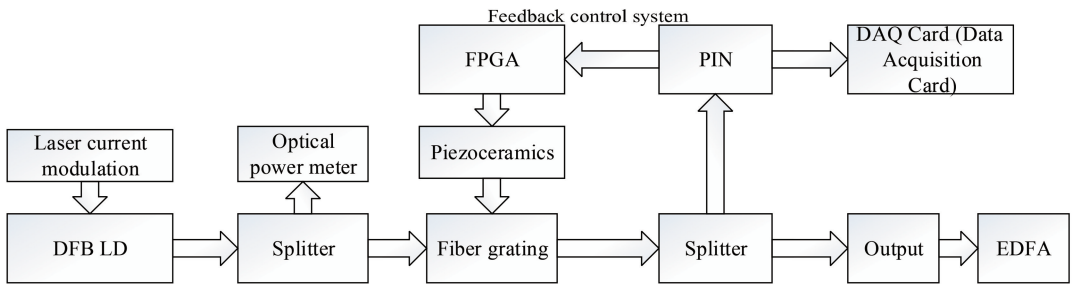


图 1 系统方案示意图

Fig. 1 System scheme diagram

种子光首先经过分束器,被分为两束,一束进入后续的窄带光纤光栅,另一束由功率计进行功率监测。光纤光栅输出的光经过分束器也被分为两束,一束被输入至掺铒光纤放大器(EDFA)进行放大,

另一束被输入至光电探测器(PIN)进行光电转换,由控制系统接收电信号。本文采用现场可编程门阵列(FPGA),通过 AD 端口采集 PIN 管信号,采用梯度下降算法解算得到光纤光栅波长误差信号,并利

用反馈信号控制压电陶瓷,通过压电陶瓷的伸缩控制光纤光栅的周期,进而实现光纤光栅中心波长和输入激光波长的匹配。实验中通过数据采集卡对PIN的强度信号进行同步监测。

本系统中采用的窄带相移光纤光栅的承受光功率约为  $200 \mu\text{W}$ ,经光纤光栅透射后的光功率约为  $100 \mu\text{W}$ ,设计采用EDFA对光信号进行放大,通过一级光纤放大即可实现约  $10 \text{ mW}$  的放大输出。

本系统采用的光纤光栅是窄带相移式光纤光栅,由长飞公司生产的PM1550光纤刻蚀而成,中心透过波长为  $1550.4440 \text{ nm}$ ,栅区长度为  $9 \text{ mm}$ ,周

期为  $535 \text{ nm}$ ,相移量为  $\pi$ ,光栅  $3 \text{ dB}$  透射带宽约为  $500 \text{ MHz}$ 。选用的压电陶瓷的型号为芯明天PSt150/5×5/20H,尺寸为  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ ,标称位移为  $20 \mu\text{m}$ ,刚度为  $60 \text{ N}/\mu\text{m}$ ,最大推力为  $1600 \text{ N}$ 。该压电陶瓷的标称位移是在  $0 \sim 150 \text{ V}$  驱动电压下形成的位移。为便于利用电压动态控制压电陶瓷伸缩,对压电陶瓷施加一个预紧力,即给压电陶瓷一个初始压缩量,一般约为最大推力的  $1/10$ 。因此,将长度为  $15 \text{ mm}$ 、极限压缩行程为  $3 \text{ mm}$ 、定数为  $6 \text{ kg}/\text{mm}$  的弹簧压缩为约  $2.7 \text{ mm}$ ,对压电陶瓷施加  $160 \text{ N}$  的预紧力。压电陶瓷的机械装配结构如图2所示。

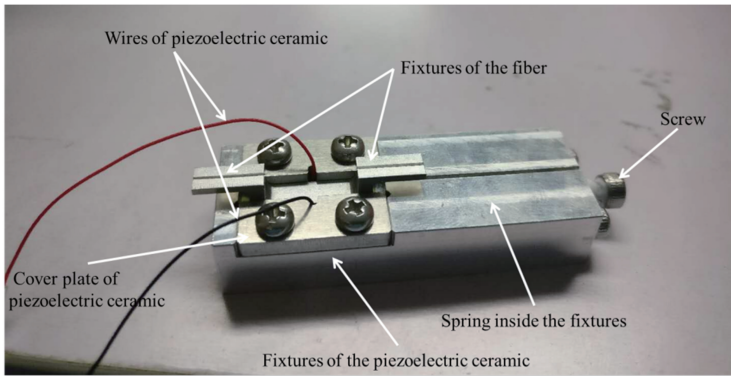


图2 压电陶瓷与光纤光栅的封装结构图

Fig. 2 Package structure of piezoelectric ceramics and fiber Bragg grating

如图2所示,由于光纤光栅表面为柱面、压电陶瓷表面为平面,因此特制了可以固定在压电陶瓷上的光纤夹具以保证光纤光栅的牢固性,并通过压电陶瓷夹具与盖片对压电陶瓷进行封装,夹具内置弹簧,以对压电陶瓷施加预紧力,外部顶丝可根据需要调节弹簧伸缩,从而改变预紧力的大小。

压电陶瓷被压缩的同时光纤光栅也被压缩,导致光栅弯曲,因此需对粘在支架上的光纤光栅进行预拉伸。本系统中的光纤光栅的初始拉伸量为  $0.16 \text{ nm}$ ,通过光谱仪观察光纤光栅中心透过波长的变化。将控制电压通过电压放大器后加到压电陶瓷上,测试光纤光栅的中心透过波长随电压的变化曲线,如图3所示。

从图3可以看出,通过FPGA控制压电陶瓷进而控制光纤光栅的中心透过波长,可实现的最大波长范围为  $1550.3560 \sim 1550.4440 \text{ nm}$ 。光纤光栅中心透过波长和加在PZT上的电压不完全呈线性关系,且光纤光栅中心透过波长在电压增大与减小时的变化曲线并不重合,该现象主要源于压电陶瓷的迟滞效应<sup>[10-11]</sup>。

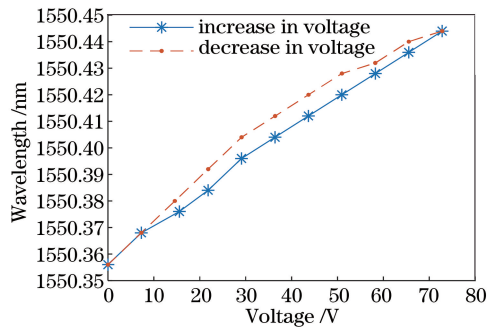


图3 光纤光栅中心透过波长随施加在压电陶瓷上的电压的变化

Fig. 3 Center transmission wavelength of fiber Bragg grating varying with voltage applied to piezoelectric ceramics

### 3.2 激光光源测试

实验系统中所选取的种子激光光源为DFB半导体激光器,其波长稳定性测试结果如图4所示。

由图4可以看出,在  $53 \text{ min}$  时间里,种子激光器波长的变化量约为  $0.8 \text{ pm}$ ,对应的频率变化约为  $96.8 \text{ MHz}$ ,激光器稳定性较好。通过调节DFB激光器的工作电流可改变输出波长,二者的变化关系如图5所示。

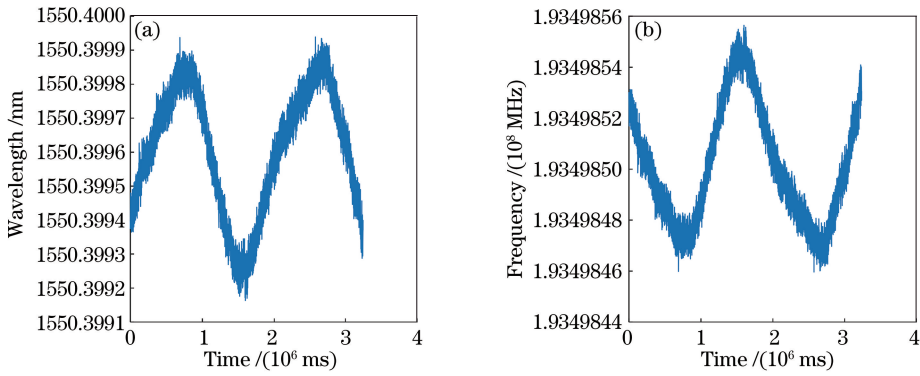


图 4 激光器的稳定性测试。(a)波长稳定性;(b)频率稳定性

Fig. 4 Laser stability test. (a) Wavelength stability; (b) frequency stability

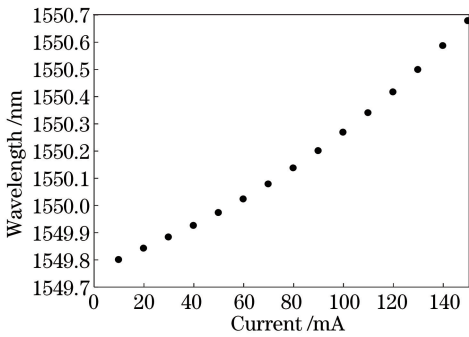


图 5 DFB 激光器的输出波长随工作电流的变化关系  
Fig. 5 Output wavelength of DFB laser varying with operating current

从图 5 中可以看出,激光器的输出波长随工作电流的变化大致呈线性关系。测试中,调整种子激光器的初始工作温度,使其输出波长和光纤光栅的透过波长基本匹配,进而通过控制压电陶瓷的电压调节光纤光栅的透过波长,使其与激光输出波长一致。另外,在测试过程中,通过对种子激光器施加电流调制,实现对空间多普勒频移的模拟。

### 3.3 反馈控制算法

反馈控制算法使用梯度下降算法<sup>[12-13]</sup>。首先,使用 FPGA 输出一个扫描电压信号,通过反馈的光强信号可找到光纤光栅中心频率和激光器频率匹配时的电压值以及对应的最大光强值。然后进行反向扫描,当 FPGA 的 AD 中得到的光强值在正向扫描时得到的最大光强值附近时,结束扫描,进入反馈控制阶段。在此电压值的基础上进行累加,得到 P\_hold;接着,在此电压值的基础上增加一个步长,进行同样次数的累加,得到 P\_add,在此电压值的基础上减小一个步长,进行同样次数的累加,得到 P\_sub。通过比较 P\_hold、P\_add 以及 P\_sub 的值,可判断出控制电压的移动方向,进而使通过光纤光栅输出的光强一直保持在最大,即实现光纤光栅中心波长和激光器波长的匹配。

## 4 结果分析

采用上述实验系统测试静态无多普勒频移时的输出激光稳定性,如图 6 所示。

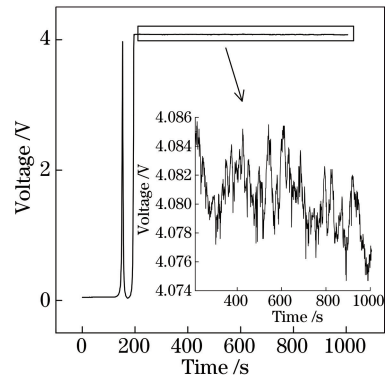


图 6 无调制情况下激光输出波长反馈控制测试结果  
Fig. 6 Test results of laser output wavelength feedback control without modulation

从图 6 可以看出,初始时,光纤光栅中心透过波长和 DFB 激光器的输出波长并不匹配,通过反馈信号控制压电陶瓷的电压,利用程序正向扫描得到一个大致的最大光强值,之后进行反向扫描,FPGA 的 AD 监测到的光强值达到最大值附近时进入反馈控制,这样可使光纤光栅的中心透过波长和 DFB 激光器波长相匹配,并保持相对锁定。从图 6 中插图可以看出,当压电陶瓷实现闭环反馈控制后,光栅输出光功率的抖动量约为 0.48%,光功率抖动量的定义为

$$\text{光功率抖动量} = \frac{\text{最大输出光功率} - \text{最小输出光功率}}{(\text{最大输出光功率} + \text{最小输出光功率}) / 2}$$

在相干光通信系统中,本振光功率主要起到相干放大的作用,由于光栅输出光功率的抖动均为慢速变化,因此系统对其稳定性要求并不高,其可保障相干增益没有大的波动即可。在静态无多普勒频移

时,光栅输出光强抖动完全可以满足系统对本振光稳定性的要求。

接下来对激光器电流进行调制,从而实现对空间多普勒频移的模拟,测试中采用两种调制方式,分别是三角波调制和正弦调制。正弦调制的激光波长的变化率是在零和最大值之间变化的,但变化率不存在突变,频率成分单一;而三角波调制的波长变化率在非极点位置处是固定的,但在最大值、最小值处

存在突变,频率成分较丰富。通过在两种调制方式下进行测试,可以更好地检验光栅闭环控制系统应对波长变化的能力。

首先,使用电压为 $\pm 10$  mV、周期为 300 s 的三角波对激光器进行调制,激光器波长的变化如图 7 (a)所示,从图中可以看到,激光器波长除了随电流的变化而变化外,同时存在一定的趋势性变化,这应是由于激光器波长自身随时间的推移而有所变化。

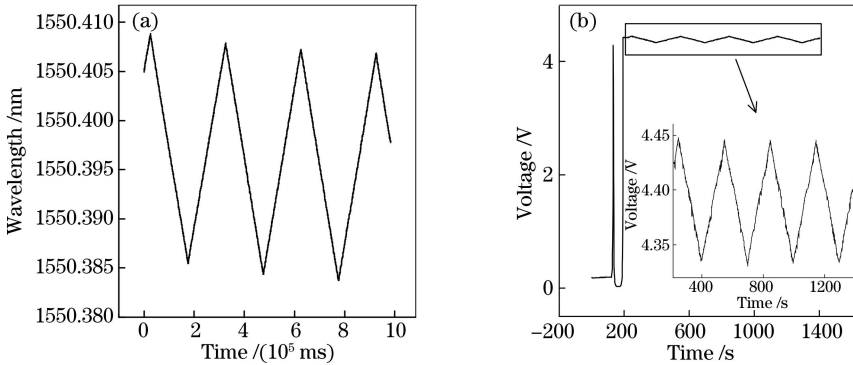


图 7 电压为 $\pm 10$  mV、周期为 300 s、初始相位为 $55^\circ$ 的三角波调制下激光器输出的稳定性测试。

(a) 调制后激光器波长; (b) 反馈控制稳定性测试

Fig. 7 Stability test of laser output under modulation of triangular wave with  $\pm 10$  mV voltage, 300 s period, and  $55^\circ$  initial phase. (a) Modulated laser wavelength; (b) feedback control stability test

从图 7 可以看出,激光器的波长变化范围为 1550.3847~1550.4078 nm,对应的频率范围约为 2.88 GHz,波长的最快变化速度为 19.2 MHz/s。实验中通过 PIN 管监测到的电压值如图 7(b)所示。从图中可以看出,使用压电陶瓷实现闭环反馈控制之后,能够实现光纤光栅中心透过波长和激光器波长的实时匹配,光栅输出光强转化为的电压值变化范围为 4.3304~4.4478 V,对应光栅输出光强的最大抖动量为 2.7%。需要指出的是,在测试过程中,由于采用对

激光器的工作电流进行调制的方式改变激光器的输出波长,所以激光器的输出光功率也会随之发生改变,在电压为 $\pm 10$  mV 时,输出功率在 142.8~146.1  $\mu$ W 之间变化,抖动量为 2.26%。因此,若考虑激光器自身光功率的变化,在实现光栅反馈控制之后,光栅实际输出光强的抖动将优于 2.7%。

接下来,使用电压为 $\pm 20$  mV、周期为 400 s 的正弦波对激光器进行调制,激光器波长的变化范围为 1550.3718~1550.4204 nm,如图 8(a)所示,对应

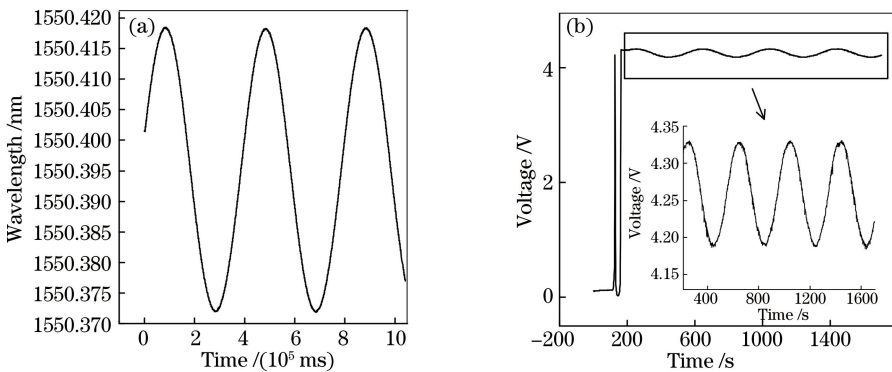


图 8 电压为 $\pm 20$  mV、周期为 400 s、初始相位为 $50^\circ$ 时正弦波调制下激光器输出的稳定性测试。

(a) 调制后激光器波长变化; (b) 反馈控制稳定性测试

Fig. 8 Stability test of the laser output under a sine wave modulation of  $\pm 20$  mV voltage, a period of 400 s, and an initial phase of  $50^\circ$ . (a) Modulated laser wavelength; (b) feedback control stability test

的频率范围为 5.85 GHz, 最大调谐速率为 45.9 MHz/s。该调谐速率可以覆盖 500 km 以上轨道高度卫星和地面之间的最快多普勒频移变化。

从图 8(b)可以看出, 使用压电陶瓷实现闭环反馈控制之后, PIN 管监测到的稳定后光纤光栅输出光强转化为的电压值变化范围为 4.1847 ~ 4.3309 V, 对应光纤光栅输出的光强抖动量为 3.43%, 若考虑电流调制引起的光功率变化量为 3.24%, 则在光栅反馈控制后, 输出的实际光强抖动将优于 3.43%, 具备较好的系统稳定性。

从上述三角波调制和正弦波调制的测试结果来看, 二者的测试结果略有差异, 虽然三角波调制的调谐速率要低于正弦波调制的最大调谐速率, 但是其输出光强抖动要略大于正弦波调制, 这可能是由于三角波调制下存在较大的波长变化率突变, 另外, 无调制时, 利用压电陶瓷实现闭环反馈控制后, 光栅输出光功率的抖动量约为 0.48%, 测试中的随机性也可能是一个重要影响因素。

## 5 结 论

采用压电陶瓷和光纤光栅相结合的闭环反馈系统, 实现了窄带光纤光栅和注入激光波长的相对锁定, 在模拟多普勒频移范围为 5.85 GHz、模拟最大调谐速率为 45.9 MHz/s 时, 光栅输出光强的抖动为 4.26%, 光强稳定性可以满足空间相干光通信系统对本振光源的要求, 可以适应 500 km 以上轨道高度卫星和地面之间的最快多普勒频移变化。

## 参 考 文 献

- [1] Kazemi A A. Intersatellite laser communication systems for harsh environment of space [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8720: 872010.
- [2] Pan B W, Yu L Q, Lu D, et al. 20 kHz narrow linewidth fiber Bragg grating external cavity semiconductor laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(5): 0502007.  
潘碧玮, 余力强, 陆丹, 等. 20 kHz 窄线宽光纤光栅外腔半导体激光器 [J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0502007.
- [3] Numata K, Camp J, Krainak M A, et al. Performance of planar-waveguide external cavity laser for precision measurements [J]. Optics Express, 2010, 18(22): 22781-22788.
- [4] Wang H J, Weng Y J, Hu Y, et al. Compact narrow-width distributed feedback fiber laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(6):

891-893.

王宏杰, 翁宇佳, 胡野, 等. 紧凑型窄线宽分布反馈光纤激光器 [J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(6): 891-893.

- [5] Kanno A, Honda S, Yamanaka R, et al. Ultrafast and broadband frequency chirp signal generation using a high-extinction-ratio optical modulator [J]. Optics Letters, 2010, 35(24): 4160-4162.
- [6] Gu J B, Zhu F N, Liu L, et al. 1550 nm laser source with narrow linewidth and high tuning bandwidth [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0901003.  
古建标, 朱福南, 刘磊, 等. 1550 nm 波段窄线宽高调谐带宽激光光源 [J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0901003.
- [7] Yamamoto H, Tsutsumi Y, Miyoshi Y, et al. Temperature characteristics of a long period fiber grating using a heat-shrinkable tube [C] // Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition, December 8-12, 2010, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2010: 651-652.
- [8] Morey W W, Meltz G, Glenn W H. Fiber optic Bragg grating sensors [J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1169: 98-107.
- [9] Song J X, Jiang Q, Huang Y Y, et al. Research on pressure tactile sensing technology based on fiber Bragg grating array [J]. Photonic Sensors, 2015, 5(3): 263-272.
- [10] Davino D, Visone C, Ambrosino C, et al. Compensation of hysteresis in magnetic field sensors employing Fiber Bragg Grating and magneto-elastic materials [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 147(1): 127-136.
- [11] Li L, He H, Lin Y C. The application of piezoelectric ceramic to fiber Bragg grating sensing demodulating [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(6): 942-945.  
李丽, 何宏, 林玉池. 压电陶瓷在光纤光栅传感解调中的应用 [J]. 压电与声光, 2010, 32(6): 942-945.
- [12] Wang S H, Liang Y H, Long X J, et al. Experimental research of laser beam cleanup for dynamic aberrations based on stochastic parallel-gradient-descent method [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 97-101.  
王三宏, 梁永辉, 龙学军, 等. 基于随机并行梯度下降方法的动态光束净化实验研究 [J]. 光学学报, 2009, 29(1): 97-101.
- [13] Chen X. Research on the PZT adaptive control system based on fiber grating [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.  
陈骁. 基于光纤光栅的 PZT 自适应控制系统研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.