

# 基于 PLZT 高速 VOA 的光源低频强度噪声抑制<sup>\*</sup>

郑鑫<sup>1</sup>, 冀军<sup>1</sup>, 金晓峰<sup>1</sup>, 章献民<sup>1</sup>, 郑史烈<sup>1</sup>, 池灏<sup>1</sup>, Kevin Yingyin Zou<sup>2</sup>

(1 浙江大学信息与电子工程系 杭州 310027 中国; 2 波士顿应用科技公司 波士顿 MA 01801 美国)

**摘要:** 提出一种基于掺镧锆钛酸铅(PLZT)高速可变光衰减器(VOA)实现光源低频强度噪声抑制新的技术方案。设计基于高速前馈-反馈控制技术的VOA驱动控制系统,通过高速调节,实现了光源低频波动的平滑与抑制,同时可克服PLZT的电滞效应和环境温度变化所引起的器件参数漂移等问题,实现光信号的稳定输出。实验结果表明在控制回路信号延迟2.1 μs下,系统可将频率范围在0~800 Hz的低频扰动幅度抑制到小于1%的水平。

**关键词:** 光源稳定性; 可变光衰减器; PLZT; 前馈-反馈控制

**中图分类号:** TN29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

## Suppression of low-frequency intensity noise using PLZT based high speed VOA

Zheng Xin<sup>1</sup>, Ji Jun<sup>1</sup>, Jin Xiaofeng<sup>1</sup>, Zhang Xianmin<sup>1</sup>, Zheng Shilie<sup>1</sup>, Chi Hao<sup>1</sup>, Kevin Yingyin Zou<sup>2</sup>

(1 Information and Electronics Engineering Department, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2 Boston Applied Technology Inc., Boston MA 01801, USA)

**Abstract:** A novel scheme of low-frequency intensity noise suppression of optical source is provided. A high speed variable optical attenuator (VOA) based on PLZT transparent optic ceramic is employed to instantly compensate the low-frequency power fluctuation of light source. Through constructing a feed-forward and feed-backward control loop system with high-speed optical power monitoring and electric driving, the suppression of low-frequency intensity noise of light source is achieved and the effect caused by the hysteresis of PLZT and the temperature dependent response of VOA can be avoided. Experiment result shows that with 2.1 μs signal delay of the control loop, the fluctuation amplitude can be suppressed down to a level of less than 1% in the frequency range of 0~800 Hz.

**Key words:** light source stability; variable optical attenuator (VOA); PLZT; feedforward-feedback control

## 1 引言

高速发展的光纤通信系统通信容量的提升对激光器光源性能提出了越来越高的要求,光源的不稳定性将直接导致误码率的增加,从而限制了通信速率的提高<sup>[1]</sup>。不仅如此,很多关键的应用,比如光纤陀螺仪<sup>[2-3]</sup>和光纤加速度计<sup>[4]</sup>等传感器,也都要求光源功率具有相当高的稳定度。

导致激光器光源输出功率不稳定的因素主要包括:

光源自身引入的强度噪声,包括量子噪声<sup>[5]</sup>、散粒噪声和模式竞争噪声<sup>[6]</sup>;外界环境因素的变化,如温度、应力等也会对输出光源的稳定性造成一定影响。其中,强度噪声的噪声幅度与频率成反比,导致光源在低频时抖动十分严重。目前光源低频强度噪声抑制方案主要是基于光源自身特点而设计的,其中包括设计合适的驱动电路<sup>[7-9]</sup>、注入锁定<sup>[10]</sup>、光电反馈<sup>[11]</sup>等方案。文献[7]中采用计算机控制的半导体激光器驱动电路,通过对驱动电流和工作温度的实时监测及分析,以实现温度控制状态下的激光稳定输出。文献[10]中则通过双模注入主激

收稿日期: 2009-12 Received Date: 2009-12

\* 基金项目: 国家自然科学基金(60971060,61071059)资助项目

光器的量子点锁模技术,实现了从激光器的频谱可调谐,因此显著地提高了时间带宽积。文献[11]利用强度调制器及其反馈控制回路将光纤光源的强度信号变化作为强度调制器的控制信号,通过负反馈消除光源的相对强度噪声。文献[12]则同时利用了注入锁定和反馈技术,动态地研究了外光反射下的反馈作用和注入锁模半导体激光器的频谱特性,并提出了相应的优化方法。

在现有的多种实现光源低频强度噪声抑制的方案基础上,本文提出了一种基于掺镧锆钛酸铅(PLZT)高速可变光衰减器(VOA)抑制光源低频强度噪声扰动的技术方案。该方案通过设计基于高速前馈-反馈控制技术的VOA驱动控制系统,利用光功率高速监控与反馈控制,实现了对光源低频波动的平滑与抑制,同时也克服了PLZT的电回滞效应和环境温度变化所引起的器件参数漂移等问题。

## 2 高速 VOA 器件实现原理

透明铁定陶瓷掺镧锆钛酸铅(PLZT)是一种新型的电光功能材料,其二次电光系数比铌酸锂大两个数量级,响应速度可以达到亚微秒量级<sup>[13]</sup>。本文设计了基于PLZT的高速VOA器件。图1为基于PLZT的电光型可变光衰减器原理框图。入射光首先通过准直器投射到偏振分束器上,分成两束偏振方向垂直的线偏振光,然后经过电控偏振旋光器及偏振合束器最后由准直器输出。

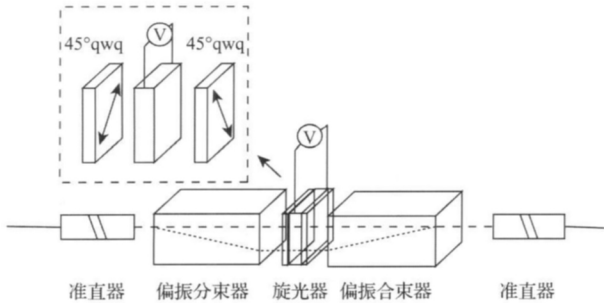


图 1 可变光衰减器原理框图

Fig. 1 The schematic of the variable optical attenuator

电控偏振旋光器由两块主轴垂直的1/4波长波片(qwp)和电控PLZT透明陶瓷组成。假设两个qwp的快轴分别落在x轴和y轴上,PLZT的电场方向与y轴夹角为θ,得到三者的传输矩阵分别为:

$$J_{qwp1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -j \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$J_{qwp2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & j \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$J_{EO} = \begin{pmatrix} \sin^2 \theta + \cos^2 \theta e^{-j\delta} & \sin \theta \cos \theta (1 - e^{-j\delta}) \\ \sin \theta \cos \theta (1 - e^{-j\delta}) & \sin^2 \theta e^{-j\delta} + \cos^2 \theta \end{pmatrix} \quad (3)$$

PLZT电控片产生的相位延时为δ:

$$\delta = \frac{\pi \eta V^2}{\lambda} \quad (4)$$

式中:λ为波长,η为电光系数与PLZT片的尺寸共同决定的系数,V为外加电压。本设计中PLZT电场方向在x-y轴角平分线上,θ取45°,由式(3)得到:

$$J_{EO} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + e^{-j\delta} & 1 - e^{-j\delta} \\ 1 - e^{-j\delta} & 1 + e^{-j\delta} \end{pmatrix} \quad (5)$$

因此电控旋光器的传输矩阵为:

$$J_{total} = e^{-j\delta/2} \begin{pmatrix} \cos \frac{\delta}{2} & \sin \frac{\delta}{2} \\ -\sin \frac{\delta}{2} & \cos \frac{\delta}{2} \end{pmatrix} \quad (6)$$

结合式(4)、(6)可以得到VOA系统的传输函数为:

$$T = \frac{I_{output}}{I_{input}} = \cos^2 \frac{\delta}{2} = \cos^2 \frac{\pi \eta V^2}{2\lambda} \quad (7)$$

由式(7)可得,控制外加电压V就可以动态地调节VOA的衰减量。图2为固定输入光信号经过由高速方波驱动的VOA器件后,由光电探测得到的幅度响应曲线,曲线(I)、(II)分别表示为上升沿和下降沿,可以看出系统响应时间在亚微秒量级。

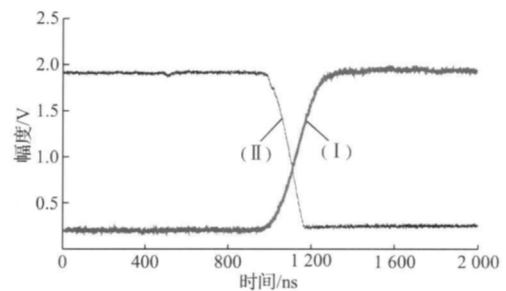


图 2 高速 VOA 响应曲线

Fig. 2 High speed switching response of VOA

## 3 低频强度噪声抑制技术方案

### 3.1 高速 VOA 控制系统设计

高速VOA系统根据输入光功率的变化实时动态地改变其衰减量,实现对光源低频强度噪声有效抑制。该系统包括对光功率的高速监测和对VOA器件的实时衰减控制2个部分。图3为系统设计框图。在光通路中,入射光首先经过一个95:5耦合器,取出5%的光功率作为前馈控制监控信号,然后通过VOA后经第2个95:5耦合器输出,同样取出5%的输出光功率作为反馈控制

监控信号。2 个耦合器引入 0.45 dB 的损耗, 加上 VOA 本身引入的 0.5 dB 损耗和器件间熔接损耗, 系统损耗控制在 1 dB 以内。在电通路中, 高速光探测器 PD 将监测光信号转化为光电流, 然后接入预处理电路, 最后经模数转换后由核心控制单元进行控制处理。其中预处理电路包括对数放大器和抗混叠滤波器, 对数放大器实现对光电流的积分放大作用, 使得系统能够满足输入光功率具有较大动态范围的要求。图中点划线框中为高速数模混合型处理模块, 具有两路 2 Ms/s 的 16 位模数控制器 ADC 和两路 1 Ms/s 的 12 位数模控制器 DAC。

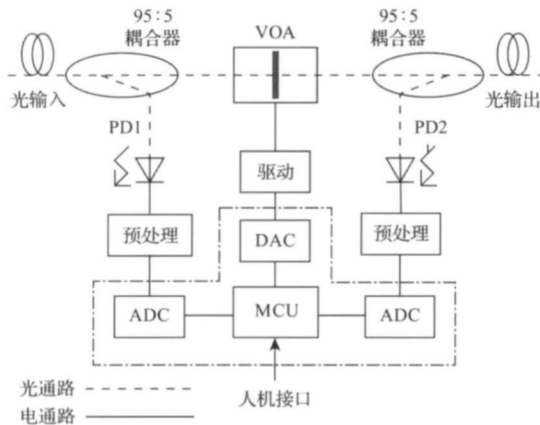


图 3 VOA 控制系统框图  
Fig. 3 The control system of VOA

VOA 控制系统首先判断光探测器 PD1 的值, 然后根据输出设定值计算得到需要的实时衰减量  $Q$ , 以完成控制。但是由于 PLZT 存在电回滞特性<sup>[13]</sup>, 以及参数  $\eta$  和 PLZT 的电疲劳性能<sup>[14]</sup> 和器件温度的影响, 使得仅使用前馈无法实现精准控制, 然而在此基础上引用反馈控制则可以克服这一缺陷。根据光探测器 PD2 的值计算实际输出值与输出设定值的差记为  $\Delta Q$ , 反馈控制调节精度为  $\Delta A$  经过系统反馈后, 误差被减小到  $\Delta A$  范围以内。假设 VOA 的动态范围为  $Q_{\max}$ , 采用 12 位 DAC 可使  $\Delta A$  最小达到  $1/4095 Q_{\max}$ , 实际系统精度可以达到  $0.001 Q_{\max}$ 。

### 3.2 低频强度噪声抑制机制

VOA 系统根据输入光功率的变化实时动态地改变其衰减量, 可以对光源低频强度噪声进行有效抑制。假设理想情况下输入光平均功率为  $I$ , 波动的频率为  $f$ , 波动幅度为  $I'$ , 则输入光强  $P$  可以表示为:

$$P = I + I' \sin(2\pi ft) \quad (8)$$

如果 VOA 系统提供实时的衰减量为:

$$Q = A + I' \sin(2\pi ft) \quad (9)$$

则得到的输出光强  $O$  为:

$$O = P - Q = I - A \quad (10)$$

即输出光强为常量, 波动被完全抑制。但实际情况

下 VOA 衰减控制延迟不可避免, 假设系统延迟时间为  $\Delta t$ , 则 VOA 实时衰减控制为:

$$Q' = A + I' \sin(2\pi f(t - \Delta t)) \quad (11)$$

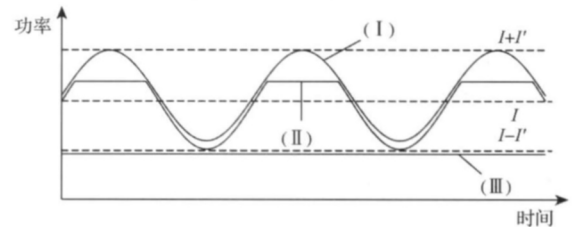
将式 (11) 代入式 (10) 得到输出光强为:

$$O' = I - A + 2I' \sin(\pi f \Delta t) \cos[2\pi f(t - \Delta t/2)] \quad (12)$$

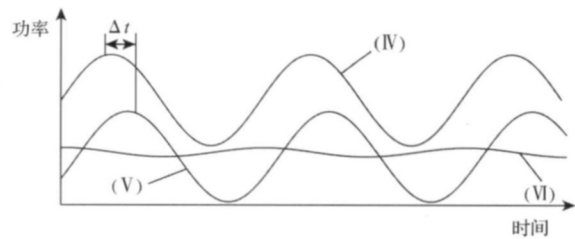
由式 (12) 可以看出最终输出的光强波动幅度为:

$$N = 2I' \sin(\pi f \Delta t) \quad (13)$$

图 4 为光源强度噪声抑制仿真结果。其中图 4 (a) 表示无延迟的 VOA 系统对输入光波动抑制的情况, 其中曲线 (I) 表示理想条件下光功率为  $I$  的光源引入幅度为  $I'$  的正弦波动产生的光信号; 曲线 (II) 为系统设定输出功率介于  $I + I'$  和  $I - I'$  之间时系统的输出波形, 大于系统设定值的部分波动被抑制; 曲线 (III) 为系统设定输出功率小于等于  $I - I'$  时系统的输出波形, 波动则被完全抑制。图 4 (b) 为存在控制延迟的 VOA 系统对输入光波动抑制的效果, 曲线 (IV) 为输入光信号, (V) 为延迟了  $\Delta t$  的 VOA 动态衰减曲线, (VI) 为系统输出波形。



(a) 无延迟滤波输出  
(a) Filtering output without delay



(b) 延迟滤波输出  
(b) Filtering output with delay

图 4 强度噪声抑制仿真

Fig. 4 Simulation of intensity noise suppression

对于式 (13), 当  $\pi f \Delta t$  足够小 ( $\pi f \Delta t \leq 0.3$ ) 时, 输出光强波动可表示为:  $N = 2I' \pi f \Delta t$ 。系统输出动态控制精度为:

$$\alpha = N/I' = 2\pi f \Delta t \quad (14)$$

图 5 为系统可以取得的动态控制精度  $\alpha$  与延迟时间以及噪声频率的对应关系。

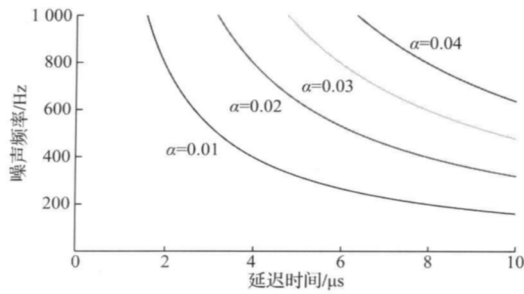


图5 动态控制精度  $\alpha$  与延迟时间以及噪声频率的关系曲线

Fig. 5 The relationship between control delay and noise frequency under different values of  $\alpha$

#### 4 低频强度噪声抑制实验

实验系统框图如图6所示,电光调制器将信号发生器产生的低频正弦信号调制到稳定的FB激光源上,作为仿真低频噪声扰动输出,经过50:50耦合器后,一路输出直接由光探测器PD检测;另一路经VOA后输出至光探测器PD检测。设计的系统控制延迟时间为 $2.1\ \mu\text{s}$ ,改变VOA系统设定输出光功率值以观测同一扰动频率下扰动的抑制情况。

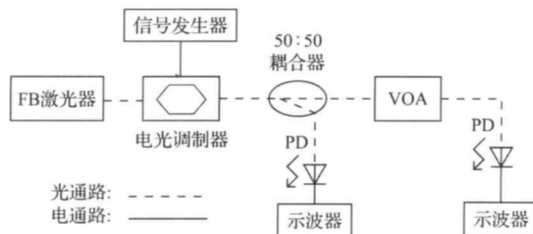


图6 系统功能测试框图

Fig. 6 Experimental setup

图7为扰动频率为800 Hz,光功率扰动幅度为2 dB时系统测试结果。曲线(I)为耦合器直接输出至PD探测的结果,表示初始扰动信号;曲线(II)为高速VOA对波动光源进行了部分抑制;曲线(III)为高速VOA对光源波动实现有效抑制后的信号,测得输出平均值为1.9 V,峰峰值为20 mV,扰动幅度被抑制到1%以下,从而实现了预期的低频强度噪声抑制的目的。

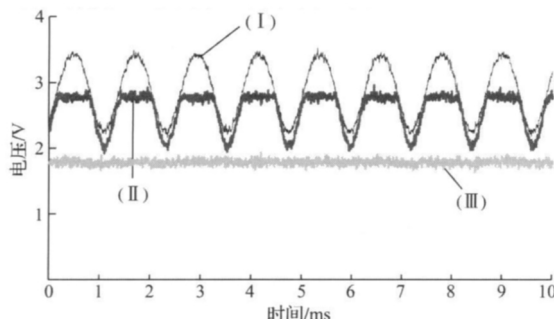


图7 系统功能测试结果

Fig. 7 Experimental results

#### 5 结论

实验结果表明采用高速VOA系统可以对一定频率范围内的光源低频强度噪声实现较好的平滑抑制效果,同时基于高速VOA的前馈-反馈控制的控制结构方案,有利于减小PLZT晶体电滞效应和温度敏感特性等因素的影响,从而使光源能够实现稳定的光强输出。

#### 参考文献

- [1] AGRAWAL G P. Fiber-optic communications systems [M]. 3rd ed. John Wiley & Sons, 2002.
- [2] 孙圣和. 现代传感器发展方向[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(1): 1-10.  
SUN SH H. Development trend of modern sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(1): 1-10.
- [3] 刘颖, 李言, 姬忠校, 等. 光纤陀螺用Y波导半波电压稳定性的研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 449-453.  
LIU Y, LI Y, JI ZH X, et al. Research on the half-wave voltage stability of Y waveguide in FOG [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(2): 449-453.
- [4] 张东生, 姚开方, 罗裴, 等. 一种新型的光纤光栅高频加速度传感器[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(7): 1400-1403.  
ZHANG D SH, YAO K F, LUO P, et al. Novel fiber bragg grating accelerometer with high resonant frequency [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(7): 1400-1403.
- [5] SHORE K A, KANE D M. Low quantum noise laser diodes [J]. Optoelectronics, IEE Proceedings, 2001, 148(56): 247-250.
- [6] MIKROULIS S, STAMATAKI I, ALEXANDROPOULOS D, et al. Low-frequency relative intensity noise due to nonlinear mode competition in InGaAsP-InP microring lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(18): 1895-1897.
- [7] 岱钦, 宋文武, 王希军. 高频半导体激光器的驱动设计及稳定性分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 745-748.  
DAI Q, SONG W W, WANG X J. Design and stability analysis of high frequency LD's driving circuit [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(5): 745-748.
- [8] 唐敏, 韩海. 基于NCP5662的半导体激光器驱动电源[J]. 电子测量技术, 2008, 31(3): 47-50.  
TANG M, HAN H. Driver of semiconductor laser based on NCP5662 [J]. Electronic Measurement Technology,

2008, 31(3): 47-50.

- [9] 井超, 张晓华. LD 泵浦固体激光器温控单元的设计 [J]. 国外电子测量技术, 2009, 28(5): 59-62.  
JING CH, ZHANG X H. Design of temperature-control unit of LD-Pumped solid laser [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2009, 28(5): 59-62.
- [10] HABRUSEVA T, O'DONOGHUE S, REBROVA N, et al. Quantum-dot mode-locked lasers with dual-mode optical injection [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(6): 359-361.
- [11] 徐建营, 王学锋, 李超, 等. 光强外调制法抑制相对强度噪声 [J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(6): 740-743.  
XU J Y, WANG X F, LI CH, et al. Method of external optical intensity modulation to reduce relative intensity noise [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2008, 16(6): 740-743.
- [12] AVRUTIN E A. Dynamics and spectra of monolithic mode-locked laser diodes under external optical feedback [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009, 45(11): 1456-1464.
- [13] JIANG H, ZOU Y, CHEN Q, et al. Transparent electro-optic ceramics and devices [J]. Proceedings of the SPIE, 2005, 56(44): 380-394.
- [14] 陈志武, 程璇, 张颖. 温度对 PLZT 铁电陶瓷电疲劳性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(8): 847-851.  
CHEN ZH W, CHENG X, ZHANG Y. Effect of temperature on electric fatigue behavior of PLZT ferroelectric ceramics [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(8): 847-851.

#### 作者简介



郑鑫 2009 年于山东大学获得学士学位, 现为浙江大学物理电子学专业在读硕士研究生, 主要研究方向为光网络与光通信和微波光子学。

E-mail: 20931008@zju.edu.cn

**Zheng Xin** received his bachelor degree from Shandong University in 2009. Now he is a master student in specialty of physical electronics, Zhejiang University. His current research interest is optical networks and optical communications and microwave photonics.



冀军 2006 年于浙江大学获得学士学位, 2010 年于浙江大学获得硕士学位, 主要研究方向为光网络与光通信。

E-mail: jijun1205@gmail.com

**Ji Jun** received his bachelor degree in 2006 and his master degree in 2010 both from Zhejiang University. His research interest is optical networks and optical communications.



金晓峰, 教授, 1990 年毕业于华中科技大学并获得学士学位, 1996 年毕业于浙江大学获得博士学位, 主要研究方向为毫米波电子技术、微波光子技术、光纤通信与光传感技术等。

E-mail: Jinx00@zju.edu.cn

**Jin Xiaofeng**, professor, received his bachelor degree from Huazhong University of Science and Technology in 1990 and obtained his Ph. D. degree from Zhejiang University in 1996. His current research interest includes millimeter-wave electronics, microwave photonics, optical communications and fiber optic sensors.