文章编号:1002-2082 (2020) 01-0186-08

基于 FFP-TF2 滤波器的可调谐激光器

谭 超[1],万生鹏[1,2],宋早标[1],刘 恒[1],肖 登[1]

(1. 南昌航空大学 江西省光电检测技术工程实验室,江西 南昌 330063; 2. 南昌航空大学 无损检测与光电传感技术及应用国家地方联合工程实验室,江西 南昌 330063)

摘 要: 可调谐激光器在光纤传感和光纤通信中有着广泛的应用,引起了人们的广泛重视。设计并搭建了基于 FFP-TF2 滤波器的可调谐激光器系统。通过 FPGA 设计的基于 DDS (direct digital frequency synthesis) 函数信号发生器与模拟放大电路结合产生的驱动电压,调节 FFP-TF2 腔长的变化,进而改变激光器的输出波长。该系统可以实现对 FFP-TF2 单点电压和扫描电压的驱动,从而激光器可以输出单波长激光和多波长扫描激光,在激光器输出波长 1 532 nm~1 568 nm 范围内,可以调节单波长输出,也可以调节多波长扫描范围,且两种模式可以切换使用。实验结果表明,激光器输出 3 dB 线宽基本保持在 0.01 nm 左右,激光器输出中心波长与驱动电压线性拟合度为 99.934%,灵敏度为 3.915 nm/V,而 FFP-TF2 输出中心波长与驱动电压线性拟合度为 99.986%,灵敏度为 4.021 nm/V,激光器输出中心波长相对 FFP-TF2 的误差为 2.6%,说明该激光器系统输出波长具有线宽窄、稳定性好、灵活性高等优点。

关键词: 光纤光学; FFP-TF2; 可调谐; FPGA; DDS

中图分类号:TN253 文献标志码:A **DOI:** 10.5768/JAO202041.0107001

Tunable laser based on FFP-TF2 filter

TAN Chao[1], WAN Shengpeng[1,2], SONG Zaobiao[1], LIU Heng[1], XIAO Deng[1]

(1. Jiangxi Engineering Laboratory for Optoelectronics Testing Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. National Engineering Laboratory for Nondestructive Testing and Optoelectric Sensing Technology and Application, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Tunable lasers are widely used in optical fiber sensing and optical fiber communications, which have attracted extensive attention. A tunable laser system based on FFP-TF2 filter was designed and built. The driving voltage generated by the DDS(direct digital frequency synthesis) function signal generator and the analog amplifying circuit designed by the FPGA was adjusted to change the cavity length of the FFP-TF2, thereby changing the output of the laser wavelength. This system could drive the single point voltage and scanning voltage of FFP-TF2, so that the single-wavelength laser and the multi-wavelength scanning laser could be output by laser. In the laser output wavelength range of 1 532 nm to 1 568 nm, the single-wavelength output and the multi-wavelength scanning range could be adjusted, and the two modes could be switched. Experimental results show that the 3 dB linewidth of the laser output is kept at about 0.01 nm, the linear fitting degree of the laser output center wavelength and the driving voltage is 99.934%, the sensitivity is 3.915 nm/V, while the linear fitting degree of the FFP-TF2 output center wavelength and the driving voltage is 99.986%, the sensitivity is 4.021 nm/V. And the error of the laser output center wavelength relative to FFP-TF2 is 2.6%, which indicates that the laser system output wavelength has the advantages of narrow line width, good stability

收稿日期: 2019-06-17; **修回日期:** 2019-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(61465009, 61067005);江西省主要学科学术和技术带头人资助计划项目(20172BCB22012)

作者简介: 谭超(1994−),男,硕士,主要从事光纤传感研究工作。E-mail: 1325373146@qq.com

通信作者: 万生鹏(1971−),男,教授,硕士生导师,主要研究方向为光通信及传感/光电检测技术研究。E-mail: sp.wan@163.com

and high flexibility.

Key words: optical fiber optics; FFP-TF2; tunable; FPGA; DDS

引言

随着光纤通信及传感技术的不断发展, 对光源可集成化, 小型化, 稳定性高, 调谐范围广, 线宽窄等要求越来越高[1-3]。由于波长可调谐激光器在光纤通信、医学、光传感等领域的应用越来越广泛, 因此越来越受到科研人员的青睐。波长可调谐激光器不仅提高了光纤网络的灵活性, 还降低了光纤网络复杂度及能耗, 促进了光纤通信及传感技术的不断发展。

从激光器诞生到现在, 可调谐激光器在不断发展, 各种各样的激光器被提出, 再到生产应用, 最后被性能更好的激光器所淘汰。按照不同的波长调谐方法可分为机械、热、电调谐激光器等[4]。机械调谐通过调谐外腔反射的角度来改变腔长进而改变波长, 该种激光器的调谐速度受限于机械部件; 热调谐通过控制温度来改变腔长进而改变波长, 但是温度比较难以控制; 电调谐是通过电路来选择不同激光器输出进而实现波长调谐, 该种激光器的调谐范围取决于激光器数量, 从而导致工艺复杂, 成本较高。

FFP-TF2 滤波器是一种简易的光学谐振腔, 由两段严格平行且内表面镀有高反射率材料的反射端面组成[5-11]。由于其腔长可调能控制波长输出的特性, 被广泛应用于各种可调谐激光器设计中。

为了更好地实现波长调谐范围宽, 线宽窄, 稳定性好, 本文设计并搭建出一种新型的可调谐激光器系统。该系统是通过控制 FFP-TF2 滤波器的驱动电压改变腔长,进而改变系统输出的激光波长。提供驱动电压的方式有很多种: 一、可以通过可调谐的直流电压源进行单点电压调节, 进而输出不同中心波长的激光; 二、可以通过信号发生器进行多点扫描电压, 进而周期性等间隔地输出不同中心波长的激光; 三、可以通过 FPGA 设计的基于 DDS 函数信号发生器和模拟放大电路进行单点或扫描的电压切换控制。第一种方式局限性在于只能单点调谐, 且系统不易集成, 适用于实验室研究使用。第二种方式局限性在于只能进行扫描调谐, 扫描电压受限于信号发生器, 且系统成本较高。本文采用第三种调谐方式, 通过 FPGA 中的程序代码控制, 不仅可以实现单点和扫描两种方式调谐的切换, 还可以改变波长调谐范围、扫描周期和步进, 具有高灵活性, 可集成化的优点。

1　驱动电压信号的设计

1.1　基于 DDS 函数信号发生器设计

直接数字频率合成(简称 DDS)是一种应用数字技术产生信号波形的方法[12-15]。由于 DDS 技术有输出频率范围宽, 分辨率高, 数字调制性能好, 输出信号波形可调, 频率切换速度快且频率切换时输出信号相位连续的特点, 所以被广泛应用于各种函数信号发生器的设计。

图 1 是 DDS 技术产生信号波形的原理框图。图中F为频率控制字, 在 Verilog HDL 程序中通过控制F的大小来控制输出波形的频率。CLK 为系统的基准时钟源, 对地址计数器与 DA 转换器模块进行时钟控制, 其周期为T_i。地址计数器可以产生 ROM(存储一个波形周期的数据)中的数据地址信号, 用来周期性地读取出 ROM 中的波形幅值信号。ROM 中存储的波形信号是由 MATLAB 或 Mif_Maker2010 等软件生成相应所需波形信号的离散数据的 MIF 文件。读取出的波形幅值信号再经过 DA 转换器进行数模转换, 以及低通滤波器滤波后就可以生产模拟波形电压信号。下面以产生输出初始相位为 0, 频率可调谐的正弦波形信号来介绍 DDS 技术的原理。

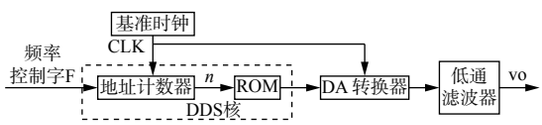

图 1　DDS 技术产生波形的原理图

Fig. 1　Schematic diagram of waveform generated by DDS technology

正弦波形信号的表达式为

$$V(t) = A\sin(2\pi \times f_{\text{out}} * t) \tag{1}$$

式中: A为正弦波信号的振幅; f_{out}为 DDS 输出正弦波信号的频率。

假设系统模块的采样时钟周期为T_i, 频率为f_i, 则采样间隔的相位改变量为

$$\varphi_i = 2\pi \times f_{\text{out}} \times T_i = 2\pi \times f_{\text{out}}/f_i \tag{2}$$

将一个周期正弦波形信号的相位2π均匀离散

为2^N等份，则相位分辨率为$\Delta = 2\pi/2^N$。如果 ROM 中存储的一个周期等间隔正弦波形信号数据样本数为2^N，则 DDS 输出电压信号的周期、基准时钟周期与从 ROM 中读出的数据点之间关系如图 2 所示。图 2 中空心圆点代表从 ROM 中读取的正弦波形信号数据点，每经过一个基准时钟周期T_i，地址计数器的地址位加 1，同时存储器会输出一个数据点，直到 ROM 最后一个地址单元中的正弦波形信号数据点被读出，此时 DDS 输出的是一个完整周期的正弦波形信号。之后 DDS 系统会重复读取 ROM 中正弦信号数据，输出周期性的正弦波形。由图 2 可知 DDS 输出信号周期与基准时钟周期的关系式为

$$T_{\text{out}} = 2^N \times T_i \tag{3}$$

$$f_{\text{out}} = f_i/2^N \tag{4}$$

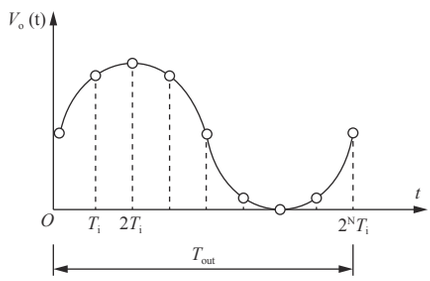

图 2　输出信号的周期与基准时钟周期的关系

Fig. 2　Relation between period of output signal and reference clock

根据采样定理，输出信号频率不能高于系统时钟频率的一半。在实际应用中，为了保证输出信号的质量，一般输出信号的频率不会超过时钟频率的 1/3，以避免混叠。

如果是每隔K个地址输出一个波形信号数据，则 DDS 输出信号周期与基准时钟周期的关系式变为

$$f_{\text{out}} = (K/2^N) \times f_i \tag{5}$$

由(5)式可知，要想改变输出波形频率有 3 种方法：1）改变取样时钟的频率f_i；2）改变取样间隔地址数K；3）改变 ROM 中储存波形信号数据点的个数2^N。

3 种方法中任意改变取样时钟频率和改变取样间隔地址数在 Verilog HDL 程序中很容易编程实现，而任意改变 ROM 中存储波形信号数据点数较为复杂，所以一般改变输出波形频率使用前 2 种方法。

在本文的可调谐激光器以及光纤光栅传感实验中所需的 FFP-TF2 滤波器调谐电压为三角波形信号，DDS 产生三角波形的过 程如图 3 所示。首先对所需的三角波形进行数据采样，并将数据存储在 ROM 中生成数据表；在需要输出波形时，周期性地调用 ROM 数据表的数据；再经过 DA 数模转换和低通滤波器得到所需三角波模拟信号波形。

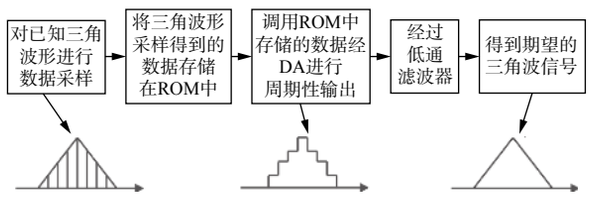

图 3　DDS 产生三角波信号的过程

Fig. 3　Process of generating triangular wave signal by DDS

上文介绍了 DDS 技术原理及硬件实现方法。下面简单介绍 DDS 通过 Verilog HDL 编程产生三角波形信号 RTL 图，如图 4 所示。图中主要包含

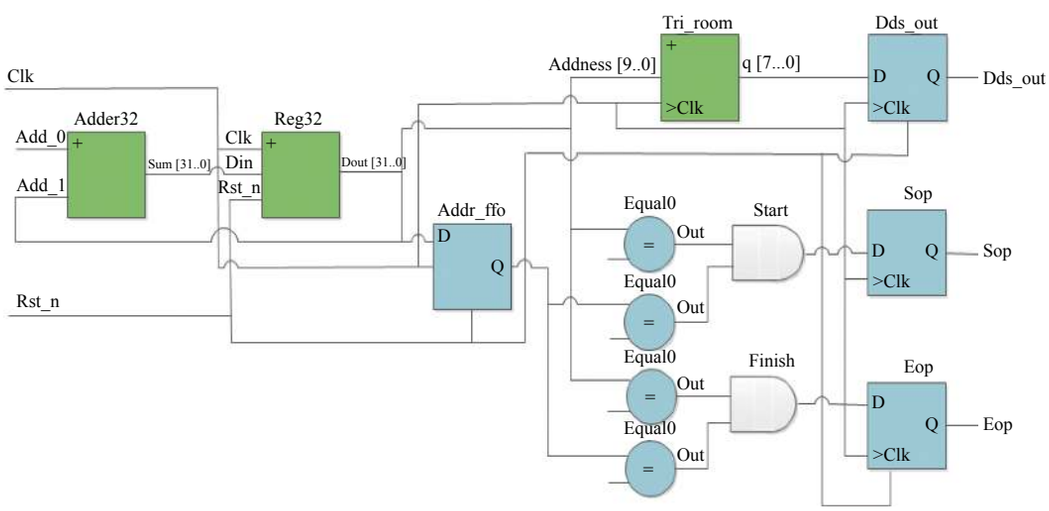

图 4　DDS 生成三角波信号的 RTL 图

Fig. 4　RTL diagram of generating triangular wave signal by DDS

了地址计数器模块、寄存器模块、三角波形 ROM 模块。基于实验要求, 本文采用的 DAC 转换芯片是 8 位高速并行 AD9708, 其数模转换速率最高为 125 MSPS。图 5 为 DDS 中 DAC 数模转换模块 AD9708 的 RTL 图。其中包含了时钟采样模块和一个 FIFO 缓存模块, 主要作用分别是控制 DAC 模块采样频率和缓存波形信号数据。通过 da_clk 和 da_out[7:0] 端口输入到 DAC9708 芯片中进行控制。

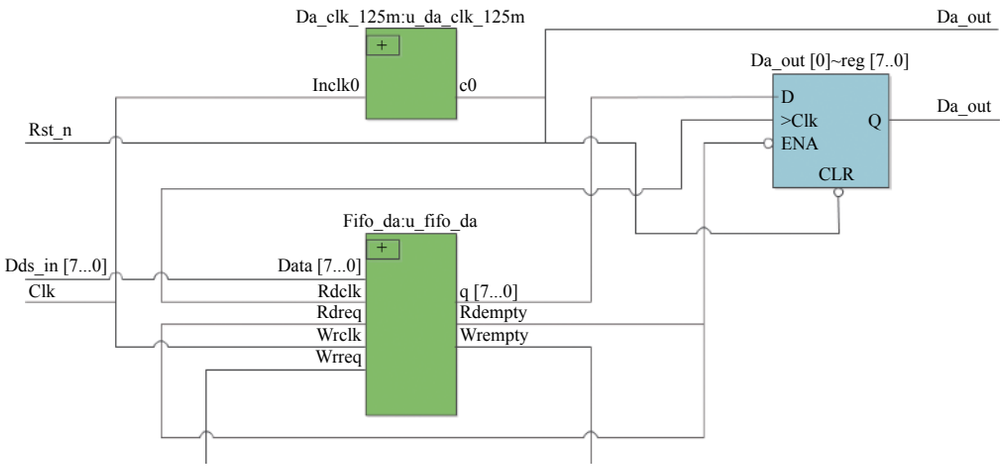

图 5　DDS 中 DAC 数模转换模块 RTL 图

Fig. 5　RTL diagram of DAC digital-to-analog conversion module in DDS

1.2　驱动电压放大电路设计

由 DDS 产生的数字三角波形信号经过 AD9708 芯片模块数模转换并经低通滤波器滤波之后输出模拟电压信号, 但使用 FPGA 的 EP4CE15F17C8N 型芯片板最高输出不超过 5 V, 不能满足 FFP-TF2 滤波器调谐电压扫描波长需求, 所以需要使用模拟放大电路对驱动信号进行放大。考虑到 FFP-TF2 滤波器的容抗特性, 使用的驱动电路要具有负载能力, 因此本文设计了如图 6 所示的驱动模拟信号放大电路。

如图 6 所示, 电路中使用了 OP37G 和 NE5532P 两颗运放芯片, $R1$、$R2$、$R3$、$R4$四个电阻, $C1$、$C2$ 两个电容。OP37G 的作用是对从 AD9708 芯片模块输出的三角波调谐电压信号进行放大, 可以

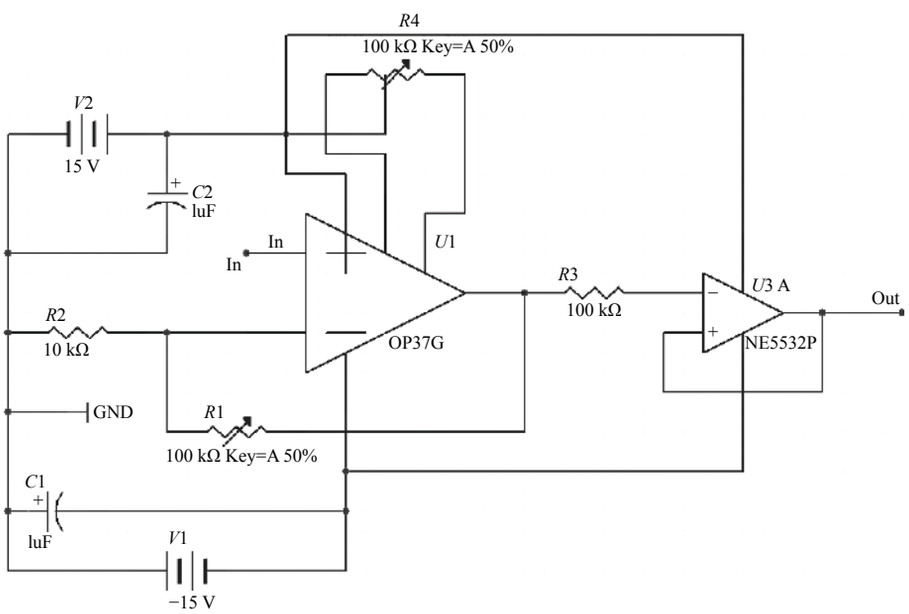

图 6　驱动模拟信号放大电路图

Fig. 6　Amplifying circuit diagram of driving analog signal

将其放大到±15 V，满足设计要求。NE5532P 与 $R3$组合作为射极跟随器使用，可以提高放大电路的负载能力，从而平衡驱动 FFP-TF2 滤波器时导致的容抗变化。电容 $C1$ 和 $C2$ 分别于正负电源并联，用于抑制由于电源波动而引入的高频噪声。$R4$具有偏置调零作用，即接入输入信号前，用示波器观察输出信号是否为 0，不为 0 时可通过调节 $R4$使其为 0。电阻$R1$、$R2$与运放 OP37G 组合形成一个负反馈回路，在使用时可以通过调节$R1$来改变电路输出的放大倍数，其电路放大系数关系式为

$$B = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = \frac{R1}{R2} + 1 \tag{6}$$

由(6)式可知，只要电源电压足够大，理论上最高可以放大 11 倍，但电路输出电压不能超过电源电压，由实验可知，11 V 扫描电压足以实现可调谐激光器全波长段扫描，本文设计的放大电路满足实验要求。由于 FFP-TF2 滤波器是利用磁致伸缩效应引起的微位移控制腔长，因此伴随着伸缩迟滞现象。即当 FFP-TF2 滤波器产生相同腔长位移时，三角波驱动电压信号向上变大过程与向下变小过程所对应的调谐电压并不相同。所以，为了实验的精确性，保证解调过程相同一致，实验只分析变大或变小单个扫描过程。

2　实验系统与工作原理

本文设计的可调谐激光器实验系统原理框图如图 7 所示。首选由 980 nm 的泵浦光源(LD)发出的光，可以通过调节电流进而控制其输出功率；通过 980 nm/1 550 nm 的波分复用器(WDM)后进入 3 m 的增益介质掺铒光纤(EDF)中；再通过光隔离器(ISO)后进入 2×2 光纤耦合器中(Coupler)，实验中使用的有 9∶1、2∶1、1∶1 的耦合器。图 7 中输出端使用的是 9∶1 的耦合器，一端是大约 90% 的光信号反馈回环形腔，另一端 10% 左右的光信号作为可调谐激光器的输出光；反馈回环形腔的光再经过 FFP-TF2 滤波器[16]后，输出的光信号与 LD 发出的 980 nm 泵浦光通过 980 nm/1 550 nm 光纤耦合器耦合形成回路；驱动电压模块(DV)对 FFP-TF2 滤波器进行电压调节。由于 FFP-TF2 滤波器对温度比较敏感，通常对其进行恒温处理，已消除温度对系统测试结果的影响，本文所做实验 FFP-TF2 都是在 25 ℃ 下进行的。

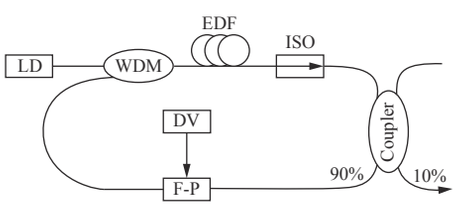

图 7　可调谐激光器实验系统原理图

Fig. 7　Schematic diagram of tunable laser experimental system

3　实验测试与分析

根据实验系统图搭建出了测试系统，从而对可调谐激光器的各性能进行测试，如图 8 所示。

图 8　实验测试系统实物图

Fig. 8　Physical diagram of experimental test system

通过实验系统测试出可调谐激光器输出中心波长在 1 532 nm~1 567 nm 之间的 3 dB 线宽如图 9 所示。由图 9 可知，输出不同中心波长的 3 dB 线宽最大不超过 0.011 nm，最小不低于 0.009 nm，基本保持在 0.01 nm 左右，说明本文设计的可调谐激光器具有比较稳定且较窄的线宽。图 10 为通过光谱仪 AQ6319 观察到可调谐激光器输出中心波长为 1 556.295 5 nm 时，其对应的 3 dB 线宽为 0.010 7 nm。

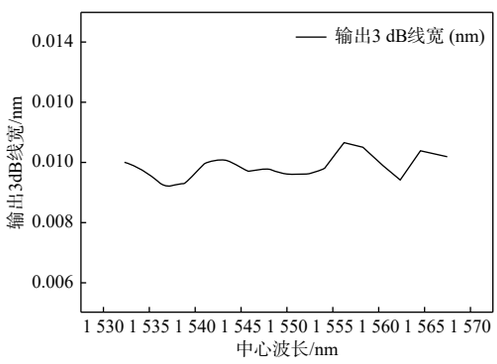

图 9　输出不同中心波长的 3 dB 线宽

Fig. 9　Output 3 dB linewidth of different center wavelengths

实验测试了宽带光源通过 FFP-TF2 滤波器后输出中心波长与驱动电压之间的关系，通过 Origin 软件

对测试数据进行线性拟合, 线性拟合度为 99.986%, 如图 11 所示。线性拟合关系式为

$$\lambda_1 = 4.021U + 1\,531.808 \tag{7}$$

通过测试可调谐激光器输出中心波长与驱动电压之间的关系, 线性拟合度为 99.934%, 如图 12 所示。线性拟合关系式为

$$\lambda_2 = 3.915U + 1\,531.684 \tag{8}$$

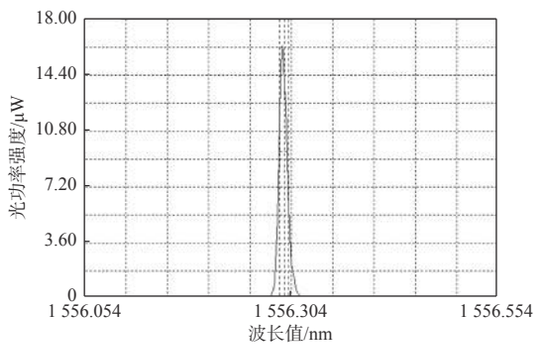

图 10　输出中心波长为 1 556.295 5 nm 的 3 dB 线宽

Fig. 10　Output 3 dB linewidth with center wavelength of 1556.295 5 nm

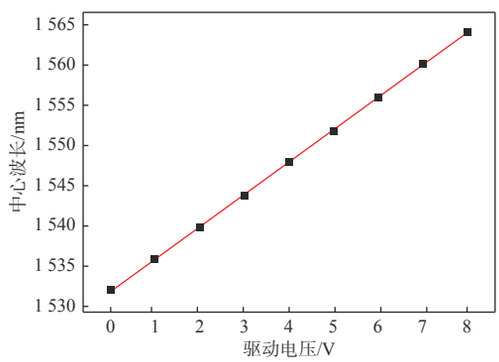

图 11　FFP-TF2 滤波器输出中心波长与驱动电压关系

Fig. 11　Relation between FFP-TF2 filter output center wavelength and driving voltage

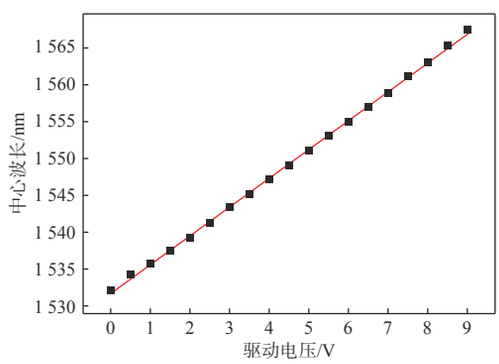

图 12　可调谐激光器输出中心波长与驱动电压关系

Fig. 12　Relation between tunable laser output center wavelength and driving voltage

由图 11 与(7)式可以发现宽带光源通过 FFP-TF2 滤波器后输出中心波长与驱动电压之间具有良好的线性关系, 同时得到 FFP-TF2 输出中心波长灵敏度为 4.021 nm/V。由图 12 与(8)式可以发现可调谐激光器输出中心波长与驱动电压之间也具有良好的线性关系, 同时得到可调谐激光器输出中心波长灵敏度为 3.915 nm/V。通过对比发现, 两者之间输出中心波长灵敏度相差 0.106 nm/V, 可调谐激光器输出中心波长相对于 FFP-TF2 的误差比较小, 仅为 2.6%, 说明该激光器的输出波长随驱动电压的变化基本与 FFP-TF2 随驱动电压的变化一致。固定 FFP-TF2 温度和调谐电压研究其中心波长随时间变化的曲线图, 如图 13 所示。总结得出, 当固定调谐电压时 FFP-TF2 输出中心波长会随时间快速稳定, 表明其具有很好的输出稳定性。

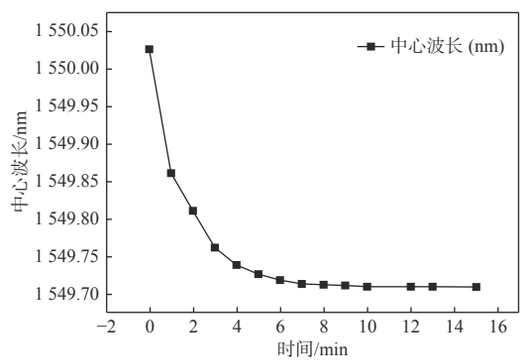

图 13　27.5 ℃ FFP-TF2 固定电压 5.5 V 时输出中心波长随时间变化曲线

Fig. 13　Output center wavelength versus time at FFP-TF2 27.5 ℃ and fixed voltage 5.5 V

本文还研究了不同耦合器输出到回路与系统输出的比对可调谐激光器输出功率的影响, 图 14 是耦合器输出比为 9∶1、2∶1、1∶1、1∶2 时, 泵浦输出功率与可调谐激光器输出功率的关系图。由图 14 可知: 1) 不同耦合器输出比在泵浦功率达到系统阈值后, 可调谐激光器输出功率都随着泵浦输出功率增加而增大, 分别对其阈值后的数据进行线性拟合, 得到线性拟合度分别为 99.293%、99.685%、99.84%、99.799%, 发现都具有较好的线性关系; 2) 在一定范围内, 随着耦合器输出比的减小, 可调谐激光器输出功率阈值逐渐增大, 同时可调谐激光器输出功率随泵浦输出功率增加变化得更快。

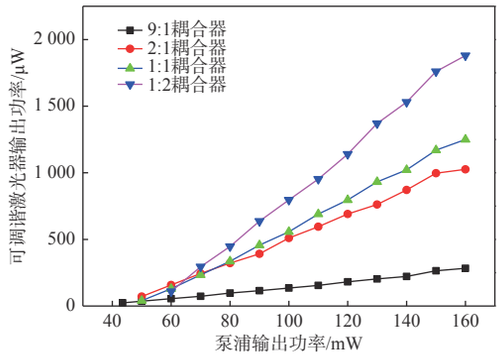

图 14 不同耦合器输出比的泵浦功率与激光器输出功率关系

Fig. 14 Relation between pumping power and laser output power with different coupler output ratios

4 结论

本文中的可调谐激光器是基于 FFP-TF2 滤波器设计的，通过 DDS 函数信号发生器与模拟放大电路结合生产的驱动电压，调节 FFP-TF2 的腔长，进而改变激光器波长的输出。该系统结构简单，可集成化，小型化，激光器输出波长调谐范围宽，线宽窄，稳定性好，灵活性高，可广泛应用于光纤通信及传感等领域。

参考文献：

[1] AHMAD H, MUHAMAD A, SHARBIRIN A S, et al. Tunable Q-switched thulium-doped fiber laser using multiwall carbon nanotube and fabry-perot etalon filter[J]. Optics Communications, 2017, 383: 359-365.

[2] LI W C, YUAN Y G, YANG J, et al. In-fiber integrated high sensitivity temperature sensor based on long Fabry-Perot resonator[J]. Optics Express, 2019, 27(10): 14675.

[3] ZHAO J L, SHI K, YU Y L, et al. Theoretical analysis of tunable three-section slotted Fabry–Perot lasers based on time-domain traveling-wave model[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(5): 1-8.

[4] GAO Yi, WANG Ju, WANG Wenrui, et al. Tunable laser based on Fabry-Perot laser self injection locking[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 247-252.
高毅, 王菊, 王文睿, 等. 基于法布里-珀罗激光器自注入锁定的波长可调谐激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 247-252.

[5] LIU K, MU S X, LU Y, et al. L-band wavelength-tunable MQW Fabry –Perot laser using a three-segment structure[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(18): 1754-1757.

[6] WANG Shaomao, SHANG Junjuan, CUI Kaifeng, et al. Laser frequency drift control based on refrigeration fabry-perot cavity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(3): 164-169.
汪绍茂, 商俊娟, 崔凯枫, 等. 基于制冷法布里-珀罗腔的激光频率漂移控制[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 164-169.

[7] DU Yong, DONG Xiaopeng, CHEN Minxiu, et al. Tunable narrow linewidth fiber laser with two FBG-FPs[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(2): 159-162.
杜勇, 董小鹏, 陈敏秀, 等. 双光纤光栅法-珀腔可调谐窄线宽激光器[J]. 激光与红外, 2013, 43(2): 159-162.

[8] LU Xiqing. Development of wide bandwidth swept source with narrow instantaneous linewidth[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
卢锡清. 窄瞬时线宽的宽带扫频激光光源的研制[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

[9] TANG Chenfei. Research on temperature demodulation system based on FFP-TF2 and dual reference grating[D]. Nanchang: Nanchang Aviation University, 2018.
唐晨飞.基于FFP-TF2和双参考光栅的温度解调系统的研究[D].南昌: 南昌航空大学, 2018.

[10] HOMAR M, BALLE S, MIGUEL M S. Mode competition in a Fabry-Perot semiconductor laser: travelling wave model with asymmetric dynamical gain[J]. Optics Communications, 1996, 131(4/5/6): 380-390.

[11] FAN Zhuo, WANG Shuang, LIU Tiegen, et al. Research of optical fiber Fabry-Perot acoustic vibration sensing demodulation system based on dual tunable lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(4): 213-219.
樊茁, 王双, 刘铁根, 等. 基于双可调谐激光器的光纤法布里-珀罗声振动传感解调系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 213-219.

[12] ZHANG W H, TONG Z R, CAO Y. A dual-wavelength erbium-doped fiber laser with widely tunable wavelength spacing[J]. Optoelectronics Letters, 2014, 10(2): 100-102.

[13] LIANG Zhuang. High frequency function signal generator based on DDS[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2018.
梁状. 基于DDS的高频函数信号发生器设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.

[14] HUANG J Y, YIN K, HONG Z. Design of improved DDS signal generator based on amplitude to phase sampling[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 303/304/305/306: 1873-1877.

[15] CAI Zhiping, ZENG Lizhu, GE Chunfeng, et al. Study of the tunable fiber laser based on angle-tuning Fabry-Perot filter for C-band[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2005, 16(4): 429-432.
蔡治平, 曾丽珠, 葛春风, 等. 基于角度调谐F-P干涉仪的C波段可调谐激光器的研究[J]. 光电子·激光, 2005, 16(4): 429-432.

[16] ZHANG Huixia. Study of all-optical F-P tunable filter and its application in DWDM system[D].Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2014.
张晖霞. 全光纤F-P腔可调谐滤波器及在DWDM系统中的应用研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.

（上接第 113 页）

[18] BAO Fucheng, DUAN Jin, DONG Jianqin, et al. Polarization imaging characteristics of underwater targets[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(1): 27-32.
鲍富成, 段锦, 董锁芹, 等. 水下目标物偏振成像特性研究[J]. 应用光学, 2019, 40(1): 27-32.

[19] BAI Sike, DUAN Jin, LU Yizhen, et al. Experimental study on polarization imaging characteristics of different materials[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(4): 510-516.
白思克, 段锦, 鲁一倬, 等. 不同材质的偏振成像特性实验研究[J]. 应用光学, 2016, 37(4): 510-516.

[20] AGAIAN S S, PANETTA K, GRIGORYAN A M. Transform-based image enhancement algorithms with performance measure[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(3): 367-378.