

# 基于声光调制的线性扫频激光器

李宏博, 谭中伟\*, 孔梦龙, 高洪培

北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044

**摘要** 针对线性扫频激光器在扫频速度、步长、范围、精度和信噪比等方面差异较大的问题, 提出一种基于声光调制直接生成频率扫描激光器的方案。该激光器采用环形腔体结构, 具有扫频速度快、扫频精度高、信噪比好等特点。通过分析激光器的信噪比和掺铒光纤放大器中掺铒光纤的长度等参数对生成的频率扫描激光器性能的影响, 对现有的频率扫描激光器进行了优化。

**关键词** 激光器; 声光调制; 环形腔体结构; 掺铒光纤

**中图分类号** TN243

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201946.1201004

## Linear Frequency Scanning Laser Based on Acousto-Optic Modulation

Li Hongbo, Tan Zhongwei\*, Kong Menglong, Gao Hongpei

Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract** Aiming at the differences in sweep speed, step size, range, accuracy, and signal-to-noise ratio (SNR) of linear sweep lasers, this study proposes a scheme for directly generating an acousto-optic modulation-based frequency-scanning laser. It adopts a ring-shaped cavity structure, which has the characteristics of fast sweeping speed, high frequency sweeping precision, and high SNR. The existing frequency-scanning laser is optimized by analyzing the effects of the laser's SNR and length of the erbium-doped fiber in the erbium-doped fiber amplifier on the performance of the generated frequency-scanning laser.

**Key words** lasers; acousto-optic modulation; ring cavity structure; erbium-doped fiber

**OCIS codes** 140.3298; 140.3500; 140.3600

## 1 引言

随着科技的发展, 人们在不断追求更短的时间、更窄的频带、更快的速率。电子技术由于受到电子本身固有的限制, 难以完全满足超高速信息处理的要求。微波光子技术具有响应速度快、传输容量大、体积小的优点, 在信息处理领域有着越来越广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。根据测量原理不同, 基于微波光子学的频谱测试方法<sup>[3-4]</sup>主要分为两种: 一是利用光学频率梳作拍频, 将高频信号降低到中频信号进行检测, 减小对电子设备带宽的要求<sup>[5]</sup>; 二是将射频信号调制到光载波上, 在光域中进行傅里叶变换和光电转换后, 得到频谱波形<sup>[6]</sup>。

常见的激光器的频率扫描方法是基于光频梳,

通常频率梳可以通过锁模激光器或非线性的方法产生<sup>[7-8]</sup>, 但是在射频测量中最常用的方法是通过级联的调制器实现, 该方法结构简单、稳定性好, 光载波的线宽窄, 频率间隔连续可调<sup>[9]</sup>, 因而得到了大量的研究。目前已经有使用多个调制器<sup>[5,10-11]</sup>来产生频率梳; 可在环形腔中使用调制器来反复调制, 以增强频率梳<sup>[12]</sup>; 可以使用不同微波信号的组合来驱动一个相位调制器<sup>[13]</sup>; 也可使用偏振调制器加调制器的方法来产生频率梳<sup>[14]</sup>。待测信号与频率梳产生拍频后, 通过低通滤波器就能得到待测信号与最近频率梳的间隔, 只需要确定频率梳的位置就可精确测定射频信号的频谱。在复杂电子环境中, 待测信号的信噪比较低, 还需要通过频率扫描的方法, 利用可调谐滤波器或可调谐激光器<sup>[5,15]</sup>, 对带宽范围内的

收稿日期: 2019-07-01; 修回日期: 2019-08-03; 录用日期: 2019-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(61875008)

\* E-mail: zhwtan@bjtu.edu.cn

频率梳进行扫描,然后分别对每个频率梳对应的波段进行光电转换和傅里叶变换,拼接成完整的频谱,故而对每个频率梳的波长准确性有很高的要求。同时,扫频光源还应用在光纤光栅的温度和拉力传感系统中<sup>[16]</sup>,使得光纤布拉格光栅(FBG)传感系统的解调部分的复杂度大大降低。

传统的频率扫描激光器以滤波器、增益介质、谐振腔为核心元件,为实现激光的频率扫描,系统通常采用环形结构。20世纪末,麻省理工学院 Lincoln 实验室首次提出频率扫描的概念<sup>[17]</sup>,实现了中心频率为 840 nm、扫频范围为 10 Hz 的扫频光源。2007年,Zhang 等<sup>[18]</sup>提出一种基于光纤法布里珀罗-可调谐滤波器(FFP-TF)的扫频激光器,该系统的原理为半导体激光输出的宽带光源经过滤波器后,滤波器带外的光继续返回到谐振腔内进行反射振荡,经过振荡后的光信号经过一定的选择后形成稳定的输出,该结构可实现的扫频带宽为 64 nm。陈明惠等<sup>[19]</sup>报道了一种基于光栅/多面镜调谐滤波器的双半导体放大器串联型傅里叶域锁模的快速线性扫频激光光源。实现了中心波长为 1290 nm,扫频速度为 14.8 kHz,扫频范围为 108 nm 的傅里叶域锁模激光器,实现了各色光在长光纤谐振腔内的同时谐振,提高了扫频激光光源各项性能。暨南大学提出一种高速线性扫频激光光源<sup>[20]</sup>,该光源在环形结构内外分别设置两级光开关,可实现波长间隔可调谐、瞬时线宽很窄的扫频输出。目前还有基于移频环路扩频的新型宽带扫频光源,其主要的优点在于可将光源和频移后的信号进行单边带调制。

本文介绍了应用于下变频关键技术的线性扫频激光器,针对环形结构的扫频激光器存在输出不平坦、信噪比低等问题,采用声光调制的方法。声光调制器不但有移频作用,还对环内信号有着调制的作用。同时还研究了掺铒光纤的长度对输出信号平坦度和信噪比的影响。

## 2 实验原理

图 1 为基于声光调制的频偏反馈(FSF)<sup>[21]</sup>环形激光器的原理图,耦合器的输出端接入声光调制器和光带通滤波器后,再接回耦合器的输入端以形成一个环形腔。在环形腔内,每经过一圈,光信号的频率偏移为  $f_s$ 。环形腔的时延为  $\tau$ ,由环形腔的腔长  $L$  和光纤的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  决定。其中  $c$  为真空中的光速。

光波的电场强度可设为  $E(t) = E_0 e^{-i(\omega_0 t + \varphi_0)}$ ,其中  $E_0$  为振幅, $\omega_0$  为角频率, $\varphi_0$  为相位角。一个

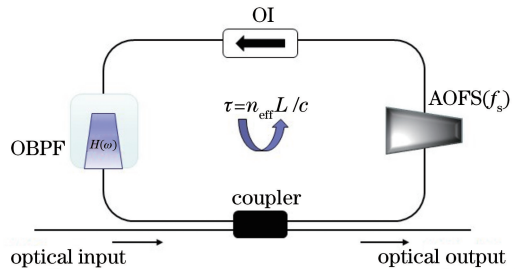


图 1 基于声光调制的 FSF 环形激光器的原理图  
Fig. 1 Schematic of FSF ring laser based on acousto-optic modulation

初始相位  $\varphi_0 = 0$  的电场可表示为  $E(t) = E_0 e^{-i\omega_0 t}$ ,进行 Fourier 变换有  $E(\omega) = \int E(t) e^{-i\omega t} dt = \int E_0 e^{-i(\omega + \omega_0)t} dt$ 。环内每圈的时间延时为  $\tau$ ,频移为  $\omega_s$  ( $\omega_s = 2\pi \cdot f_s$ )。对于负频移,经过  $n$  圈,时域上时间延时为  $\tau, 2\tau, 3\tau, \dots, n\tau$ ;频域上频移为  $\omega_0 - \omega_s, \omega_0 - 2\omega_s, \omega_0 - 3\omega_s, \dots, \omega_0 - n\omega_s$ 。光信号经  $n$  圈环形腔的传递函数为

$$\sum_n \delta(\omega - \omega_0 + n\omega_s) \cdot e^{in\omega_0\tau} = \delta(\omega - \omega_0 + \omega_s) \cdot e^{i\omega_0\tau} + \delta(\omega - \omega_0 + 2\omega_s) \cdot e^{i2\omega_0\tau} + \dots + \delta(\omega - \omega_0 + n\omega_s) \cdot e^{in\omega_0\tau} \quad (1)$$

理想情况下,中心频率  $f_0$  的连续脉冲信号在通过一次循环频移环路进行负频移后,生成一个频率是  $f_0 - f_s$  的信号,此信号再通过光耦合器分成两路光信号,一路通过端口输出,一路再次通过循环频移系统,生成一个频率是  $f_0 - 2f_s$  的光信号。多次经过此循环频移系统,可以得到  $N$  个载波信号,也就是在输出端是一个包含  $f_0 - f_s, f_0 - 2f_s, \dots, f_0 - Nf_s$  的光信号。由于  $\omega_0 \gg \omega_s$ ,若只考虑光频梳的周期特性,不考虑起始位置  $\omega_0$ , (1) 式可改写为  $\sum_n \delta(\omega + n\omega_s) \cdot e^{in\omega_0\tau}$ 。假设理想带通滤波器的函数为  $H = H(\omega) \cdot e^{-i\omega t}$ ,带宽为  $\Delta\omega$ ,根据信号的筛选性质,可得光信号经  $n$  圈环形腔的传递函数为

$$H \cdot \sum_n \delta(\omega + n\omega_s) \cdot e^{in\omega_0\tau} = \sum_n H(n\omega_s) e^{in\omega_0\tau} \cdot \delta(\omega + n\omega_s) \quad (2)$$

在不考虑高阶色散效应、光学的非线性现象和损耗的情况下,设定连续激光器的中心波长为 1549.346 nm,如图 2(a) 所示,理想光带通滤波器的带宽范围为 1549.20~1549.32 nm,如图 2(b) 所示。当连续激光信号作为入射信号输入到环形腔内时,输出信号为光频梳,其仿真结果图如图 2 所示。在

时域上,环形腔的时延  $\tau$  在频域上不影响光频梳的谱线形状,只在频率上进行一个相位调制。若考虑时延  $\tau$  引起的相位调制,频域的输出信号的频谱函

数则为  $G = \sum_n H(n\omega_s) e^{in\omega_s t} e^{in\omega_0 \tau}$ , 其中图 2(b) 为 FFSF 输出的光频谱图,形成光频梳的包络即为光带通滤波器的函数  $H(\omega)$ 。

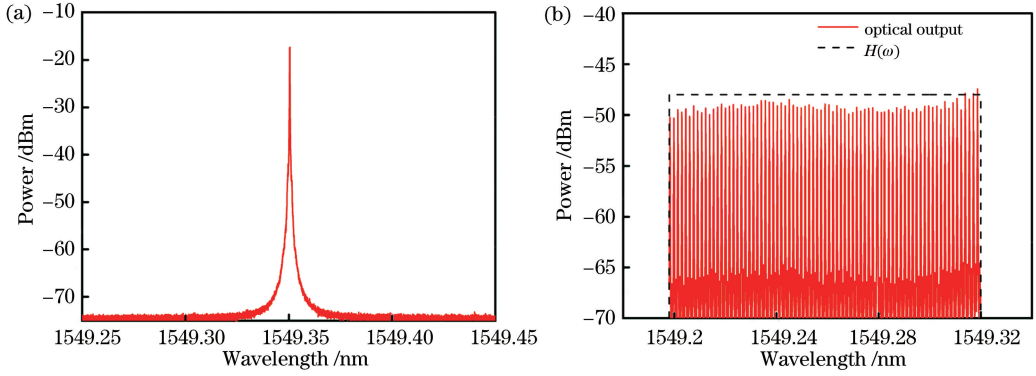


图 2 FFSF 腔的频谱仿真。(a)中心波长为 1549.346 nm 的激光器的频谱;(b) FFSF 输出的光频谱图

Fig. 2 Spectrum simulation of FFSF cavity. (a) Spectrum of laser with center wavelength of 1549.346 nm; (b) optical spectrum of FFSF output

经过带通滤波器,输入光信号和输出光信号的频域关系为

脉冲信号的第一个脉冲信号绕环形腔一圈之后与下一个脉冲重合,绕环形腔两圈后,与第三个脉冲重合,依此循环,输出端的光信号为周期性的光脉冲序列,这符合理论分析。

$$E_{out}(\omega) = E_{in}(\omega) * \sum_n H(n\omega_s) e^{in\omega_s t} e^{in\omega_0 \tau} \quad (3)$$

若输入光信号为经过脉冲调制的光信号,此时的  $E_{in}(t)$  为脉冲光,  $E_{in}(\omega)$  为离散的 sinc 函数形式,由于 FPGA 产生的脉冲宽度为百 ns 量级,其主瓣的带宽为 MHz 量级,远远小于声光调制的频率  $f_s = 200$  MHz,此时调制的电信号频谱被激光器的线宽和噪声所覆盖,  $E_{out}(\omega)$  可看作为忽略调制信号的光频梳。时域上,由于周期脉冲序列的傅里叶变换,输出光信号在时域上为周期性的脉冲形状。实际上,腔内每圈时间间隔为  $\tau = n_{eff} L / c$ 。在已实现的扫频激光器中,通过改变腔长,使得调制后的光

### 3 实验装置

基于声光调制技术方案,设计一个频率偏移反馈环路。频率偏移反馈环路主要包括偏振控制器(PC)、声光移频器(AOFS)、任意函数发生器(AFG)、光隔离器(OI)、可调谐光带通滤波器(OBPF)和掺铒光纤放大器(EDFA)。FFSF 光纤激光器如图 3 所示,该结构分为射频信号调制和光纤反馈环路。该环路用一个现场可编程逻辑门阵列

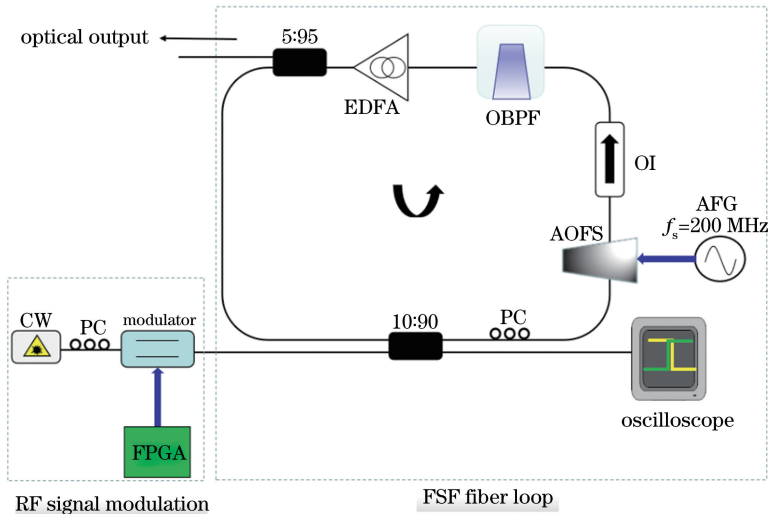


图 3 FFSF 光纤激光器的结构

Fig. 3 Structure of FFSF fiber laser

(FPGA)脉冲源对连续波激光源进行强度调制,以形成较宽的光脉冲信号。在环形腔内,声光移频器由任意函数发生器驱动调制,其中声光移频器的中心工作频率为 200 MHz,频移方式为负频移,可对光信号进行脉冲调制;光带通滤波器能够控制输出光脉冲的脉冲宽度,该滤波器是中心波长为 1549.26 nm、3 dB 带宽为 1 nm 的窄带滤波器;光隔离器防止环路中的后向激光入射,以保证光纤环的单向传播并且可以避免后向的自发辐射;掺铒光纤放大器的泵浦源为一个 980 nm 的半导体激光器,最大功率为 900 mW,泵浦方式为前向泵浦;两个耦合器分光比为 5:95 和 10:90。

本文使用的是 Xilinx 公司 Spartan-6 系列的 FPGA 开发板,型号为 XC6SLX16-2CSG324,采用的设计程序是 ISE Design Suite 14.7,硬件描述语言为 Verilog HDL。该开发板提供的时钟源为 50 MHz 的有源晶振电路,为能够得到 ns 级电脉冲,需要对 50 MHz 时钟频率进行分频,可以获得特定脉冲宽度和工作频率的电脉冲序列。通过编写纳秒脉冲发生器的 Verilog HDL 程序,只需要根据注释设定相关参数,就可以得到相应脉宽和频率的电脉冲输出。设输出信号的频率为  $f$ ,时钟源的频率为  $f_1$ ,输出信号源于时钟源的分频,时钟源频率是输

出脉冲频率的整数倍,记为  $q = f_1/f$  ( $q = 1, 2, 3, \dots$ )。对于  $f_1 = 50$  MHz 的时钟源,可以得到输出信号频率为

$$f = \frac{f_1}{q} = \frac{50}{q} \quad (4)$$

时钟最小脉宽  $\tau = 20$  ns,可调的脉冲宽度  $\Delta$  为  $\Delta = m \cdot \tau = m \times 20$  ( $m = 1, 2, 3, \dots$ )。 (5)

此时占空比为  $D = \Delta \cdot f$ 。改变参数  $q$  和  $m$ ,可得到所需的频率和脉宽的电脉冲输出,取  $m = 10$ ,  $q = 400$ ,如图 4(a)所示,调制生成的光脉冲经 PD 探测得到周期为 8  $\mu$ s、脉宽为 200 ns 的脉冲信号。FPGA 生成的脉冲用于连续光的强度调制及对 AOFS 的脉冲调制,脉冲调制器和 AOFS 的同步调制以及噪声的累积过程如图 4(b)所示,在 AOFS 调制脉冲信号中设置一段截断区可减少噪声的累积。理想情况下,环外脉冲调制信号低电平越接近零点,调制后的光信号噪声越小。与暨南大学的线性扫频激光光源相比,本课题组在结构上减少了一个光开关。声光调制器不仅能作为频移器也能起到光开关的作用,当对声光调制器设定脉冲调制状态时,将直流调制改为高占空比的脉冲调制可起到光开关的作用,同时一定程度上抑制了噪声的累积,并且减小了光开关调制产生的噪声,从而简化了系统。

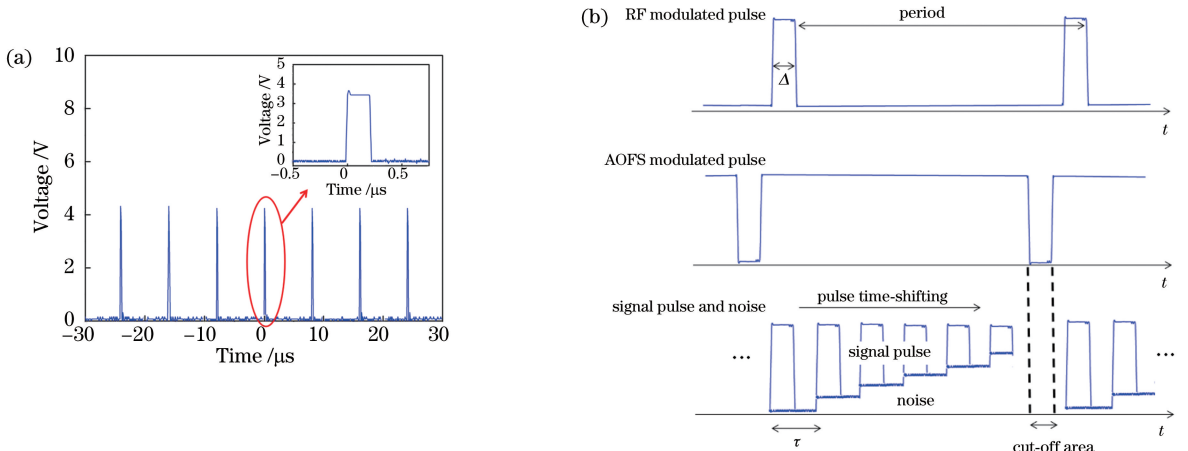


图 4 电脉冲信号波形图。(a)周期为 8  $\mu$ s、脉宽 200 ns 的脉冲信号;(b)脉冲调制器和 AOFS 的同步调制及噪声的累积过程  
Fig. 4 Waveforms of electrical pulse signal. (a) Pulse signal with period of 8  $\mu$ s and pulse width of 200 ns;  
(b) synchronous modulation of pulse modulator and AOFS and accumulation of noise

## 4 实验结果及分析

### 4.1 频域特性

实验采用环形光纤构成主动锁模激光器,从而形成稳定的光学频率梳。在腔外先对连续光进行强度调制,通过注入不同的电脉冲将连续光调制成具

有特定脉宽和周期的脉冲光,调制后的光信号进入光纤环内,其中 AOFS 的作用是既作为频移器又作为高占空比脉冲调制器。实验中,采用中心波长为 1549.346 nm 的连续激光器作为输出光源,频率扫描激光器输出的频谱如图 5(a)所示,从图中能够看出生成的频率扫描激光器的频谱的平坦化程度较



好、载波数目较多且信噪比性能良好。在此频率扫描激光器中,每次产生的载波向负向频移。图 5(b)

为频谱放大图,可以看出频移方向为负向,起始波长为 1549.346 nm,3 dB 带宽为 0.2 nm。

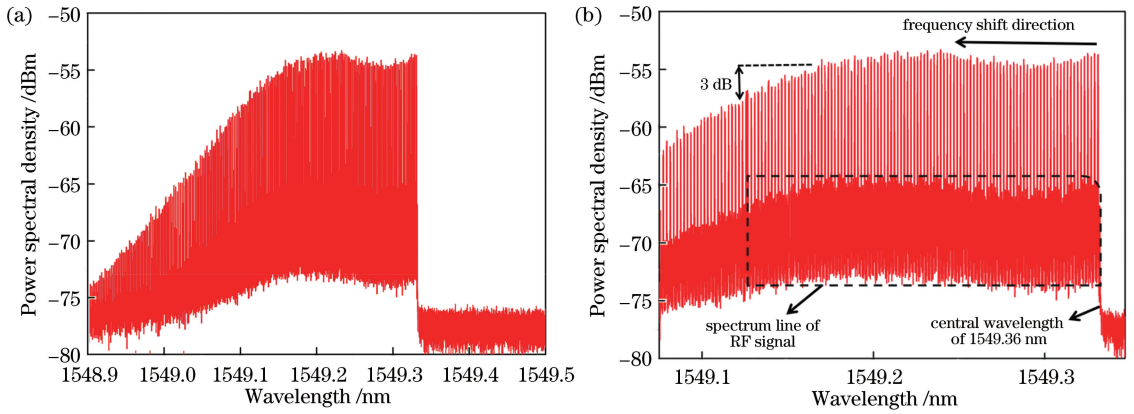


图 5 频率扫描激光器输出频谱图。(a)光频梳谱线;(b)频谱放大

Fig. 5 Output spectra of frequency-scanning laser. (a) Optical frequency comb line; (b) spectrum amplification

#### 4.2 EDFA 对平坦度的影响

在频率扫描激光器中,在环形腔内,随着循环次数的逐渐增加,光载波的功率在逐渐下降,光频梳的包络曲线逐渐减小,同时噪声也在逐渐积累,光载波的信噪比变得越来越低,光载波的频谱带宽受到 EDFA 的自发辐射噪声的影响。因此,为弥补光纤环路中的功率损耗,引入了 EDFA。想要实现平坦化程度较好的光频梳,就要保证链路中的损耗和补偿能够实现平衡。通过优化 EDFA 的动态特性、改变声光调制器的调制方式(将直流调制改为脉冲调制<sup>[22]</sup>),进而降低噪声在环内的累积,提高载波的功率和信噪比,从而提高扫描频谱

的宽度。采用 EDFA 作为增益介质,用于补偿光纤环路中的功率损耗,与此同时掺铒光纤的长度影响着环形腔的腔长,从而影响腔内延时时间  $\tau$ 。要想实现动态特性好的频率扫描激光器,就要选择合适的掺铒光纤长度,在特定的腔长内保证损耗和增益的动态平衡,从而减少自发辐射放大(ASE)噪声的影响。图 6(a)为波长为 1550 nm 时,不同泵浦能量下的输出功率曲线,图 6(b)为泵浦功率为 100 mW 时,不同波长下的输出功率曲线。在 1550 nm 的波长下,掺铒光纤的长度应该优化至 22 m,原掺铒光纤长度为 60 m,以确保受 ASE 噪声影响最小。

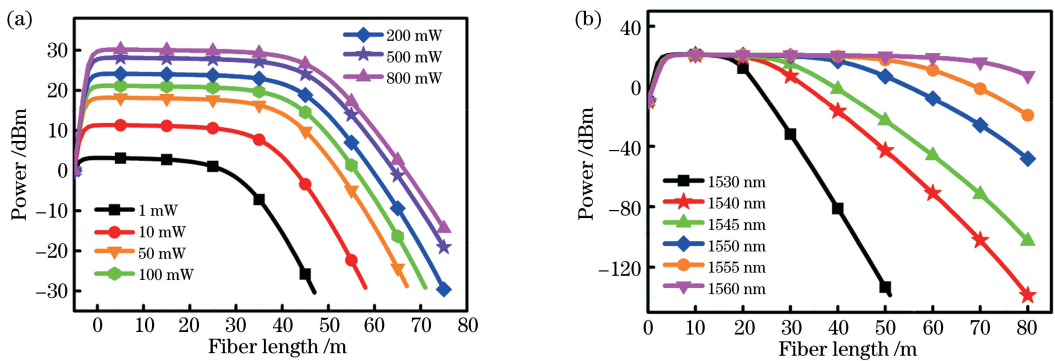


图 6 不同泵浦能量和波长下输出功率随掺铒光纤长度的变化曲线。(a)不同泵浦能量;(b)不同波长  
Fig. 6 Output power versus erbium-doped fiber length under different pump energies and wavelengths.

(a) Different pump energies; (b) different wavelengths

根据放大信号的光功率和自发辐射噪声分析 EDFA 对光频梳造成的影响。通过理论分析和仿真可知,EDFA 的噪声指数越高,光频梳的信噪比越低。实验中,调制信号入射到环形腔前,可增加相应的延时量,从而生成平坦度较好、载波数目较多且信

噪比特性良好的频率扫描激光器。

#### 4.3 EDFA 对信噪比的影响

设 EDFA 循环第  $n$  次的增益是  $G_n$ ,光信号每循环一次,腔内损耗就为 1,即  $G_n * L = 1$ ,使得载波功率放大,实现较为理想的光频梳。与此同时,

EDFA 会引入 ASE 噪声,并且 ASE 噪声会随循环次数的增加而积累。如果采用理想滤波器,随着循环次数的增加,第  $n$  次循环的输出为

$$E_n(f) = E_0(f) + \{G_n * L * [k_{NF} \otimes E_{n-1}(f)] + n'_n(f)\}, \quad (6)$$

式中: $E_0(f)$ 为中心频率为  $f_0$  的光信号; $n'_n(f)$ 为第  $n$  次循环时引入的 ASE 噪声;功率谱密度  $S(f) = E[|n'_n(f)|^2] = \frac{k_{NF}(G-1) * h * f}{2}$ ,  $G$  为 EDFA 增益, $k_{NF}$ 为噪声指数, $h$  为普朗克常量。从功率谱密度函数可知,每次循环后产生的噪声随循环次数的增多而线性增加。

频率扫描激光器的时域图如图 7 所示,图 7(a)、(c)为未优化掺铒光纤长度的时域信号,在掺铒光纤长度为 60 m 时,受 ASE 噪声和腔长影响,输出时域信号不平坦。图 7(b)、(d)为经过优化的频率扫描时域图,注入的电脉冲周期为 8  $\mu\text{s}$ ,

脉宽为 200 ns;AOFS 调制的是脉冲周期为 8  $\mu\text{s}$ ,脉宽为 7.2  $\mu\text{s}$  的高占空比脉冲信号。EDFA 中掺铒光纤长度优化为 22 m,环形腔内的连接光纤的长度为 20 m,腔内总长度为 42 m,此时腔内每圈时延为 203 ns(此时  $n_{\text{eff}} = 1.45$ )。在脉宽为 7.2  $\mu\text{s}$  的高占空比脉冲信号的调制下,每个周期内循环的次数为 35,即每 35 次截断一次,下一周期脉冲重新循环。不过,随着循环次数的逐渐增加,积累的噪声也越来越多,与之相对应的信噪比逐渐减小。从图 7(b)可知,每次循环后通过 EDFA 生成的 ASE 噪声量随着循环次数的增加而呈线性增加,实验结果与之前的理论分析是一致的。通过图 7(d)计算可知,当循环次数分别是 1、10、20、35 时,噪声分别为 2、5、7.5、10 mV,得到的信噪比分别是 30 dB、15.6 dB、12.1 dB、10.9 dB。在每个周期内,35 圈衰减 19.1 dB,平均每圈衰减 0.56 dB。

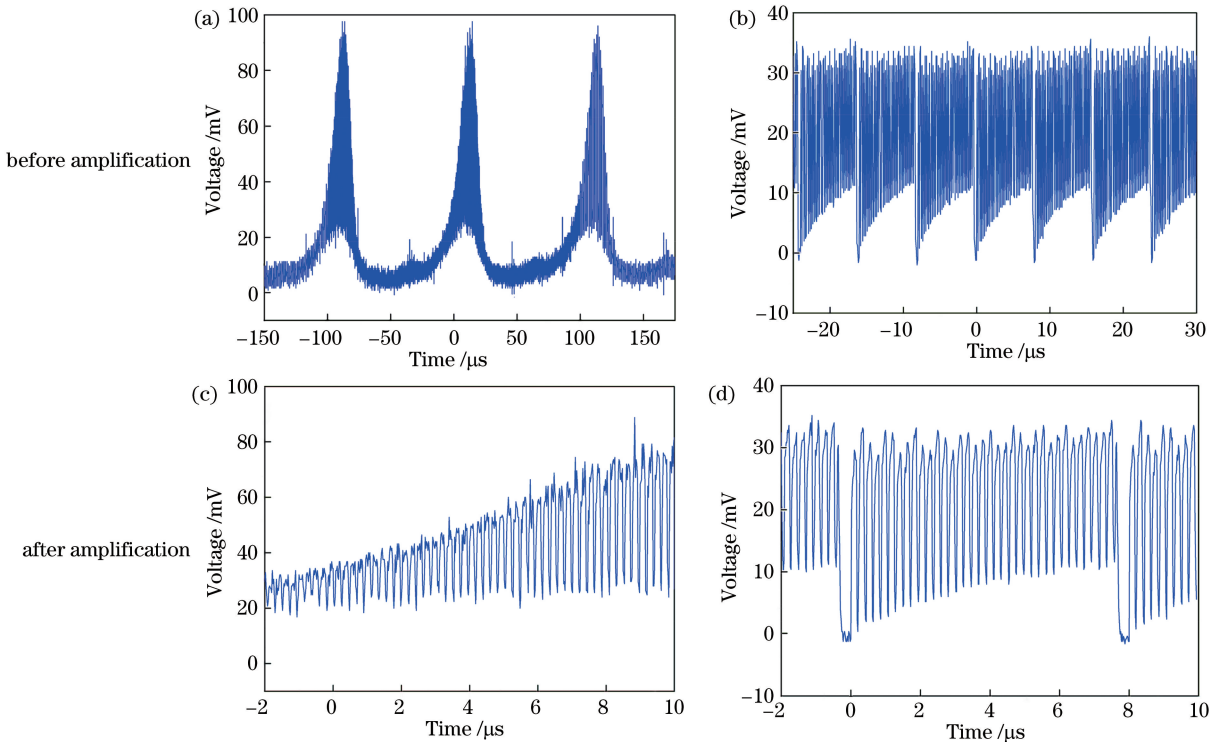


图 7 频率扫描激光器的时域图。(a)(c) 未优化的扫频时域波形;(b)(d) 优化后的扫频时域波形

Fig. 7 Time-domain diagrams of frequency-scanning laser. (a)(c) Unoptimized frequency-scanning time domain waveform; (b)(d) optimized frequency-scanning time domain waveform

## 5 结 论

与传统的频率扫描技术相比,基于声光调制器的线性频率扫描激光器的平坦度得到大幅度提高,同时信噪比也得到相应提高。搭建的系统成本较低廉且结构较简单,这为频率扫描方案提供了新思路。

在扫频的过程中,为实现具有更好平坦度、信噪比和稳定性的频率扫描激光器,需要进一步地完善该系统。在实际情况下,必须考虑到 EDFA 的动态特性和其他因素的干扰,相应地进行 EDFA 性能优化和选择特定声光调制器的调制方式,这些都是实现线性频率扫描技术的关键因素。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Q M, Zhou B K. Prospect of the development of Si-based photonics in 21 Centenary [J]. Optoelectronic Technology & Information, 2000, 13(2): 1-6.  
王启明, 周炳琨. 展望 21 世纪 Si 基光子学的发展 [J]. 光电子技术与信息, 2000, 13(2): 1-6.
- [2] Jian S S. Photon latest technologies will develop the basis of low-carbon information society of human beings [J]. Optical Communication Technology, 2011, 35(8): 1-5.  
简水生. 光子技术最新进展将为人进入低碳信息社会奠定基础 [J]. 光通信技术, 2011, 35(8): 1-5.
- [3] Wang C. Dispersive Fourier transformation for versatile microwave photonics applications [J]. Photonics, 2014, 1(4): 586-612.
- [4] Li Y Q, Pei L, Ning T G, *et al.* Research progress in microwave photonic-assisted instantaneous frequency measurement technology [J]. Electro-Optic Technology Application, 2014, 29(4): 76-80.  
李月琴, 裴丽, 宁提纲, 等. 微波光子辅助的瞬时频率测量技术研究进展 [J]. 光电技术应用, 2014, 29(4): 76-80.
- [5] Onori D, Scotti F, Laghezza F, *et al.* 0.5-40 GHz range extension of a compact Electronic Support Measures scanning receiver based on photonics [C] // 2017 18th International Radar Symposium (IRS), June 28-30, 2017, Prague, Czech Republic. New York: IEEE, 2017: 17102242.
- [6] Duan Y H, Chen L, Zhou H D, *et al.* Ultrafast electrical spectrum analyzer based on all-optical Fourier transform and temporal magnification [J]. Optics Express, 2017, 25(7): 7520-7529.
- [7] Corral V, Guzmán R, Gordón C, *et al.* Optical frequency comb generator based on a monolithically integrated passive mode-locked ring laser with a Mach-Zehnder interferometer [J]. Optics Letters, 2016, 41(9): 1937-1940.
- [8] Xue X X, Weiner A M. Microwave photonics connected with microresonator frequency combs [J]. Frontiers of Optoelectronics, 2016, 9(2): 238-248.
- [9] Li J R, Lin J C, Zhang X G, *et al.* Scheme for generation of flat top and high signal-to-noise ratio optical frequency comb [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(1): 010605.
- [10] Xiao X, Wu K, Chen J P. 0.18-dB ultra-flat optical frequency comb generation using cascaded modulators with low driving RF power [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, May 14-19, 2017, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2017: STh10.8.
- [11] Wu R, Supradeepa V R, Long C M, *et al.* Generation of very flat optical frequency combs from continuous-wave lasers using cascaded intensity and phase modulators driven by tailored radio frequency waveforms [J]. Optics Letters, 2010, 35(19): 3234-3236.
- [12] Tian F, Zhang X G, Li J P, *et al.* An experiment for generating the 14-tone stable carriers using recirculating frequency shifter [J]. Chinese Physics Letters, 2010, 27(9): 094206.
- [13] Ozharar S, Quinlan F, Ozdur I, *et al.* Ultraflat optical comb generation by phase-only modulation of continuous-wave light [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(1): 36-38.
- [14] Chen C H, He C, Zhu D, *et al.* Generation of a flat optical frequency comb based on a cascaded polarization modulator and phase modulator [J]. Optics Letters, 2013, 38(16): 3137-3139.
- [15] Onori D, Laghezza F, Ghelfi P, *et al.* Photonic ultra-wideband software-defined RF receiver for electronic spectrum measurements [C] // Optical Fiber Communication Conference, March 9-13, 2014, San Francisco, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2014: Th4H.3.
- [16] Su H, Wang J, Liu L L, *et al.* Optical fiber grating temperature and axial tension sensing system based on swept source [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 040601.  
苏红, 王健, 刘岚岚, 等. 基于扫频光源的光纤光栅温度和轴向拉力传感系统 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 040601.
- [17] Chinn S R, Swanson E A, Fujimoto J G. Optical coherence tomography using a frequency-tunable optical source [J]. Optics Letters, 1997, 22(5): 340-342.
- [18] Zhang J, Wang Q, Rao B, *et al.* Swept source at 1060 nm for Fourier domain optical coherence tomography [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6429: 642902.
- [19] Chen M H, Ding Z H, Wang C, *et al.* Fiber Fabry-Perot tunable filter based Fourier domain mode locking swept laser source [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(6): 068703.  
陈明惠, 丁志华, 王成, 等. 基于法布里-珀罗调谐滤波器的傅里叶域锁模扫频激光光源 [J]. 物理学报, 2013, 62(6): 068703.
- [20] Feng X H, Wan M G, Wang X D, *et al.* The invention relates to a high speed linear sweep laser source: 201610016342.1 [P]. 2016-04-20.  
冯新焕, 万明桂, 王旭东, 等. 一种高速线性扫频激

- 光光源: 201610016342.1[P]. 2016-04-20.
- [21] de Chatellus H G, Cortés L R, Azaña J. Optical real-time Fourier transformation with kilohertz resolutions [J]. Optica, 2016, 3(1): 1-8.
- [22] Shimizu K, Horiguchi T, Koyamada Y. Frequency translation of light waves by propagation around an optical ring circuit containing a frequency shifter: I. Experiment [J]. Applied Optics, 1993, 32 (33): 6718-6726.