

## 基于相位调制器的宽带窄线宽的线性调频激光源的产生

许蒙蒙<sup>1,2</sup>, 周煜<sup>1</sup>, 孙建锋<sup>1</sup>, 卢智勇<sup>1</sup>, 劳陈哲<sup>1,2</sup>, 贺红雨<sup>1,2</sup>, 李跃新<sup>1,2</sup>

- (1. 中国科学院上海光学精密机械研究所 空间激光传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;  
2. 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049)

**摘要:** 提出了一种基于相位调制器(PM)和可调谐光滤波器产生线性调频激光信号的方法。该方法利用带有基频的微波线性调频信号作为相位调制器的驱动信号, 窄线宽的激光种子源经相位调制器调制后产生一系列的宽带线性调频激光信号。通过可调谐光滤波器抑制其他边带保留所需阶次的线性调频激光信号。实验结果表明: 当光滤波器保留正二阶调频激光信号时, 获得了调频带宽为 2 GHz、调频速率为 6 THz/s 的线性调频激光信号。在观测时间为 1 ms 时, 测得的线性调频激光信号的瞬时线宽为 3.2 kHz。该方法结构简单, 易于实现, 并且对调频连续波激光雷达、相干光谱分析等测量应用有重要意义。

**关键词:** 激光器; 线性调频; 相位调制; 光滤波器

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA202049.0205004

## Generation of linear frequency modulation laser source with broadband narrow linewidth using optical phase modulator

Xu Mengmeng<sup>1</sup>, Zhou Yu<sup>1</sup>, Sun Jianfeng<sup>1</sup>, Lu Zhiyong<sup>1</sup>, Lao Chenzhe<sup>1,2</sup>, He Hongyu<sup>1,2</sup>, Li Yuexin<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; 2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** An approach to generate linear frequency modulation laser source based on an optical phase modulator and a tunable optical filter was proposed. A narrow linewidth fiber laser seed source was modulated by an optical phase modulator, whose driven radio frequency (RF) signal was generated by the microwave linear frequency modulation signal with a fundamental frequency, and thus a series of wideband linear frequency modulation laser signals were generated. A tunable optical filter was used to select the desired linear frequency modulation optical sideband and suppress the others modulation sidebands. The experimental results show that when the optical filter retains the positive second order modulation sideband, a linear frequency modulation laser signal with a tuning range of 2 GHz and tuning rate of 6 THz/s is obtained. The instantaneous linewidth of the linear frequency modulation laser signal is 3.2 kHz in 1 ms observation time. The system is simple in structure and easy to implement. This

收稿日期: 2019-11-12; 修订日期: 2019-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(61505233, 61605226)

作者简介: 许蒙蒙(1992-), 女, 博士生, 主要从事激光测速测距方面的研究。Email: xmm9210@siom.ac.cn

导师简介: 孙建锋(1978-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事自由激光通信、激光雷达等方面的研究。Email: sunjianfengs@163.com

technique has important significance for the applications such as frequency modulated continuous wave laser radar and coherent spectroscopy.

**Key words:** laser; linear frequency modulation; phase modulation; optical filter

## 0 引言

快速线性调频激光源在调频连续波激光雷达、相干光谱分析、光学相干断层成像等领域有着重要的应用<sup>[1-6]</sup>,其调频范围和线宽是调频激光光源的重要指标。通过电流调制、温度调制等方法改变激光器的谐振腔的长度可以实现激光器的频率调制。采用腔内调制的方法可以获得大带宽的频率可调谐激光信号,但会引入很大的非线性误差,尤其在调频速率高时,导致不能得到理想的线性调频信号<sup>[7-9]</sup>。为了同时实现宽带和窄线宽的线性调频激光源,国内外学者进行了广泛的研究。一种方法是利用锁相技术得到可调谐激光器与光学频率梳之间的拍频<sup>[10-11]</sup>,或者通过光学锁相环(OPLL)得到可调谐激光器与具有所需频率偏移量的频率稳定的激光器的拍频<sup>[12]</sup>,然而,该技术的实现成本相对较高,控制电路复杂,此外,调谐速率受 OPLL 的限制。另一种技术是通过声光调制器(AOM)或电光调制器(EOM)产生调制边带,AOM 的调制带宽被限制在几百 MHz 的范围,而使用 EOM 调制可以在 GHz 的范围内进行频率调谐。在参考文献[13]中报道了采用注入锁定和单边带调制产生调频带宽为 3.85 GHz,调谐速率为 80GHz/s 的线性调频信号,虽然产生的调频激光信号有很高的调谐速率,但调频激光信号的线性度并不理想,参考文献[14]中报道了采用双平行马赫-曾德调制(DPMZM)产生了带宽为 11 GHz、调谐速率为 3.67 THz/s 的调频激光信号。无论采用 DPMZM 还是单边带调制都存在直流偏置漂移问题,降低了系统的鲁棒性。参考文献[15]提出了采用调频微波信号驱动相位调制,并利用固定光学陷波滤波器抑制光载波产生了二倍频和四倍频的可调谐毫米波信号,参考文献[16]提出并验证了采用马赫-曾德调制器和带通光滤波器产生六倍频的调频微波信号,这表明利用相位调制器和带通光滤波器的方法具有产生宽带连续调频激光信号的潜力。

文中利用带有基频的微波线性调频信号作为相

位调制器的射频驱动信号,窄线宽的激光种子源经过相位调制器产生一系列的线性调频激光信号,产生的第  $n$  阶调制边带的调频范围和调频速率均是微波线性调频信号的  $n$  倍。由于采用外部调制,产生的调制边带激光信号的相位噪声并不受激光器腔体的影响,所以即使在高的调频速率条件下,也可以产生窄线宽的线性调频信号。通过改变射频驱动信号的幅度,可以提高特定调制带宽的输出光功率。利用可调谐光学滤波器选择该特定的调制边带,抑制其他边带,可以获得宽带线性调频激光信号。文中基于该方法进行了实验验证,在获得正二阶调制边带下,产生了调频范围为 2 GHz、调谐速率为 6 THz/s 的线性调频激光信号。

## 1 基本原理

线性调频激光信号产生的原理框图如图 1 所示,激光种子源产生的连续激光信号为:

$$E_0(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + \varphi_0(t)] \quad (1)$$

式中: $A_0$  和  $\omega_0$  分别为激光种子源的幅度和频率; $\varphi_0(t)$  为激光种子源的相位噪声。

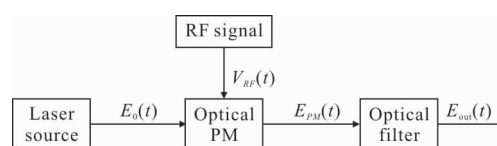


图 1 线性调频激光器产生的原理框图

Fig.1 Schematic diagram of the proposed linear frequency modulation laser generation

射频 (RF) 信号作为光学相位调制器的驱动信号,它是带有基频的微波线性调频信号,其表达式为:

$$V_{RF}(t) = V_{RF} \cos[\omega_{RF}(t)t + \varphi_{RF}(t)] \quad (2)$$

式中: $V_{RF}$  和  $\varphi_{RF}(t)$  分别为射频信号的幅度和相位噪声; $\omega_{RF}(t)$  为射频信号的频率,其表达式为:

$$\omega_{RF}(t) = \omega_{fm} + \omega_F \quad (3)$$

式中: $\omega_F$  为基频信号的频率; $\omega_{fm}$  为微波线性调频信

号的调频速率, 其调频带宽  $\Delta\omega=\omega_H-\omega_L$ ,  $\omega_L$  是微波线性调频信号的低频截止频率,  $\omega_H$  是微波线性调频信号的高频截止频率。

相位调制器输出的光信号为:

$$E_{PM}(t)=A_0 \cos \left\{ \omega_0(t)+\varphi_0(t)+\beta \cos \left[ \omega_{RF}(t)t+\varphi_{RF}(t) \right] \right\} \quad (4)$$

式中:  $\beta$  为相位调制器的调制深度。

$$\beta=\pi \frac{V_{RF}}{V_{\pi}} \quad (5)$$

式中:  $V_{\pi}$  为相位调制器的半波电压。

将公式(4)展开, 可得:

$$\begin{aligned} E_{PM}(t)= & A_0 \cos \omega_0(t)+\varphi_0(t) J_0(\beta)+ \\ & A_0 \sum_{n=1}^{\infty}(-1)^{n+1} J_{2n-1}(\beta)+ \\ & \left\{ \sin \left\{ \omega_0(t)+\varphi_0(t)+(2n-1)\left[ \omega_{RF}(t)t+\varphi_{RF}(t) \right] \right\} + \right. \\ & \left. \sin \left\{ \omega_0(t)+\varphi_0(t)-(2n-1)\left[ \omega_{RF}(t)t+\varphi_{RF}(t) \right] \right\} \right\} + \\ & A_0 \sum_{n=1}^{\infty}(-1)^n J_{2n}(\beta)+ \\ & \left\{ \cos \left\{ \omega_0(t)+\varphi_0(t)+2n\left[ \omega_{RF}(t)t+\varphi_{RF}(t) \right] \right\} + \right. \\ & \left. \cos \left\{ \omega_0(t)+\varphi_0(t)-2n\left[ \omega_{RF}(t)t+\varphi_{RF}(t) \right] \right\} \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

式中:  $J_n(\beta)$  为参数为  $\beta$  的第一类  $n$  阶贝塞尔函数。

公式(6)表明激光种子源的功率扩展到了  $n$  个调制边带上, 这些调制边带的幅度由参数为  $\beta$  的贝塞尔函数的相应阶数控制, 并且可以通过改变  $RF$  信号的幅度来增强特定调制边带的输出光功率。而这些调制边带的调频范围是由  $RF$  信号带宽和其对应的阶次决定, 对于第  $n$  阶调制边带, 其对应的调频带宽为  $n\Delta\omega$ 。从公式(6)中可以看出: 产生的调制边带包括正边带和负边带, 图 2 是相位调制器输出的调频正边带的激光信号。

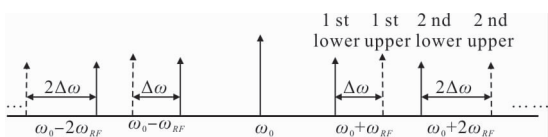


图 2 相位调制器输出的调频正边带信号

Fig.2 Frequency modulation positive sideband laser signal at the output of the optical phase modulator

假定可调谐光学滤波器可以通过具有带宽  $\Delta B$  ( $\Delta B > n(\omega_H - \omega_L)$ ) 矩形窗口来表示, 为了避免不同阶调制边带在频域中相互重叠,  $RF$  信号的基频频率和微波线性调频信号的低频截止频率以及高频截止频

率应满足以下不等式:

$$\omega_F > n\omega_H - (n+1)\omega_L \quad (7)$$

通过调节光滤波器的中心频率可以抑制其他调制边带, 获得指定阶次的线性调频激光信号。光学滤波器之后产生的线性调频激光信号由下面两个公式给出:

$$E_{out}(t)=A_0 J_{2n-1}(\beta) \sin \left\{ \omega_0(t)+\varphi_0(t)-(2n-1)\left[ \omega_{RF}(t)t+\varphi_{RF}(t) \right] \right\} \quad (8)$$

$$E_{out}(t)=A_0 J_{2n}(\beta) \cos \left\{ \omega_0(t)+\varphi_0(t)-2n\left[ \omega_{RF}(t)t+\varphi_{RF}(t) \right] \right\} \quad (9)$$

式中: 公式(8)、(9)分别对应选择奇数阶调制边带和偶数阶调制边带时对应的线性调频激光信号。

## 2 实验结果及讨论

基于相位调制的线性调频激光源产生的实验装置如图 3 所示。该系统由激光种子源、光学相位调制器、直接数字频率合成器(DDS)、射频(RF)源、混频器、RF 放大器和光学滤波器组成。激光种子源是波长为 1 550.148 nm (相应频率为 193 396.0 GHz) 的低噪声激光器, DDS(AD9914)产生频率范围为 2.9~3.9 GHz, 重复频率为 1 kHz 的线性调频微波信号, 如图 3(a)所示。射频源产生频率为 14.8 GHz 的基频信号。激光种子源产生的连续单频光波被发送到光学相位调制器。相位调制器是带宽为 10 GHz 的铷酸锂电光调制器, 其驱动 RF 信号是由 DDS 产生的线性调频微波信号与射频源产生的基频信号在混频器中产生的混频信号。为了提高高阶调制边带的功率, 使用了频率范围为 6~18 GHz 的 RF 放大器, 其增益和饱和输出功率分别为 34、31 dBm。相位调制器输出的调频正边带激光信号如图 3(b)所示。光滤波器是带有环形器的热调谐光纤布拉格光栅(FBG)滤波器, 其中心波长的可调谐范围为 1 549.8~1 550.12 nm, 设置其中心波长为 1 549.861 nm 时, 用分辨率为 0.04 pm 的光谱仪测得的光滤波器的反射光谱如图 4 所示, 从图 4 中可以看出: 光滤波器的 3 dB 带宽约为 5.7 GHz(46 pm), 边带抑制比约为 24 dB。在该实验中, 光滤波器的中心波长设定为 1 549.861 nm, 以得到正二阶调制边带。经过光滤波器后产生的线性调频激光信号如图 3(c)所示。

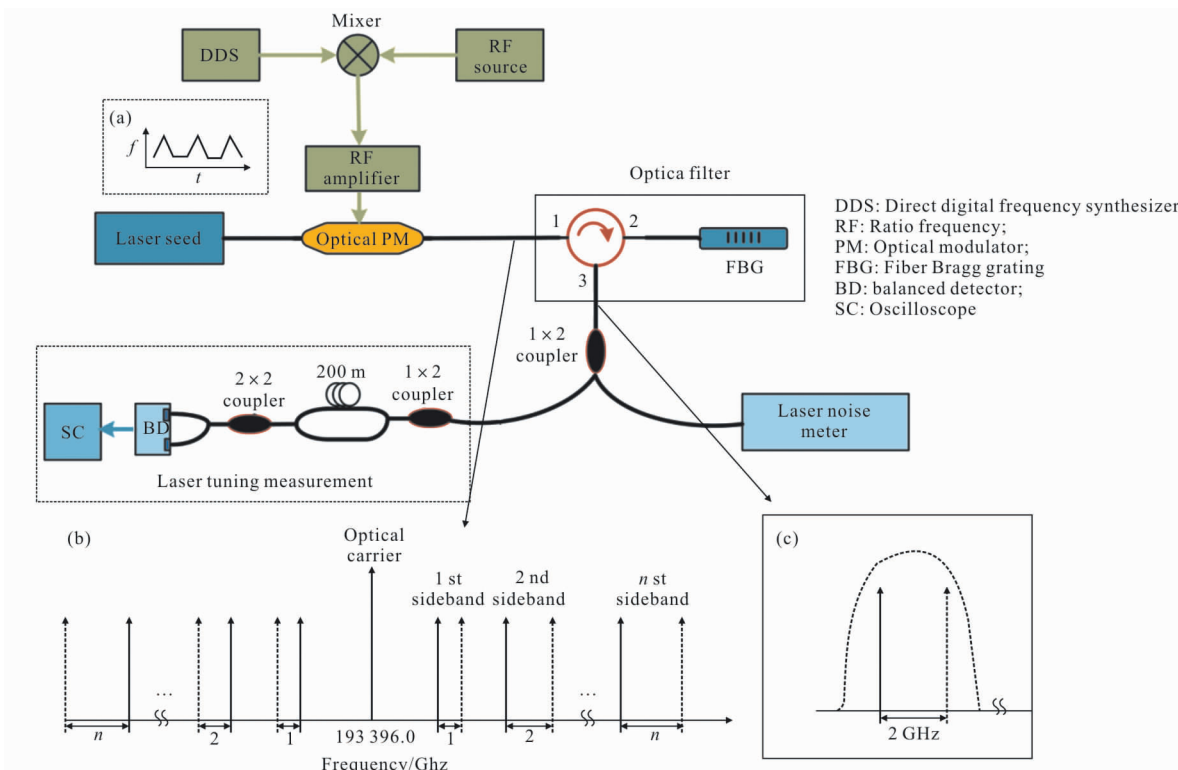


图 3 基于相位调制的线性调频激光源产生的实验装置及其测量装置

Fig.3 Experimental device of linear FM laser signal generation using an optical phase modulator and its performance measurement device

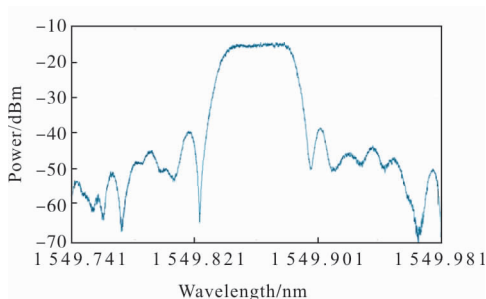


图 4 光纤布拉格光栅滤波器的反射光谱

Fig.4 Reflection spectrum of a fiber Bragg grating filter

### 2.1 线性调频激光信号的频率噪声谱及线宽

为了研究产生的线性调频激光信号的光谱质量,在同一实验环境下,用激光器噪声测试仪测量了其频率噪声谱,测量原理在参考文献[17-18]中描述,测量结果如图 5 所示。图 5(a)和(b)分别是激光种子源和线性调频激光器的频率噪声谱和线宽,其中,蓝色曲线是频率噪声频谱,灰色直线是  $\beta$ -分割线,根据 Domenico 等提出的  $\beta$  算法通过频率噪声谱,可以计算不同观测时间对应的积分线宽,结果是图 5 中绿色的离散点。该方法的最小可测线宽不会

受限于观测时间决定的频率分辨率,而是受限于测量系统本底噪声,图 5(a)中蓝色虚线曲线是测量系统的本底噪声,所以该系统的本底噪声约为 1 Hz,最小可测线宽约为 4 Hz。由图 5(a)、(b)中标记的离散点可知,激光种子源在 1ms 观测时间测得的线宽为 2.1 kHz,生成的线性调频激光信号在 1 ms 观察时间测得的线宽为 3.2 kHz。图 5(a)、(b)中频率噪声谱的水平部分是频率白噪声  $S_v(f)$ ,对应的激光器的线宽极限为  $\pi S_v(f)$ ,所以,从图 5 可以看出:测得的激光种子源的线宽极限约为 459 Hz,线性调频激光源的线宽极限约为 647 Hz。从公式(6)可以得到:理论上所产生的线性调频激光信号的相位噪声与激光种子源的相位噪声以及 RF 信号相位噪声有关系,可以表示为  $\varphi_{FM} = \varphi_0 + n\varphi_{RF}$ ,其中,  $\varphi_{FM}$  是线性调频激光信号的相位噪声,  $\varphi_0$  是激光种子源的相位噪声,  $\varphi_{RF}$  是射频信号的相位噪声,包括 DDS 产生的调频信号和射频源产生的基频信号。在该实验测量中,采用的是短时延的自延时外差技术,产生的线性调频信号的相位噪声和线宽与激光种子源的相位噪声



和线宽的差别不仅来源于射频驱动信号以及射频放大器引入的噪声,还与线性调频信号的非线性有关。

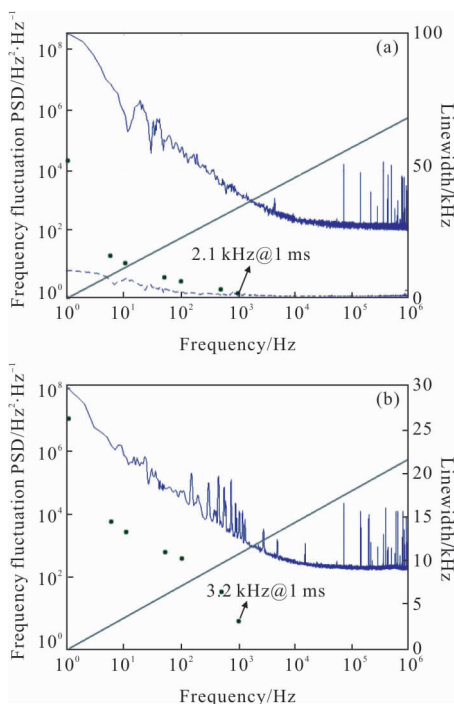


图 5 (a) 激光种子源的频率噪声谱及线宽;(b) 线性调频激光器的频率噪声谱及线宽

Fig.5 (a) Frequency noise spectrum and linewidth of the laser seed source; (b) Frequency noise spectrum and linewidth of the linear frequency modulation laser source

### 2.2 调谐范围及调谐速率

线性调频激光信号的频率扫描可以通过两个臂之间具有短且固定的延迟时间的自零差干涉仪测得<sup>[19]</sup>,测量装置如图 3 中的左侧虚线框所示。这里使用的光纤延迟线的长度约为 200 m,用  $\Delta L$  表示。在这种情况下,干涉仪输出的拍频信号可以认为是连续的正弦曲线信号,用  $y(t)$  表示。拍频信号的瞬时相位可以通过  $\Delta\varphi(t)=\arctan[y(t)/HT\{y(t)\}]$  得到,其中,  $HT$  表示希尔伯特变换。拍频信号的瞬时相位与线性调频激光信号的时变光学频率  $f(t)$  可以由  $f(t) = \frac{c}{2\pi n \Delta L} \Delta\varphi(t)$  确定,其中  $c$  是真空中光速,  $n$  是光纤的有效折射率。所获得的线性调频激光信号的时变瞬时光频率如图 6(a) 所示。从图中可以看到所获得的线性调频激光信号在 0.33 ms 内具有 2 GHz 的调谐范围,相应的调谐速率为 6 THz/s。图 6(b) 显

示了线性拟合的频率残余误差。可以看出:频率残余误差可以认为是随机的,因此用标准差表示残差是合理的。所获得的线性 FM 激光信号的光学频率在 2 GHz 频率调谐范围内具有标准差为 86.4 kHz 的频率偏差。从公式(8)、(9)可知:使用高阶边带和更宽带滤光器可以实现大的调谐范围。

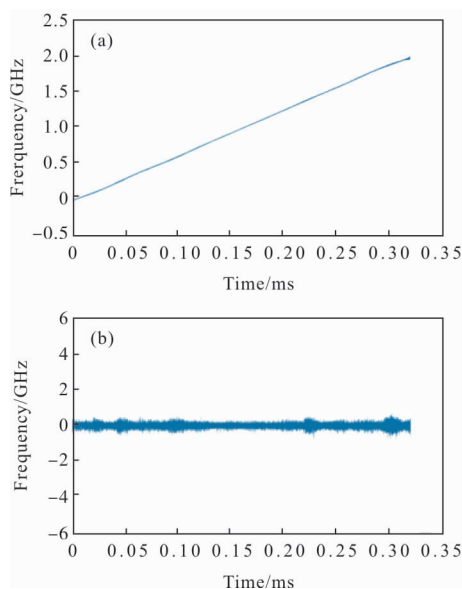


图 6 (a) 线性调频激光信号的频率调谐速率;(b) 线性拟合的瞬时光频率调制的残余误差

Fig.6 (a) Frequency tuning speed of the linear frequency modulation laser signal; (b) Instantaneous optical frequency modulation residual errors from a linear fitting

### 2.3 线性调频激光器的功率变化

线性调频激光器输出的光信号接入到光电探测器可以探测到线性调频激光器的功率变化,并通过示波器采集线性调频激光器信号的一个周期的数据并显示,将得到的功率值做归一化处理(测得的功率值/功率平均值),结果如图 7。光电探测器的响应度为 2.3 V/mW,带宽为 100 MHz。线性调频激光器的周期是 1ms,波形是倒梯形波,上升沿、下降沿和平顶的时间各占周期的三分之一。从图 7 可以看出:在上升沿和下降沿的拐点处功率波动剧烈(0.33 ms 附近),这是由于 DDS 产生的线性调频信号在拐点处不连续导致的。如果采用线性调频信号的 5%~95% 作为工作区(对应的调制带宽为 1.8 GHz),如图 7 中红色虚线标记的区间。从图 7 中可以看出:产生

的线性调频信号波形的上升沿、下降沿和平顶区的功率波动分别为 42%~40%、42%~39%、10%~9%。线性调频激光源的功率波动是由于 DDS 产生的微波线性调频信号的功率波动和相位调制器在调制带宽内不是常数导致的。

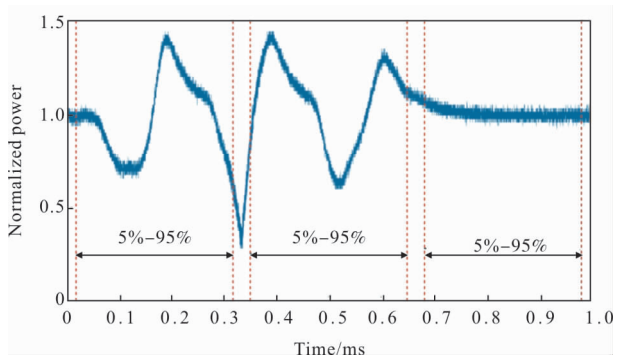


图 7 线性调频激光器的功率变化

Fig.7 Power fluctuation of linear frequency modulation laser

### 3 结论

提出并实现了一种基于相位调制器产生宽带、窄线宽的线性调频激光信号的方法。在实验中使用相位调制产生一系列调制边带激光信号和并用布拉格光栅滤波器保留了正二阶调制边带，产生了调频带宽为 2 GHz、调谐速率为 6 THz/s 的线性调频激光信号。并测得线性调频激光信号的瞬时线宽为 3.2 kHz@1 ms，调频频率的标准差为 86.4 kHz。如果采用产生的线性调频激光信号的 5%~95%作为工作区，其上升沿的线性调频区对应的功率波动为 42%~40%。与基于 OPLL 的方法相比，该方法显著简化了系统配置，易于实现。并且使用光相位调制器可以消除直流偏差漂移相关问题。此外，通过提高线性调频微波信号的性能并选择更高阶的调制边带，可以实现更高的带宽和更快的调谐速率。文中所提出的方法有望有助于改善激光雷达测距和成像以及其他应用的性能。

#### 参考文献：

[1] Gao S, Sullivan M O, Hui R Q. Complex-optical-field lidar system for range and vector velocity measurement [J]. *Optics Express*, 2012, 20(23): 25867-25875.

[2] Szafranec B, Motamedi A, Baney D M. Polarization-diverse coherent optical spectrum analyzer with swept

local oscillator [C]//Optical Fiber Communication Conference and Exhibit IEEE, 2002: 619-620.

[3] Clairon N, Djerroud K O, Acef C, et al. Lasers for coherent optical satellite links with large dynamics [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(30): 7342-7351.

[4] Sarunic M V, Choma M A, Yang C H. Instantaneous complex conjugate resolved spectral domain and swept-source OCT using 3x3 fiber couplers [J]. *Optics Express*, 2005, 13(3): 957-967.

[5] Qu Yang, Wang Chunhui, Gao Jie, et al. Ranging measurement based on linear frequency modulated continuous laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1779-1783. (in Chinese)

曲杨, 王春晖, 高洁, 等. 基于连续线性调频激光器的测距方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1779-1783.

[6] Liu Ximin, Zhang Jianhua, Yang Dezhao, et al. Review on coherent laser fuze (Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0303001. (in Chinese)

刘锡民, 张建华, 杨德钊, 等. 相干激光引信综述(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(3): 0303001.

[7] Coldren L A, Fish G A, Akulova Y, et al. Tunable semiconductor lasers: a tutorial [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(1): 193-202.

[8] Wang Qi, Guo Jinjin, Chen Wei, et al. Widely tunable distributed feedback semiconductor lasers with constant power and narrow linewidth [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0101004. (in Chinese)

王琪, 郭锦锦, 陈伟, 等. 功率稳定且波长可调谐的窄线宽分布式反馈半导体激光器 [J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0101004.

[9] Xu Xinrui, Fan Rongwei, Chen Zhaodong, et al. 1.35 GHz linearly tunable signal-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1105001. (in Chinese)

徐新瑞, 樊荣伟, 陈兆东, 等. 1.35 GHz 线性调频 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 1105001.

[10] Jost J D, Hall J L, Ye J. Continuously tunable, precise, single frequency optical signal generator [J]. *Optics Express*, 2002, 10(12): 515-520.

[11] Prehn A, GloCkner R, Rempe G, et al. Fast, precise, and widely tunable frequency control of an optical parametric, oscillator referenced to a frequency comb [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88 (3): 033101.

- [12] Numata K, Chen J R, Wu S T. Precision and fast wavelength tuning of a dynamically phase-locked widely-tunable laser [J]. *Optics Express*, 2012, 20(13): 14234–14243.
- [13] Wang J, Chen D J, Cai H W, et al. Fast optical frequency sweeping using voltage controlled oscillator driven signal sideband modulation combined with injection locking [J]. *Optics Express*, 2015, 23 (6), 7038–7043.
- [14] 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.
- [15] Qi G H, Yao J P, Seregelyi J, et al. Optical generation and distribution of continuously tunable millimeter-wave signals using an optical phase modulator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(9): 2687–2695.
- [16] Anle W, Jianghai W, Xiong L, et al. Ka-band microwave photonic ultra-wideband imaging radar for capturing quantitative target information [J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 20708–20717.
- [17] Xu D, Yang F, Chen D J, et al. Laser phase and frequency noise measurement by michelson interferometer composed of a 3×3 optical fiber coupler [J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22386–22393.
- [18] Zhang X, Yang F, Feng Z T, et al. Narrow-linewidth swept laser phase reconstruction and noise measurement technology and its applications [J]. *Optics Express*, 2018, 26(25): 32958–32970.
- [19] Ahn T J, Kim D Y. Analysis of nonlinear frequency sweep in high-speed tunable laser sources using a self-homodyne measurement and Hilbert transformation [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(13): 2394–2400.