

半导体激光器光电负反馈线性调频技术研究

吴映^{1,2} 陈迪俊¹ 孙延光^{1,2} 蔡海文¹ 瞿荣辉¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 报道利用主动光电反馈技术实现半导体激光器线性调频技术的研究。使用自零差探测技术表征调频非线性; 所得拍频信号经鉴频电路给出相对于理想线性调频的偏移; 获得误差信号反馈到激光器的调制电流上, 构成一个光电反馈环, 主动控制调频线性化。实验采用 1550 nm 的分布反馈激光器, 调制电流为 20 mA, 扫描周期为 30 ms, 实现线性调频范围为 10 GHz。系统稳定性好, 操作方便。该方法对于调频连续波激光雷达、光频域反射仪等测量应用有重要意义。

关键词 激光器; 线性调频; 自零差探测; 光电反馈

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0902001

Research on Optical Chirp Linearization Technique of Semiconductor Lasers by an Optoelectronic Feedback Loop

Wu Ying^{1,2} Chen Dijun¹ Sun Yanguang^{1,2} Cai Haiwen¹ Qu Ronghui¹

(¹ Shanghai Key Laboratory of All Solid State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The research on chirp linearization of a semiconductor laser using an optoelectronic feedback loop is reported. Self-homodyne detection is adopted to characterize the chirp nonlinearities. The beat signal is fed to a frequency discriminator circuit, which measures the laser instantaneous frequency deviation from a perfectly linear chirp and provides an error signal. The error signal is fed back to the modulation current of the laser, and thus an optoelectronic feedback loop is achieved and linear tuning is realized. The experiment is conducted with a 1550 nm distributed feed back (DFB) laser. The injection current is modulated by a ramp with 20 mA in amplitude and 30 ms in period. A linear tuning range of 10 GHz is realized in experiment. The system is both stable and effective. This technique is of significance to applications such as frequency-modulated continuous-wave laser radar, optical frequency-domain reflectometry etc.

Key words lasers; chirp linearization; self-homodyne detection; optoelectronic feedback

OCIS codes 140.3600; 140.3570; 140.3490

1 引言

快速线性调频的单模激光光源在调频连续波(FMCW)激光雷达、光频域反射计(OFDR)、三维成像、相干原子操纵、相干光谱分析、高分辨率光谱仪等领域有广泛的应用^[1-6], 其调频线性度和带宽是光源性能的重要指标。半导体激光器有灵活的调谐

特性, 可直接通过电流调制直接进行调谐, 而且结构小巧, 价格低廉, 应用广泛。但半导体激光器存在内在的频率响应非线性, 尤其在高频情况下^[7], 导致不能得到理想的线性调频信号。比如在 FMCW 激光雷达中常用三角波调制函数, 此时只能得到非线性的光学调频, 导致信号雷达拍频频谱展宽, 分辨率下

收稿日期: 2013-03-04; 收到修改稿日期: 2013-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(61108028, 61178031, 61137004)、上海市科委重点基金项目(11JC1413500)

作者简介: 吴映(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事单频半导体激光器调频方面的研究。E-mail: stellawu@siom.ac.cn

导师简介: 瞿荣辉(1972—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电子器件与信息系统技术等方面的研究。

E-mail: rhqu@siom.ac.cn

降。要精确控制高速的调频,必须在整个过程中实时测量激光的瞬时频率。自零差技术可以表征激光的频率噪声,并提供误差信号。1996年 Iiyama 等^[8]最早提出将这种技术用于线性调频,并使用参考干涉仪和相位比较器搭建光电反馈环,实现了较慢速调频的线性化。1998年, Greiner 等^[9]在光电反馈环中使用了锁相环技术,实现了稳频,并在实验中验证了这种结构也可以用于频率调谐。2003年, Kakuma 等^[10]报道了线性调频在光频域反射计上的应用,但只在低调谐速度下实现了简单的线性调频。线性调频技术在射频(RF)信号处理及 FMCW 激光雷达方面的应用,引发了对其新一轮的研究热情,在调谐速度、调谐带宽和精度等方面都取得了突出进展。2005年法国的 Gorju 等^[11]详尽地分析了光纤延迟线的长度对于噪声测量精度的影响,并在2007年实现了较快速度和较大调谐范围的线性调频。2009年 Satyan 等^[12]利用他们在光学锁相方面的经验,改进了反馈电路,实现了高速线性调频。同一年, Roos 等^[13]利用外腔半导体激光器实现了大范围线性调频。国内也有关于线性调频的广泛研究。2009年本课题组利用电流调谐的半导体激光器研究了甲烷的吸收谱,如果文献中的光源用线性调频的激光器替代可以得到更高的测量精度^[14]。中国科学院上海光学精密机械研究所许楠等^[15]研究了合成孔径激光成像雷达中非线性啁啾校正算法。文献^[16]分析了光学调频激光雷达中的非线性响应特性,并进行了非线性参数估计和补偿,利用数据处理提高了激光雷达测距测速精度。文献^[17]研究了一种基于反馈控制的线性调频连续波线性度校正的方法,但没有在实验上实现。

上面提到的基于锁相技术的线性调频精度高,但是要求所采用激光器的线宽很窄、控制环路带宽很大。有些情况中构建锁相环是不必要的,使用锁频可以大大简化电路的复杂性,且对激光器的适应范围更广。

本文搭建了一个鉴频光电负反馈系统。在自零差探测中采用加长的延迟线,得到较高频率的拍频信号,避免了激光器噪声的影响。使用分频器及频压转换芯片将干涉仪输出的拍频信号转换成电压信号,这种电路结构简单,通用性、稳定性好。通过电学负反馈实现了激光器的主动线性调频。使用该系统,在实验上实现线性调频带宽 10 GHz,反馈后显著改善了调频非线性。

2 器件结构和工作原理

线性调频激光器的结构如图 1 所示。分布反馈(DFB)半导体激光器的输出光经过一个耦合器,将一部分光耦合到反馈环内,另一部分光作为输出。输出端设有一个马赫-曾德尔干涉仪和光子探测器(PD2),如图 1(a)所示,探测到的信号用来辅助分析光频变化。图 1(b)所示为光电反馈环。进入反馈环的光分成两路,一路经过延时 τ_d ,另一路不经过延时,经耦合器汇合后入射到 PD1 上,构成自零差探测。下面来分析调频时 PD1 上接收到的信号^[11]。

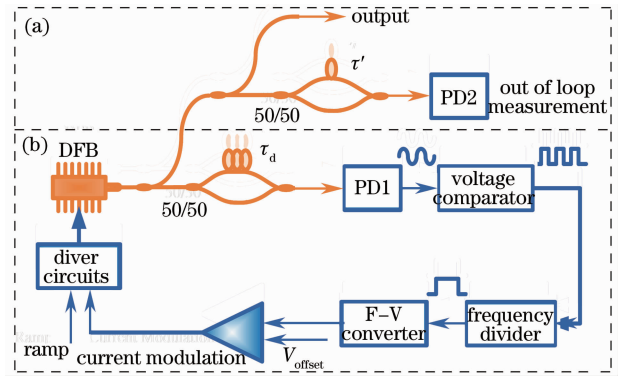


图 1 线性调频激光器装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the linearly tuned laser

若不考虑噪声,线性调频的激光光频可以表示为

$$\nu(t) = \nu_0 + rt, \quad (1)$$

式中 ν_0 是初始光频, r 为调谐速率,则其相位可以表示为

$$\varphi(t) = \int_0^t \nu(\tau) dt = 2\pi\left(\nu_0 t + \frac{1}{2}rt^2\right) + \phi_0. \quad (2)$$

在图 1 所示的自零差探测装置中,激光被分成两束。一束光经过延时 τ_d ,另一束光从没有延时的臂通过,两臂的光强之比为 1:1。设光纤输入端的电场为

$$E(t) = \varepsilon(t) + C =$$

$$E_0 \exp\left[j2\pi\left(\nu_0 t + \frac{r}{2}t^2\right) + j\phi_0\right] + C, \quad (3)$$

式中 $\varepsilon(t)$ 表示光场,为复指数形式, C 为其复共轭, E_0 是光场的振幅,这里假定为常数, ϕ_0 是一个常相位。则两束光汇合后得到的总电场强度为

$$E_T = \frac{1}{\sqrt{2}}[\varepsilon(t) + \varepsilon(t - \tau_d) + C]. \quad (4)$$

在探测器 PD1 上得到的光强为

$$I(t) = E_0^2 [1 + \cos(2\pi f_b t + \phi_0)], \quad (5)$$

式中 $f_b = r\tau_d$ 为拍频频率, ϕ_0 为与时间无关的常相位。

若考虑调谐的非线性, 设激光的瞬时频率为 $\nu = \nu_0 + rt + \alpha t^2$ 。于是得到探测光强为

$$I(t) = E_0^2 \{1 + \cos[2\pi(f_b - \alpha\tau_a^2 - \alpha\tau_d t)t + \psi'_0]\}, \quad (6)$$

式中 ψ'_0 为与时间无关的常相位。可见, 此时拍频频率是随时间变化的, 可以表示为

$$f(t) = f_b - \alpha\tau_a^2 + \alpha\tau_d t. \quad (7)$$

因此拍频的频率变化可以表征调谐速率的变化。鉴别出拍频的频率, 并将误差进行反馈, 使拍频频率锁定在固定频率上便可实现调谐速率的锁定。

这里使用的鉴频系统由比较器、分频器、频压转换器等组成。比较器的作用是将正弦拍频信号转换成方波, 方波再经分频器转换成较低频的信号, 使其符合频压转换芯片的工作范围。该信号经频压转换芯片转换成与频率成正比的电压信号 U 。设计时鉴频电路的响应时间应远小于调频周期。从上面的分析可以知道 $U = K \cdot f(t)$, 其中 K 是一个与电路有关的常数。该电压与一个稳定的标准电压进行对比, 偏差反馈到激光器驱动电流上从而进行调频动态补偿, 反馈电路带宽应远大于调频重复频率。

3 实验结果及讨论

使用的激光器为一个波长为 1550 nm 的光纤耦合输出 DFB 半导体激光器, 线宽为 1.85 MHz, 工作在偏置电流为 50 mA (偏置电流由偏置电压

V_{offset} 产生, 阈值电流为 15 mA)。

首先利用图 1(a) 所示的环外测量装置来分析该激光器自身的调谐特性。用一个幅值为 20 mA 的锯齿波对激光器进行电流调谐。干涉仪延迟光纤长度为 4 m, 产生延时 $\tau' = 20$ ns。示波器采集 PD2 的光电流信号, 作希尔伯特变换分析^[18], 可得到调频线性度, 结果如图 2 所示, 图中 t 表示时间, T 表示锯齿波的上升时间, 故横坐标表示一个锯齿波周期。图 2(a) 为光频相对于起始光频的变化。图 2(b) 为调谐速率的变化。由图可见不同电流调制频率下, 激光器调谐特性变化很大, 而且光频变化都存在非线性。相同的调制电流下, 扫描电流频率越大, 光频变化量越小, 且调频非线性越明显。产生这种现象的一个原因是半导体激光器的电流调谐存在内在的非线性, 因为其频率调制 (FM) 响应是非均匀的。半导体激光器的电流调制频响由两个因素构成, 即载流子密度变化^[19]和温度变化^[20]。其总的频响有一个类似低通滤波响应的经验公式^[21], 频率越高调制幅度越小, 相位滞后越严重。锯齿波可以看做不同频率成分正弦波的组合, 因而在调谐过程中非均匀的调谐速率, 在锯齿波的转折处这种现象更明显。另一个原因是激光器热电制冷器 (TEC) 的响应速度不够快, 半导体激光器的温度变化也会引起频率漂移。调频的非线性会给实际应用造成很多不便, 利用主动反馈控制可以显著减小调频非线性。

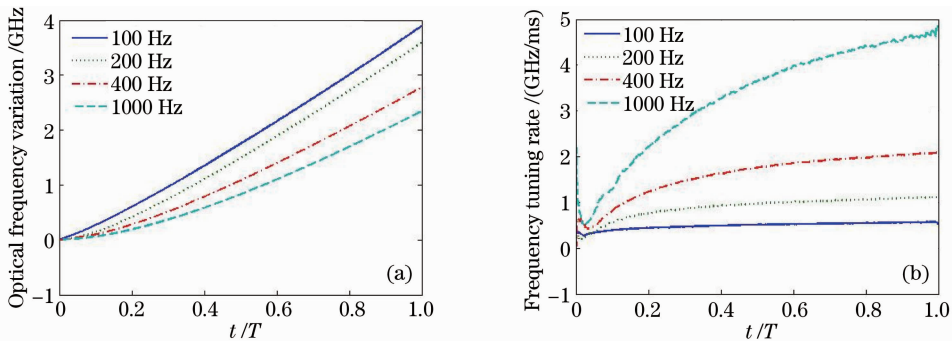


图 2 不同锯齿波重复频率下激光器的调频特性。(a) 一个周期内 DFB 半导体激光器的光频变化;
(b) 一个周期内 DFB 半导体激光器的调谐速率的变化

Fig. 2 Chirp behavior of the laser under different repetition frequencies. (a) Optical frequency variation of the DFB laser during one period of the saw-tooth waveform; (b) frequency tuning rates of the DFB laser during one period of the saw-tooth waveform

使锯齿波重复频率为 30 Hz, 进行线性调频实验。PD1 输出的拍频信号如图 3 所示。拍频的波形是两种效应的叠加, 一是激光器的中心频率调谐产生的频率为 f_b 的正弦拍频, 一是激光器中心频率抖动 (即线宽) 引起的在自零差探测输出端出现的拍频信号^[22], 它在时域上相对于正弦信号是一个噪声,

振幅与正弦信号相等, 对鉴频产生极大干扰。而当正弦拍频频率较高时, 一个周期内激光器的中心频率抖动较小, 对正弦信号产生的干扰较小。图 3(a) 为正弦拍频频率较低时, 激光器中心频率抖动产生很大干扰信号。图 3(b) 为正弦拍频频率较高, 激光器中心频率抖动小, 正弦拍频光滑。根据前面的分

析 $f_b = r\tau_d$, 延迟时间影响拍频频率。为了得到较

好的拍频信号,采用 18.5 km 的光纤延迟线。

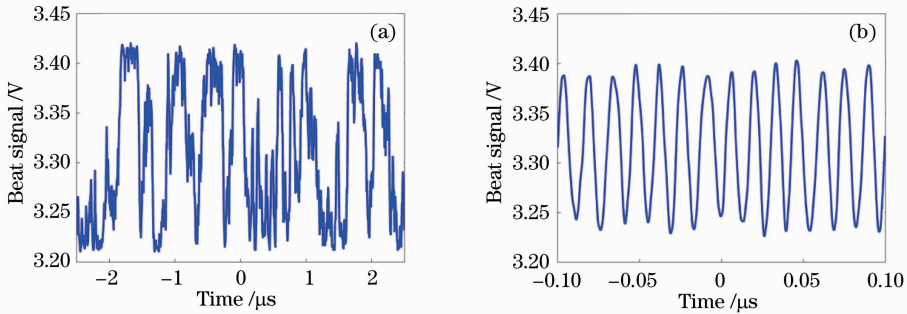


图 3 实验中得到的拍频信号。(a) 频率较低的拍频信号;(b) 频率较高的拍频信号

Fig. 3 Experimental beat signal with (a) low frequency and (b) high frequency

激光器输出的调频激光在 PD1 上产生约 30 MHz 的正弦拍频信号。正弦拍频信号经比较器(LM360N)转换成方波,再经过一个 64 倍分频器(SN54LS294N)将 30 MHz 的拍频信号转换成 500 kHz 的方波信号。方波信号经频压转换芯片(AD650KN)直接将频率转换成电压。该电压与一个稳定的标准电压(AD581LH)作比较,微分放大后得到的误差信号经比例积分与微分(PID)控制电路反馈到激光器的驱动电流上,给激光器的驱动电流加以调制。

反馈实验结果如图 4 所示。频压(F-V)转换芯片的输出电压即是电路的鉴频信号。从图中可以看到,未反馈时,鉴频信号约从 2 V 变化到 5 V;反馈闭合后,鉴频信号基本变为一条直线,说明拍频信号较好地锁定在了一个固定频率,反馈成功地稳定了激光器调谐速率。图 4 中椭圆圈起来的部分位于锯齿波的转折处,由于存在电流突变,非线性较大,超出了反馈电路的补偿范围,未能完全补偿。若改进反馈电路,采用多级 PID 反馈或对驱动电流进行预补偿,将能更好地补偿,得到更线性的以调频。

采集光电流的频谱来直接分析拍频频率变化,结果如图 5 所示。对采集的一段 PD1 的输出拍频

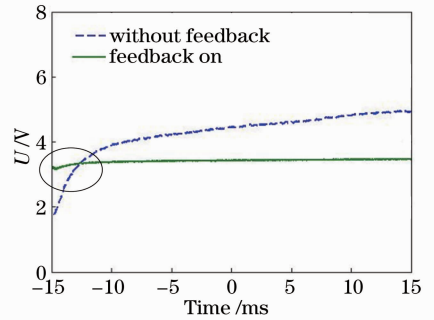


图 4 频压转换芯片的输出

Fig. 4 Output of the F-V converter

信号作分段快速傅里叶变换(FFT)得到图 5 (a),从图中可以看到未加反馈时,拍频频率 f_b 随时间增大,说明调谐速率随时间增大;反馈闭合后,拍频频率几乎保持不变,说明调谐速率几乎不变。图中数据点的上下波动是分段 FFT 处理数据的精度引起的。图 5(b)为同一时间范围内 PD2 的输出信号频谱。PD2 与它前面的马赫-曾德尔干涉仪也构成自零差探测结构,其拍频频率也可以反映调谐速率。由于延时较小,PD2 上的拍频频率较低,可以采用较低的采样率,数据处理更方便。从图中可以看到,未加反馈时,拍频的频谱在一定范围内延展开;反馈

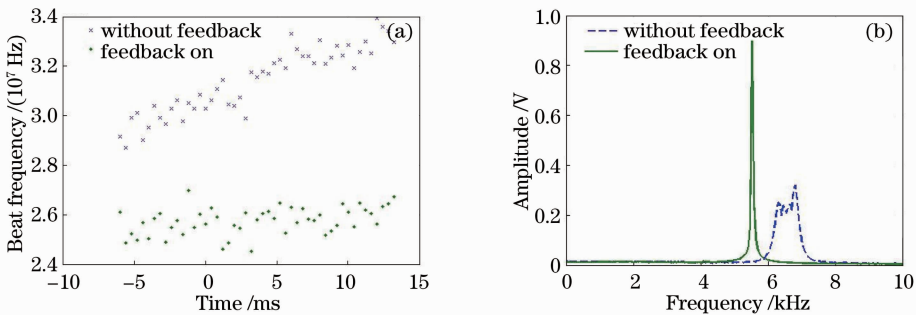


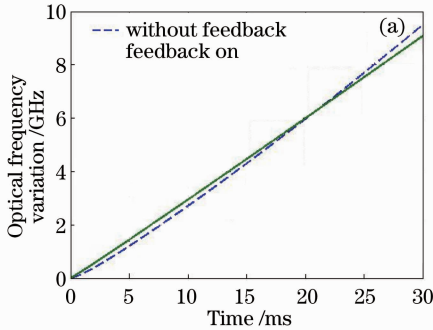
图 5 调频实验结果。(a) PD1 输出的拍频频率随时间的变化;(b) PD2 的信号频谱

Fig. 5 Experimental results for the chirp. (a) Beatnote frequency of the output of PD1 versus time;

(b) spectra of the whole beat signal of output of PD2

加上后,拍频频谱变成一个尖峰,说明反馈后拍频频率集中到了一个固定频率。

为了考察反馈后的调频线性度。分别在有无反馈和反馈闭合时进行环外测量,结果如图 6 所示。图 6(a)为反馈前后光频率相对于起始光频率的变化,横坐标表示时间。从图中可以看到反馈前激光频率随时间非线性变化,反馈后基本成一条直线,整



个过程中激光频率增大近 10 GHz。图 6(b)为反馈前后调谐速率随时间的变化,反馈前调谐速率随时间改变明显,反馈后调谐速率的变化被压缩,显著改善了非线性。此外图 6(b)与图 3 的曲线趋势完全一致,说明鉴频电路输出电压真实地反映了拍频频率和调谐速率。

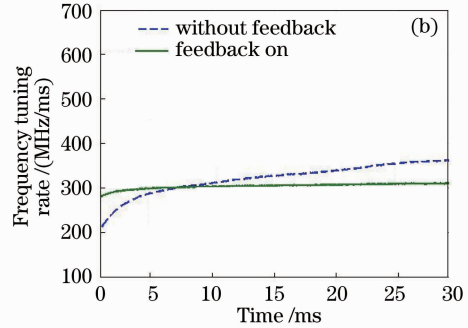


图 6 反馈前后激光器的调频特性对比。(a) 光频率随时间的变化;(b) 调谐速率随时间的变化

Fig. 6 Comparison of chirp behavior before and after feedback. (a) Optical frequency variation of the DFB laser; (b) frequency tuning rates of the DFB laser

该激光器的驱动电路只能产生 20 mA 的电流调制,在每毫秒几个吉赫兹的调谐速率时,调谐带宽较小,故没有实验能更高速地线性调频。若改进驱动电路,该光电反馈系统有潜力实现更高速和更大带宽的线性调谐。

4 结 论

本文使用自零差探测技术与鉴频反馈控制技术,研制了一个线性调频的激光器。构建了一个光电反馈环,在实验中实现了 10 GHz 的线性调频。分析了干涉仪输出的拍频频率,反馈后拍频频率变化量显著减小。利用希尔伯特变换技术分析光频变化。考察了激光器的调谐特性及调谐非线性,反馈后光频随时间线性变化。锁频电路可以大大简化电路的复杂性,且对激光器的适应范围更广。该线性调频激光器结构简单,稳定性好,有广泛的应用前景。改善驱动电路的调制带宽后,可实现更大范围和更高速度的调频。

参 考 文 献

- W Eickhoff, R Ulrich. Optical frequency-domain reflectometry in single-mode fiber[J]. Appl Phys Lett, 1981, 39(9): 693-695.
- U Glombitza, E Brinkmeyer. Coherent frequency-domain reflectometry for characterization of single-mode integrated-optical wave-guides[J]. J Lightwave Technol, 1993, 11(8): 1377-1384.
- J Zheng. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference[J]. Appl Opt, 2004, 43(21): 4189-4198.

- C J Karlsson, F A A Olsson. Linearization of the frequency sweep of a frequency-modulated continuous-wave semiconductor laser radar and the resulting ranging performance[J]. Appl Opt, 1999, 38(15): 3376-3386.
- T L Harris, M Z Tian, W R Babbitt, et al.. Chirped excitation of optically dense inhomogeneously broadened media using $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ [J]. J Opt Soc Am B, 2004, 21(4): 811-819.
- Zeng Zhaoyang, Zhang Xiaoyong, Jia Xin. Measurement of linear frequency-modulated continuous-wave laser radar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(2): 022802.
- 曾朝阳, 张晓永, 贾 鑫. 线性调频连续波激光雷达测量方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(2): 022802.
- P Correc, O Girard, I F Defaria. On the thermal contribution to the FM response of DFB lasers: theory and experiment[J]. IEEE J Quantum Electron, 1994, 30(11): 2485-2490.
- K Iiyama, L T Wang, K Hayashi. Linearizing optical frequency-sweep of a laser diode for FMCW reflectometry[J]. J Lightwave Technol, 1996, 14(2): 173-178.
- C Greiner, B Boggs, T Wang, et al.. Laser frequency stabilization by means of optical self-heterodyne beat-frequency control[J]. Opt Lett, 1998, 23(16): 1280-1282.
- S Kakuma, K Ohmura, R Ohba. Improved uncertainty of optical frequency domain reflectometry based length measurement by linearizing the frequency chirping of a laser diode[J]. Opt Rev, 2003, 10(4): 182-184.
- G Gorju, V Crozatier, V Lavielle, et al.. Experimental investigation of deterministic and stochastic frequency noises of a rapidly frequency chirped laser[J]. Eur Phys J Appl Phys, 2005, 30(3): 175-183.
- N Satyan, A Vasilyev, G Rakuljic, et al.. Precise control of broadband frequency chirps using optoelectronic feedback[J]. Opt Express, 2009, 17(18): 15991-15999.
- P A Roos, R R Reibel, T Berg, et al.. Ultrabroadband optical chirp linearization for precision metrology applications[J]. Opt Lett, 2009, 34(23): 3692-3694.
- Yuntao Wang, Haiwen Cai, Jianxin Geng, et al.. Logarithmic conversion of absorption detection in wavelength modulation

- spectroscopy with a current-modulated diode laser[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(21): 4068–4076.
- 15 Xu Nan, Lu Wei, Liu Liren. Simulation of nonlinear-chirp compensation by scan-filtering in SAIL[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 47–54.
许楠, 鲁伟, 刘立人. 合成孔径激光成像雷达中非线性啁啾逐扫描滤波校正算法的仿真与分析[J]. *光学学报*, 2009, 29(1): 47–54.
- 16 Li Jiang, Lin Zhili, Ma Jingjin. Nonlinear response characteristics of the optical frequency modulated lidar[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(s2): s214002.
李荏, 林志立, 马静谨. 光学调频激光雷达的非线性响应特性[J]. *中国激光*, 2012, 39(s2): s214002.
- 17 Zheng Wei, Lu Guanghua, Chen Weidong, *et al.*. Novel method for linearity correcting and system application[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2005, 34(4): 12–15.
郑伟, 陆广华, 陈卫东, 等. 线性度校正的新方法与系统应用[J]. *火控雷达技术*, 2005, 34(4): 12–15.
- 18 T J Ahn, D Y Kim. Analysis of nonlinear frequency sweep in high-speed tunable laser sources using a self-homodyne measurement and Hilbert transformation[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(13): 2394–2400.
- 19 R S Tucker. High-speed modulation of semiconductor-lasers[J]. *J Lightwave Technol*, 1985, 3(6): 1180–1192.
- 20 G S Pandian, S Dilwali. On the thermal FM response of a semiconductor-laser diode[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1992, 4(2): 130–133.
- 21 S Saito, O Nilsson, Y Yamamoto. Coherent FSK transmitter using a negative feedback stabilized semiconductor-laser [J]. *Electron Lett*, 1984, 20(17): 703–704.
- 22 Zhang Nan, Rao Wei, Xu Pan, *et al.*. Line shape analysis of frequency-modulated laser with delayed self-heterodyne method [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0302005.
张楠, 饶伟, 徐攀, 等. 基于延迟自外差方法的调频激光器线型分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0302005.

栏目编辑:何卓铭