

基于预畸变和光锁相的线性扫频激光源生成

许妍 秦杰 谢玮霖 周潜 董毅 胡卫生

上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

摘要 线性扫频激光源在高分辨率、高精度、大动态范围的激光测量和光纤传感领域有着广泛的应用。然而,扫频非线性及激光相位噪声限制了测量系统的分辨率、精度和动态范围。本文分析了分布反馈式(DFB)半导体激光扫频中的非线性及激光相位噪声产生的机制,提出基于预畸变和光锁相的激光扫频非线性校正和激光相位噪声抑制方法,实现了扫频范围为50 GHz,均方根频率误差小于263 kHz的激光扫频信号。实验测试表明该扫频激光源的线性度和相干性得到了有效增强。

关键词 激光器;线性扫频激光光源;光扫频非线性;预畸变;光锁相

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0202002

Linearized Swept Laser Source Generation Based on Pre-Distortion and Optical Phase-Locked Loop

Xu Yan Qin Jie Xie Weilin Zhou Qian Dong Yi Hu Weisheng

State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University,
Shanghai 200240, China

Abstract Linearly frequency-swept laser source is widely used in high spatial resolution, precision and dynamic range light measuring and optic fiber sensor. However, the frequency sweep nonlinearity and the phase noise of the laser source limit the system spatial resolution, precision and dynamic range. The mechanism of the nonlinearity and phase noise in frequency-swept distributed feedback (DFB) semiconductor laser is analyzed, and propose the combination of pre-distortion and optical phase-locked loop to overcome the nonlinearity of the frequency sweep and suppress the phase noise of the laser source. Chirp of 50 GHz is achieved where the root mean square frequency error is less than 263 kHz. And the performance of the frequency-swept laser source linearity and coherence enhancement is demonstrated.

Key words lasers; linear frequency-swept laser source; frequency sweep nonlinearity; pre-distortion; optical phase-locked loop

OCIS codes 060.2370; 060.2630; 060.2380

1 引 言

基于线性扫频激光源用于相干测速、测距,以其高分辨率、高精度、大动态范围和分布式测量能力等优越性,受到越来越广泛的关注与研究。在该测量技术中,通过测量待测物的后向反射(或散射)光信号与本振光信号的相干拍频信号的频谱,实现对物体的距离、速度等参量的精确测量。宽扫频范围、高线性度和低相位噪声的扫频光源是实现高分辨率和高精度测量的先决条件^[1-4]。

激光扫频的实现方式,总体上可分为两类:1)通过控制激光器谐振腔的腔长、折射率等光学参数实现;2)通过外接光频调制器(如双平行光强度调制器、声光调制器)实现。前者的主要问题是扫频非线性及激光

收稿日期:2015-08-21;收到修改稿日期:2015-10-09

基金项目:国家自然科学基金(61225004)、国家973计划(2012 CB315602)

作者简介:许妍(1991—),女,硕士研究生,主要从事光纤通信和测量方面的研究。E-mail: chris7@sjtu.edu.cn

导师简介:董毅(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事光传输、光接入及光电测量等方面的研究。

E-mail: yidong@sjtu.edu.cn(通信联系人)

相位噪声, 后者的主要问题是扫频范围小。

谐振腔调谐扫频的代表性方法有: 采用压电陶瓷(PZT)控制外腔半导体激光器(ECDL)或光纤激光器的谐振腔长实现激光扫频; 通过控制注入电流(或工作温度)改变分布式反馈(DFB)半导体激光器的腔折射率实现激光扫频^[5-11]。相比较而言, 基于注入电流控制的DFB半导体激光器扫频光源具有控制简单、价格低廉和体积小的优越性, 深受仪器设备领域的青睐, 但DFB固有的扫频非线性和激光相位噪声^[12-16]严重制约了测量的精度、分辨率和测量范围。近年来, 基于闭环反馈的线性光扫频技术得到广泛研究^[17-20], 但受限于光频控制的精度和速度等问题, 对激光相位噪声的抑制效果不明显, 不能同时满足线性扫频和低相位噪声的需求。

扫频非线性主要源于半导体激光器的电流调制频响的非线性, 其导致的频率误差呈现为大范围慢变的特性。而激光的相位噪声主要源于 $1/f$ 噪声和自发辐射引起的白频率噪声, 在频域上表现为宽频带的随机频率噪声。驱动电流预畸变方法可以有效地改善激光的扫频非线性, 但无法抑制宽频的随机频率噪声^[21], 因而无法改善激光的相干特性。而光锁相技术可以对激光源的随机频率噪声进行有效抑制, 但受限于锁相带宽, 难以跟踪大范围的非线性频率误差。

针对这一问题, 本文采用电流预畸变和光锁相的复合方法改善扫频激光源的线性度和相干性。首先通过电流预畸变校正激光的扫频非线性, 减小扫频非线性导致的频率误差范围; 然后采用基于马赫-曾德尔干涉仪的光锁相来抑制残余的扫频非线性和随机频率噪声, 由此, 获得一个相干性得到有效增强的高线性扫频激光源, 以满足对高分辨率和高精度测量的需求。

2 系统原理

2.1 实验系统介绍

DFB 半导体激光器的电流调制频响特性与载流子密度和温度变化有关, 由于注入电流与载流子密度之间的非线性关系, 以及伴随的有源区温度变化而导致的输出光频变化, 因此基于注入电流控制的光扫频特性呈现为非线性。图 1 为本论文采用的基于注入电流预畸变和光锁相控制技术的激光扫频非线性校正和激光相位噪声抑制实验系统框图。

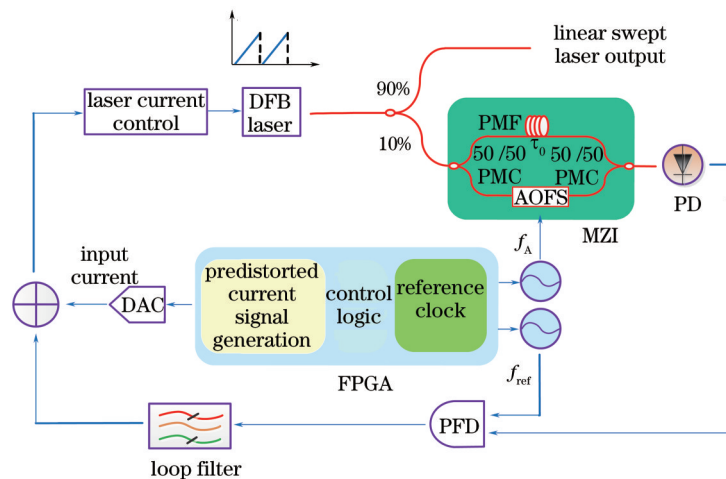


图 1 基于注入电流预畸变和光锁相的线性光扫频系统框图

Fig.1 Linear sweep frequency system based on injected current pre-distortion and optical phase-locked loop

预畸变的关键在于获得激光器输出频率与注入电流的关系曲线, 本论文采用马赫-曾德尔干涉方式测得激光的输出频率与驱动电流的关系曲线。然后, 通过计算得到该曲线的反函数, 获得预畸变曲线, 采用现场可编程门阵列(FPGA)生成预畸变的电流驱动信号, 控制DFB激光注入电流进行激光扫频。

预畸变信号驱动的扫频激光, 通过 90:10 的保偏光纤耦合器, 将其输出功率的 10% 注入马赫-曾德尔干涉仪的两臂, 其中一臂经过长约 10 m 的保偏光纤, 对光信号产生约 50 ns 的延时, 另一臂经过声光移频器(AOFS)对光载波进行 f_A 上频移, 两臂光信号经保偏光纤耦合器和光电检测器(PD)获得外差拍频信号 f_{PD} , 与参考信号 f_{ref} 鉴相后得到相位误差信号, 经过环路滤波, 反馈控制驱动电流形成闭环回路。在锁定状态下,

相位误差趋近于零,意味着扫频非线性被进一步校正,同时激光相位噪声得到抑制。

以上系统中的预畸变信号、参考信号、AOFS的驱动信号、系统控制信号以及同步信号均由FPGA实现,以保证系统的同步及可靠工作。

2.2 理论分析

在一个扫频周期内,扫频激光器的瞬时频率可表示为

$$f(t) = f_0 + \eta_i[i(t)] \cdot i(t), \quad (1)$$

式中 f_0 为初始频率, $\eta_i[i(t)]$ 为激光器的电流-频率调制系数, $i(t)$ 为激光器的调制电流。故一个周期内激光器输出的扫频信号可表示如下:

$$E(t) = E_0 \exp\left\{j \int_0^t 2\pi[f_0 + \eta_i[i(\xi)] \cdot i(\xi)] d\xi + \phi(t) + \phi_0\right\} = E_0 \exp\left\{j \left[2\pi f_0 t + \phi_{\eta_i}(t) + \phi(t) + \phi_0\right]\right\}, \quad (2)$$

式中 $\phi_{\eta_i}(t) = \int_0^t 2\pi \cdot \eta_i[i(\xi)] \cdot i(\xi) d\xi$, 表征扫频相位项, $\phi(t)$ 为激光随机相位噪声, ϕ_0 为激光初始相位。经马赫-曾德尔干涉和光电检测后,输出的拍频信号为

$$i_{PD}(t) = R |E(t - \tau_0) + \kappa \exp(j2\pi f_A t) E(t)|^2 = 2R\kappa E_0^2 \cos[2\pi f_A t + 2\pi f_0 \tau_0 + \phi_{\eta_i}(t) - \phi_{\eta_i}(t - \tau_0) + \phi(t) - \phi(t - \tau_0)] + D_c, \quad (3)$$

式中 R 为PD的响应度, κ 为两臂功率比, τ_0 为两臂延迟差, f_A 为AOFS的驱动频率, $D_c = RE_0^2(1 + \kappa^2)$ 为直流项。故拍频信号的频率可表示为

$$f_{PD}(t) = f_A + \eta_i[i(t)] \cdot i(t) - \eta_i[i(t - \tau_0)] \cdot i(t - \tau_0) + \frac{d[\phi(t) - \phi(t - \tau_0)]}{dt} \approx f_A + \tau_0 \frac{d\{\eta_i[i(t)] \cdot i(t)\}}{dt} + \Delta f \quad (\tau_0 \rightarrow 0) = f_A + \tau_0 \left[\eta_i(i) + i \cdot \frac{d\eta_i(i)}{di} \right] \cdot \frac{di}{dt} + \Delta f = f_A + \tau_0 \cdot D(i) \cdot \frac{di}{dt} + \Delta f, \quad (4)$$

式中 $\Delta f = \frac{d[\phi(t) - \phi(t - \tau_0)]}{dt}$ 为相位噪声导致的频率抖动, $D(i) = \eta_i(i) + i \cdot \frac{d\eta_i(i)}{di}$ 为畸变函数,表征了激光扫频非线性。 $\left[\eta_i(i) + i \cdot \frac{d\eta_i(i)}{di} \right] \cdot \frac{di}{dt}$ 是扫频速率,记为 $\gamma(t)$ 。通过多次迭代,对 $D(i)$ 求反函数,可获得预畸变的电流调制信号,并且使 $\gamma(t)$ 趋于常数,使用该预畸变信号驱动激光电流,可以有效减小激光扫频非线性。

将拍频信号 f_{PD} 与高频率稳定的参考信号 f_{ref} 鉴相,获得拍频信号的相位误差信号,如下式所示:

$$e_F(t) = K [2\pi(f_{PD} - f_{ref})t + \phi_{PD} - \phi_{ref}] = K [2\pi(\tau_0 \gamma(t) + \Delta f + f_A - f_{ref})t + 2\pi f_0 \tau_0 + \phi(t) - \phi(t - \tau_0) - \phi_{ref}], \quad (5)$$

式中 K 为鉴相增益, ϕ_{ref} 为参考信号的初始相位。

误差信号经过环路滤波器后与和预畸变信号相加,反馈控制激光器的注入电流,形成闭环控制回路。当环路锁定时,满足:1) $f_{ref} \equiv f_{PD}$, 即 $\tau_0 \gamma(t) + \Delta f + f_A \equiv f_{ref}$, 故扫频非线性被校正;2) $\phi_{PD} - \phi_{ref} \equiv C$, 即 $\phi(t) - \phi(t - \tau_0) \equiv \phi_{ref} - 2\pi f_0 \tau_0 + C$, 故激光器的时间相干性得到改善,激光相位噪声得到抑制。

3 实验结果与分析

3.1 扫频信号的频率误差分析

实验中,使用线宽为650 kHz,中心波长为1550 nm的DFB激光器,扫频驱动电流范围为80~200 mA,相应扫频范围约为50 GHz,扫频周期为100 ms。图2为经4次迭代后生成的预畸变电流驱动信号。图示结果表明,DFB激光器的电流-频率调制系数随电流的增大而增大,与文献[17]中的理论分析一致。

图3为激光器分别在驱动电流未经预畸变和经过不同迭代次数预畸变下的扫频光信号的频率误差,从图中可以看出,加载预畸变前扫频信号的频率误差变化范围达到900 MHz。经过4次迭代预畸变处理后,频率误差变化范围小于24 MHz。此外,图示结果还表明,经过3次迭代后,再增加迭代次数,扫频非线性校正效果改善不明显,表明迭代达到收敛。

图4为锁相环处于开环和闭环状态下的扫频光信号的频率误差(驱动电流均为经过4次迭代的预畸变信号)。实验中,锁相环路带宽优化为500 kHz,锁相环路带宽主要受限于激光器电流调制频率响应中的相位翻转。图示结果表明,经锁相后,扫频信号的频率误差范围进一步减小至2 MHz,相应的均方根频率误差变化范围为263 kHz。

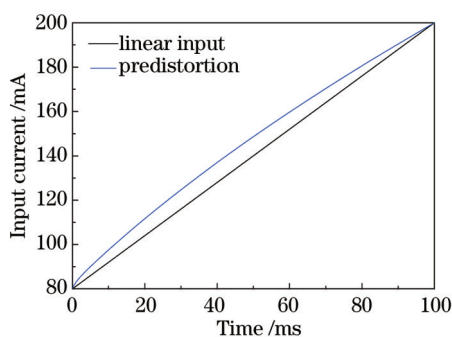


图2 预畸变前后的激光器驱动电流

Fig.2 Laser driving current for linear and pre-distorted cases

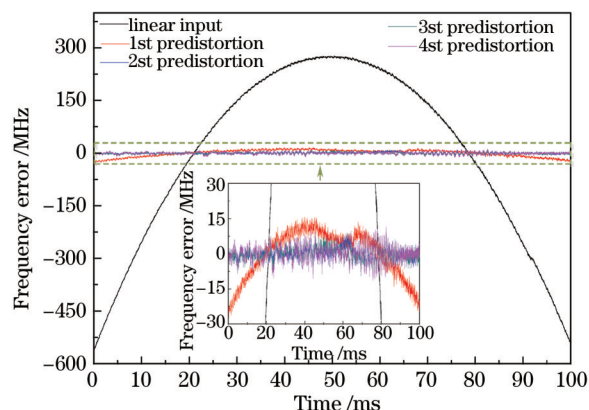


图3 预畸变前后的扫频光信号频率误差

Fig.3 Frequency error of sweep for linear and pre-distorted input

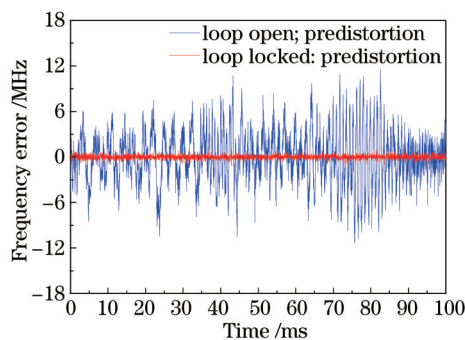


图4 锁相环在开环和闭环状态下的扫频光信号的频率误差

Fig.4 Frequency error of sweep for loop-open and loop-locked cases

3.2 扫频信号的相干性分析

对于洛伦兹线型的激光信号,通常采用激光线宽表征其相干性。但是,本文中的扫频激光经过锁相控制生成,其谱型不再是洛伦兹型,单纯的线宽无法准确表征其相干性。为此,论文通过测量扫频光信号的延迟自相干频谱来研究其相干性。图5(a)~(d)分别表示延迟距离为47、105、200和297 m下的自相干频谱,其中插图频率变化范围为 ± 200 kHz的频谱细节。

图示结果可知,仅对驱动电流进行预畸变,当延迟距离超过200 m后,干涉峰被明显展宽,信噪比严重恶化。而经过锁相控制后,在300 m的延迟距离下,仍可以测到明显的干涉峰,可见,锁相控制有效增强了扫频光信号的相干性。

4 结论

分析了注入电流控制的DFB半导体激光器的扫频非线性和激光相位噪声产生机制,提出基于驱动电流预畸变和光锁相的扫频非线性校正和激光相位噪声抑制方法,首先通过电流预畸变校正激光的扫频非线性,减小扫频非线性导致的频率误差范围;然后采用基于马赫-曾德尔干涉仪的闭环光锁相来抑制残余的扫频非线性和激光随机噪声,由此,实现了扫频范围为50 GHz,均方根频率误差小于263 kHz,扫频周期为100 ms的激光扫频信号。实验测试表明,采用本文的方法,不仅激光扫频信号的非线性得到了校正,而且激光相干性获得了有效增强。本光源可以有效提高线性扫频激光相干测量系统的精度、分辨率和测量距离。

参考文献

1 Pierrottet D, Amzajerdian F, Petway L, *et al.*. Flight test performance of a high precision navigation Doppler lidar[C]. SPIE, 2009, 7323: 732311.

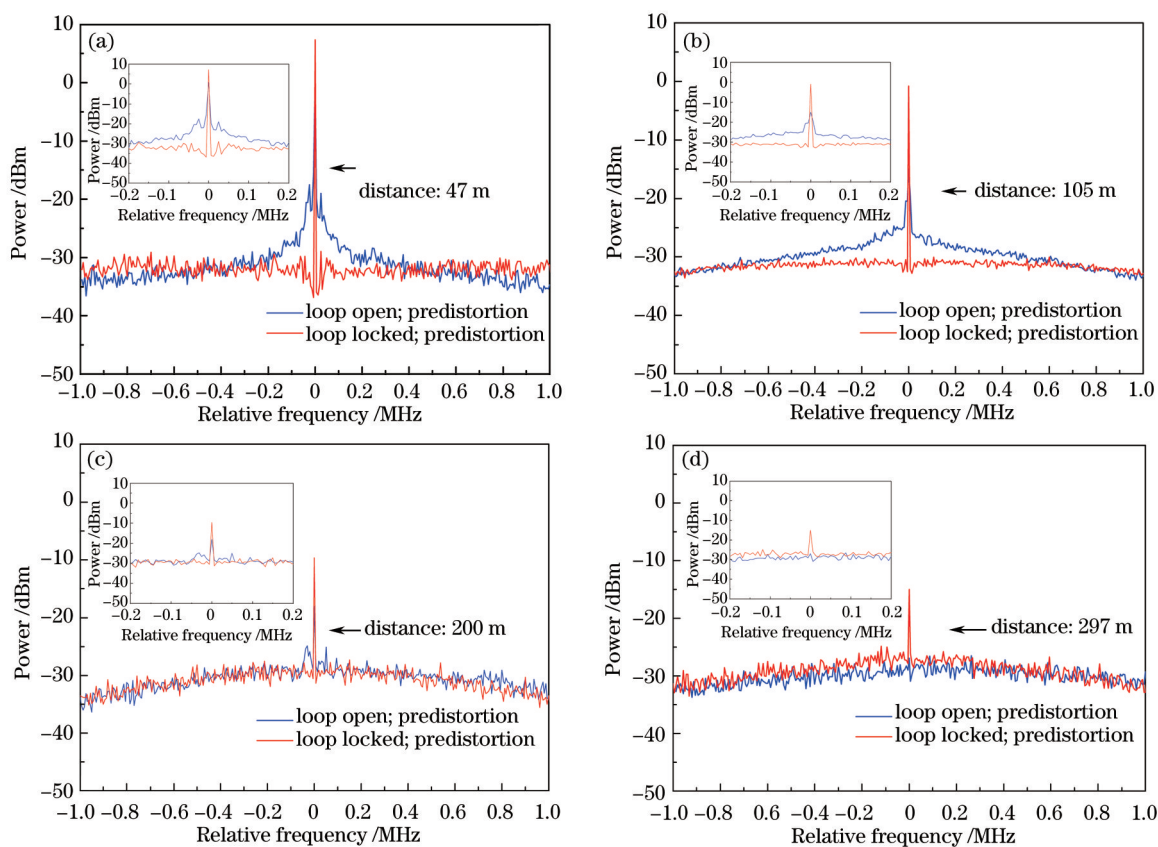


图5 不同延迟距离下的扫频光信号自相干频谱。(a) 47 m; (b) 105 m; (c) 200 m; (d) 297 m

Fig.5 Auto-correlation spectrum of sweep in different delay distances. (a) 47 m; (b) 105 m; (c) 200 m; (d) 297 m

- 2 Gaede S, Jastram M, Schaeffer C G, *et al.*. Field evaluation of high resolution optical FMCW monitoring approaches in passive optical networks[C]. Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference, Optical Society of America, 2013: NM2I. 2.
- 3 Herschel R, Jastram M, Gaede S, *et al.*. Cost efficient optical FMCW scheme for long range high resolution detection[C]. National Fiber Optic Engineers Conference, Optical Society of America, 2012: NM2K. 3.
- 4 Mateo A B, Barber Z W. Precision and accuracy testing of FMCW lidar based length metrology[J]. Appl Opt, 2015, 54(19): 6019-6024.
- 5 Zheng J. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference[J]. Applied Optics, 2004, 43(21): 4189-4198.
- 6 Zheng J. Signal analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference[C]. Frontiers in Optics, Optical Society of America, 2007: JSuA15.
- 7 Zhou X, Iiyama K, Hayashi K. Extended-range FMCW reflectometry using an optical loop with a frequency shifter[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 1996, 8(2): 248-250.
- 8 Liu Kun, Feng Bowen, Liu Tieqen, *et al.*. Continuous distributed fiber strain location sensing based on optical frequency domain reflectometry[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0505006.
刘 琨, 冯博文, 刘铁根, 等. 基于光频域反射技术的光纤连续分布式定位应变传感[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0505006.
- 9 Han Ping, Xie Yongquan, Liu Yang. Research of all-fiber micro-vibration multiplexing sensors[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0305004.
韩 屏, 谢涌泉, 刘 阳. 分布式全光纤微振动传感器研究[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305004.
- 10 Zhang Baofu, Guo Siji. External cavity semiconductor lasers[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science), 1993, 7(1): 30-35.
张宝富, 过巴吉. 外腔半导体激光器[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 1993, 7(1): 30-35.
- 11 Liu Ming, Zhang Mingjiang, Wang Aanbang, *et al.*. Generation of ultra-wideband signals by directly current-modulation distributed feedback laser diode subjected to optical feedback[J]. Chinese Journal of Physics, 2013, 62(6): 064209.
刘 明, 张明江, 王安帮, 等. 直接调制光反馈半导体激光器产生超宽带信号[J]. 物理学报, 2013, 62(6): 064209.

- 12 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.
- 13 Saito S, Nilsson O, Yamamoto Y. Coherent FSK transmitter using a negative feedback stabilised semiconductor laser[J]. Electronics Letters, 1984, 20(17): 703-704.
- 14 Huang Rui, Lü Haibao, Chu Xingchun, *et al.*. The characteristic analyzing of frequency-modulated semiconductor laser diode used in FMCW measuring system[J]. Laser Journal, 1998, 19(1): 22-26.
黄 锐, 吕海宝, 楚兴春, 等. FMCW 传感测量中的半导体激光器调频特性分析[J]. 激光杂志, 1998, 19(1): 22-26.
- 15 Xie Weiling, Dong Yi, Zhou Qian, *et al.*. Phase noise analysis of optical frequency domain reflectometry[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0706003.
谢玮霖, 董 毅, 周 潜, 等. 光频域反射技术中激光相位噪声影响分析[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0706003.
- 16 Cao Chunyan, Yao Qiong, Rao Wei, *et al.*. Linewidth measurement using unbalanced fiber-optic interferometer for narrow linewidth lasers [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0508005.
曹春燕, 姚 琼, 饶 伟, 等. 窄线宽激光器线宽的非平衡光纤干涉仪测量法[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0508005.
- 17 Wu Yin, Chen Dijun, Sun Yanguang, *et al.*. Research of optical chirp linearization technique of semiconductor lasers by an optoelectronic feedback loop[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0902001.
吴 映, 陈迪俊, 孙延光, 等. 半导体激光器光电负反馈线性调频技术研究[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0902001.
- 18 Fang Zujie, Ye Qing, Liu Feng, *et al.*. Progress of millimeter wave subcarrier optical fiber communication technologies[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(4): 481-488.
方祖捷, 叶 青, 刘 峰, 等. 毫米波副载波光通信技术的进展[J]. 中国激光, 2006, 33(4): 481-488.
- 19 Musch T. A high precision 24-GHz FMCW radar based on a fractional-N ramp-PLL[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2003, 52(2): 324-327.
- 20 Brooker G M. Understanding millimetre wave FMCW radars[C]. 1st International Conference on Sensing Technology, 2005: 152-157.
- 21 Gorju G, Crozatier V, Lavielle V, *et al.*. Experimental investigation of deterministic and stochastic frequency noises of a rapidly frequency chirped laser[J]. The European Physical Journal Applied Physics, 2005, 30(3): 175-183.

栏目编辑: 宋梅梅