

线性扫频激光器实时动态相频噪声特性研究

张茜^{1,2}, 冯子桐^{1,2}, 赵洁璐^{1,2}, 杨飞^{1*}, 魏芳¹, 蔡海文^{1,2}, 瞿荣辉¹

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 基于 120° 相差干涉和光场相位实时重构的窄线宽激光动态噪声特性测试方法, 从时域频率调谐函数、频域频率噪声功率谱密度及其随时间的演化特征等方面, 研究线性扫频激光器在不同扫频方式下动态相频噪声的细节特性。实验结果表明, 扫频机理或参数差异导致结果呈现完全不同的实时动态噪声特性。电光调制能够在反馈锁相环辅助下获得最佳的扫频线性度, 但会引起反馈谐振峰等噪声恶化, 其控制参数不同, 反馈谐振峰频率等特征也会发生变化; 声光调制呈现最小程度的噪声恶化; 压电调谐扫频线性度较差, 且会附加较大的调谐噪声。该结果为激光器扫频机制及控制技术的研究和工程应用光源选型提供了参考。

关键词 激光器; 调谐激光器; 线宽; 噪声; 相位测量

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0901004

Real-Time Dynamic Phase-Frequency Noise Characteristics of Linear Frequency-Swept Lasers

Zhang Xi^{1,2}, Feng Zitong^{1,2}, Zhao Jiejun^{1,2}, Yang Fei^{1*},
Wei Fang¹, Cai Haiwen^{1,2}, Qu Ronghui¹

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract We experimentally compare the detailed dynamic noise characteristics of a narrow linewidth-swept laser using different tuning mechanisms from three aspects, including the tunable frequency function in the time domain, frequency fluctuation power spectral density in the frequency domain, and its evolution law with time. All the analyses are conducted based on 120° phase difference interferometry and phase real-time reconstruction. The experimental results denote that different frequency-sweeping mechanisms and control parameters exhibit different real-time dynamic noise characteristics. Electro-optic modulation can obtain optimal sweep linearity using an optical phase-locked loop; however, this will result in noise deterioration such as feedback resonance peaks. Simultaneously, the different control parameters applied to the same electro-optic modulator will result in different feedback resonance peak frequencies. Acousto-optic modulation exhibits minimal noise degradation, and piezoelectric modulation results in poor sweep linearity and large tuning noise. This study lays the foundation for the research of the laser-frequency-sweeping mechanism and control technology and the selection of a light source in engineering applications.

Key words lasers; tunable lasers; linewidth; noise; phase measurement

OCIS codes 140.3600; 300.6170; 270.2500; 120.5050

收稿日期: 2019-03-14; 修回日期: 2019-04-09; 录用日期: 2019-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(61875214)

* E-mail: fyang@siom.ac.cn

1 引 言

线性扫频激光光源已经成为许多应用领域的重要工具,包括相干光通信^[1]、高精度相干光谱分析^[2]、低噪声相干传感^[3-4]等。扫频光源的线性度及其噪声是评价系统性能的关键参数,比如在光频域反射仪(OFR)中,当光场瞬时光频不再是线性变化时,扫频非线性以及激光相位噪声会严重影响 OFDR 的距离分辨率,进而引起峰值功率分散,信噪比下降,影响可测量范围^[5]。

不同的扫频光源采用的扫频机制不同。比如,半导体激光器通常具有良好的线性扫频能力,可以通过调谐抽运电流和温度直接调谐;光纤激光器可以通过改变激光器的温度或者利用压电陶瓷(PZT)拉伸腔长实现内部调谐,或者通过声光调制器(AOM)、电光调制器(EOM)实现外部调谐。

常见的测试扫频光源动态特性的方法有自外/零差干涉法^[6-7]、平均法^[8]、门控法^[9-10]、分别用于光学层析相干成像(OCT)的大范围宽线宽扫频激光^[11]和窄线宽扫频光源^[12]的基于 120° 相差干涉和光场实时重构的激光动态噪声特性测试方法。

本文基于窄线宽激光动态噪声特性测试方法^[12],实验测试商用窄线宽分布式反馈布拉格(DFB)光纤激光器(Koheras BASIK X15, NKT Photonics, 丹麦)使用不同控制参数的电光调制、声光调制以及内部压电调制等扫频方式下的动态噪声特性,并分析比较不同扫频方式的细节特征和对应的机理差异。

2 基本原理

扫频激光器的不同扫频方式以及窄线宽动态相频噪声特性测试的原理如图 1 所示,利用商用窄线宽 DFB 光纤激光器,通过不同的调制方式实现线性扫频。第一种方法利用 Photline 公司电光调制器(MXPE-LN-10, Photline, 法国)实现,主激光器经电光调制器调制,选取其正一阶边带,控制射频驱动信号实现线性扫频。结果表明,由于载波的影响,实际得到的差分相位快速变化的正弦包络信号。为了抑制载波的影响,将电光调制器的输出光注入到与主激光器波长相近的从激光器,通过同步电流补偿技术控制从激光器的电流,保证主从激光器在锁定带宽内,且光学锁相环反馈伺服系统抑制扫频非线性时,可以得到大范围、高调谐速率的线性扫频光源^[13]。电光调制器驱动信号的周期为 16 ms,电压幅度变化为 0.5~1.5 V。第二种方法是在此基础上改变控制电光调制器的驱动信号,得到具有不同扫频参数的信号。第三种方法通过 AA 公司声光调制器(MT160-IIR10-FIO-SM0.5-J3V-A, AA OPTO-ELECTRONIC, 法国)实现,主激光器经过声光调制器发生移频,移频大小与所加射频驱动信号有关,通过控制射频驱动信号实现外调制扫频,驱动信号周期为 20 ms,电压幅度变化为 2~3 V。第四种方法通过 NKT 公司 DFB 光纤激光器内部压电调谐实现,通过改变施加在分布反馈布拉格光纤激光器内置压电陶瓷的驱动信号,实现线性扫频,驱动信号周期为 20 ms,电压幅度变化为 0~5 V。

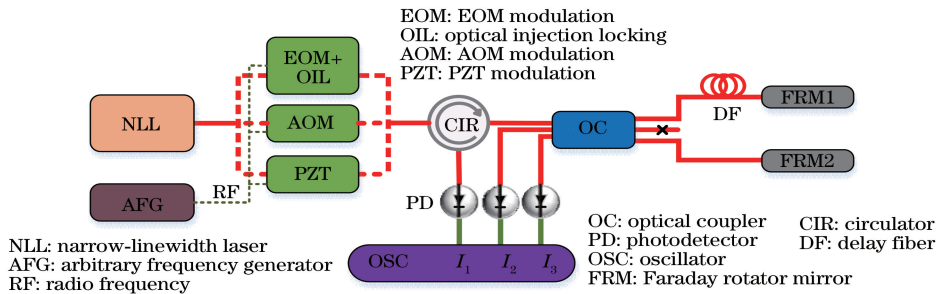


图 1 激光线性扫频及其实时动态相频噪声特性测试系统

Fig. 1 Diagram of experimental system for laser linear sweeping and real-time dynamic phase-frequency noise characterization measurement

线性扫频激光由环形器的输入端口 1 进入 120° 相差干涉仪,耦合器将其分为两束光,两束光经过不同的延时光纤由法拉第旋转反射镜反射至原路径返回,再次经过不同的延时光纤之后在耦合器中发生干涉,这里选用的干涉仪延时臂长为 29 m,对应的

自由光谱范围(FSR)为 6.9 MHz,耦合器的输出端口 2 悬空,干涉后的三路输出信号分别由三个完全相同的高速探测器探测,高速示波器采集、保存数据,最后进行离线处理和分析。非平衡迈克耳孙式干涉仪结构不需要实时调节延时臂的偏振状态即可

获得最大的条纹消光比。

通过解调 120° 相差干涉仪输出的待测激光差分相位 $\Delta\varphi(t)$, 利用泰勒展开对差分相位进行数据处理, 得到扫频光源瞬时相位的一阶导数 $\varphi'(t)$, 数据处理后可进一步得到扫频光源瞬时频率 $\nu(t)$ 以及重构扫频激光器的瞬时相位 $\varphi(t)$ 。得到重构光场瞬时频率信息后, 去除调谐函数频率部分 $\nu_{\text{tunable}}(t)$, 可以得到残余噪声频率成分 $\nu_{\text{noise}}(t)$, 运算后可得不同时间窗下扫频光场的瞬时动态特性, 比如时域频率调谐函数、不同时间窗下的频域频率噪声功率谱密度以及线宽及其随时间的演化特征^[12]。参数之间的转换过程如图 2 所示, 具体关系式为

$$\varphi'(t) = \frac{1}{\tau} \Delta\varphi(t) + \frac{1}{2} \Delta\varphi'(t), \quad (1)$$

$$\varphi(t) = \int \varphi'(t) dt =$$

$$\int_{t=0}^t \left[\frac{1}{\tau} \Delta\varphi(t) + \frac{1}{2} \Delta\varphi'(t) \right] dt + \varphi_0, \quad (2)$$

$$\nu(t) = \varphi'(t) / 2\pi, \quad (3)$$

$$\nu_{\text{tunable}}(t) = A + A_1 t, \quad (4)$$

$$\nu_{\text{noise}}(t) = \nu(t) - \nu_{\text{tunable}}(t), \quad (5)$$

$$S_{\nu_{\text{noise}}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \langle F_{\nu}(f) F_{\nu}^*(f) \rangle. \quad (6)$$

以 4 ms 时间窗为例阐述实验具体过程。

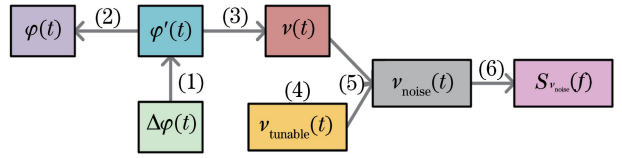


图 2 扫频激光器实时动态相频噪声特性参量关系图
Fig. 2 Parameter relationships of dynamic phase-frequency noise characteristics of linear frequency-swept lasers

图 2 中, t 为时间; φ_0 为光场的初始相位, 可以通过波长计校准中心波长获得; τ 为干涉仪臂长延时时间, 本文所用干涉仪延时时间为 145 ns; A 为初始频率, A_1 为最小二乘法线性拟合的系数; $S_{\nu_{\text{noise}}}$ 为频率噪声功率谱密度; T 为傅里叶积分时间; $*$ 表示复数共轭; $F_{\nu}(f)$ 表示 $\nu_{\text{noise}}(t)$ 的傅里叶变换; $\langle \cdot \rangle$ 代表系综平均。

3 实 验

3.1 不同调谐机制下的扫频激光器时域调谐函数比较

不同调谐方式下激光器的时域调谐函数如图 3 所示。其中, Tunable frequency 表示解调 120° 相差干涉仪的差分相位信息测试得到的扫频光源的调谐函数; Fitted frequency 表示基于最小二乘法进行线性拟合的拟合函数; Residual frequency 为原始调谐函数减去拟合函数得到的偏离线性扫频的频率波动。

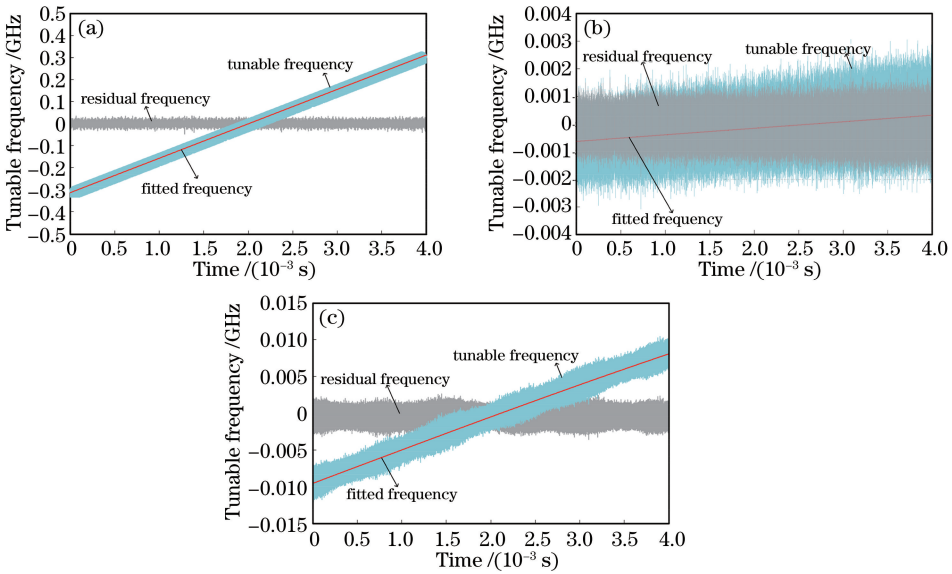


图 3 不同调制方式下激光器频率调谐的时域图。(a) EOM 调制; (b) AOM 调制; (c) PZT 调制

Fig. 3 Tunable frequencies in time domain of swept laser under different modulation modes.

(a) EOM modulation; (b) AOM modulation; (c) PZT modulation

基于电光调制的扫频输出光的时域调谐函数如图 3(a) 所示, 扫频光源扫频范围为 9~10 GHz, 频

率调谐函数为 $\nu_{\text{tunable}}(t) = -0.30 + 123.78t$, 拟合残差均方值为 0.9999, 4 ms 时间尺度的频率变化范围

为 0.5 GHz, 激光器频率维持线性扫频, 标准偏差保持在 600 kHz 以内; 基于声光调制的扫频输出光的时域调谐函数如图 3(b) 所示, 频率调谐函数为 $\nu_{\text{tunable}}(t) = -0.0005 + 0.24t$, 拟合残差均方值为 0.9999, 4 ms 时间尺度的频率变化范围为 950 kHz, 标准偏差保持在 1 MHz 以内; 基于压控陶瓷调制的扫频输出光的时域调谐函数如图 3(c) 所示, 频率调谐函数为 $\nu_{\text{tunable}}(t) = -0.01 + 4.41t$, 拟合残差均方值为 0.9905, 4 ms 时间尺度的频率变化范围为 20 MHz, 激光器频率维持近线性扫频, 标准偏差保持在 2 MHz 以内。

实验结果表明, EOM 调制可以实现大范围快速调谐, 注入锁定技术有效抑制了主模, 光锁相环的引入抑制了扫频非线性, 扫频线性度最好; AOM 调制的调频范围较小, 调制速率较慢, 本文所用的 AOM 调频最大调制范围为 8 MHz; PZT 调制存在严重的非线性和迟滞效应, 扫频范围较小, 扫频线性度最差。

3.2 不同调谐机制下的扫频激光器频率噪声功率谱密度比较

为了研究不同调制方式下扫频激光器频率噪声的差异, 选取相同尺度的某扫频时间段, 对比分析其频率噪声功率谱密度(PSD)。图 4 给出了 4 ms 时间段内的对比结果, 横轴为功率谱密度的傅里叶频率分析范围, 低频截止频率为 125 Hz, 其受限于 4 ms 的观测时间, 高频截止频率受限于干涉仪的有效自由光谱范围^[14]。图 4 中曲线⑤给出了激光器处于无扫频状态时的频率噪声 PSD, 洛伦兹线宽 $\delta\nu = 37.7$ Hz。

率噪声 PSD, 如图 4 中曲线①所示。激光器在 10 kHz~1 MHz 的频率范围内呈现较多的尖峰特征, 如 17.8 kHz 频率及其谐波频率处出现较大的尖峰, 200~600 kHz 频率范围出现一个大鼓包, 这些尖峰反映了锁相环的反馈特征, 即存在 17.8 kHz 的谐振, 同时, 锁相环的反馈带宽为 200 kHz, 这与锁相环的设计相吻合。

为了研究电光调制器驱动信号参数对扫频光源相频噪声的影响, 调整电光调制器驱动信号扫频范围为 11~12 GHz, 为了保证扫频输出信号处于较好的工作状态, 相应地调整锁相电路的锁相参数(锁相带宽), 得到的频率噪声 PSD 如图 4 中曲线②所示。此时, 谐振峰频率为 25 kHz, 锁相带宽为 300 kHz, 频率噪声 PSD 也发生变化。对于同样的扫频结构, 改变锁相环电路参数会影响扫频激光器的相频噪声 PSD, 并且可以观察到明显的细节特征变化。

对于 AOM 调制, 当频率低于 100 kHz 时, 输出扫频信号的频率噪声 PSD 近似为无调制状态下的水平, 当频率高于 300 kHz 时, 频率噪声为白噪声, 但是比无调制时略大, 洛伦兹线宽约为 $\delta\nu = 172.7$ Hz, 说明声光调制过程虽然引入的额外噪声很小, 但还是在一定程度上恶化了激光器的本征线宽。

PZT 调制的带宽约为 1 kHz, 低于 1 kHz 的噪声被抑制, 1~400 kHz 范围为 $1/f$ 噪声, 当频率高于 400 kHz 时, 频率噪声为白噪声, 洛伦兹线宽约为 $\delta\nu = 2.8$ kHz。

综上所述, AOM 调制扫频光源的噪声水平略高于无调制状态, 并且没有引入额外的尖峰噪声, 是相频性能最好的一种扫频方式; PZT 扫频因受限于机械结构和压电效应, 带宽只能达到千赫兹量级, 并会引入非线性和迟滞效应, 这较大地劣化了输出扫频信号的相频噪声特性, 是相频性能最差的一种扫频方式; 而基于 EOM 的调制方式虽然扫频输出光的相频噪声特性较好, 但是为了维持较高的扫频线性度, 使用锁相电路的同时引入了许多额外的噪声峰。同时, 对于同一扫频结构, 系统参数变化会带来相频噪声水平的变化, 扫频系统引入的额外噪声峰的频率值也会发生变化。

3.3 不同调谐机制下的扫频激光器频率噪声 PSD 随时间的演化规律

为了进一步研究不同扫频机制下扫频激光器噪声的动态演化特性及其差异, 将上述 4 ms 时间段等分为 8 个相同的时间窗, 即 0.5 ms 的时间尺度, 研

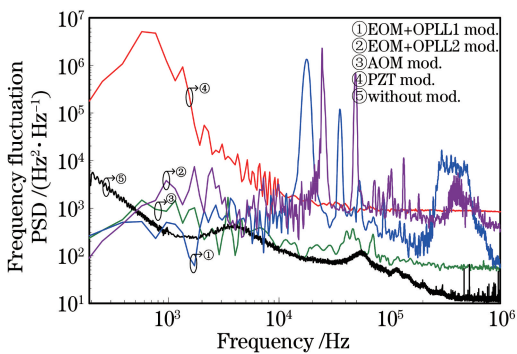


图 4 不同扫频情况下激光器的频率噪声 PSD

Fig. 4 Frequency fluctuation PSD of lasers with different tuning mechanics

图 4 结果表明, 对于 EOM+OPLL(光锁相环) 调制, 通过更改压控振荡器的电压改变 EOM 的射频驱动信号, 可以得到扫频范围为 9~10 GHz 的频

究扫频光源在这 8 个时间窗内动态特性随时间的演化规律,结果如图 5 所示。

结果表明,在不同扫频方式下,随着时间变化,扫频激光器频率噪声 PSD 的谱型基本不变,但是白噪声水平存在波动,没有确定的变化规律,说明整个扫频过程中扫频激光器性能一直处于随机变化之中,且不同扫频方式对应的波动范围并不一致。EOM 调制状态下的扫频输出光洛伦兹线宽在 0.7~6.7 kHz 之间波动,锁相环引入的尖峰噪声的频率一致,均为 17.8 kHz 及其谐波,锁相带宽附近

200.0~600.0 kHz 频率范围内的振荡相同;AOM 调制状态下的扫频输出光洛伦兹线宽在 0.2~6.3 kHz 之间波动;PZT 调制状态下的扫频输出光洛伦兹线宽在 219.8 kHz~12.6 MHz 之间波动。可以看出,当激光器处于 EOM、AOM 的调制方式时,扫频输出光的白噪声水平变化范围较小;而当激光器处于 PZT 调谐方式时,扫频输出光洛伦兹线宽存在近两个量级的变化,其相频噪声特性较无调制状态发生极大的劣化,这充分反映出 PZT 调谐方式与 EOM、AOM 的较大差异。

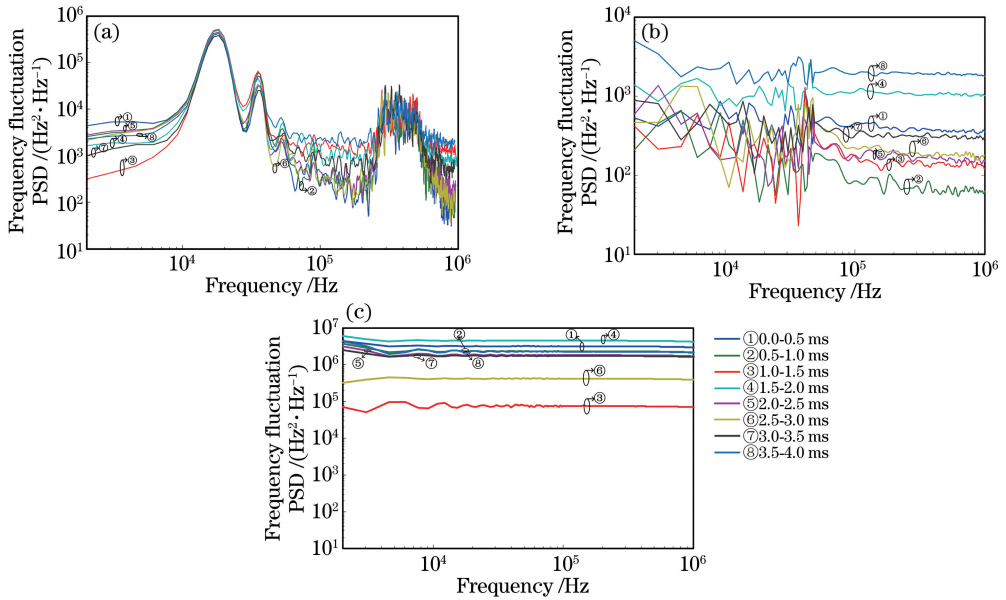


图 5 不同调制方式下的扫频激光器频域频率噪声 PSD 随时间的演化规律。(a) EOM 调制;(b) AOM 调制;(c) PZT 调制
Fig. 5 Evolution of frequency fluctuation PSD of swept laser versus time under different modulation modes.

(a) EOM modulation; (b) AOM modulation; (c) PZT modulation

4 结 论

基于 EOM、AOM 以及 PZT 调制搭建了同一 DFB 光纤激光器在不同扫频机制下的激光扫频系统以及基于 120° 相差干涉和光场相位实时重构的动态相频噪声特性系统。以光场相位实时重构的动态相频噪声特性系统为测试工具,从时域调谐频率函数、频域频率噪声功率谱密度及其随时间的演化特征等方面实验研究了电光调制器及控制参数不同的锁相环、声光调制器、DFB 光纤激光器内置压电陶瓷等不同扫频方式下扫频激光器实时动态噪声的细节特性及其差异。

实验结果表明,基于不同器件实现的扫频方式都可以实现线性扫频,但结果呈现出完全不同的实时动态噪声特性。电光调制能够在反馈锁相环辅助下获得最佳的扫频线性度,但会引起反馈谐振峰等

噪声恶化,其尖峰噪声特征在不同时间段基本一致,白噪声水平波动范围较小;声光调制呈现最小程度的噪声恶化,其白噪声水平随时间的变化与电光调制方式相当;压电调谐扫频线性度较差,且会附加较大的调谐噪声,白噪声水平随时间发生较大变化。通过更改驱动电光调制器的压控振荡器射频信号参数研究不同状态下的频率噪声功率谱密度,得到了不同驱动信号情况下激光器相频噪声变化的细节。该研究为激光器扫频机制及控制技术的研究和应用奠定了基础,有助于更好地理解扫频光源的动力学原理,优化扫频光源的性能,可以扩展到其他调谐机制的研究,以达到全面了解不同调谐方式的目的。

参 考 文 献

[1] Lu B, Wei F, Zhang Z, *et al.* Research on tunable local laser used in ground-to-satellite coherent laser

- communication[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(9): 091402.
- [2] Baney D M, Szafraniec B, Motamedi A. Coherent optical spectrum analyzer [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(3): 355-357.
- [3] Lu B, Wang Z Y, Zheng H R, *et al.* High spatial resolution long-distance distributed optical fiber vibration sensing system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1015001.
卢斌, 王照勇, 郑汉荣, 等. 高空间分辨率长距离分布式光纤振动传感系统 [J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1015001.
- [4] Pang S, Luo Z C, Chang T Y, *et al.* Similarity demodulation method of interferometric fiber optic sensing system[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(6): 0606003.
庞铄, 罗政纯, 常天英, 等. 用于干涉型光纤传感系统的相似性解调方法 [J]. 光子学报, 2018, 47(6): 0606003.
- [5] Zhang C, Yang N, Bao Y, *et al.* Spectral resolution improvement technique for optical frequency-domain reflectometry-based optical fiber distributed sensing [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0806001.
张超, 杨楠, 包艳, 等. 基于光频域反射计的光纤分布式传感中光谱分辨率提升技术 [J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0806001.
- [6] Tsuchida H. Simple technique for improving the resolution of the delayed self-heterodyne method[J]. Optics Letters, 1990, 15(11): 640-642.
- [7] Wang Z, Wang Z, Liu L L, *et al.* Dynamic measurement of linewidth of the wavelength-swept lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6): 0608005.
王哲, 王智, 刘岚岚, 等. 波长扫描激光器光谱线宽的动态测量技术研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0608005.
- [8] Zhou Q, Qin J, Xie W L, *et al.* Dynamic frequency-noise spectrum measurement for a frequency-swept DFB laser with short-delayed self-heterodyne method [J]. Optics Express, 2015, 23(22): 29245-29257.
- [9] Biedermann B R, Wieser W, Eigenwillig C M, *et al.* Direct measurement of the instantaneous linewidth of rapidly wavelength-swept lasers[J]. Optics Letters, 2010, 35(22): 3733-3735.
- [10] Yun S H, Richardson D J, Culverhouse D O, *et al.* Wavelength-swept fiber laser with frequency shifted feedback and resonantly swept intra-cavity acoustooptic tunable filter [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1997, 3(4): 1087-1096.
- [11] Butler T, Slepneva S, O' Shaughnessy B, *et al.* Single shot, time-resolved measurement of the coherence properties of OCT swept source lasers[J]. Optics Letters, 2015, 40(10): 2277-2280.
- [12] 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.
- [13] Wei F, Lu B, Wang J, *et al.* Precision and broadband frequency swept laser source based on high-order modulation-sideband injection-locking[J]. Optics Express, 2015, 23(4): 4970-4980.
- [14] Xu D, Lu B, Yang F, *et al.* Narrow linewidth single-frequency laser noise measurement based on a 3×3 fiber coupler [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0102004.
徐丹, 卢斌, 杨飞, 等. 基于 3×3 耦合器的窄线宽单频激光器噪声测量技术 [J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0102004.