

基于光纤延时声光频移自差拍法快速测量激光线宽

白建东 王杰英 王军民

山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006

摘要 基于光纤延时声光调制器(AOM)频移自差拍法实验研究了不同线宽激光的功率谱特性,并作了相关的仿真分析;同时,提出了利用短光纤测量窄线宽激光器线宽的一种简单方法。当光纤延时时间小于激光器的相干时间时,自差拍频谱的3 dB带宽不能直接用于标定激光线宽。理论分析和实验均表明,此时激光的线宽信息主要由自差拍频谱中两翼的周期性振荡成分决定,几乎不受中央尖峰的影响。根据最小二乘法理论,对实验所测的自差拍频谱进行理论拟合可获得待测激光的线宽。该方案基本不受延时自差拍系统最小分辨率的限制,可以用于激光线宽的快速测量,特别是窄线宽激光的测量。

关键词 激光光学;窄线宽光纤激光器;光纤延时声光频移自差拍法;线宽测量;短光纤

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.061407

Rapid Measurement of Laser Linewidth Based on Fiber-Delayed AOM-Shifted Self-Heterodyne Scheme

Bai Jiandong Wang Jieying Wang Junmin

State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract The characteristics of laser power spectra under different laser linewidths are investigated experimentally based on the fiber-delayed acousto-optic modulator (AOM) shifted self-heterodyne scheme, and the relevant simulation analysis is performed. Meanwhile, a simple method is introduced that short fiber is used to measure the linewidth of a narrow-linewidth laser. When the delay time of the fiber is less than the coherence time of the laser, 3 dB width of the beat signal cannot be directly used for measuring the laser linewidth. The experimental and theoretical analysis shows that the measurement result is hardly affected by the narrow peak. Therefore, it should be considered that the oscillations of the wings of the power spectrum rather than the effects of the narrow peak when dealing with the data. Using the weighted least square method, the laser linewidth can be obtained by theoretically fitting the experimental heterodyne spectrum. The scheme is not affected by the limit of the minimum resolution of the system, and it is applicable to the laser linewidth measurement, especially for narrow-linewidth lasers.

Key words laser optics; narrow linewidth fiber laser; fiber-delayed AOM-shifted self-heterodyne scheme; linewidth measurement; short fiber

OCIS codes 140.0140; 300.6360; 300.3700; 300.6170; 300.6310

1 引言

窄线宽激光器因其具有输出激光线宽窄、相干性高和相位噪声低的特点,被广泛应用于光频原子钟、激光雷达、高分辨率精密光谱测量、航天对接、光通讯等领域^[1-5]。因此,对其线宽进行精确测量具有十分重要

收稿日期: 2015-12-25; **收到修改稿日期:** 2016-01-27; **网络出版日期:** 2016-05-11

基金项目: 国家重大科学研究计划(2012CB921601)、国家自然科学基金(61475091, 11274213, 61227902)

作者简介: 白建东(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光技术及冷原子物理方面的研究。

E-mail: physjdbai@163.com

导师简介: 王军民(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事量子光学、冷原子物理、激光技术等方面的研究。

E-mail: wwjjmm@sxu.edu.cn(通信联系人)

的意义。

通常测量激光线宽的主要方法有法布里-珀罗(F-P)腔干涉仪法、双光束外差法、延时零拍法和延时差拍法。使用超低膨胀系数玻璃(ULE)制作的高精细度 F-P 腔干涉仪(自由光谱区约为 3 GHz,精细度约为 30000),其分辨率只能达到 100 kHz 的量级。更窄激光线宽的测量对腔镜的镀膜指标要求非常高,一方面技术难度会增加,另一方面会带来很高的成本。双光束外差法^[6]需要两台输出激光波长相近的激光器,并且要求参考激光器的线宽很窄,这样成本比较高,测量系统也不够稳定。延时零拍法^[7]虽然光路系统简单,但是由于整个系统工作在零频附近,易受机械振动和温度变化等周围环境的影响,整个系统对环境的要求比较高。1980年,日本的 Okoshi 等^[8]提出的光纤延时自差拍法通过调制光源或光路,使信号光和参考光产生的拍频信号位于非零频的中频附近,避免了周边环境对系统带来的低频干扰,从而降低了系统误差,提高了测量精度。因此,基于光纤延时自差拍法测量窄线宽激光器的线宽是一个比较理想的方案^[9-10]。理论计算表明只有当光纤延时时间大于激光相干时间的 6 倍时^[11],才能保证测量精度。对于千赫兹或几百赫兹量级的激光线宽,要保证测量精度,要求延时光纤长度达到上百公里到几万公里,这不仅使得整个实验方案难以实现,而且会使所测激光功率谱展宽并引入相位噪声。最近,贾豫东等^[12]提出了短光纤延时自差拍法,采用三阶有理式模型仿真得到激光线宽。对于 25 km 光纤延时线,其最小测量谱宽为 22.39 kHz,所以该方法也有一定的测量极限。

实验发现当光纤延时时间小于激光器的相干时间时,激光拍频谱的两翼会出现周期性的振荡。本文实验中利用短光纤延时声光频移得到了激光的自差拍频谱,并重点考虑拍频谱两翼的拟合来获得激光的线宽信息。通过理论拟合的方案分别测量了 1077 nm 窄线宽掺镱光纤激光器(YDFL)、1560 nm Littman 式光栅外腔半导体激光器(ECDL)和 1560 nm 蝶型封装分布反馈式(DFB)半导体激光器的线宽,并将实验结果与理论模型进行了对比分析。

2 实验装置

光纤延时自差拍法测量激光线宽的实验系统如图 1 所示, $\lambda/2$ 为半波片,PBS 为偏振分光棱镜,AOM 为声光调制器,SG 为信号发生器,M 为高反镜,SMF 为单模光纤,BS 为 50/50 分束器,PD 为快速光电探测器。待测激光器分别是 NKT Photonics 的 1077 nm 窄线宽 YDFL,New Focus 的 1560 nm Littman 式 ECDL 和 JDSU 的 1560 nm 蝶型封装 DFB,最大输出功率分别为 100、20、60 mW。为了防止对激光器造成光反馈,待测激光器发出的激光先经过光学隔离器,再经半波片和偏振分光棱镜分成两路:一路激光经过声光调制器(中心频率为 80 MHz,带宽为 20 MHz)移频产生一级衍射光,由输出频率为 80 MHz 的信号发生器直接驱动。这里所使用的 AOM 在 1077 nm 和 1560 nm 连续激光下典型的透射率分别为 97.5%和 95%,典型的衍射效率分别为 62%和 50%;另一路激光经过单模光纤延时,两路激光经分束器合束后以相同偏振进入快速光电探测器(型号 1554-B,New Focus 公司,美国),经光电转换后接入射频频谱分析仪(E4405B,Agilent Technology 公司,美国)观测激光的拍频谱信号。这里所使用的光纤对 1077 nm 和 1560 nm 激光的传输损耗分别为 0.70 dB/km 和 0.19 dB/km。

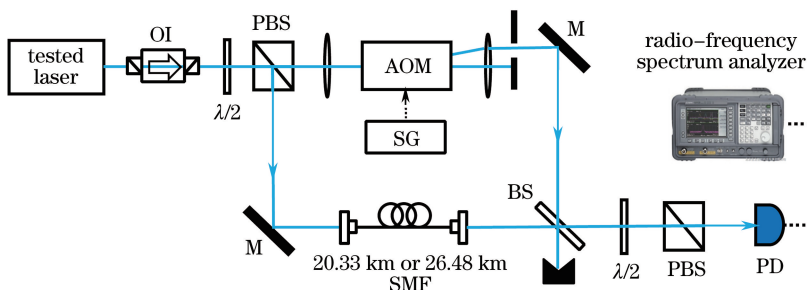


图 1 光纤延时自差拍法测量激光线宽的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for the delayed self-heterodyne linewidth measurement

3 理论分析

假设单模激光器的输出光场是一个振幅稳定、有相位扰动的准单色电磁场^[13],

$$E(t) = E_0 \exp\{i[\omega_0 t + \varphi(t)]\}, \quad (1)$$

并且激光器的激光光谱为 Lorentz 线型,其对应的光功率谱密度函数为

$$S(\omega) = \frac{2E_0^2 \tau_c}{1 + [\tau_c(\omega - \omega_0)]^2}, \quad (2)$$

式中 E_0 为激光场的振幅, ω_0 为激光的中心角频率, $\varphi(t)$ 为相位变化, τ_c 为激光器的相干时间。则激光频谱的半峰全宽为

$$\Delta f_{\text{Laser}} = \frac{\Delta\omega}{2\pi} = \frac{1}{\pi\tau_c}. \quad (3)$$

设两束激光到达 BS 前, AOM 移频一路和光纤延时一路的光场分别为 $E_1(t) = E_0 \exp\{i[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi(t)]\}$ 和 $E_2(t) = \alpha E_0 \exp\{i[\omega_0(t + \tau_d) + \varphi(t + \tau_d)]\}$, 其中 Ω 为 AOM 的射频角频率, α 为两路激光光场的振幅之比, τ_d 为光纤的延时时间。则两路激光经分束器合束后的合成光场 $E_s(t) = E_1(t) + E_2(t)$, 再经过快速光电探测器探测, 经光电转换后光电二极管输出的光电流为 $I(t) = E_s(t)E_s^*(t)$, 光电流的自相关函数 $R_I(t) = \langle I(t)I(t + \tau_d) \rangle$, 根据 Wiener-Khintchine 定理^[14], 可得到光电流的功率谱密度函数为

$$S_s(\omega) = \frac{\alpha^2}{2} I_0^2 \frac{2/\tau_c}{(2/\tau_c)^2 + (\omega - \Omega)^2} \cdot \left\{ 1 - \exp(-2\tau_d/\tau_c) \left[\cos(\omega - \Omega)\tau_d + \frac{2/\tau_c}{\omega - \Omega} \sin(\omega - \Omega)\tau_d \right] \right\} + \frac{\pi\alpha^2}{2} I_0^2 \exp(-2\tau_d/\tau_c) \delta(\omega - \Omega), \quad (4)$$

当 $\tau_d \gg \tau_c$ 时, $\exp(-2\tau_d/\tau_c) \rightarrow 0$, (4) 式转化为

$$S_s(\omega) = \frac{\alpha^2}{2} I_0^2 \frac{2/\tau_c}{(2/\tau_c)^2 + (\omega - \Omega)^2}, \quad (5)$$

此时, 拍频谱的半峰全宽 Δf_s , 即 3 dB 带宽为

$$\Delta f_s = \frac{\Delta\omega_s}{2\pi} = \frac{2}{\pi\tau_c} = 2 \cdot \Delta f_{\text{Laser}}. \quad (6)$$

因此, 当激光器的光功率谱为 Lorentz 线型时, 其拍频谱仍为 Lorentz 线型, 拍频谱的半峰全宽是激光器线宽的 2 倍; 同理, 当激光器的光功率谱为 Gauss 线型时, 其拍频谱仍为 Gauss 线型, 拍频谱的半峰全宽是激光器线宽的 $\sqrt{2}$ 倍。

利用 Matlab 软件对不同线宽的激光的光纤延时差拍法拍频谱作了仿真, 不同延时时间下的仿真频谱如图 2 所示。红色和蓝色曲线分别表示 20.33 km 和 26.48 km 延时光纤的仿真频谱, 绿色曲线表示光纤延时时间远大于激光器的相干时间时的仿真频谱, 其中 L_d 和 L_c 分别表示光纤长度和激光的相干长度。由于 (4) 式的 e 指数部分, 功率谱两翼的振荡随着延时时间的增加逐渐消失, 并且信号强度从功率谱 δ 函数的尖峰转

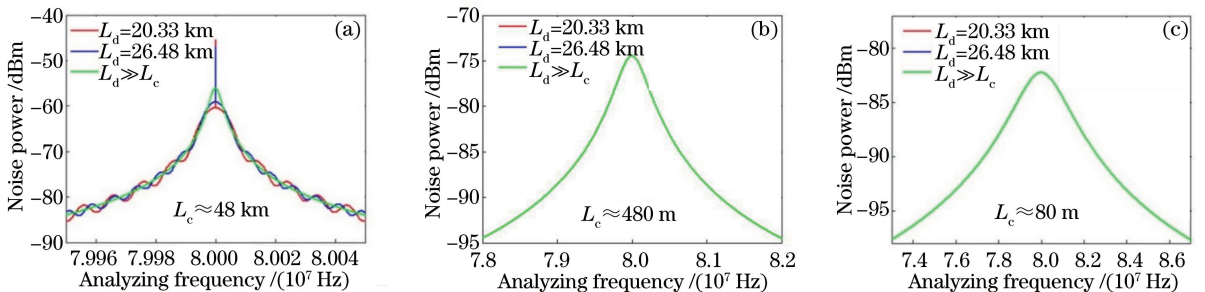


图 2 不同光纤长度下不同线宽激光的仿真频谱图。(a) $\Delta\nu = 2$ kHz; (b) $\Delta\nu = 200$ kHz; (c) $\Delta\nu = 1.2$ MHz

Fig. 2 Simulation spectrum of different linewidth lasers in different laser lengths.

(a) $\Delta\nu = 2$ kHz; (b) $\Delta\nu = 200$ kHz; (c) $\Delta\nu = 1.2$ MHz

向两翼直到功率谱变成严格的 Lorentz 线型,如图 2(a)所示。理论计算表明:只有当 $\tau_d \gg \tau_c$ 时,光电流的频谱才能精确反映被测激光器的线宽。如图 2(b)、(c)所示,三种不同颜色的曲线完全重合,所以这两根光纤可以用于测量线宽约为 200 kHz 和 1.2 MHz 的激光。若要准确测量线宽为 2 kHz 的激光,要求延时光纤的长度至少为 191 km。显然,如此长的光纤不仅会造成很强的光吸收,而且也会导致激光线宽的展宽。Lorentz 光谱和 Gauss 光谱分别与白噪声和 $1/f$ 噪声有关^[10,15]。若要求光纤延时自差拍法测量线宽系统的相对测量误差为 δ ,系统的最小检测线宽即系统分辨率 Δf_{\min} 由 $\tau_d \Delta f_{\min} > \eta(\delta)$ 决定^[16],其中 $\tau_d = nL/c$ 表示光纤的延时时间, $\eta(\delta)$ 表示与系统测量误差相关的系数,它由 L_d 与 L_c 的比值决定。这里取光纤折射率 $n=1.5$,光速 $c=3 \times 10^8$ m/s,延时光纤长度 $L=20.33$ km。

表 1 系统相对测量误差与最小检测线宽之间的关系

Table 1 Relationship between the relative measurement error and the minimum detection linewidth of system

| $\delta / \%$ | τ_d / τ_c | $\tau_d \Delta f_{\min}$ | $\Delta f_{\min} / \text{kHz}$ |
|---------------|-------------------|--------------------------|--------------------------------|
| 2 | > 3 | > 0.95 | 9.4 |
| 5 | > 2.5 | > 0.78 | 7.7 |
| 10 | > 1 | > 0.30 | 2.9 |
| 30 | > 0.7 | > 0.22 | 2.1 |

如表 1 所示,系统的最小检测线宽决定了当 $\tau_d < \tau_c$ 时想要准确测量激光线宽是非常困难的。若要求系统的最小检测线宽为 2.1 kHz,则相对测量误差达到了 30%。显然,如此大的相对测量误差并不能达到精确测量激光线宽的要求。因此,当 $\tau_d < \tau_c$ 时,可以利用(4)式对拍频谱进行理论拟合。由于 AOM 的射频角频率 Ω 和光纤的延时时间 τ_d 都是已知的,根据最小二乘法对实验数据进行理论拟合就可以得到激光器的相干时间 τ_c ,经换算就可快速确定激光器的线宽。

4 实验结果与讨论

实验中分别获得了 1077 nm 窄线宽 YDFL,1560 nm Littman 式 ECDL 和 1560 nm 蝶型封装 DFB 半导体激光器的拍频谱,如图 3 所示。对两路激光的拍频谱进行处理时,射频频谱分析仪参数的设置是非常重要的。分辨带宽(RBW)作为其中的一个重要参数,表示两个不同频率的信号能够被清楚分辨出来的最低频宽差异,若两个不同频率的信号频宽低于频谱分析仪的 RBW,此时两信号重叠,难以分辨。较低的 RBW 虽然有助于不同频率信号的分辨,但是低的 RBW 会滤除较高频率的信号成分,导致信号显示时产生失真;较高的 RBW 虽然有助于宽频带信号的侦测,但会降低测量灵敏度,影响测量结果^[17]。另一个重要参数是视频带宽(VBW),反映的是视频滤波器的带宽,VBW 越小,测试精度越高,测试曲线越平滑。改变 VBW 的设置并不能改变测量灵敏度,但在测量小功率信号时,可以减小噪声峰-峰值的变化量,提高较低信噪比信号测量的分辨率和再现性,易于发现隐藏在噪声中的小信号。因此,选择合适的 RBW 和 VBW 是获得理想实验结果的关键。对三台待测激光器,射频频谱分析仪的 RBW 和 VBW 分别设置为 10 Hz 和 1 Hz,10 kHz 和 1 kHz,30 kHz 和 3 kHz。黑色曲线表示实验数据,粉色、蓝色和红色曲线表示理论拟合。

根据所测拍频谱在不同衰减处的线宽比值^[18],就可以得到待测激光的线型。Gauss 线型在 3 dB,10 dB 和 20 dB 处的线宽比值约为 1:1.82:2.58,而 Lorentz 线型在 3 dB,10 dB 和 20 dB 处的线宽比值约为 1:3:10。对于 1560 nm 蝶形封装 DFB 半导体激光器,使用 20.33 km 和 26.48 km 的延时光纤,Gauss 线型拟合曲线的 3 dB 带宽分别为 1.17 MHz 和 1.23 MHz,如图 3(a)、(b)所示。对于 1560 nm Littman 式 ECDL,Lorentz 拟合曲线的 3 dB 带宽分别为 207 kHz 和 211 kHz,如图 3(c)、(d)所示。两个测量值之间的偏差可能是由于激光的频率起伏、快速光电探测器的电子学噪声和由光纤引入的激光相位噪声造成的。如图 3(e)、(f)所示,由于光纤的延时时间小于激光的相干时间,功率谱在 AOM 的调制频率处出现一个窄峰,并且两翼出现明显的振荡。窄峰表示两路光在时间上的相干成分,功率谱两翼的振荡是由(4)式的 e 指数部分造成的。因此,对 1077 nm 窄线宽 YDFL 的功率谱直接进行 Lorentz 线型拟合,用 3 dB 带宽表征该激光的线宽是不可行的。实际测量时,窄峰对激光线宽的测量结果影响不大,因此处理数据时需更加注重功率谱两

翼的波动。根据最小二乘法,考虑尖峰的权重,利用(4)式对 1077 nm 激光的功率谱直接进行拟合得到其线宽分别为 1.90 kHz 和 1.69 kHz。因此,两次测量的平均线宽约为 1.80 kHz,测量值相对于平均线宽的相对误差约为 6%。实验测得不同光纤长度下激光自差拍频谱的宽度并不相同,说明在当前测试条件下测得的激光线宽的偏差主要与延迟时间有关。

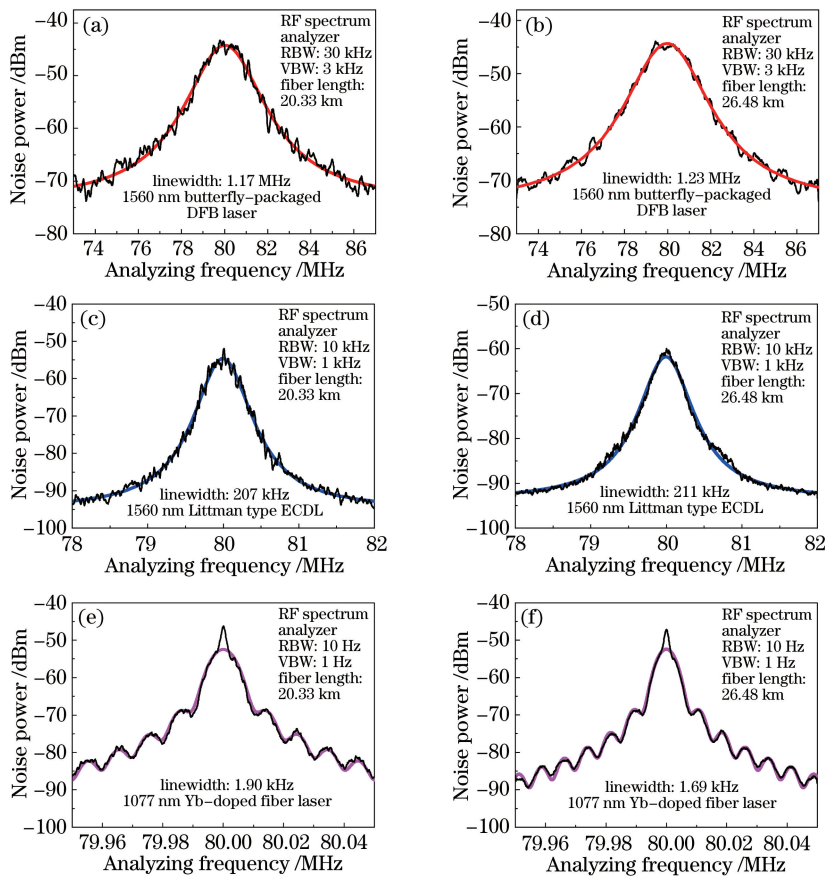


图 3 不同线宽激光的实测频谱图

Fig. 3 Measured spectra of different linewidth lasers

另外,通过使用 1560 nm 窄线宽掺铒光纤激光器(EDFL)分别与 1560 nm Littman 式 ECDL 和 1560 nm 蝶型封装 DFB 半导体激光器进行了拍频测量。实验结果与延时自差拍法得到的结果基本一致。

5 结 论

实验中,搭建了光纤延时 AOM 移频自差拍法测量窄线宽激光器线宽的系统,理论分析了测量激光线宽的基本原理,仿真分析了不同延时光纤长度对测量激光线宽的影响。使用 20.33 km 和 26.48 km 的光纤分别得到了 1077 nm 窄线宽掺铒光纤激光器,1560 nm Littman 式光栅外腔半导体激光器和 1560 nm 蝶型封装分布反馈式半导体激光器的拍频谱。理论计算表明,对于 1077 nm 窄线宽激光器线宽的测量,需要延时光纤的长度达到 200 km,这不仅会造成强烈的光吸收,还会造成延时自差拍功率谱的展宽。由于实验所用光纤的延时时间不够长,所以激光自差拍谱的两翼会出现明显的周期性振荡,并且在声光调制器的射频调制频率处有很窄的尖峰。为了消除由于延时时间不够造成的测量精度的降低,实验上通过对拍频谱两翼的拟合来获得激光线宽。实验表明用较短的光纤可以达到长光纤的测量效果。该理论拟合的方法不受延时自差拍系统最小分辨率的限制。因此,当光纤延时时间小于激光器的相干时间时,这种利用短光纤延时 AOM 移频自差拍法测量窄线宽激光器线宽的方法是简单可行的,特别适合窄线宽激光器的测量,避免了长达百公里甚至更长的延时光纤的使用。

参 考 文 献

- 1 Mihélic F, Bacquet D, Zemmouri J, *et al.*. Ultrahigh resolution spectral analysis based on a Brillouin fiber laser[J]. Optics Letters, 2010, 35(3): 432-434.
- 2 Jiang Y Y, Ludlow A D, Lemke N D, *et al.*. Making optical atomic clocks more stable with 10^{-16} -level laser stabilization [J]. Nature Photonics, 2011, 5(3): 158-161.
- 3 Bonfrate G, Vaninetti F, Negrisola F. Single-frequency MOPA Er^{3+} DBR fiber laser for WDM digital telecommunication systems[J]. Photonic Technology Letters, 1998, 10(8): 1109-1111.
- 4 Ludlow A D, Boyd M M, Zelevinsky T, *et al.*. Systematic study of the ^{87}Sr clock transition in an optical lattice[J]. Physical Review Letters, 2006, 96(3): 033003.
- 5 Webster S A, Oxborrow M, Gill P. Subhertz-linewidth Nd:YAG laser[J]. Optics Letters, 2004, 29(13): 1497-1499.
- 6 San Haisheng, Wen Jimin, Liu Jian, *et al.*. Measurement system of ultra-wideband frequency response based on optical heterodyne technique[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(11): 1497-1500.
伞海生, 温继敏, 刘 戡, 等. 基于光外差技术的超宽带频率响应测量系统[J]. 光学学报, 2005, 25(11): 1497-1500.
- 7 Iiyama K, Hayashi K, Ida Y, *et al.*. Delayed self-homodyne method using solitary monomode fiber for laser linewidth measurements[J]. Electronics Letters, 1989, 25(23): 1589-1590.
- 8 Okoshi T, Kikuchi K, Nakayama A. Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum [J]. Electronics Letters, 1980, 16(16): 630-631.
- 9 Chen M, Meng Z, Wang J F, *et al.*. Ultra-narrow linewidth measurement based on Voigt profile fitting[J]. Optics Express, 2015, 23(5): 6803-6808.
- 10 Mercer L B. $1/f$ frequency noise effects on self-heterodyne linewidth measurements[J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(4): 485-493.
- 11 Richter L E, Mandelberg H I, Kruger M S, *et al.*. Linewidth determination from self-heterodyne measurements with subcoherence delay times[J]. Journal of Quantum Electronics, 1986, 22(11): 2070-2074.
- 12 Jia Yudong, Ou Pan, Yang Yuanhong, *et al.*. Short fibre delayed self-heterodyne interferometer for ultra-narrow laser linewidth measurement[J]. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(5): 568-571.
贾豫东, 欧 攀, 杨远洪, 等. 短光纤延时自外差法测量窄线宽激光器线宽[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(5): 568-571.
- 13 Gallion P B, Debarge G. Quantum phase noise and field correlation in single frequency semiconductor laser systems[J]. Journal of Quantum Electronics, 1984, 20(4): 343-349.
- 14 Goodman J W. Statistical optics[M]. New York: Wiley, 1985.
- 15 Canagasabay A, Michie A, Canning J, *et al.*. A comparison of delayed self-heterodyne interference measurement of laser linewidth using Mach-Zehnder and Michelson interferometers[J]. Sensors, 2011, 11(10): 9233-9241.
- 16 Iiyama K, Hayashi K, Ida Y, *et al.*. Reflection-type delayed self-homodyne-heterodyne method for optical linewidth measurements[J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(5): 635-640.
- 17 Lavielle V, Lorgere I, Le Gouet J L, *et al.*. Wideband versatile radio-frequency spectrum analyzer[J]. Optics Letters, 2003, 28(6): 384-386.
- 18 Peng Xuefeng, Ma Xiurong, Zhang Shuanggen, *et al.*. Effect of beat frequency linetype on measurement of laser linewidth using two independent lasers[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0408002.
彭雪峰, 马秀荣, 张双根, 等. 两台独立激光器拍频线型对线宽测量的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0408002.