

窄线宽激光器线宽的非平衡光纤干涉仪测量法

曹春燕 姚琼 饶伟 胡永明

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 针对已有线宽检测方法在窄线宽激光器测量中存在的缺陷,提出一种利用非平衡光纤干涉仪相位噪声测量并计算线宽的方法。理论分析了短程差非平衡干涉仪相位噪声与窄线宽激光器的光频噪声的关系,得到了激光器的光波功率频谱和线宽。利用臂差为 10 m 的光纤干涉仪对窄线宽分布反馈激光器进行测量,结果表明激光器光波功率谱有近似的洛伦兹线型且线宽为 5.4 kHz,与 5 kHz 的理论值相近。窄线宽光纤环形腔激光器的线宽测量结果为 0.75 kHz,比用零拍法测量到的同类型激光器低于 1.5 kHz 的结果更精确。

关键词 光纤光学;窄线宽激光器线宽测量;非平衡光纤干涉仪;光源相位噪声;光波功率频谱

中图分类号 TN253;O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0508005

Linewidth Measurement Using Unbalanced Fiber-Optic Interferometer for Narrow Linewidth Lasers

Cao Chunyan Yao Qiong Rao Wei Hu Yongming

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract In order to solve problems in linewidth measurement for narrow linewidth laser, a method is put forward based on the phase noise of unbalanced fiber-optic interferometer. The relationship between the phase noise of an unbalanced fiber-optic interferometer with a short optical path difference (OPD) and the laser frequency jitter is analyzed, and the optical power spectrum and linewidth are obtained. The linewidth of a distributed feedback laser is tested using an interferometer with 10 m OPD. The result shows that the power spectrum is an approximate Lorentzian lineshape with 5.4 kHz linewidth, which is close to the theoretical value of the laser. The linewidth of a fiber ring laser (FRL) is tested and the result is 0.75 kHz, which is more accurate than the result of less than 1.5 kHz of the similar FRL obtained using homodyne method.

Key words fiber optics; linewidth measurement for narrow linewidth laser; unbalanced fiber-optic interferometer; laser phase noise; optical power spectrum

OCIS codes 030.1670; 060.2300; 060.2380; 140.3510

1 引 言

窄线宽激光器^[1~5]在光纤相干通信、光纤传感等领域有着重要的应用,尤其在一些采用非平衡光纤干涉仪^[6,7]的传感系统中,窄线宽激光器的应用可以大大降低光频起伏通过非平衡干涉仪引入的相位噪声^[8,9],激光器的线宽已成为决定系统噪声性能的重要因素。在实际应用中,光源线宽通常在千

赫兹量级,这对窄线宽激光器的线宽测量提出了很高的要求。

传统的光频谱分析仪精度一般在 0.01 nm,法布里-珀罗(F-P)扫描干涉仪的光频分辨率在兆赫兹量级,均难以满足测量精度。目前的窄线宽激光器线宽测量方案一般采用延时自零差^[2,10]和延时自外差法^[11~13],它们要求延时光纤长度大于被测激光器

收稿日期: 2010-12-02; 收到修改稿日期: 2011-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(60908004)资助课题。

作者简介: 曹春燕(1979—),女,博士研究生,讲师,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: ccy_nudt@hotmail.com

导师简介: 胡永明(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感和光学设计等方面的研究。

E-mail: sdss@21cn.com

的相干长度,否则测量结果将大于实际线宽。对于线宽在千赫兹量级的激光器,几十甚至上百千米的延迟光纤极大地增加了系统损耗,瑞利散射等杂散光也会引入大量的噪声,给测量带来困难。

本文提出利用窄线宽激光器瞬时频率起伏在非平衡光纤干涉仪中引入的相位噪声,计算光源的光波功率谱以及线宽的方法,并成功应用于千赫兹量级窄线宽激光器线宽测量实验中。该方法利用简单的实验系统得到激光器的线宽,在窄线宽激光器的线宽测量领域有着很好的应用前景。

2 理论分析

2.1 激光器的线宽

激光器输出电磁场可表示为

$$\text{Re}\{E(t)\} = \text{Re}\{E_0 \exp[-i\omega_0 t - i\delta\phi(t)]\}, \quad (1)$$

式中 E_0 为激光器输出光场的复振幅, ω_0 为光波中心角频率, $\delta\phi(t)$ 为光波相位的起伏,它导致了激光器谱线的展宽。由威纳-肯钦定理可知,光波的功率频谱 $S_E(\omega)$ 可由 $\text{Re}\{E(t)\}$ 自相关函数的傅里叶变换给出^[14]

$$\begin{aligned} S_E(\omega) = & \frac{1}{2} \int \text{Re}\{\langle E^*(t+\tau)E(t) \rangle\} \exp(i\omega\tau) d\tau = \\ & \frac{E^2}{2} \int \text{Re}\{\exp(i\omega_0\tau) \langle \exp[i\Delta\phi(t,\tau)] \rangle\} \exp(i\omega\tau) d\tau, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\Delta\phi(t,\tau) = \delta\phi(t+\tau) - \delta\phi(t)$ 是激光器相位的随机变化,大多数情况下可以假设成平稳的高斯随机过程^[10]

$$\langle \exp[i\Delta\phi(t,\tau)] \rangle = \exp[-\langle \Delta\phi(t,\tau)^2 \rangle / 2]. \quad (3)$$

激光器光场相位起伏 $\delta\phi(t)$ 时与瞬时光频率起伏有 $\delta\omega(t) = d\delta\phi(t)/dt$ 的关系,频率噪声和相位噪声功率频谱之间的关系则为 $S_\omega(\Omega) = \Omega^2 S_\phi(\Omega)$ 。利用以上关系和威纳-肯钦定理对(3)式中 $\langle \Delta\phi^2 \rangle$ 进行计算,可以得到^[14]

$$\begin{aligned} \langle \Delta\phi(t+\tau)^2 \rangle = & \langle [\delta\phi(t+\tau) - \delta\phi(t)]^2 \rangle = \\ & 2\langle [\delta\phi(t)]^2 \rangle - 2\langle \delta\phi(t+\tau)\delta\phi(t) \rangle = \\ & \tau^2 \int S_\omega(\Omega) [\sin(\Omega\tau/2) / (\Omega\tau/2)]^2 d\Omega / (2\pi), \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $S_\omega(\Omega)$ 为计算激光器线宽的关键,通过 $S_\omega(\Omega)$ 得到 $\langle \Delta\phi(t+\tau)^2 \rangle$ 并依次代入(3)式和(2)式,计算出激光器的光波功率频谱 $S_E(\omega)$ 后,由 $S_E(\omega)$ 的半峰全宽(FWHM)可得到激光器线宽 $\Delta\omega$ 。

2.2 非平衡干涉仪线宽测量法

频率噪声功率谱 $S_\omega(\Omega)$ 与激光器中载流子密度起伏等诸多因素有关,一般很难通过理论计算直接得到。而光源频率起伏会在非平衡干涉仪中引入相位起伏,利用这个关系可以对 $S_\omega(\Omega)$ 进行测量。

非平衡光纤干涉仪输出干涉光强表达式为

$$I = A + B \cos[\varphi(t)] = A + B \cos\left(\frac{2\pi n \Delta l \nu}{c}\right), \quad (5)$$

式中 $\varphi(t)$ 为干涉仪两臂相位差, Δl 为臂差, n 为光纤纤芯折射率, c 为真空中光速, ν 为光源频率。

光纤干涉仪受到外界环境变化或者光源自身频率变化时,相位差改写为

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \frac{2\pi n \Delta l \nu}{c} \left(\frac{\delta n}{n} + \frac{\delta l}{l} + \frac{\delta \nu}{\nu} \right), \quad (6)$$

式中 φ_0 为干涉仪初始相位差, δn 和 δl 为外界信号或环境扰动在干涉仪上引起的变化, $\delta \nu$ 为光源频率起伏。当屏蔽外界环境变化以去除 δn 和 δl 的影响,并滤除初相位 φ_0 后,干涉仪的相位差 $\varphi(t)$ 仅包含光频起伏项 $\delta\varphi(t)$

$$\delta\varphi(t) = \frac{2\pi n \Delta l \delta \nu}{c} = \frac{n \Delta l}{c} \delta_\nu \omega(t), \quad (7)$$

式中 $\delta_\nu \omega(t) = 2\pi \delta \nu$ 。

当 Δl 为 1~10 m 时,光波干涉时延仅为 5~50 ns,由相位差得到的光频起伏 $\delta_\nu \omega(t)$ 可近似为激光器光频的瞬时起伏 $\delta\omega(t)$ 。此时激光器频率噪声功率频谱 $S_\omega(\Omega)$ 与干涉仪相位噪声功率频谱 $S_\varphi(\Omega)$ 的关系为

$$S_\omega(\Omega) = \left(\frac{c}{n \Delta l}\right)^2 S_\varphi(\Omega). \quad (8)$$

将 $S_\omega(\Omega)$ 代入(2)~(4)式,即可算出由干涉仪相位噪声 $\varphi(t)$ 表达的被测激光器线宽 $\Delta\omega$ 。

3 实验及结果分析

实验中搭建了非平衡光纤迈克耳孙干涉仪测试系统,对激光器的相位噪声进行测试。测试系统框图如图 1 所示。

待测激光器输出接隔离器(ISO)后进入迈克耳孙干涉仪。干涉仪输出通过光电转换,进行频率为 256 kHz 的 A/D 采样,采样长度 30000 点。经信号解调得到干涉仪的相位噪声 $\varphi(t)$ 后,根据(1)~(8)式编写程序计算激光器线宽。

为尽量增加光频起伏的累计测试时间以抑制外界干扰,选择干涉仪往返臂差 10 m。反射端接法拉

第旋镜(FRM)^[15,16]以消除偏振态随机变化导致的信号衰落。干涉仪放入屏蔽罐中屏蔽外界振动和声信号。系统采用基于光频调制的相位载波(PGC)^[17,18]方案消除外界环境变化导致的信号衰落。光源采用 32 kHz 的光频调制,调制周期

31.25 μs ,调制深度 $C=2.4$ rad。在 50 ns 的干涉时间内,调制引起的光源频率变化非常小,因此可以忽略其对激光器线宽测量的影响。另外 $C=2.4$ rad 时 PGC 解调系数 $J_1(C) * J_2(C)$ 位于贝塞尔函数的极值处,使光频调制的波动对 PGC 解调的影响达到最小。

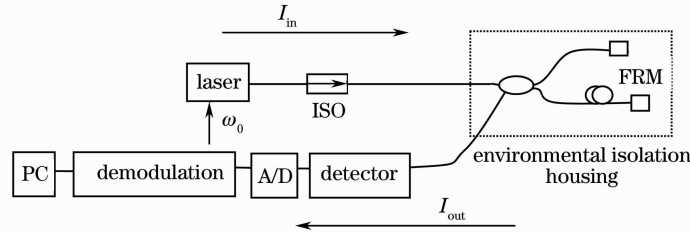


图 1 激光器相位噪声测试结构图

Fig. 1 Schematic diagram to measure the laser phase noise

虽然干涉仪已经置于屏蔽罐中,但系统仍有可能受到外界低频随机环境噪声的影响,使测试得到的 $\varphi(t)$ 略有波动且大于 $\delta\varphi(t)$ 。因此实验中取 30 次测试的平均值 $\overline{\varphi(t)}$ 以抑制随机噪声的影响,使 $\overline{\varphi(t)} \approx \delta\varphi(t)$ 。

由 $\overline{\varphi(t)}$ 依次计算出 $S_\varphi(\Omega)$ 、 $S_\omega(\Omega)$ 、 $\langle \Delta\varphi(t,\tau)^2 \rangle$ 和 $\langle \exp[i\Delta\varphi(t,\tau)] \rangle$ 。将 $\langle \exp[i\Delta\varphi(t,\tau)] \rangle$ 代入(2)式计算时,忽略光波中心频率 ν_0 引起的谱线平移,由 $\langle \exp[i\Delta\varphi(t,\tau)] \rangle$ 的傅里叶变换即可得到 $\nu_0 = 0$ 的光波功率频谱 $S_E(\nu)$ 和线宽 $\Delta\nu[\nu = \omega/(2\pi)]$ 。

实验中首先使用 RIO 公司型号为 Orion 的窄线宽分布反馈(DFB)激光器,经测试得到干涉仪的相位噪声 $\overline{\varphi(t)}$ 频谱如图 2 所示。

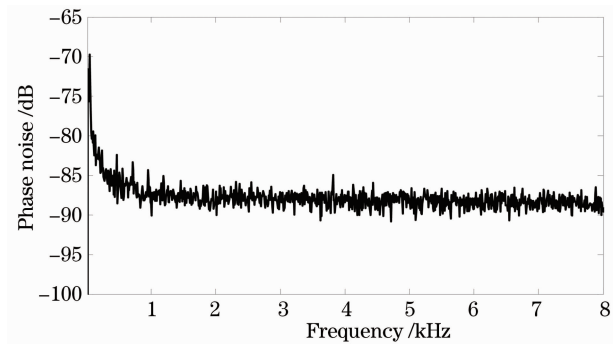


图 2 DFB 激光器的相位噪声频谱

Fig. 2 Phase noise spectrum of DFB laser

图 2 中,DFB 激光器频率瞬时起伏在 10 m 臂差干涉仪中引入的相位噪声在 -88 dB (4×10^{-5} rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$) 附近,且 1 kHz 以下噪声逐步增加。

图 3 中实线为由 $\overline{\varphi(t)}$ 得到的 DFB 激光器归一化光波功率频谱 $S_E(\nu)$,虚线为数据拟合的归一化洛伦兹曲线 $S_L(\nu) = \frac{(\Delta\nu/2)^2}{\nu^2 + (\Delta\nu/2)^2}$, $\Delta\nu = 5.4$ kHz,

两者重合较好。因此经干涉仪测量得到的 DFB 激光器 $S_E(\nu)$ 有近似的洛伦兹线型,且线宽为 5.4 kHz,与 DFB 激光器理论线宽 5 kHz 相近。

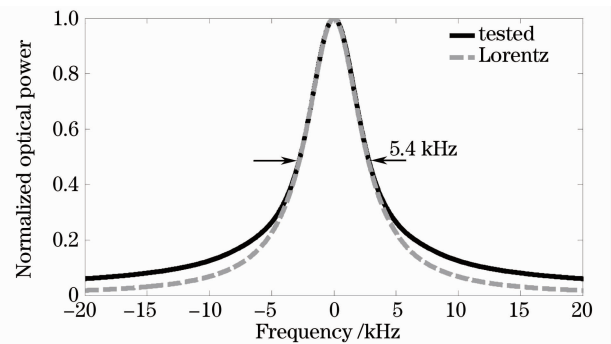


图 3 DFB 激光器的归一化光波功率频谱

Fig. 3 Normalized optical power spectrum of DFB laser

对窄线宽光纤环形腔激光器进行测试,得到的相位噪声 $\overline{\varphi(t)}$ 频谱如图 4 所示。

图 4 中,光纤激光器频率瞬时起伏引入的相位噪声在 -100 dB (10^{-5} rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$) 附近,且在 200 Hz 以下噪声逐步增加。相同测试条件下,窄线宽光纤激光器的相位噪声比 DFB 激光器小约 12 dB。

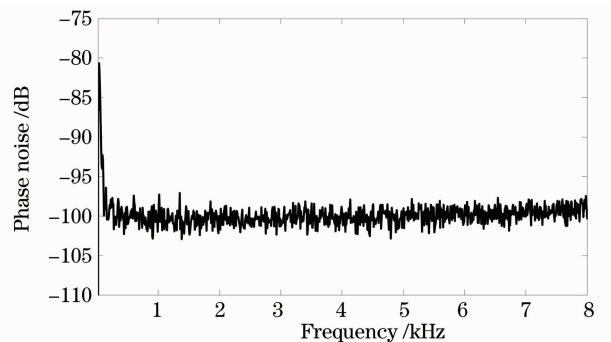


图 4 光纤环形腔激光器的相位噪声频谱

Fig. 4 Phase noise spectrum of fiber ring laser

图 5 中实线为由 $\overline{\varphi(t)}$ 得到的光纤激光器光波功率频谱 $S_E(\nu)$, 虚线为 $\Delta\nu = 0.75$ kHz 的洛伦兹曲线, 两者重合很好。因此激光器线宽为 0.75 kHz, 与文献[2]用零拍法测量得到的同类型激光器线宽低于 1.5 kHz 的结果相符, 并且更精确。

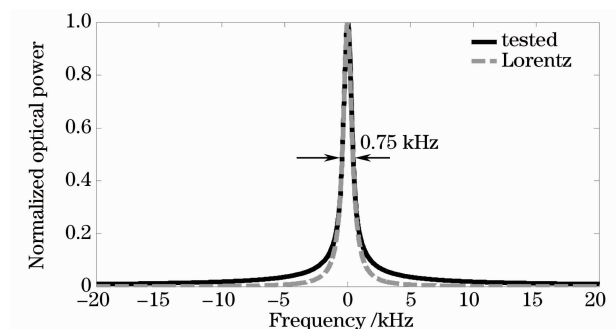


图 5 光纤环形腔激光器的归一化光波功率频谱

Fig. 5 Normalized optical power spectrum of fiber ring laser

4 结 论

利用非平衡干涉仪相位噪声测量原理分析了干涉仪相位噪声与激光器频率噪声功率频谱的关系, 并成功应用于千赫兹量级窄线宽激光器线宽测量实验。窄线宽 DFB 激光器的测量结果表明, 激光器光波功率谱有近似的洛伦兹线型且线宽为 5.4 kHz, 与 5 kHz 的理论值相近。窄线宽光纤环形腔激光器的线宽为 0.75 kHz, 比零拍法的测量结果更精确。解决了千赫兹量级窄线宽激光器线宽测量的问题, 方法简单且精度高, 在光纤传感和光纤通信领域都有很好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Yu Benli, Qian Jingren, Luo Jiatong *et al.*. Stable single-frequency fiber ring laser with linewidth less than 0.5 kHz[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, **18**(4): 345~348
俞本立, 钱景仁, 罗家童等. 线宽小于 0.5 kHz 稳态的单频光纤环形腔激光器[J]. *量子电子学报*, 2001, **18**(4): 345~348
- 2 Zhou Meng, George Stewart, Gillian Whitenett. Stable single-mode operation of a narrow-linewidth, linearly polarized, erbium-fiber ring laser using a saturable absorber[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(5): 2179~2183
- 3 Y. Cheng, J. T. Krignebotn, W. T. Loh *et al.*. Stable single-frequency traveling-wave fiber loop laser with integral saturable-absorber-based tracking narrow-band filter[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(8): 875~877
- 4 Li Jian, Liu Peng, Wang Jing *et al.*. Experiment study on a tunable fiber laser using optical circulator and tunable fiber Bragg gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1047~1050
李 坚, 刘 鹏, 王 静等. 以环形器和光纤光栅为腔镜的可调谐窄线宽激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1047~1050
- 5 Xu Pan, Hu Zhenliang, Ma Lina *et al.*. Output power stability of dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser[J]. *Chinese J.*

- Lasers*, 2009, **36**(6): 1347~1351
徐 攀, 胡正良, 马丽娜等. 双波长环形腔掺铒光纤激光器输出的稳定性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1347~1351
- 6 Wang Zefeng, Hu Yongming, Meng Zhou *et al.*. New measurement method for dynamic phase changes in fiber interferometer and its applications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2121~2125
王泽锋, 胡永明, 孟 洲等. 光纤干涉仪动态相移测量的新方法及应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2121~2125
- 7 Liang Xun, Yao Qiong, Hu Yongming *et al.*. Real-time mode hopping detection on narrow line-width laser source based on unbalanced fiber interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 437~442
梁 迅, 姚 琼, 胡永明等. 基于非平衡光纤干涉仪的窄线宽激光光源跳模实时测试方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 437~442
- 8 Zhou Meng, Yongming Hu, Shuidong Xiong *et al.*. Phase noise characteristics of a diode-pumped Nd:YAG laser in an unbalanced fiber-optic interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(17): 3425~3428
- 9 W. Marshall, B. Crosignani, A. Yariv. Laser phase noise to intensity noise conversion by lowest-order group-velocity dispersion in optical fiber: exact theory[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(11): 165~167
- 10 Yu Benli, Qian Jingren, Yang Yinghai *et al.*. Homodyne method for measuring narrow linewidth lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(4): 351~354
俞本立, 钱景仁, 杨瀛海等. 窄线宽激光的零拍测量法[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(4): 351~354
- 11 T. Okoshi, K. Kikuchi, A. Nakayama. Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum [J]. *Electron. Lett.*, 1980, **16**(16): 630~631
- 12 Jia Yudong, Ou Pan, Yang Yuanhong *et al.*. Short fibre delayed self-heterodyne interferometer for ultranarrow laser linewidth measurement[J]. *Journal of 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 L. T. Rinchter, H. I. Manderg, M. S. Kruger. Linewidth determination from self-heterodyne measurement with subcoherence delay times [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986, **QE-20**(11): 2070~2074
- 14 Xiyuan Minming. Fundamentals of Semiconductor Laser[M]. Zhou Nansheng Trans.. Beijing: Science Press, 2002. 175~176
栖原敏明. 半导体激光器基础[M]. 周南生译. 北京: 科学出版社, 2002. 175~176
- 15 A. D. Kersey, M. J. Marrone, M. A. Davis. Polarization insensitive fiber optic Michelson interferometer [J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(6): 518~519
- 16 L. A. Ferreira, J. L. Santos, F. Farahi. Polarization induced noise in a fiber-optic Michelson interferometer with Faraday rotator mirror elements [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(28): 6399~6402
- 17 Wang Zefeng, Hu Yongming, Meng Zhou *et al.*. Physical mechanism and solution of aliasing in phase generated carrier modulation-demodulation of interferometric fiber-optic hydrophone[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 92~98
王泽锋, 胡永明, 孟 洲等. 干涉型光纤水听器相位载波调制-解调中信号混叠产生的机理及解决方案[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 92~98
- 18 Cao Jianian, Zhang Likun, Li Xuyou *et al.*. Phase modulation and demodulation of interferometric fiber-optic-hydrophone using phase generated carrier techniques[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11): 1536~1540
曹家年, 张立昆, 李绪友等. 干涉型光纤水听器相位载波调制及解调方案研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(11): 1536~1540