

延时自外差法线宽测量误差分析仿真及修正

贾豫东 欧攀 张春熹 曹彬

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘要 讨论了移频延时自外差探测的基本原理,并对外差得到的功率谱进行了公式推导。在此基础上,对外差测量中出现的测量误差进行分析,同时设计了自外差测量实验装置进行实验对比,确定了由于延时线长度不够导致的线宽测量误差来源是因为延时时间短导致幂指数函数项波动加剧造成的;同时针对外差信号频谱为洛伦兹型和类高斯型的混合谱型,在高斯功率谱密度函数的基础上,对延时时间和 $1/f$ 谱宽的影响进行了仿真计算,采用 Voigt 分析,提取出 $1/f$ 导致的测量误差,提高了线宽测量的精度。以高斯谱宽 4.5 kHz 的谱型为例,对应的洛伦兹线宽约为 0.68 kHz,提高了一个数量级的测量精度。

关键词 激光器;线宽测量;延时自外差法;误差修正

中图分类号 TN248 文献标识码 A

Laser Linewidth Measurement Error Analysis and Correction on Fiber Delayed Self-Heterodyne Interferometer

Jia Yudong Ou Pan Zhang Chunxi Cao Bin

(School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract The linewidth measurement error of delayed self-heterodyne interferometer is described in detail. The fundamental using delayed self-heterodyne to measure laser linewidth is analyzed, the emulator is programmed and an experimental setup is constructed to measure laser linewidth, when shorter delayed fiber is adopted. The result shows the measurement error result from the fluctuation of power term. From numerical analysis, the power spectrum resulting of self-heterodyne signal is Voigt profile and the $1/f$ frequency noise is shown to be approximately Gaussian. The effects of $1/f$ frequency noise on self-heterodyne detection are described and the results are applied to the problem of laser linewidth measurement. It is proved that method is an effective tool for reducing the measurement error. As the example, when the spectrum width of Gauss profile is 4.5 kHz, the Lorentzian spectrum width is 0.68 kHz, the improvement is obvious.

Key words lasers; linewidth measurement; fiber delayed self-heterodyne; error correction

1 引 言

随着激光器技术的飞速发展,线宽低于千赫兹量级的窄线宽单频激光器得到越来越广泛的研究和使用。窄线宽激光器具有很长的相干长度,光纤传感系统可以利用长相干长度实现远距离相干探测,这种系统可以被广泛应用在安全警戒、石油天然气探测、地震探测和高压传输线上。其次,窄线宽激光器具有的低相位噪声的特性,大大提高了传感系统

的灵敏度和分辨率^[1]。因此,精确测量窄线宽光纤激光器的线宽显得非常重要。

当窄线宽激光器的线宽达到千赫兹时,传统的光谱仪和滤波器扫描法已经不能够提供所需要的测量分辨率^[2]。外差法是测量很窄线宽较理想的方法,可以得到比较满意的分辨率。但是在外差探测中,必须使用两个激光器,一个是被测激光器,另一个是参考激光器用来作为本地振荡器使用。参考激

作者简介: 贾豫东(1975—),男,甘肃人,博士研究生,主要从事光纤激光器和光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: jyd_blueeye@126.com

导师简介: 张春熹(1965—),男,湖南人,教授,博士生导师,主要从事光电子器件方面的研究。

E-mail: Zchunxi@hotmail.com

光器的线宽必须远小于被测激光器线宽,且中心频率必须被调整到接近被测激光器中心频率,以便于混频后的信号频率在探测电路的带宽内。同时,探测器件的带宽必须覆盖中心频率周围数十吉赫兹的范围,这些都极大地限制了外差法的实际应用。L. E. Richter等^[3]提出采用一个改进的马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪实现线宽的自外差测试,方案采用声光调制(Acousto-optic modulator, AOM)对分光后的其中一路光移频,然后做延时自外差,避开了低频干扰,得到了很好的测量结果。

本文讨论了移频延时自外差探测的基本原理,并对外差得到的功率谱进行了公式推导。在此基础上,对外差测量中出现的测量误差进行分解,指出实际测试中主要误差来源于两个方面,一是由于延时线长度不够导致功率谱成分中指数函数在两翼波动造成;二是拍频信号中的 $1/f$ 噪声类高斯型展宽。同时采用仿真计算和实验对比,提出了改进测量精度的方法。

2 实验装置及原理

图1中, τ_d 代表光延时线的延时时间, Ω 为声光移频器频移量。激光器输出光经过隔离器后输入分

光比为50:50的耦合器1(Coupler 1),然后分两路,一路通过光纤环延时后送入分光比为50:50耦合器2(Coupler 2);另一路通过一个工作在频移量为55 MHz的声光调制器,也送入耦合器2,两路光合光后送入光电探测器,差频后电信号送入频谱分析仪。

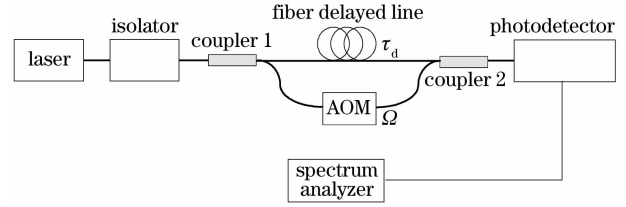


图1 移频延迟自外差法实验装置组成框图

Fig. 1 Schematic for optical delayed self-heterodyne detection

假定经过延时线到达耦合器2的光束电场为^[4]

$$e_s(t) = E_s \cos[\omega_s t + \varphi_s(t)], \quad (1)$$

则经过声光调制器到达耦合器2的光束电场为

$$e_L(t) = E_s \cos[(\omega_s + \Omega)t + \varphi_L(t)]. \quad (2)$$

ω_s 和 ω_L 分别为信号光和本振光角速度, $\varphi_s(t)$ 和 $\varphi_L(t)$ 分别为信号光和本振光相位的随机波动。由光电探测器平方律特性,其输出光电流可表示为

$$i_{IF} = P_0 + P_0 \cos[-\Omega t_1 + (\omega_s + \Omega)\tau_d + \varphi_s(t_1) - \varphi_s(t_1 - \tau_d)], \quad (3)$$

经隔直输入频谱仪的信号即为

$$i(t) = P_0 \cos[-\Omega t + (\omega + \Omega)\tau_d + \varphi(t) - \varphi(t - \tau_d)],$$

P_0 为光电探测器光电流信号幅度。整个实验装置稳定工作后, $\varphi(t) - \varphi(t - \tau_d)$ 的随机波动将转化为强度噪声,反映为光电流的频谱展宽。为了得到光电流的功率谱,引进光电流信号的自相关函数^[5]。

$$R_i(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i(t) i(t - \tau) dt \right], \quad (4)$$

对于各态经历系统而言,时间平均就等于系综平均。所以有 $\langle x(t)x(t - \tau) \rangle = R(\tau)$ 。所以(4)式展开后,可转换为

$$R_i(\tau) = \frac{1}{2} P_0^2 \cos(\Omega\tau) \langle \cos[\Delta\varphi(\tau_d, 0) - \Delta\varphi(\tau - \tau_d, \tau_d)] \rangle, \quad (5)$$

取 $\Delta\varphi(t_1, t_2) = \varphi(t_1 + t_1) - \varphi(t_1 + t_2)$ 为 t_1 和 t_2 时刻的相位差,由于窄线宽光纤激光器的相位抖动为高斯分布,因此有 $\langle \cos(x) \rangle = \exp(-\langle x^2 \rangle / 2)$,经过耦合器2合光的两束光的相位相关性为 $\langle [\varphi(t) - \varphi(t - \tau_d)]^2 \rangle = \tau_d / \tau_c$, τ_c 为激光源相干时间,则(5)式可化为

$$R_i(\tau) = \frac{1}{2} P_0^2 \cos(\Omega\tau) \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_c}\right), \quad (6)$$

根据Wiener-Khintchine定律,可以由自相关函数直接得到其功率谱密度为

$$S(\omega, \tau_d) = \frac{p_0^2 \tau_c / 2}{1 + (\omega \pm \Omega)^2 \tau_c^2} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\tau_d}{\tau_c}\right) \cdot \left[\cos(\omega \pm \Omega)\tau_d + \frac{\sin(\omega \pm \Omega)\tau_d}{(\omega \pm \Omega)\tau_c} \right] \right\} + \frac{1}{2} p_0^2 \pi \exp\left(-\frac{\tau_d}{\tau_c}\right) \delta(\omega \pm \Omega), \quad (7)$$

3 自外差法仿真及实验分析

从(7)式可以看出,差频信号的功率谱是由四项构成的,其中三项都与延时时间与相干时间的比值的幂指数函数有关,则当 $\tau_d \geq \tau_c$ 时,(7)式可简化为

$$S(\omega, \tau_d) = \frac{p_0^2 \tau_c / 2}{1 + (\omega \pm \Omega)^2 \tau_c^2} \quad (8)$$

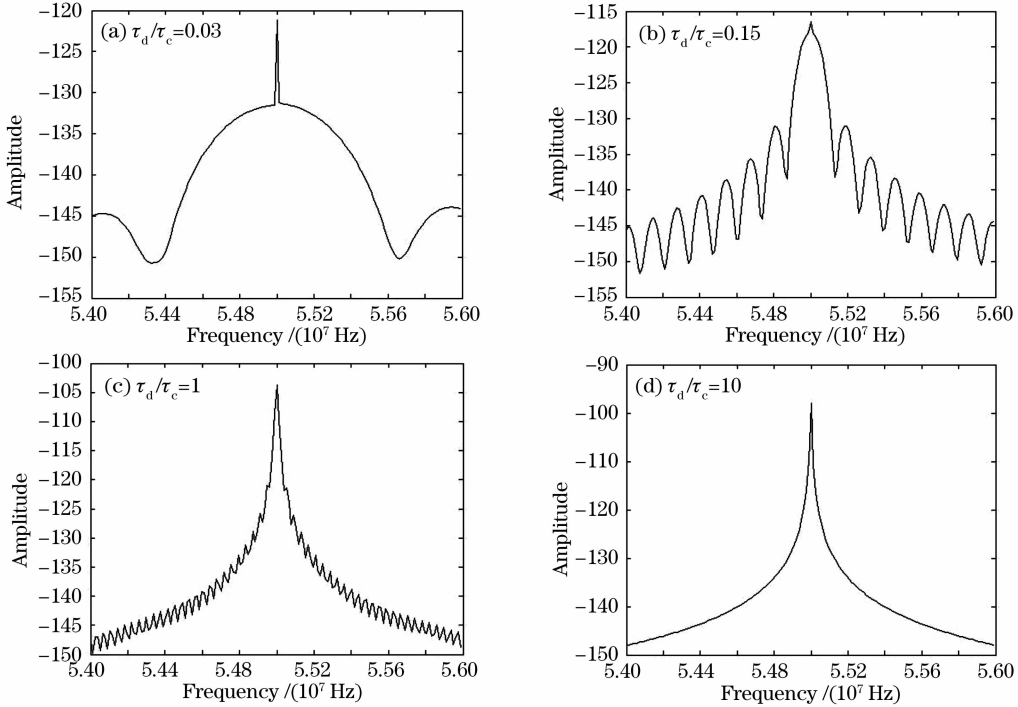


图 2 $S(\omega, \tau)$ 功率谱仿真计算结果

Fig. 2 Computer simulation of the power spectra $S(\omega, \tau)$

图 3 为采用图 1 所示实验装置,分别延时 0.12 μs 和 0.48 μs ,对相干时间约 0.15 μs 的激光器的测量频谱图。可以看出,当延时时间为 0.12 μs 时, δ 函数呈现出一个有限的宽度,光谱分析仪分辨率设为 30 Hz,很显然这一宽度不是因为仪器的测量误差导致的。当延时时间增加 4 倍后,可以看出, δ 函数谱宽增加,指数函数两翼波动减小,与图 2 的仿真

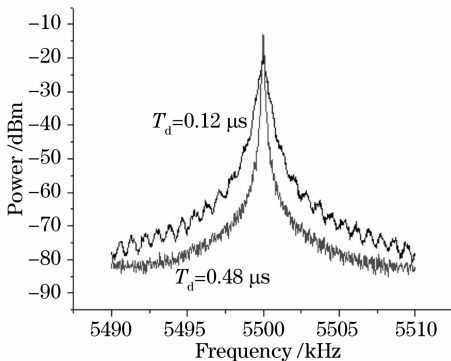


图 3 不同延时时间下功率谱观察结果

Fig. 3 Power spectra observed for different delay time

从图 2 的仿真结果也可以看出,当延时时间增加时,信号的强度从 δ 函数的峰向洛仑兹型基底转移,直到两路光经延时后变得完全不相干,功率谱变为洛仑兹型。这一过渡过程可以在图 2 中清晰地看出。 δ 函数峰两翼的波动是幂指数函数导致的。

结果吻合。根据文献[1]的计算结果,延时时间要大于 6 倍的相干时间, $S(\omega, \tau)$ 的半峰全宽(FWHM)才基本保持不变,测量比较准确,否则将导致测量出现较大的偏差^[6,7]。但在实际的工程实验中,延时时间大于相干时间 3 倍以上,谱型已接近洛仑兹型,谱宽变化很小,相对线宽已可忽略不计。

4 功率谱分析及误差修正

激光器中的自发辐射因为能级宽度的存在,并不是单色的,这是激光器线宽的根源,无法排除。在大部分的自外差线宽的测量中,都是假设线宽仅仅来源于量子噪声。但在实际中,当延时时间远大于相干时间时,测量到的不是一个严格的洛仑兹型,而是混杂了白噪声洛仑兹型和 $1/f$ 噪声类高斯型的 Voigt 谱型。激光器相干性能主要是由白噪声洛仑兹型线宽决定, $1/f$ 高斯型噪声引起自外差谱型额外加宽^[8,9]。

所以激光器中的频率噪声谱可以被表示为

$$I(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\nu) L(\nu - \nu') d\nu', \quad (9)$$

G 为中心频率为 0 的标准高斯谱型。

$$G(\nu) = \frac{\sqrt{4\ln 2}}{\sqrt{2}\Delta\nu_{GF}} \exp\left[-\frac{(\nu - \nu_0)^2}{\Delta\nu_{GF}^2}\right], \quad (10)$$

$$\Delta\nu_{GF} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2k\ln 2}{\pi} \left(4.3 + \ln \frac{4.3kt^{2.1}}{\pi}\right)}, \quad (11)$$

图 4 为未修正过的高斯型 $1/f$ 噪声在不同延时时间下谱型的仿真结果(取 $k=1 \times 10^{12} \text{ Hz}^2$)。由图 4 可知, $1/f$ 噪声对一固定频率的激光器, 谱宽不是固定不变的, 而是随着延时时间的增加, 谱宽也增大。

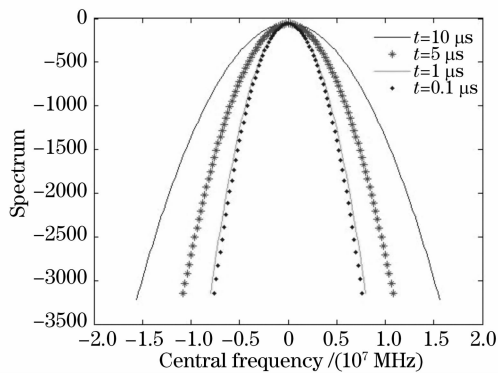


图 4 $1/f$ 噪声在不同延时时间下的谱型

Fig. 4 $1/f$ spectrum for different delayed times

以图 5 为例, 当高斯谱宽为 4.5 kHz, 直接读取的线宽将远大于洛仑兹谱宽; 而当高斯谱宽为 0.68 kHz 时, 直接读取的线宽值基本与洛仑兹谱宽接近。当激光器线宽较宽, 需要延时线不长时, $1/f$ 的谱宽对线宽测量结果影响不大; 但随着激光器线宽越来越窄, 需要很长延时线时, $1/f$ 噪声就会使得直接读取的谱宽远大于激光器真实线宽, 出现较大误差。此时, 采用目前普遍采用的 10 dB 或 20 dB 直接读取, 然后拟合出半峰全宽线宽的方法就已不

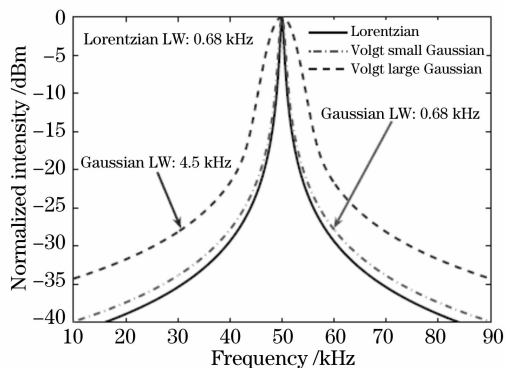


图 5 不同高斯和洛仑兹下的 Voigt 谱型

Fig. 5 Voigt profile with different Gaussian and Lorentzian linewidth

太适用, 采用 Voigt 法谱型分析提取出测量系统的高斯谱成分, 然后对得到的外差信号频谱进行修正, 可大大降低测量误差。

5 结 论

对延时自外差法测量窄线宽激光器线宽的基本原理做了分析推导, 在此基础上采用相应的实验装置, 通过理论计算仿真和实验结果对比, 确定了由于延时线长度不够导致的线宽测量误差来源。同时, 对外差信号噪声谱进行了分析, 确定了该信号功率谱为混合了洛仑兹型和类高斯型的 Voigt 型, 并在此基础上, 对 $1/f$ 高斯型噪声进行计算, 推导出与延时时间之间的对应关系, 提取出了导致测量误差的高斯谱成分。分析及误差修正都是建立在忽略了幅度噪声和非线性效应的基础上进行的, 进一步的研究必将更细致地认识和提高线宽测量精度。

参 考 文 献

- 1 Yu Benli, Zhen Shenglai, Zhu Jun *et al.*. Experimental study on low-noise fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 217~220
俞本立, 甄胜来, 朱军等. 低噪声光纤激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 217~220
- 2 Zhang Xin, Chen Wei, Liu Yu *et al.*. Single longitudinal mode fiber laser with multiple ring cavities and its frequency stabilization [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 48~52
张欣, 陈伟, 刘宇等. 单纵模多环形腔掺铒光纤激光器及其稳定性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 48~52
- 3 L. E. Richter, H. I. Mandelberg, M. S. Kruger *et al.*. Linewidth determination from self-heterodyne measurements with subcoherence delay times [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986, **QE-22**(11): 2070~2074
- 4 An Yuying, Zeng Xiaodong. *Optic Electronic Principle* [M]. Xi'an: Publishing House of Xi'an Electronic Science and Technology University, 2004. 152~153
安毓英, 曾晓东. *光电探测原理* [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004. 152~153
- 5 Park Namkyoo, Jay W. Dawson, Kerry J. Vahala. An improved delayed self-heterodyne interferometer for linewidth measurements [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(9): 1063~1066
- 6 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. *Laser Theory* [M]. Beijing: Publishing House of National Defense Industry, 2000. 131~182
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘等. *激光原理* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 131~182
- 7 Linden B. Mercer. $1/f$ frequency noise effects on self-heterodyne linewidth measurements [J]. *J. Lightwave Technology*, 1991, **9**(4): 485~493
- 8 Xiaopei Chen, Ming Han, Yizheng Zhu *et al.*. Implementation of a loss-compensated recirculating delayed self-heterodyne interferometer for ultranarrow laser linewidth measurement [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(29): 7712~7717
- 9 Makoto Murakami, Shigeru Saito. Evolution of field spectrum due to fiber-nonlinearity-induced phase noise in in-line optical amplifier systems [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **4**(11): 1269~1272