

窄线宽激光器线宽测量方法

解东宏¹ 邓大鹏¹ 郭丽¹ 杨剑¹ 韦海军²

(¹ 中国人民解放军西安通信学院, 陕西 西安 710106)
(² 中国人民解放军 96261 部队, 河南 灵宝 472500)

摘要 回顾了窄线宽激光器线宽测量的各种方法和发展过程,介绍了利用光外差法测量窄线宽激光器线宽的基本原理,描述了双光束外差法和延时自外差法不同测试机理。针对延时零拍自外差法容易引起的系统误差,说明了光源调制和光路调制移频非零拍自外差法不同改进方案的优缺点。综述了窄线宽激光器测量线宽的新方法。对窄线宽激光器线宽测量方法进行了较全面的梳理,从发展过程看双光束外差法和延时自外差法有着各自的测量优势。

关键词 激光器;测试方法;双光束外差法;延时自外差法;短光纤;斯托克斯光

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.010006

Line-Width Measurement Method of Narrow Line Width Lasers

Xie Donghong¹ Deng Dapeng¹ Guo Li¹ Yang Jian¹ Wei Haijun²

(¹ Xi'an Communication Institute of the People's Liberation Army, Xi'an, Shaanxi 710106, China)
(² Troop 96261 the People's Liberation Army, Lingbao, Henan 472500, China)

Abstract The measurement methods of narrow linewidth lasers are reviewed. The basic principle of narrow linewidth laser measurement based on optical heterodyne method is introduced. The testing mechanisms of double-light-beam heterodyne and delayed self-heterodyne methods are described. For the systematic error frequently introduced in delayed zero frequency self-heterodyne method, source modulation and path modulation non-zero frequency self-heterodyne methods have been developed, and these improved methods have their advantages and disadvantages, respectively. Moreover, the new measurement methods of narrow linewidth lasers are summarized. The full spectrum of measurement methods of narrow linewidth lasers is shown, and it is seen that double-light-beam heterodyne and delayed self-heterodyne methods can find superiority for different conditions.

Key words lasers; measurement method; double-light-beam heterodyne method; delayed self-heterodyne method; short fiber; Stokes light

OCIS codes 140.3510; 300.3700; 300.6310; 300.6360; 350.4800

1 引言

窄线宽光纤激光器因其线宽窄、噪声低、抗电磁干扰、安全和可远程控制等特性,广泛应用于光纤通信、光纤传感、光纤遥感、矿井监测、材料技术以及高精度光谱等领域^[1~3]。窄线宽光纤激光器主要有利用分布式布拉格反射器(DBR)构成的光纤激光器、由一个光栅构成的分布反馈(DFB)式光纤激光器及利用一段未被抽运的稀土掺杂光纤作为饱和吸收体的光纤激光器等^[4]。

早期DFB和DBR激光器线宽在10 MHz量级,采用外腔技术大大压窄光谱线宽后,激光器线宽已经可以达到甚至低于千赫兹量级^[5]。对于传统光源,一般采用光谱分析仪进行谱线分析,光谱分析仪采用扫描衍射光栅作为选频滤波器,其波长扫描范围宽、动态范围大,但波长分辨率仅限制在十几皮米(大于1 GHz),因此,目前用光谱分析仪对千赫兹量级的窄线宽光纤激光器进行分析是很困难的。

收稿日期: 2012-07-30; **收到修改稿日期**: 2012-09-26; **网络出版日期**: 2012-10-24

作者简介: 解东宏(1970—),男,硕士,副教授,主要从事光通信与传感技术等方面的研究。

E-mail: xiedonghong2003@163.com

然而,通过光混频把光频信号频移到微波频段,通过频谱分析仪测量电频谱的 3 dB 带宽,并根据谱形特征计算出光谱的线宽,即可以解决激光光谱在千赫兹量级的线宽测试分析问题。常用的混频法是光外差法。光外差法又分为双光束外差法和单激光器的延时自外差法。单激光器的延时自外差法包括了延时零拍自外差法和延时非零拍自外差法,这两种方法在近几年的窄线宽光纤激光器线宽测试中应用比较广泛。利用不同的测试方法,国内多家单位对激光器线宽测试进行了仔细研究。

本文对上述方法进行了较全面的回顾与梳理,分析了双光束外差法和延时自外差法各自的测量优势。

2 光外差原理

光外差法与电子学外差检测原理相似。两束波长相近的光波耦合到光探测器中混频从而产生中频电信号,所产生的中频电信号的频率由两束光的波长差决定,其幅度由两束光的场矢量内积决定。

如果将波长为 λ_1 和 λ_2 的两束光注入到光探测器中,通过光探测器的非线性效应即可检测到频率为 f_m 的电信号。产生的中频电信号 $f_m = (\lambda_1 - \lambda_2)c/\lambda_1^2$, 频率由两束光的波长差决定,幅度由两束光的场矢量内积决定。光外差法的工作原理如图 1 所示。光外差法发展的早期是双激光器的双光束外差法^[6]。

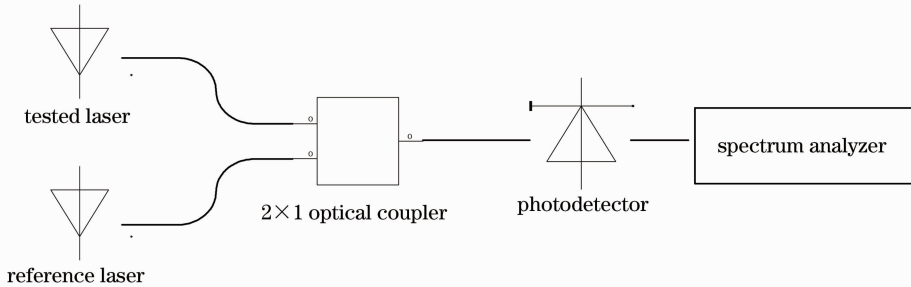


图 1 光外差法工作原理示意图

Fig. 1 Functional block diagram of optical heterodyne method

3 双激光器的双光束外差法

双光束外差法需要两个激光器。一个激光器输出功率和波长要十分稳定,另一个激光器的波长在小范围内连续可调,并保证两束激光的波长差在很小范围内稳定、精密、连续可调,才能实现一定频率范围内的扫频测试。图 2 是典型的双激光器光外差测试系统。谱线宽度待测的光源输出固定频率为 ν_1 的光,波长可调谐的窄线宽光源输出频率为 ν_2 的光,两束光耦合到光探测器的光敏面进行混频。光波的场函数可简单表达为

$$\begin{cases} E_1(t) = E_1 \cos(2\pi\nu_1 t + \varphi_1) \\ E_2(t) = E_2 \cos(2\pi\nu_2 t + \varphi_2) \\ \nu_b = \nu_2 - \nu_1, \quad \Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \end{cases}, \quad (1)$$

式中 ν_b 为拍频功率谱的中心频率。

根据 Wiener-Khinchine 定理,通过对自相关函数进行傅里叶变换即可得到光电流的谱密度。对于两束 Lorentzian 线形的激光光谱,其拍频谱仍然是 Lorentzian 线形:

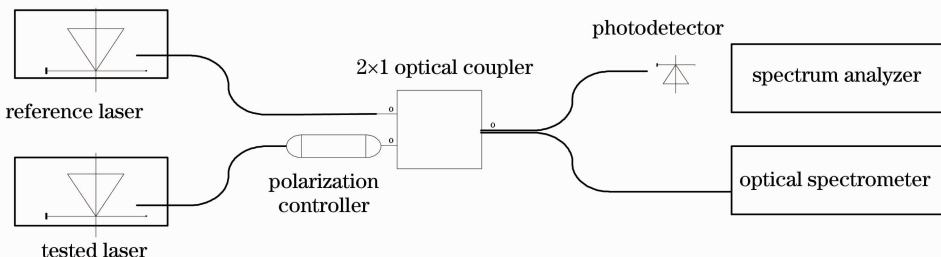


图 2 双激光器光外差测试原理图

Fig. 2 Functional diagram of double-laser beam heterodyne method

$$S_b(\nu) = \frac{\delta\nu_b}{2\pi \left[(\nu - \nu_b)^2 + \left(\frac{\delta\nu_b}{2} \right)^2 \right]}, \quad (2)$$

式中 $\delta\nu_b = \delta\nu_1 + \delta\nu_2$ (两激光器的线宽之和), 为拍频功率谱的线宽。对于两束 Gaussian 线形的激光光谱, 其拍频谱仍然是 Gaussian 线形, $\delta\nu_b^2 = \delta\nu_1^2 + \delta\nu_2^2$ (两激光器的线宽平方之和), 为拍频功率谱的线宽平方。

因此, 不管是 Lorentzian 线形, 还是 Gaussian 线形, 只要 $\delta\nu_2$ (参考光源的线宽) $\ll \delta\nu_1$ (待测激光器的线宽), 就可以认为 $\delta\nu_b$ (拍频谱的线宽) $\approx \delta\nu_1$ (待测激光器的线宽)^[6~8]。

然而双光束外差法需要两个激光器, 对激光器的频率、幅度等稳定性有十分苛刻的要求, 实验系统复杂。为此 1980 年日本学者 Okoshi 等^[9] 提出延时自外差干涉法 (DSHI), 它实际是对两个单频激光器直接外差测谱法的改进, 即采用一个激光器, 分光产生两路延时不同的光进行自外差, 利用自外差的频谱特性来测量线宽。该方法避免了对两个独立光源频率稳定性和频率匹配的苛刻要求, 相对于双光束外差法, 系统只需一个光源, 测试环境简单, 具有更好的稳定性。

4 单激光器的延时自外差法

延时自外差法的基本原理是将一路入射光分成两路, 将其中一路光用光纤延时后, 使两路光相拍, 经光电转换, 在频谱分析仪上得到相拍后的光电流谱线, 从延时光电流谱线确定出激光器线宽。这种简单测量系统将工作在零拍状态, 即参考光和测试光频率差为零, 所得到的光电流谱线的中心频率为零频, 也称为延时零拍自外差法, 测试系统如图 3 所示^[10]。

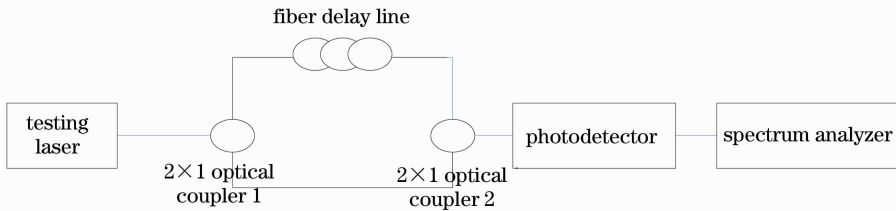


图 3 延时零拍自外差法原理图

Fig. 3 Functional diagram of delayed zero frequency self-heterodyne interferometer

延时零拍自外差法的优点是不使用声光调制器, 使得光路系统变得简单, 有利于仪器的小型化和集成化, 节约了成本, 同时也减小了传输光的功率损耗^[11]。但由于整个系统工作在零频附近, 比较容易引入由于周边环境引起的变动, 如空气的微振动和温度的细微变化等因素带来的影响, 使得整个仪器对环境的要求比较高。为了消除外界环境噪声对干涉仪的干扰, 光纤马赫-曾德尔 (M-Z) 干涉仪可以采用全保偏结构, 并置于一个声屏蔽盒内^[12]。为了更好地避免上述原因所引起的系统误差, 发展出了延时非零拍自外差法。

延时非零拍外差法是通过调制光源或光路, 使信号光和参考光产生一定的频率差, 发生干涉后产生的拍频位于非零频的中频附近, 避免周边环境对系统带来的低频干扰, 从而降低系统误差、提高测量精度。通常有两种实现方案, 其中之一调制光源, 使得激光器的输出光波长为两个周期性变化的波长。调节方波的半周期恰好等于干涉仪引入的额外时延, 两束频率差固定的光就保持同步, 耦合到光探测器进行拍频, 产生的拍频信号的中心频率可通过方波信号来调节, 系统原理如图 4 所示^[6]。

调制光源由于是直接对光源进行调制, 系统比较复杂, 对实验精确性及成本的要求都很高, 因此人们提出了调制光路改变光频的方案, 这种方案在目前的各种测试中应用广泛, 系统原理如图 5 所示。

光源发出的光波经 2×1 光耦合器 1 分成两路, 一路经过光纤延迟线, 另一路经过声光移频器移频, 两路光在 2×1 光耦合器 2 上进行干涉叠加。

设到达耦合器前, 未延时支路的光波信号为

$$E_1(t) = E_0 \exp\{j[(\omega_0 + \Omega)t + \phi t]\},$$

延时支路的光波信号为

$$E_2(t) = aE_0 \exp\{j[\omega_0(t + \tau_d) + \phi(t + \tau_d)]\},$$

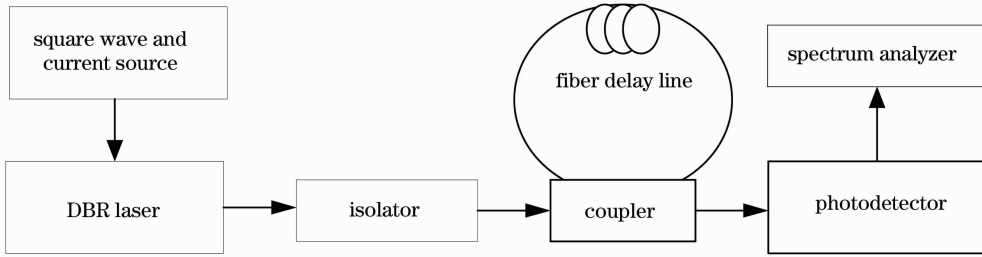


图 4 光源调制非零拍自外差法原理图

Fig. 4 Diagram of source-modulation non-zero frequency self-heterodyne interferometer

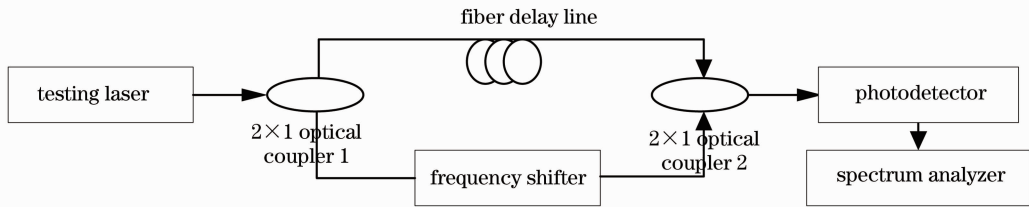


图 5 光路调制非零拍自外差法原理图

Fig. 5 Diagram of path-modulation non-zero frequency self-heterodyne interferometer

则两路光在耦合器 2 上叠加后的合成场经光电探测器后,形成光电流 $I_{(t)}$,得到光电流强度信号。

通过求光电流的自相关函数后,根据 Wiener-Khintchine 定理,求傅里叶变换,当 τ_d (光纤延迟线的延时) $\gg \tau_c$ (激光器的相干时间) 时,便可得到光电流的功率谱密度函数为

$$S_s(\omega) = \frac{\alpha^2 I_0^2}{2} \frac{2/\tau_c}{(2/\tau_c)^2 + (\omega - \Omega)^2}, \quad (3)$$

此时拍频谱的半峰全宽(FWHM)为

$$\Delta f_s = \frac{\Delta\omega_s}{2\pi} = \frac{2}{\pi\tau_c}. \quad (4)$$

因此,可以通过测量拍频谱的半峰全宽得到激光器的实际线宽。从光电流的功率谱密度函数可以看到,此时光频段的测量已经变为非零频的中频段测量^[13]。

5 激光器线宽的其他测量方法

双光束外差法和延时自外差法是测量窄线宽激光器的两种常用方法。随着技术的不断发展,两种方法又出现了一些改进,产生了新的窄线宽激光器测量方法。

随着更窄线宽激光器的出现,双光束光外差法在一些实验中发挥了新的作用。如哈尔滨工业大学光电电子技术研究所提出了使用布里渊光纤环形激光器产生的二阶斯托克斯光作为参考光测量超窄激光线宽的新方法^[14]。该方法可以有效地精确测量 100 kHz 以下的激光线宽,其中光纤谐振腔的自由光谱范围大于布里渊增益线宽是布里渊光纤环形激光器单纵模运转的条件,并且稳定布里渊光纤环形激光器温度,对稳定、精确地测量超窄激光线宽有重要意义。该方法装置结构简单,使用的光学器件较少,而且不需要很长的光纤,测量精度高。二阶斯托克斯光比一阶斯托克斯光线宽更窄,可以达到亚赫兹水平,因此可以准确反映待测激光的光谱线型。测量不受抽运光波长限制,对于较宽范围的波段都可以进行测量^[14]。

延时自外差法随着激光器线宽越来越窄,延时光纤的长度越来越长。如对于 10 kHz 量级线宽的激光器而言,需要用到上百公里长的光纤才能满足要求。这就使整个方案体积庞大、使用不便且成本较高,而且随着光纤长度的增加,系统的光路又会产生新的问题,如光路引入损耗、偏振等变化,为此一些短光纤延时方法被提出。如北京航空航天大学贾豫东等^[15]在理论分析推导移频延时自外差法测量激光器线宽的基础上,通过对两台已知线宽的窄线宽激光器实际测量数据的分析,对用短光纤法测试激光器线宽的结果进行处理,给出了短光纤测试窄线宽激光器的一种方法;国防科学技术大学曹春燕等^[16]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,通过分析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 Lorentzian 线形且线宽为 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。以上两种测量方法,对用短光纤延时测量窄线宽激光器谱线宽度具有一定的参考意义。

6 结束语

本文回顾了窄线宽激光器利用光外差法测量线宽的基本原理和发展历程,描述了双光束光外差法和延时自外差法的测试机理,说明了延时自外差法两种改进方案的优缺点,介绍了窄线宽激光器测量线宽的新方法。

参 考 文 献

- 1 Fan Shibin, Xu Hongchun, Xiang Xiong. Multi-point optical fiber sensing technology for methane detection [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(10): 100602
樊士彬,徐红春,向雄. 多点光纤瓦斯传感技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(10): 100602
- 2 Tian Pengfei, Sun Xinxin. Single longitudinal-mode and narrow line width fiber lasers [J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2010, (5): 16~19
田鹏飞,孙欣欣. 单纵模窄线宽光纤激光器的研究 [J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2010, (5): 16~19
- 3 Xue Lifang, Zhang Qiang, Li Fang *et al.*. High-frequency modulation, high-power and narrow-line width distributed feedback fiber laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(1): 014213
薛力芳,张强,李芳等. 高频调制大功率窄线宽分布反馈光纤激光器 [J]. 物理学报, 2011, **60**(1): 014213
- 4 Song Rui, Chen Shengping, Hou Jin *et al.*. All-fiber pulsed laser with narrow line width [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0502002
宋锐,陈胜平,侯静等. 全光纤窄线宽脉冲激光器 [J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0502002
- 5 Yu Benli, Qian Jingren, Luo Jiatong *et al.*. Stable single-frequency fiber ring laser with line-width less than 0.5 kHz [J]. *Chinese J. 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
- 6 Zhu Ninghua. *Microwave Design and Characterization of Optoelectronics Devices and Packaging* [M]. Beijing: Science Press, 2007
祝宁华. 光电子器件微波封装与测试 [M]. 北京: 科学出版社, 2007
- 7 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,刘戩等. 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
- 8 Li Yanchao, Wang Chunhui, Qu Yang. Study on magnetostrictive coefficient based on multi-beam laser heterodyne [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(s1): s108005
李彦超,王春晖,曲杨. 多光束激光外差测量磁致伸缩系数的方法 [J]. 中国激光, 2012, **39**(s1): s108005
- 9 T. Okoshi, K. Kikuchi, A. Nakayama. Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum [J]. *Electron. Lett.*, 1980, **16**(16): 630~631
- 10 Yu Benli, Qian Jingren, Yang Yinghai *et al.*. Homodyne method for measuring narrow linewidth lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **28**(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, **28**(4): 351~354
- 11 Wang Jinwen, Dong Xiaopeng, Zhou Jinlong. Measurement of the line width of DFB fiber laser based on the delayed self-homodyne [J]. *J. Xiamen University (Natural Science)*, 2007, **46**(3): 322~325
王劲文,董小鹏,周金龙. 基于延时零拍法的 DFB 光纤激光器线宽测量 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2007, **46**(3): 322~325
- 12 Ma Mingxiang, Xu Pan, Hu Zhengliang *et al.*. Research on mode hopping detection of ultra-narrow line-width lasers based on the visibility change of fiber Mach-Zehnder interferometer [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2011, **32**(1): 123~127
马明祥,徐攀,胡正良等. 基于光纤 M-Z 干涉仪相干度变化的超窄线宽激光器跳模检测研究 [J]. 半导体光电, 2011, **32**(1): 123~127

- 13 Xiao Huaju, Wang Xiang, Ma Yun *et al.*. Linewidth measurement of narrow fiber laser based on the DSHI [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(8): 57~61
肖华菊, 王翔, 马云等. 基于DSHI的窄线宽光纤激光器线宽测量 [J]. 光电工程, 2010, **37**(8): 57~61
- 14 Dong Yongkang, Lu Zhiwei, Lu Yuelan *et al.*. A new method of measuring ultra-narrow laser line-width [J]. *J. Harbin Institute of Technology*, 2005, **37**(5): 670~673
董永康, 吕志伟, 吕月兰等. 一种测量超窄激光线宽的新方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, **37**(5): 670~673
- 15 Jia Yudong, Ou Pan, Yang Yuanhong *et al.*. Short fibre delayed self-heterodyne interferometer for ultranarrow laser linewidth measurement [J]. *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
- 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