

频谱仪快速测定窄线宽激光器线宽

安盼龙^{1,2}, 赵瑞娟², 郑永秋³, 薛晨阳^{1,3}, 张成飞¹, 李小枫¹, 闫树斌^{1,3}, 刘俊^{1,3}

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 理学院, 山西 太原 030051;

3. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 针对传统光谱仪和 F-P 干涉仪分辨率不能满足窄线宽激光器线宽的测量要求, 基于延时自外差法搭建测试平台。设置频谱分析仪分辨率参数抑制噪声实验, 通过使用 20 km 延时光纤、80 MHz 声光移频器和 50:50 光纤耦合器, 通过光电探测器实现光电转换并利用频谱分析仪分析测试信号。对频谱分析仪分辨带宽 RBW 和视觉带宽 VBW 以及扫频范围(Scan Range)进行优化设置, 在不降低测试灵敏度的情况下, 将重叠信号分辨开, 使其不会过多滤掉高频成分而失真并对线宽功率谱峰值进行洛伦兹曲线拟合。最后得到了 1 550 nm 波长可调谐光纤激光器(1 520~1 570 nm)的线宽值约为 161 kHz, 为频谱仪的参数优化设置及窄线宽激光器线宽标定提供了相关参考。

关键词: 频谱仪; 线宽测量; 窄线宽激光器; 延时自外差法; 分辨带宽

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)03-0897-04

Linewidth rapid measurement of narrow fiber laser by spectrum analyzer

An Panlong^{1,2}, Zhao Ruijuan², Zheng Yongqiu³, Xue Chenyang^{1,3}, Zhang Chengfei¹, Li Xiaofeng¹,
Yan Shubin^{1,3}, Liu Jun^{1,3}

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement Ministry of Education, North University of China,
Taiyuan 030051, China; 2. School of Science, North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: For the linewidth measurement of the narrow linewidth laser, the resolution of the traditional spectrometer and the F-P interferometer is obviously insufficient to meet the requirement of linewidth measurement. In the experiment, a test platform was built using a spectrum analyzer based on the delay self-heterodyne method. Opportune parameters of the spectrum analyzer was set to distinguish noise suppression, using 20 km delay optical fiber based on the result of the calculation, 80 MHz acousto-optic frequency shifter(AOM)and 50:50 fiber coupler, achieve the photoelectric conversion by the photodetector.

收稿日期: 2014-07-05; 修订日期: 2014-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(61275166, 91123036, 61178058); 国家自然科学基金项目科学仪器基础研究(61127008); 国家自然科学基金杰出青年基金(51225504); 山西省高等学校中青年拔尖创新人才项目; 中北大学杰出青年基金支持计划

作者简介: 安盼龙(1978-), 男, 讲师, 博士生, 主要从事微纳测试技术及仪器方面的研究。Email: panlong_an@nuc.edu.cn

导师简介: 闫树斌(1975-), 男, 副教授, 博士, 主要从事 MEMS 微腔的光 MEMS 传感器件、光纤传感、量子光学等方面的研究。

Email: shubin_yan@nuc.edu.cn

Optimally set the visual bandwidth(RBW), resolution bandwidth(VBW) and the scan range. Without reducing the testing sensitivity, the analyzer will distinguish overlapping signals and do not filter out too much high frequency to be distorted. Lorenz curve fitting was carried to the linewidth power spectrum peaks. Then it is achieved that the linewidth of the tunable wavelength fiber laser (1520-1570 nm) is about 161 kHz. It provides a reference to optimize the spectrum analyzer parameter settings and calibrate the linewidth parameter of the narrow linewidth fiber laser.

Key words: spectrum analyzer; linewidth measurement; narrow linewidth laser; DSHI; resolution bandwidth

0 引言

窄线宽半导体光纤激光器因其线宽窄、噪声低、抗电磁干扰强等性能,广泛应用于光纤传感、石油勘探、管道监控、激光雷达和海底通信以及其他高精度光谱测量领域。频带宽度是光源单色性的量度,精确测量激光器的线宽对于评价单频激光器的性能非常重要^[1-3]。目前丹麦 NKT 公司 X15 型激光线宽可窄至 15 Hz。窄线宽单纵模光纤激光器可以保证激光具有极好的相干特性,其相干长度可达 200 km 以上。传统常用光谱分析仪对光源线宽进行分析,但波长分辨率仅限制在十几皮米。如果使用光谱分析仪和 F-P 干涉仪测量分辨率显然不够,对千赫兹量级或更低频率的窄线宽激光器进行分析更加困难。因此,使用高性能频谱分析仪通过延时自外差法对光电流的频谱进行分析能精确反映被测激光器的线宽指标。在测量线宽的过程中,频谱仪使用参数的准确设置决定了测量的精度,根据具体测量要求,对高性能频谱仪使用过程两个重要参数准确设置,降低测量本底噪声,提高了测试精度。

1 延时自外差法原理

延时自外差法(DSHI)是一种精准测量单纵模窄线宽激光器线宽较好的方法^[4-7],对于延时自外差法系统,激光器发出的光波经耦合器分成两路,一路经过光纤延迟线,另一路经过声光调制器进行移频,两路光波自身光频非常大(可高达几百太赫兹以上),但是经过移频,频移量有几十到几百兆赫兹,此时两路光频相差仅为频移量,远远小于光波本身频率,满足拍频条件。频谱分析仪测量的为相干叠加后得到的光电流谱线,此时可从延时光电流谱线测定窄线宽激光器的线宽。延时自外差系统实物图如图 1 所示。



图 1 延时自外差法测试实物平台

Fig.1 Test platform based on DSHI

单纵模激光器的输出光场是一个振幅稳定、相位有扰动的准单色电磁场,表达式为^[8]:

$$E(t) = E_0 \exp[i\omega_0 t + \phi(t)] \quad (1)$$

式中: E_0 为振幅; ω_0 为光场中心频率; $\phi(t)$ 为导致谱线展宽的初相位。

设光纤激光器的光功率谱密度为洛伦兹型,其功率谱密度函数为:

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

式中: τ_c 为激光器的相干时间,此时光频谱的半高全宽值,即 3 dB 线宽为:

$$\Delta f = \Delta\omega / 2\pi = 1 / (\pi\tau_c) \quad (3)$$

由于两路光在耦合器 C2 中发生干涉叠加,根据 Wiener-Khintchine 定理,当 $\tau_d \gg \tau_c$,这里 τ_d 为光纤延迟线的延时,为激光器的相干时间,此时激光器光谱的半高全宽为:

$$\Delta f_s = \Delta\omega_s / 2\pi = 1 / (\pi\tau_c) \quad (4)$$

此时,所测线宽为激光线宽的 2 倍。延时自外差法随着激光器的线宽变窄,延时光纤的长度需要越长,根据计算,对于 10 kHz 线宽光纤激光器进行测量,光纤材料折射率为 1.5,光纤长度大于 19 km 即可。当然,理论上实际光纤延迟线的长度越大于计算值,测量的结果越精确,但太长会引入较大噪声反而

不宜。

2 实验与结果

实验中测量的激光器为丹麦 NKT 公司的波长为 1550 nm 的窄线宽激光器。实验系统配置及测量原理如图 2 所示。

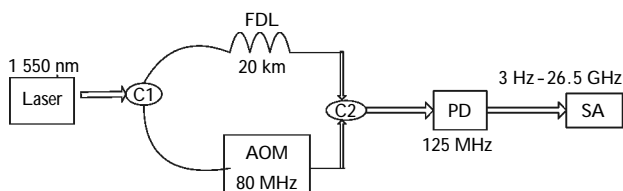


图 2 DSHI 线宽测量系统装置示意图

Fig.2 DSHI linewidth measurement system device

单纵模窄线宽半导体激光器输出光功率为 10 mW，经过光纤耦合器 C1 分成两路，一路经过延时光纤 FDL，一路经过 80 MHz 的声光频移器，两路最终汇合到耦合器 C2 进行耦合拍频，通过光电探测器 PD 进行光电转换，将信号传输到频谱分析仪 SA 进行拍频测量，从而得到待测激光器的线宽拍频的功率谱信号。

实验中所采用光纤延迟线的损耗为 0.19 dB/km，单模光纤的长度为 20 km；声光频移器(AOM)采用的是 Gooch and housego 公司 T-M080-0.4C2J-3-F2S 型，其中用 15 V 直流电压对其供电，采用 25 MHz Tektronix 公司 AFG3022 dual channel Arbitrary/Function Generator 信号发生器产生偏移量为 400 mV 的模拟信号和 2.5 V 的数字信号对声光频移器分别进行模拟调制和数字调制，并用直流 24 V 电压对其驱动装置进行供电。由于在实验过程中驱动装置会产生较大热量，为保证实验顺利进行，实验中对驱动盒覆盖接触金属盘片进行散热降温；光电探测器使用 New Focus 公司的 model 1811 型号 IR-DC-125M low noise photodetector；测试仪为 PXA Signal Analyzer N9030A 型带宽为 3 Hz~26.5 GHz 高性能频谱分析仪。

频谱仪设置最重要的参数之一为分辨率带宽 RBW，代表两个不同频率的信号能被清楚分辨的最小频宽差异。如果两个信号频宽低于频谱分析仪的分辨率带宽，此时该两信号将发生重叠，难以分辨。较低的 RBW 虽然对不同频率信号的分辨有益，但是低

的 RBW 将滤除较高频率的信号成分，导致信号显示时产生失真，失真程度与设定的 RBW 密切相关，且会增加测量的扫频时间。较高的 RBW 固然有助于宽频带信号的侦测，但会降低测量灵敏度，对测量低强度的信号产生极大影响。因此，适当的 RBW 带宽是正确使用频谱分析仪的关键，实验中设定为 500 Hz。重要参数之二是视频带宽 VBW，视频带宽的设定只是为了观察方便，对实验测量结果没有影响，将其设定为 30 Hz，此值可以最大消除频谱底噪。

通常根据公式(5)来计算频谱仪的分辨率带宽^[10]：

$$\tau_d \cdot \frac{\Delta f_{\min}}{0.318} = \frac{nL}{c} \cdot \frac{\Delta f_{\min}}{0.318} > 3 \quad (5)$$

实验中使用的光纤延迟线 FDL 长度 L 为 20 km，折射率为 1.46，真空中光速为 3×10^8 m/s，经过计算，延迟线测量系统的最小分辨率约为 9.8 kHz，实际中频谱仪自动检测设定分辨率带宽为 9.1 kHz，与计算值基本相符^[9-11]。

如果频谱仪参数设置不合适，则屏幕上会出现如图 3 所示 -3 dB 处一个 10 kHz 的频谱信号。这个信号比较光滑，但仅仅为频谱仪的一个频响信号，并非真正的测试信号，应该通过优化参数解决。

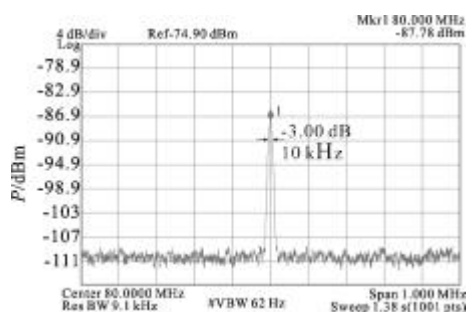


图 3 频谱仪频率响应谱线

Fig.3 Frequency response curve of spectrum analyzer

表 1 为频谱仪采样数据不同峰值所对应的频率和功率。对峰值数据点采用高斯曲线拟合如图 4 所示，最后找出 3 dB 功率带宽，测试结果为 161 kHz。测试如果对时间没有特定要求，把仪器分辨率带宽 RBW 最小可设置为 1 Hz，可视分辨率 VBW 带宽再调小以优化降低仪器本底噪声，得到的值应该更精确。

激光器线宽测试结果分析如图 4 所示，通过频谱分析仪测量电频谱的 3 dBm 带宽为 161 kHz，由于实验中存在精度误差，故所测激光器线宽真实值应该高于此值。

表 1 峰值数据点坐标

Tab.1 Peak data point coordinates

Item	Value				
Frequency/Hz	75 981 958	77 007 732	77 994 845	79 010 309	79 994 845
Power/dBm	-121.433 546	-122.687 17	-121.886 245	-122.896 111	-81.526 407 4
Frequency/Hz	80 981 958	81 981 958	82 981 958.8	83 997 422.7	85 000 000
Power/dBm	-127.736 506	-123.905 978	-120.458 503	-125.716 773	-123.697 04

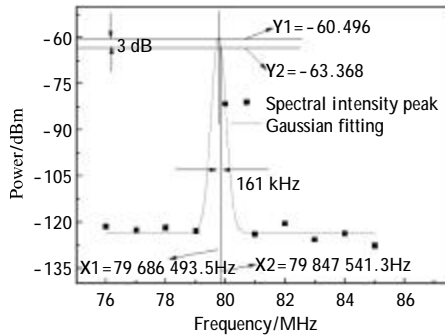


图 4 频谱仪测光电流功率谱曲线

Fig.4 Photocurrent power spectral curve by SA testing

3 结论

基于自延时外差法搭建窄线宽激光器线宽测量平台,通过采用 20 km 的延时光纤以及声光调制器移频,对频谱仪测量参数进行优化选择设置,对测量功率谱进行拟合,最后得到窄线宽单纵模激光器线宽为 161 kHz。这一测量方法,对于光学测量和光通信领域提高系统精度、进行激光器性能快速评测都有十分重要的作用。

参考文献:

- [1] Yang Xiufeng, Jia Guoqiang, Tong Zhengrong, et al. Narrow line width fiber laser measurement line width of the research [J]. *Optical Communication Technology*, 2012, 36(7): 4-6. (in Chinese)
- [2] He X, Fang X, Liao C, et al. A tunable and switchable single longitudinal mode dual wavelength fiber laser with a simple linear cavity [J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 21773-21781.
- [3] Tian Pengfei, Sun Xinxin. Single longitudinal mode and narrow linewidth fiber lasers [J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2010(5): 16-19. (in Chinese)
- [4] Takakura T, Iga K, Tako T. Linewidth measurement of a single longitudinal mode AlGaAs laser with a Fabry-Perot interferometer [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1980, 19(12): 725-727.
- [5] Okoshi T, Kikuchi K, Nakayama A. Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum [J]. *Electronics Letters*, 1980, 16(16): 630-631.
- [6] Richter L E, Mandelberg H I, Kruger M S, et al. Linewidth determination from self-heterodyne measurements with subcoherence delay times [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1986, 22(11): 2070-2074.
- [7] Xie Donghong, Deng Dapeng, Guo Li, et al. Linewidth measurement method of narrow line width lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 010006. (in Chinese)
- [8] Gallion P B, Debarge G. Quantum phase noise and field correlation in single frequency semiconductor laser systems [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1984, 20(4): 343-349.
- [9] Shi Hanxing, Wu Tie. Basic requirements of the delayed self-heterodyne spectrum measurement system [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 1997, 20(2): 55-60. (in Chinese)
- [10] Xiao Huaju, Wang Xiang, Ma Yun, et al. Linewidth measurement of narrow fiber laser based on the DSHI [J]. *Optic-Electronic Engineering*, 2010, 37(8): 57-61. (in Chinese)
- [11] Jia Yudong, Ou Pan, Yang Yuanhong, et al. Short fiber delayed self-heterodyne interferometer for ultra-narrow laser linewidth measurement [J]. *Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, 34(5): 568-571. (in Chinese)