短光纤延时自外差法测量窄线宽激光器线宽

贾豫东 欧 攀 杨远洪 张春熹

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘 要: 从理论上分析推导了移频延时自外差法测量激光器线宽的基本原理,并采用延时自外差法数学模型,编写了仿真程序. 借助此分析结果,通过对两台已知线宽的窄线宽激光器的实际测量数据,与仿真结果对比,验证了模型的正确性. 在此基础上,提出了短光纤延时自外差法,采用该方法可以在延时光纤长度远小于 6倍的激光器相干长度时,消除延时自外差法因为延时时间不够导致测量精度的大幅度下降这一缺陷,为工程上实现精确测量窄线宽激光器线宽提供了行之有效的方法.

关 键 词: 激光器; 线宽测量; 短光纤延时自外差法

中图分类号: TN 248

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)05-0568-04

Short fibre delayed self-heterodyne interferometer for ultranarrow laser linewidth measurement

Jia Yudong Ou Pan Yang Yuanhong Zhang Chunxi

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Ultranarrow laser linewidth measurement using an shorter delay fibre to realize delayed self-heterodyne interferometer was described. The fundamental using delayed self-heterodyne to measure laser linewidth was analyzed, and the emulator was programmed based on the mathematical module. An experimental setup was constructed to measure subkilohertz laser linewidths, the experimental results agree well with the emulational result. On the basis analysis, the method of short fibre delayed self-heterodyne were presented and analyzed. By using the method, the measure error can be decreased greatly when the length of delay fibre shorter than six times laser's coherence length. It is proved that method is an effective tool for measuring an ultranarrow laser linewidth, and it can reduce the length of fibre.

Key words: ultrannarrow laser; linewidth measurement; short fibre delayed self-heterodyne

单频激光器是近年来激光器的发展方向之一,它主要应用于激光雷达、光通信、引力波测量、高分辨率光谱测量以及量子光学中压缩态研究等许多领域. 频带宽度是光源单色性的量度,单色性越好,相干时间越长. 因此,精确测量这些激光器的线宽对于评价单频激光器的性能很有必要. 通常对窄线宽激光器测量线宽,采用的方法有 F-P 干涉仪法和外差法. 但是目前公布的窄线宽激光器参数,线宽已小于 kHz量级,测量如此窄的线宽, F-P干涉仪分辨率显得不够.

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. 1980年文献 [1]中提出了光纤延迟自外差法,采用一个激光器,分光产生两路延时不同的光进行自外差,测量线宽. 1986年,文献 [2]在文献 [1]方案的基础上采用声光调制器 AOM (Acousto-Optic Modulator)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,同时通过公式证明了只有当 $\tau_d \gg \tau_c$ (τ_d 为光纤延时时间, τ_c 为激光器相干时间),光电流的频谱才能精确反映被测激光器的线宽的结论. 然而根据文献 [2]的计算结果, τ_d 至少要为 $6\tau_c$. 对于目前大量使用的

收稿日期: 2007-04-27

作者简介: 贾豫东 (1975 -),男,甘肃庆阳人,博士生, jyd_blueeye@126.com.

10 kH量级线宽的激光器而言, $\tau_c = 1/10^4$ s,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. 本文在文献[2]的基础上,提出了一种短光纤延时自外差法,采用较短光纤延时线,达到精确测量线宽的目的,采用该方法,可以有效降低光纤延时线长度.

1　移频延时自外差法理论分析

外差探测所用的探测器,只要光谱响应和频率响应合适,原则上和直接探测所用的光电探测器相同[2]. 假定同方向到达且同偏振方向的信号光束和本机振荡光束的电场分别为

$$e_s(t) = E_s \cos(\omega_s t + \phi_s) \tag{1}$$

$$e_L(t) = E_L \cos(\omega_L t + \phi_L) \tag{2}$$

式中, ω_s 和 ω_L 分别为信号光和本振光角速度; ϕ_s 和 ϕ_L 分别为信号光和本振光相位; E_s 和 E_L 分别为信号光和本振光振幅; t 为时间变量. 由光电探测器平方律特性,其输出光电流[3]为

$$i = \alpha [e_s(t) + e_L(t)]^2 \tag{3}$$

式中, α 为光电转换系数. i 经过有限带宽的中频放大器,直流项被滤除,只剩下中频交流分量:

$$i_{IF} = \alpha E_s E_L \cos[\omega_{IF} t + (\phi_s - \phi_L)] \tag{4}$$

式中, ω_{IF} 为中频交流分量角速度. 由于激光的相干性问题,单模激光可以认为是一个有相位扰动振幅稳定的准单色电磁场. 故式(4)可表示为

$$i_{IF} = \alpha E_s E_L \cos\{\omega_{IF} + [\phi_s(t) - \phi_L(t)]\} \tag{5}$$

式中, $\phi_s(t)$ 和 $\phi_L(t)$ 分别为信号光和本振光相位的随机波动,它导致线宽展宽[3].

图 1中,激光器输出经过隔离器输入耦合器 1,然后分两路,一路通过光纤环延时后送入耦合器 2;另一路通过 AOM,送入耦合器 2,两路光通过探测器混频后,差频电信号送入频谱分析仪.

取 $\omega_L = \omega_s + \Omega$, Ω 为声光移频器频移量,则经隔直输入频谱仪的信号为

$$i_{IF} = p_0 \cos[-\Omega t + (\omega + \Omega)\tau_d + \phi_s(t) - \phi_s(t - \tau_d)] \tag{6}$$

式中, p_0 为被测交流分量振幅; ω 为被测交流信号角速度偏移量.

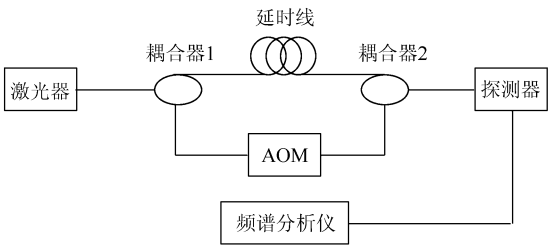


图 1　移频延迟自外差法组成框图

整个实验装置稳定工作后,短期内光电探测器光电流相位波动可看作为高斯平稳随机过程. $\phi_s(t) - \phi_s(t - \tau_d)$ 的随机波动将转化为强度噪声,反映为 i_{IF} 的频谱展宽,为了得到光电流的功率谱,引进光电流自相关函数[2]:

$$R_i(\tau) = \frac{1}{2} p_0^2 \cos(\Omega\tau) \exp\left(-\frac{\tau_d}{\tau_c}\right) \tag{7}$$

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

$$S(\omega, \tau_d) = \frac{\frac{1}{2} p_0^2 \tau_c}{1 + (\omega \pm \Omega)^2 \tau_c^2} \left\{1 - e^{-\tau_d/\tau_c} \cdot \left[\cos(\omega \pm \Omega)\tau_d + \frac{\sin(\omega \pm \Omega)\tau_d}{(\omega \pm \Omega)\tau_c}\right]\right\} + \frac{1}{2} p_0^2 \pi e^{-\tau_d/\tau_c} \delta(\omega \pm \Omega) \tag{8}$$

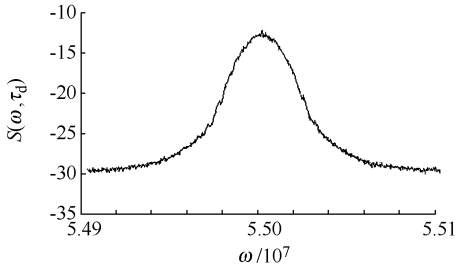
式中, $\delta(\omega + \Omega)$ 为脉冲函数.

2　延时自外差法仿真及实验对比

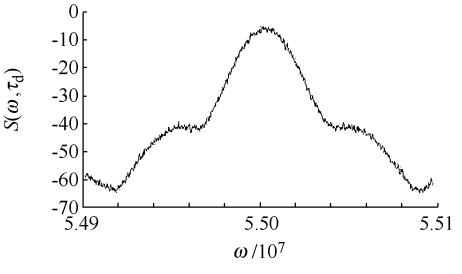
设计试验装置如图 1.

光纤延时线为 25 km 长的单模光纤, τ_d = 125 μs,耦合器 1和 2为单入双出型,分光比为 1∶1; AOM为上移频 55MHz的声光移频器;探测器为跨阻 40 kΩ的 PNFET器件. 整个试验装置放在一个箱子里,降低外界温度和声音的影响.

激光器源采用两个单频光纤激光器做对比测试, *A* 激光器线宽为 50 kHz; *B* 激光器线宽为 17 kHz,中心波长均为 1549. 9 nm. 采用上述测量装置,测得频谱图如图 2a和图 2b所示.



a　A激光器实测频谱



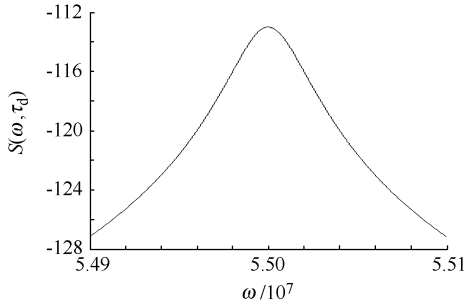
b　B激光器实测频谱

图 2　激光器移频延迟自外差法实测频谱

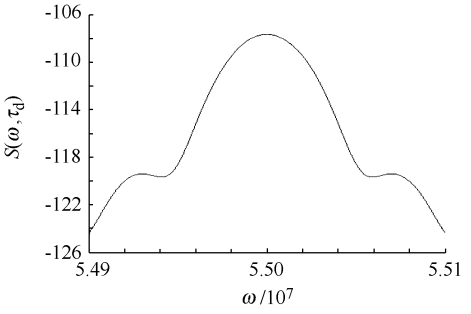
将试验参数代入仿真程序,得到仿真结果如图 3a和图 3b.

两组结果基本吻合.

根据上面移频延时自外差法理论分析,图 2中的实测不能精确反映激光器的线宽,线宽较窄的 *B* 激光器光纤延时线长度需达到 71 km,才能得到比较精确的线宽数值. 而以现在报道的线宽已突破 1 kHz的激光器,光纤延时长度将会达到惊人的上千公里左右,这显然会使整个测量方案很难得以实现. 因此,如何以较短的光纤达到长光纤的测量结果显得非常重要.



a A激光器仿真频谱



b B激光器仿真频谱

图 3 激光器移频延迟自外差法仿真频谱

3 短光纤延时自外差法实现

假设被测激光器线宽为 10 kHz,则 τ_c = 100 μs;采用 25 km 延时线,τ_d = 121.5 μs,$N = \tau_d / \tau_c$ = 0.823.将 3个参数代入仿真程序,同时取 τ_d / τ_c = 10作对比,由于此时 $\tau_d >> \tau_c$,功率谱呈现严格的洛仑兹谱线,结果如图 4所示. 两个结果反映了光纤延时线延时时间不足够长时,测量线宽 Δν比实际线宽 Δν宽了 2.5倍多,只能大致反映线宽的量级,精度误差太大.

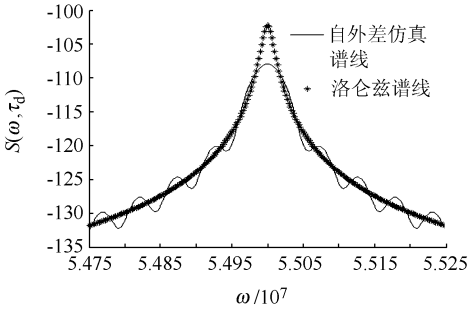


图 4 25 *km* 延时线对应功率谱密度曲线

按上述方法,选取光纤延时线长度为 25 km,分别选取 Δν范围从 2 kHz到 60 kHz,步进为 2 kHz的 29个频率点,换算出相应参数,代入仿真程序,得到如表 1所示结果.

表 1 25 km延时线 Δν与 Δν对照

Δν/kHz	2	4	6	8	10
Δν′/kHz	23.324	23.816	24.346	24.917	25.533
Δν/kHz	12	14	16	18	20
Δν′/kHz	26.196	26.910	27.677	28.500	29.382
Δν/kHz	22	24	26	28	30
Δν′/kHz	30.327	31.336	32.413	33.559	34.775
Δν/kHz	32	34	36	38	40
Δν′/kHz	36.063	37.423	38.855	40.355	41.923
Δν/kHz	42	44	46	48	50
Δν′/kHz	43.554	45.243	46.984	48.773	50.602
Δν/kHz	52	54	56	58	
Δν′/kHz	52.465	54.355	56.268	58.198	

对表 1的结果拟合做图,如图 5所示.

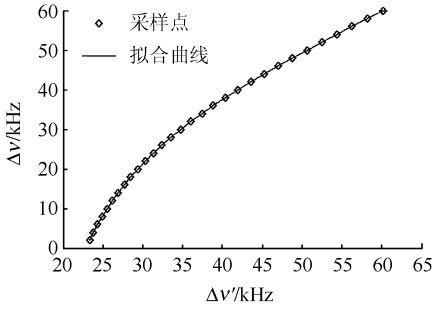


图 5 光纤延时线长度与对应线宽拟合曲线

通过对多项式、高斯、幂、有理式 4种常见模型进行拟合,发现采用三阶拟合即可达到较好的效果,在此基础上对 4种模型的三阶拟合做了对比 (幂函数到二阶),结果如表 2所示. 选取以下 3个统计量评价参数模型的拟合优度,误差平方和 (SSE)、R的平方和 (R-square)、均方误差的根 (RMSE)[4].

表 2 4种数学模型三阶拟合优度对比

统计量	多项式	高斯	幂	有理式
SSE	5.112	19.47	10.83	0.005257
R-square	0.9994	1	0.9988	1
RMSE	0.4434	0.005786	0.6334	0.0145

从表 2可以看出,有理式模型的拟合效果最好,精度最高,其它 3种结果相差不大. 从算法的实现角度而言,多项式模型最简. 因此可以根据实

际情况进行选取. 本文选取三阶有理式进行参数拟合,可得 $\Delta\nu'$ 与 $\Delta\nu$ 的拟合对应函数为

$$\Delta\nu = [0.002321\Delta(\nu')^3 + 0.5066\Delta(\nu')^2 + 23.2\Delta\nu' - 822.4]/(\Delta\nu' - 11.62) \quad (9)$$

例如用 25 km 延时线测量得到的 3 dB 谱宽为 25 kHz,则可推算出 $\Delta\nu'$ 为 8.2156 kHz,用 6倍相干长度光纤延时仿真得到的数据为 8.324 kHz,两者误差 108 Hz,误差比率仅为 1.2%.

4 结 束 语

本文从理论上分析推导了移频延时自外差法测量激光器线宽的基本原理,与文献[2]的结果完全吻合;并采用文献[2]给出的数学模型,编写了仿真程序. 通过对两台已知线宽的窄线宽激光器的实际测量数据,与仿真结果对比,验证了模型的正确性. 在此基础上,首次提出了短光纤延时自外差法,采用该方法可以在延时光纤长度远小于6倍的激光器相干长度时,消除延时自外差法因为延时时间不够导致测量精度的大幅度下降这一缺陷. 为工程上实现精确测量窄线宽激光器线宽提供了行之有效的方法. 应该注意的是,对应所选取的光纤延时线长度,该方法有测量的极限,以式(9)为例,3 dB 谱宽小于 22.324 kHz,拟合值小于零,通过求解比例多项式,得到近零点为 22.39 kHz,即当谱宽小于此值,已无法准确推导出实际线宽.

参考文献 (References)

[1] Okoshi T, Kikuchi K, Nakayama A. Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum[J]. Electron Lett, 1980, 26: 630 - 631

[2] 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

[3] 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
An Yuying, Zeng Xiaodong[M]. Xi'an: Publishing House of Xi'an Electronic Science and Ttechnology University, 2004: 152 - 153 (in Chinese)

[4] 苏金明,阮沈勇,王永利. MATLAB工程数学[M]. 北京:电子工业出版社, 2005: 477 - 480
Su Jinming, Ruan Shenyong, Wang Yongli. MATLAB engineering maths[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 477 - 480 (in Chinese)

[5] Namkyoo Park, Dawson Jay W, Vahala Kerry J. Linewidth and frequency jitter measurement of an erbium-doped fiber ring laser by using a loss-compensated delayed self-heterodyne interferometer[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1992, 4(9): 1063 - 1066

[6] Chen Xiaopei, Han Ming, Zhu Yizheng, et al. Implementation of a loss-compensated recirculating delayed self-heterodyne interferometer for ultranarrow laser linewidth measurement[J]. Applied Optics, 2006, 45(29): 7712 - 7717

(责任编辑:刘登敏)

(上接第 567页)

[3] Shulmeister V, Van der Burg M W D, Van der Giessen E, et al. A numerical study of large deformations of low-density elatomeric open-cell foams[J]. Mech Mater, 1998, 30(2): 125 - 140

[4] Zhu H X, Hobdell J R, Windle A H. Effect of cell irregularity on the elastic properties of open-cell foams[J]. Acta Mater, 2000, 48(20): 4893 - 4900

[5] Zhu H X, Windle A H. Effects of cell irregularity on the high strain compression of open-cell foams[J]. Acta Mater, 2002, 50(5): 1041 1052

[6] Zhang Jialei, Lu Zixing. Numerical modeling of the compressive deformation process of elastic open-cell foams[J]. Chinese Journal of Aeronautics(English Edition), 2007, 20(3): 215 - 222

[7] 卢子兴,张家雷,王嵩. 各向异性随机泡沫模型的弹性性能分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(12): 1468 - 1471
Lu Zixing, Zhang Jialei, Wang Song. Investigation into elastic properties of anisotropic random foam model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(12): 1468 - 1471 (in Chinese)

[8] Gong L, Kyriakides S. Compressive response of open-cell foams. Part I: Morphology and elastic properties[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(5 - 6): 1355 - 1379

[9] Schraad M W, Harlow F H. A stochastic constitutive model for disordered cellular materials: finite-strain uni-axial compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(11 - 12): 3542 - 356

[10] 卢子兴,田常津. 关于泡沫塑料各向异性模型的修正[J]. 应用力学学报, 1996, 13(4): 108 - 111
Lu Zixing, Tian Changjin. Modification of anisotropic model for foam plastics[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1996, 13(4): 108 - 111 (in Chinese)

[11] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: structure and properties[M]. 2nd ed. London: Cambridge Univeity Press, 1997

(责任编辑:娄　嘉)