

短光纤延时自外差测量单频激光器频率漂移

段洪成^{1,2} 吴 谨¹ 赵志龙^{1,2} 吴曙东^{1,2}

¹中国科学院电子学研究所, 北京 100190

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于光纤延时自外差和相位解缠绕技术,提出了一种采用较短的光纤延时线测量单频激光器输出激光频率漂移的方法。从理论上给出了该测量方法的工作原理并分析了测量精度的影响因素;利用一台频率变化可知的激光器对该方法进行了实验验证,实验结果表明该方法能够准确测量激光频率随时间的实际变化曲线;基于此方法,采用6 m的光纤延时线,对一台1550 nm波长的单频激光器频率漂移特性进行了3 h连续测量,得到该激光器长期频率漂移结果为75 MHz/h,与其频率稳定度出厂指标50 MHz/h基本相符。

关键词 激光器; 频率漂移; 光外差探测; 相位解缠

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0702008

Frequency Drift Measurement on Single-Frequency Laser by Short Fiber Delayed Self-Heterodyne

Duan Hongcheng^{1,2} Wu Jin¹ Zhao Zhilong^{1,2} Wu Shudong^{1,2}

¹*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract Based on delayed self-heterodyne and phase unwrapping techniques, a new approach to measure the frequency drift of a single-frequency laser by adopting relatively shorter fiber delay lines is proposed. The working principle and factors affecting the measurement accuracy of this method are given in theory. A laser that we can get the function of the frequency fluctuation easily is used to test the presented method. The experimental result demonstrates that the actual curve between laser frequency and time can be acquired accurately by this method. Then the frequency drift characteristic of a 1550 nm wavelength laser is measured by this method with a 6 m fiber delay line in 3 h continuously, resulting in the long-term frequency drift of 75 MHz/h, which is consistent basically with the nominal frequency stability 50 MHz/h.

Key words lasers; frequency drift; optical heterodyne detection; phase unwrapping

OCIS codes 140.3460; 140.3510; 140.3570; 060.2840

1 引 言

单频激光器因其具有光束质量好、相干长度长、谱线宽度窄等优点,在激光多普勒测风雷达、激光遥感、激光陀螺、光频标准和相干光通信等众多领域中得到了广泛的应用^[1-6]。在这些应用领域,激光器不仅要求为单纵模输出,还需要有很高的频率稳定度^[7-8]。例如,激光多普勒测风雷达要达到0.5 m/s的测量精度,单频激光源频率漂移量须小于1 MHz。但是,单频激光器的频率稳定度,尤其是长时间的稳定度一般并不好。由于多种因素的影响(如温度、机械振动等),单频激光器的工作频率是随时间变化的。这种现象,称为激光器

收稿日期: 2015-02-02; 收到修改稿日期: 2015-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(61178071)

作者简介: 段洪成(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光多普勒振动检测技术方面的研究。

E-mail: hongchengduan@126.com

导师简介: 吴 谨(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光雷达技术与系统、脉冲气体激光器等方面的研究。

E-mail: jwu909@263.net

输出频率漂移。

对单频激光器频率漂移特性的测量,常见的方法有直接测量法、拍频法^[9-11]、频率标准参考具法^[14-16]和自外差法^[17-21]等。直接测量法是利用光谱分析仪直接测量激光器的输出频率,其测量精度受到光谱分析仪频率分辨率的限制;拍频法通常利用一台频率相同的激光器与待测激光器进行光外差混合产生拍频^[9-11],由频谱分析仪分析拍频信号,得到待测激光器相对于另外一台激光器的频率稳定度。这种方法,拍频信号的频率不稳定性来源于两台激光器。因此,拍频法需要一台与待测激光器相比具有更高稳定度的参考激光器^[12-13]。其他利用频率标准参考具如光频梳^[14]、光电子振荡器^[15]、法布里-珀罗(F-P)谐振腔^[16]等方法,不需要引入稳定度很高的激光器作为频率参考,可以在光频域直接测量激光器的频率漂移。但是,频率测量范围局限在标准具谐振半宽范围内。

近年来更多研究人员利用光纤延时自拍法,测量单频激光器的频率漂移特性(频率稳定度)^[17-21]。2000年,Izawa等^[19]报道了该方法对2 μm Tm, Ho:YLF激光器短期稳定度测量的研究,实验中采用300 m的光纤,延时1.5 μs。2008年,鞠有伦等^[20]利用光纤延时自拍法对同类型号激光器的短期不稳定性进行了测量,获得了不同光纤延时长度和积分时间下的自拍频信号,得出频率不稳定性测量结果。2014年,Zhi等^[21]利用光纤延时自零差的方法,测量了分布式反馈(DFB)光纤激光器,以外差光电流的形式给出了100 s内的频率漂移特性曲线,并分析了测量精度与光纤延时线长度的关系。

相较而言,光纤延时自外差法具有测量精度高、系统简单等优点。但是,为达到足够高的测量精度,该方法往往采用几百米甚至上千米的光纤延时线,而过长的光纤延时线会带来激光信号的不稳定和衰减,有时还需加入光放大器以增强待测激光信号。

本文在光纤延时自外差方法的基础上,提出了一种利用双外差信号的相位差及相位解缠绕技术,测量单频激光器频率漂移特性的方法。该方法可以利用较短的光纤延线实现对单频激光频率漂移特性的快速或长时间连续监测,原理简单,实现方便,既能实现高精度测量,又可大大降低光纤延时线长度。

2 测量原理

短光纤延时自外差法测量单频激光器频率漂移的实验装置如图1所示。

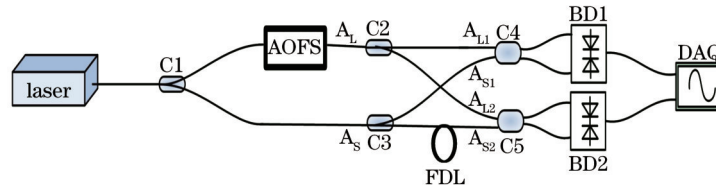


图1 单频激光器输出频率漂移测量装置示意图

Fig.1 Experimental setup of frequency drift measurement on single frequency laser

图1中,待测激光器输出激光经光纤分束器C1分成两束,其中一束通过声光移频器(AOFS)移频(称为本征光),另一束直接在光纤中传输(称为信号光)。本征光和信号光分别再次经过1×2的3 dB光纤分束器C2、C3分成两束,两束信号光中的一束在光路中加入长度可调的光纤延时线FDL。四束光两两经2×2的3 dB光纤耦合器C4、C5耦合输出后,分别由平衡外差探测器BD1、BD2转化为电信号,再由数据采集和处理系统(DAQ)进行采集、处理和输出显示。

设单频激光器输出光场表示为

$$A(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

式中 A 、 f_0 、 φ_0 分别为激光振幅、频率和初相位。

设本征光L和信号光S传输到两平衡探测器BD1、BD2光敏面延时时间分别为 t_{L1} 、 t_{L2} 和 t_{S1} 、 t_{S2} , 则其接收的混合光场可分别表示为

$$\begin{cases} A_1(t) = A_{L1} \cos[2\pi(f_0 + f_M)(t - t_{L1}) + \varphi_0] + A_{S1} \cos[2\pi f_0(t - t_{S1}) + \varphi_0] \\ A_2(t) = A_{L2} \cos[2\pi(f_0 + f_M)(t - t_{L2}) + \varphi_0] + A_{S2} \cos[2\pi f_0(t - t_{S2}) + \varphi_0] \end{cases} \quad (2)$$

式中 f_M 为声光移频器频移量。

平衡光电探测器输出射频光电流分别为^[22]

$$\begin{cases} i_1(t) = M\alpha A_{11} A_{s1} \cos\{2\pi[f_M t + f_0(t_{s1} - t_{11}) - f_M t_{11}]\} \\ i_2(t) = M\alpha A_{12} A_{s2} \cos\{2\pi[f_M t + f_0(t_{s2} - t_{12}) - f_M t_{12}]\} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 M 、 α 分别为平衡探测器的放大倍率和光电转换效率。

两光电流信号相位差：

$$\Delta\varphi = \text{angle}[i_2(t)] - \text{angle}[i_1(t)] = 2\pi[f_0(t_{s2} - t_{s1} + t_{11} - t_{12}) + f_M(t_{11} - t_{12})], \quad (4)$$

式中函数 $\text{angle}(\cdot)$ 表示取相位(角度)。

令 $\Delta t = t_{s2} - t_{s1} + t_{11} - t_{12}$, $\Delta\tau = t_{11} - t_{12}$, (4)式可简化为

$$\Delta\varphi = 2\pi(f_0\Delta t + f_M\Delta\tau). \quad (5)$$

由(5)式可得

$$\delta(\Delta\varphi) = 2\pi[\delta(f_0)\cdot\Delta t + f_0\cdot\delta(\Delta t) + \delta(f_M)\cdot\Delta\tau + f_M\cdot\delta(\Delta\tau)], \quad (6)$$

式中 $\delta(\cdot)$ 表示变化量。由(6)式可以看出, $\Delta\varphi$ 的变化量由四个部分组成: 激光频率 f_0 漂移、移频器频移量 f_M 漂移及两个光学延时的变化。

首先考虑引入声光移频器对测量精度的影响, 即估算(6)式后两项对相位差变量的贡献。移频器件驱动频率 f_M 由电子学方法产生, 一般为几十兆赫兹, 稳定度很高, 达 10^{-5} 。而在光学系统中, 一般容易满足下列条件:

$$\begin{cases} (c\Delta\tau/n) \ll 1 \text{ mm} \\ \delta(\Delta\tau)/\Delta\tau \ll 10^{-5} \end{cases}, \quad (7)$$

式中 c 为真空中光速, n 为光纤折射率。

例如, 如果 $f_M = 55 \text{ MHz}$, $\delta(f_M)/f_M = 5 \times 10^{-5}$, $c\Delta\tau = 0.5 \text{ mm}$, $\delta(\Delta\tau)/\Delta\tau = 10^{-6}$, 则有

$$\begin{aligned} 2\pi|\delta(f_M)\cdot\Delta\tau + f_M\cdot\delta(\Delta\tau)| &\leq 2\pi[|\delta(f_M)\cdot\Delta\tau| + |f_M\cdot\delta(\Delta\tau)|] = \\ &2\pi \times 55 \times 10^6 \times \frac{0.5 \times 10^{-3}}{3 \times 10^8} (5 \times 10^{-5} + 1 \times 10^{-6}) \approx 2.94 \times 10^{-8} \text{ rad}. \end{aligned} \quad (8)$$

可见与 f_M 有关的部分对相位差 $\Delta\varphi$ 的变量贡献很小, 可忽略不计。因此, (6)式可化简为

$$\delta(\Delta\varphi) = 2\pi[\delta(f_0)\cdot\Delta t + f_0\cdot\delta(\Delta t)] = 2\pi f_0\cdot\Delta t \left[\frac{\delta(f_0)}{f_0} + \frac{\delta(\Delta t)}{\Delta t} \right]. \quad (9)$$

下面进一步讨论光纤延时线的稳定性[即 $\delta(\Delta t)$]对频率漂移量测量精度的影响。

光纤延时线一般放置在隔震装置中, 其长度变化主要受温度的影响, 即有

$$\frac{c\cdot\delta(\Delta t)}{c\cdot\Delta t} = \alpha\cdot\delta T, \quad (10)$$

式中 α 为光纤的热膨胀系数, 常温下, 一般有 $\alpha \leq 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; δT 代表温度的变化量。

在实际测量系统中, 可将光纤延时线置于恒温环境中。如果恒温环境温度为 $T=298 \text{ K}$, 1 h 内光纤延时线环境温度变化为 $\delta T=0.1 \text{ K}$, 采样间隔为 0.1 ms , 则有

$$\frac{c\cdot\delta(\Delta t)}{c\cdot\Delta t} = \alpha\cdot\delta T \leq 10^{-6} \text{ K}^{-1} \times 0.1 \text{ K} \times \frac{0.1 \text{ ms}}{3600 \text{ s}} \approx 2.8 \times 10^{-15}. \quad (11)$$

一般单频激光器的频率不稳定性 $\delta(f_0)/f_0 \gg 10^{-14}$, 即满足条件:

$$\delta(f_0)\cdot\Delta t \gg f_0\cdot\delta(\Delta t), \quad (12)$$

因此, (9)式可进一步写成

$$\delta(\Delta\varphi) = 2\pi\cdot\delta(f_0)\cdot\Delta t, \quad (13)$$

即相位差变化量只与激光器频率漂移量有关。另外, 从(13)式还可以看出, 光纤延时线长度越长(即 Δt 越大), 对激光频率的变化越敏感。

在连续变化的相位关系中, 如果相邻采样点的相位变化在 $[-\pi, \pi]$ 之间, 利用 `unwrap` 函数相位解缠绕后可准确恢复相位随时间的变化趋势^[23]。即, 光纤延时线长度 L 需满足:

$$L \leq \frac{c}{2n|\delta(f_0)|_{\max}}, \quad (14)$$

式中 n 为光纤折射率, $|\delta(f_0)|_{\max}$ 为相邻采样点之间激光器输出频率的最大变化量。

此时,对于得到的离散相位值 $\Delta\varphi_0$,经 `unwrap` 函数处理,也可准确恢复其随时间变化曲线,表示为

$$\Delta\varphi(t) = 2\pi f_0(t) \cdot \Delta t + \Delta\varphi_0, \quad (15)$$

式中 $\Delta\varphi_0$ 为一个未知常数,其值不影响整个曲线的变化趋势。因此,(15)式准确地反映了激光器输出频率随时间漂移的规律。

3 实验验证

由于单频激光器的频率漂移本质上是激光频率随时间推移发生的缓慢变化,因此利用一台频率变化可知的激光器可以验证上文提出的测量方法的可行性,实验装置如图2所示。

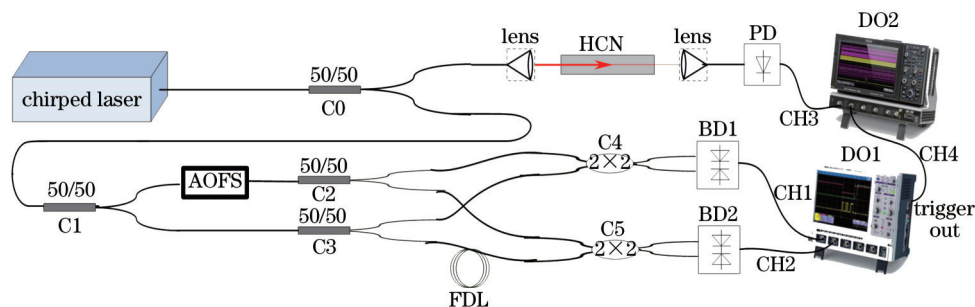


图2 单频激光器频率漂移测量实验验证装置图

Fig.2 Verification setup of frequency drift measurement on single frequency laser

图2中,待测激光器为一台调谐激光器,输出波长可以 1 nm/s 的速度从 1525 nm 变化至 1565 nm ,其频率变化用来模拟单频激光器的“频率漂移”;HCN 气体吸收池(吸收峰波长范围 $1525 \sim 1565 \text{ nm}$)用于监测该激光器的频率随时间的变化;声光移频器的射频驱动频率 $f_m = 55 \text{ MHz}$,稳定度为 1.5×10^{-5} ;C0 ~ C3 为四个 1×2 光纤分束器、C4 和 C5 为两个 2×2 光纤耦合器,每个 1×2 光纤分束器的两个输出臂近似等长(长度差小于 1 mm),每个 2×2 光纤耦合器的两个输入臂和两个输出臂也分别近似等长(长度差小于 1 mm);FDL 为 Oz Optics 公司生产光纤延迟线,型号为 ODL-200,可手动调节间距为 $0 \sim 25 \text{ mm}$,分辨率为亚微米量级(小于 0.003 ps);BD1、BD2 分别为 InGaAs PIN 平衡外差光电探测器。

待测激光器输出激光经光纤分束器 C0 分为两路:其中一路光通过 $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ 气体吸收池,输出光经光电二极管 PD 接收,得到的激光输出波长吸收峰谱线由示波器 DO2 显示和记录,以此作为该激光器输出激光频率随时间变化标准;另一路光按图1所示光路传输,由示波器 DO1 采集两路光外差信号,用于测量相位差 $\Delta\varphi$ 随时间变化曲线。为保证两示波器同步采集,DO1 示波器的触发输出信号作为 DO2 示波器的触发信号。

实验中,激光器产生的频率变化速度为 1 nm/s ,相位差采样时间间隔为 $\delta t = 0.15 \text{ s}$,相应的激光漂移量为 $\delta(f_0) = \frac{c}{\lambda^2} \frac{d\lambda}{dt} \delta t = \frac{3 \times 10^8}{(1.55 \times 10^{-6})^2} \times 1 \times 10^{-9} \times 0.15 \approx 18.7 \text{ GHz}$ 。为满足(13)式条件,要求光纤延时线长度 $L \leq 5.35 \text{ mm}$,对应的光纤延时差 Δt 不能超过 26.75 ps 。通过调节光纤延时线长度,可使之满足上述要求。

实际的光纤延时差 Δt 值可以通过两路外差信号进行测量。因为激光器的波长是线性变化的,当时间间隔很小时,激光器频率变化也近似线性。将两路外差信号做差频(直接用示波器完成),差频信号的频率将为 $k\Delta t$,其中 k 为调频率。

图3为通过示波器记录的两个相邻吸收峰谱线和差频信号。选择的吸收峰位置为 R6 线(对应波长 1537.90675 nm)和 R5 线(对应波长 1538.52305 nm)。利用图3的数据,可得到 $\Delta t \approx 23 \text{ ps}$,符合不超过 26.75 ps 的要求。

图4(a)为示波器 DO2 实际测得吸收峰谱线,将其与 $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ 标准吸收峰谱线^[24]对照,得到的激光器实际输出频率随时间变化曲线,如图4(b)所示。图4(b)中,蓝线(*)为实际测算得出曲线,红线(-)为线性拟合曲线。实验时,激光器输出波长设置为以 1 nm/s 的速度线性变化。从图4(b)可以看出,利用 $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ 气体吸收池,测量得到的激光频率变化率为 $k_1 = -1.3 \times 10^{11} \text{ Hz/s}$ 。

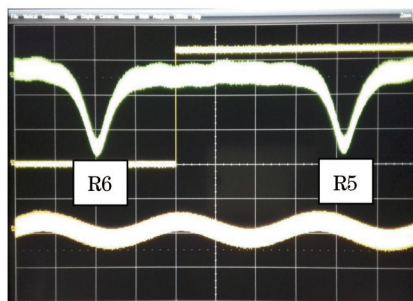


图3 示波器记录相邻两个连续吸收峰信号

Fig.3 Oscilloscope recording of two successive absorption lines

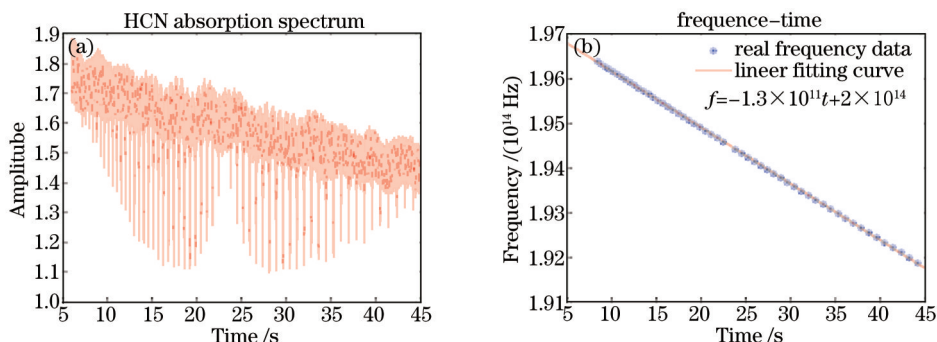


图4 实测吸收峰谱线(a)和对应激光频率(b)

Fig.4 Measured $H^{13}C^{14}N$ absorption spectrum (a) and the corresponding laser frequencies (b)

将示波器 DO1 采集到的两路光外差信号分别作希尔伯特变换后直接提取相位信息,经线性拟合处理得到初相位。两初相位差值经 `unwrap` 函数处理,得到相位差随时间变化曲线,如图 5(a)所示。图 5(b)是由图 5(a)数据根据(15)式计算得到的激光器输出频率变化曲线,其中,粗线(绿色)为激光频率曲线,细线(红色)为线性拟合曲线,拟合曲线斜率 $k_2 = -1.3 \times 10^{11}$ Hz/s,与图 4(b)中 $H^{13}C^{14}N$ 吸收池测量得到的结果相同。因此,利用短光纤延时自外差与相位差解缠绕的方法,可以测量单频激光器的输出频率随时间的变化规律。

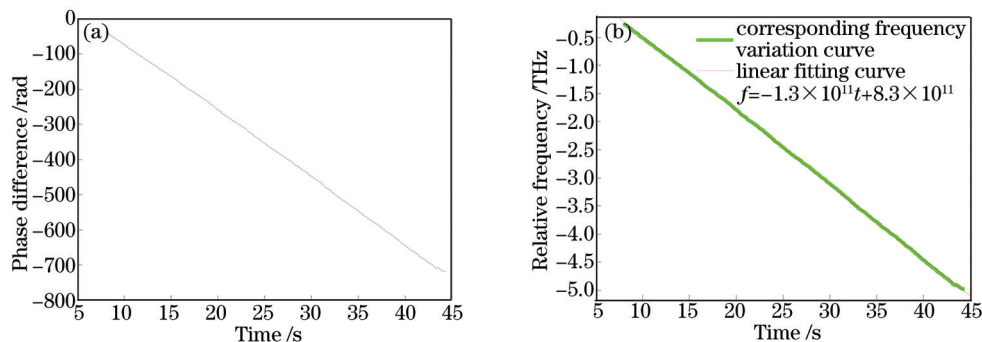


图5 相位差变化曲线(a)和相应的激光频率变化曲线(b)

Fig.5 Unwrapped phase difference $\Delta\varphi$ (a) and the corresponding laser frequencies (b)

4 单频激光器频率漂移实测

按图 1 所示,搭建了单频激光器频率稳定度测量装置。其中,光纤延时线长度为 6 m,即相邻相位差采样点之间的最大频率变化量为 16.7 MHz。待测激光器为美国 NP Photonics 公司生产的 Rock 系列窄线宽光纤激光器,激光器出厂参数为激光波长 1550.050 nm,洛伦兹线宽为 4.2 kHz,频率稳定度为 50 MHz/h。

图 6 为对激光器短期(1 ms)频率稳定度测量的结果,采样时间间隔 20 μ s。其中,图 6(a)为测量得到外差信号相位差变化曲线,图 4(b)为相应的激光频率变化曲线。

从图 6(b)可以看出,该激光器在 1 ms 时间内频率变化很小,约为 200 kHz,表明激光器有较高的短期频率稳定度。另外,从图 6(b)还可以看出,在短时间内观察,测量得到的激光器输出频率变化围绕平均值呈现一

定的随机性。

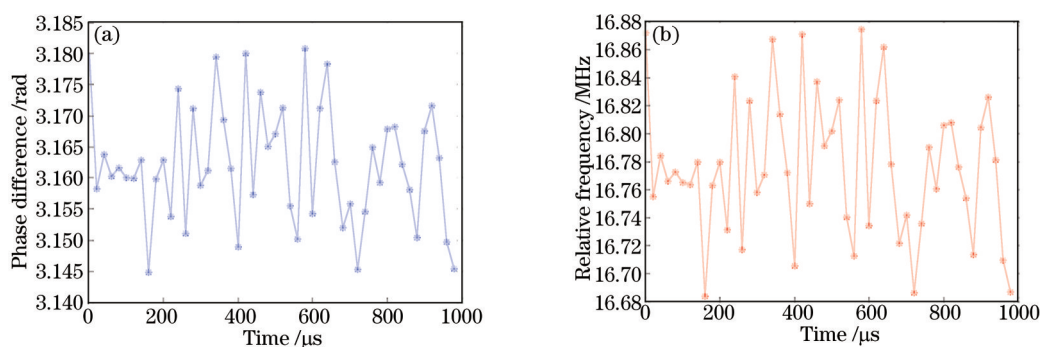


图6 1 ms内相位差变化曲线(a)和对应的激光频率变化曲线(b)

Fig.6 Unwrapped phase difference (a) and the corresponding laser frequency drift (b) in 1ms

图7为从该激光器开机开始连续测量3 h得到的结果,采样时间间隔2 s。图7(a)为相位差变化曲线,图7(b)为相应的激光频率漂移特性曲线。

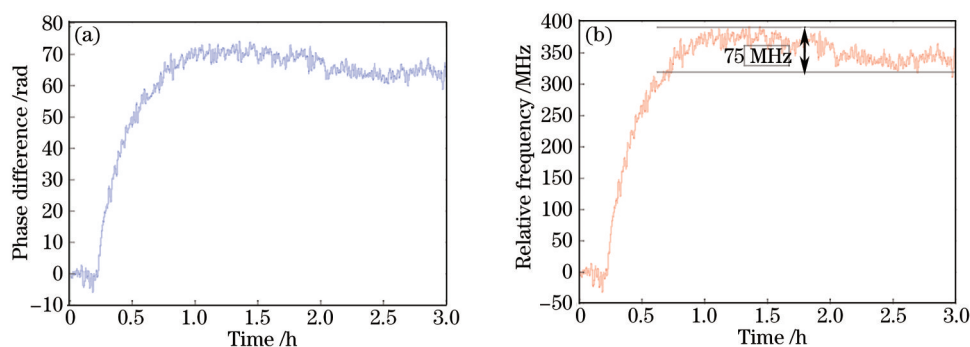


图7 3 h内相位差变化曲线(a)和对应的频率漂移曲线(b)

Fig.7 Unwrapped phase difference (a) and the corresponding laser frequency drift (b) in 3 h

从图7(b)可以看出,激光器在刚开机前0.5 h内,频率漂移较大;之后,激光输出频率变化明显变缓。这是因为激光器从开机到整个系统达到热平衡需要一段时间。由图7(b),这台激光器在当时实验环境下达到热平衡的时间需要约1 h。此外,根据图7(b)数据,后2 h内的频率漂移范围约为75 MHz,与激光器出厂指标参数50 MHz/h基本吻合。

从图6(b)和7(b)的测量结果看,短时间观察,激光器输出频率围绕平均值的随机波动;长时间观察,激光器输出频率漂移呈现某种规律性。

5 结 论

基于光纤延时自外差和相位解缠绕技术,提出了一种利用双光路外差信号相位分析测量单频激光器输出激光频率漂移的方法。给出了该测量方法的详细理论论述并分析了测量精度的影响因素。采用一个频率变化可通过HCN标准气体吸收池测量得到的线性调波长激光器,实验验证了该方法的可行性。搭建了基于该方法的单频激光器输出频率漂移测量系统,采用6 m的光纤延时长度,对一台频率稳定度出厂指标为50 MHz/h的窄线宽光纤激光器的短期(1 ms)和长期(3 h)输出频率变化情况行了测量,得到短期频率稳定性和长期频率稳定度的测量结果分别为200 kHz/ms和75 MHz/h。

该方法具有测量范围大、测量精度高、实时性好的优点,尤其避免了很长的光纤延时线和复杂的测量工具(如光谱仪等),为单频激光器输出频率稳定性和长期频率漂移特性的测量提供了行之有效的方法。

参 考 文 献

- 1 Lei Ming, Feng Lishuang, Zhi Yinzhou, *et al.*. Current modulation technique used in resonator micro-optic gyro[J]. Appl Opt, 2013, 52(2): 307-313.
- 2 Zhou Xiaolin, Kong Dongsong, Zhong Qingzhi, *et al.*. Development of doppler wind Lidar[J]. Journal of Atmospheric and

- Environmental Optics, 2007, 2(3): 161–168.
- 周小林, 孔东松, 钟庆志, 等. 多普勒测风激光雷达研究进展[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(3): 161–168.
- 3 Li Feifei, Wu Jin, Zhao Zhilong, *et al.*. Air coupled vibration detection of all-fiber laser Doppler vibrometer[J]. High Laser and Partical Beams, 2012, 24(11): 2549–2554.
- 李斐斐, 吴 谨, 赵志龙, 等. 全光纤激光多普勒测振仪空气耦合振动检测[J]. 强激光与光粒子束, 2012, 24(11): 2549–2554.
- 4 Wu Zhanjun, Han Fengshan, Fan Zhe, *et al.*. Triple-beam laser doppler velocimeter based on Janus configuration[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(7): 071404.
- 邬战军, 韩凤山, 范 哲, 等. 基于 Janus 配置的三光束激光多普勒测速仪[J]. 激光与光电子进展, 2013, 50(7): 071404.
- 5 Zhang Dejin, Li Qingquan, He Li. A new method for laser rut depth measurement[J]. Acata Optica Sinica, 2013, 33(1): 0112005.
- 张德津, 李清泉, 何 莉. 一种新的激光车辙深度测量方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0112005.
- 6 Zheng Yang, Jiang Huilin, Tong Shoufeng, *et al.*. Establishment of space light mixer mathematical model based on the space coherent laser communication[J]. Acata Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706024.
- 郑 阳, 姜会林, 佟首峰, 等. 基于相干激光通信空间光混频器数学模型的建立[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706024.
- 7 Sun Xutao, Liu Jiqiao, Zhou Jun, *et al.*. Frequency stabilization of a single-frequency all-solid-state laser for Doppler wind lidar[J]. Chin Opt Lett, 2008, 6(9): 679–680.
- 8 Jin Zhonghe, Yu Xuhui, Ma Huilian. Resonator fiber optic gyro employing a semiconductor laser[J]. Appl Opt, 2012, 51(15): 2856–2864.
- 9 Liu Tao, Ma Xiurong, Zhang Shuanggen, *et al.*. Measurement of frequency stability of two independent lasers with the same model[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0408006.
- 刘 涛, 马秀荣, 张双根, 等. 两台同类型号独立激光器频率稳定度的测量[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0408006.
- 10 Cao Xiangke, He Yao, Zhang Rongzhu. Experiment on beat frequency of two independent different type of lasers[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(2): 284–289.
- 曹翔科, 何 耀, 张蓉竹. 两种不同类型独立激光器的拍频实验[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 284–289.
- 11 Zhang Yin, Wang Qing. Research of automatic frequency stability diode laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0602001.
- 张 胤, 王 青. 自动稳频半导体激光器研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0602001.
- 12 I Ozdur, M Akbulut, N Hoghooghi, *et al.*. A semiconductor-based 10-GHz optical comb source with sub 3 fs shot-noise-limited timing jitter and 500 Hz comb linewidth[J]. Photon Technol Lett, 2010, 22(6): 431–433.
- 13 F Quinlan, S Ozharar, S Gee, *et al.*. Harmonically mode-locked semiconductor-based lasers as high repetition rate ultra-low noise pulse train and optical frequency comb sources[J]. Appl Opt, 2009, 11(10): 103001.
- 14 S Uetake, K Matsubara, H Ito, *et al.*. Frequency stability measurement of a transfer-cavity-stabilized diode laser by using an optical frequency comb[J]. Appl Phys B, 2009, (97): 413–419.
- 15 I Ozdur, D Mandridis, M U Piracha, *et al.*. Optical frequency stability measurement using an etalon-based optoelectronic oscillator [J]. Photon Technol Lett, 2011, 23(4): 263–265.
- 16 Xu Pan, Hu Zhengliang, Ma Mingxiang, *et al.*. Mapping the optical frequency stability of the single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring lasers with saturable absorber[J]. Opt & Laser Technol, 2013, 49: 337–342.
- 17 T Okoshi, K Kikuchi, A Nakayama. Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum[J]. Electron Lett, 1980, 16(16): 630–631.
- 18 L E Richter, H I Mandelberg, M S Kruger, *et al.*. Linewidth determination from self-heterodyne measurements with subcoherence delay times[J]. Quantum Electron Lett, 1986, 22(11): 2070–2074.
- 19 Jun Izawa, Hayato Nakajima, Hiroshi Hara, *et al.*. Comparison of lasing performance of Tm, Ho:YLF lasers by use of single and double cavities[J]. Appl Opt, 2000, 39(15): 2418–2421.
- 20 Ju Youlun, Wang Zhenguo, Wang Lei, *et al.*. Short-term frequency instability measurement of 2 μm single longitudinal mode laser[J]. Acata Optica Sinica, 2008, 28(11): 2164–2168.
- 鞠有伦, 王振国, 王 磊, 等. 2 μm 单纵模激光频率短期不稳定度的测量[J]. 光学学报, 2008, 28(11): 2164–2168.
- 21 Zhi Yinzhou, Feng Lishuang, Lei Ming. Delay self-heterodyne measurement of narrow linewidth laser frequency drift characteristic[J]. Optik, 2014, 125(13): 3124–3126.
- 22 Wang Chunhui, Gao Long, Pang Yajun, *et al.*. Experimental investigation for relation between beam splitter coefficient and signal-to-noise ratio of 2 μm balanced coherent system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1104002.
- 王春晖, 高 龙, 庞亚军, 等. 光束分束比对 2 μm 平衡式相干探测系统信噪比影响的实验研究[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1104002.
- 23 Xu Xianwen, Hong Guanglie, Ling Yuan, *et al.*. Simulative detection of vibration phase error of synthetic aperture lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0512001.
- 徐显文, 洪光烈, 凌 元, 等. 合成孔径激光雷达振动相位误差的模拟探测[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0512001.
- 24 SRM2519. High Resolution Wavelength Calibration Reference for 1530 nm–1565nm Hydrogen Cyanide H¹³C¹⁴N[OL]. <http://www-s.nist.gov/srmors/certificates/2519a.pdf?>