

# 基于非平衡光纤干涉仪的窄线宽激光光源跳模实时测试方法

梁 迅 姚 琼 胡永明 熊水东 胡正良 饶 伟

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 窄线宽激光器随机发生的跳模现象, 是影响光学系统稳定的重要因素。激光器线宽窄往往意味着较长的谐振腔和较小的模间隔, 从而给跳模的监测带来了难度。本文提出一种基于非平衡光纤干涉仪的窄线宽激光光源跳模测试方法, 该方法将激光器跳模的频率变化转变为干涉仪的相位变化, 并通过相位产生载波 (PGC) 调制解调技术来检测相位信息, 从而实现对跳模过程的监测。该方法灵敏度高, 能够长时间连续监控, 测试效果优于 Fabry-Pérot 干涉仪, 还可在 kHz 量级上测量窄线宽激光器的线宽, 为单纵模窄线宽激光器研究提供有效的测试手段。

**关键词** 光纤激光器; 跳模; 光纤非平衡干涉仪; 相位产生载波 (PGC)

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092902.0437

## Real-Time Mode Hopping Detection on Narrow Line-Width Laser Source Based on Unbalanced Fiber Interferometer

Liang Xun Yao Qiong Hu Yongming Xiong Shuidong Hu Zhengliang Rao Wei

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan, China 410073)

**Abstract** Random mode hopping in narrow line-width lasers is a significant factor that affects the stability of the optical system. Narrow line-width lasers always have long resonator length and small intervals between two neighbor modes. A new method of detecting mode hopping based on unbalanced fiber interferometer for very narrow line-width laser is proposed. It transforms the mode hopping process to the phase change of the unbalanced interferometer. Phase generated carrier (PGC) modulation-demodulation technique has been used to detect the phase signal. This method has high sensitivity and can be used in long time and real-time observation with better effects than Fabry-Perot interferometer. It can also be used in measuring the line-width ( $\sim$ kHz) of the laser, and gives a good testing method to improve the performance of the laser source.

**Key words** fiber laser; mode hopping; fiber unbalanced interferometer; phase generated carrier (PGC)

### 1 引 言

掺铒光纤环形腔激光器, 利用未被抽运掺铒光纤的饱和和吸收, 形成了瞬态自写入光栅来进行滤波, 可以得到稳定的窄线宽 (kHz) 的激光输出<sup>[1~6]</sup>。通过光电负反馈抑制弛豫振荡, 将噪声抑制在 -100dB 左右<sup>[1,2]</sup>, 得到了较为平坦的噪声谱级。在测试过程中, 发现光源偶尔会发生跳模现象, 严重影响

了光学系统的性能。因此, 对跳模进行有效的监测和研究, 成为不可回避的问题。

研究跳模时, 不能单独的从激光光源的输出光强判断, 一方面光强会有漂移, 容易造成误判, 另一方面, 在模式竞争的过程中, 严重影响光源的相干性能, 而对光源的光强输出影响不大。对跳模进行测量, 必须能够有效分辨出两个不同模式之间的区别。

收稿日期: 2008-06-25; 收到修改稿日期: 2008-08-03

作者简介: 梁 迅(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤传感、信号处理方面的研究。E-mail: liang428@163.com

导师简介: 胡永明(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤信息技术、光纤光栅技术方面的研究。

E-mail: huyongming\_nudt@hotmail.com

较窄线宽的激光器往往有着较长的谐振腔,而由  $\Delta\nu = c/(nL)$  ( $c$  为真空中光速,  $n$  为光纤折射率,  $L$  为腔长)可知,较长的谐振腔意味着较小的纵模间距。以光纤环形腔激光器为例,设环形腔腔长为 10 m,则相邻两个模式之间的频率间隔为  $\Delta\nu = c/(nL) = 20$  MHz。一般常用的干涉型光谱仪精度有限,基于 Mach-Zehnder 干涉仪的光功率谱波长分辨率可达到 0.01 nm 左右<sup>[7]</sup>,基于 Michelson 干涉仪的光谱仪可以达到 0.007 nm 的精度<sup>[8]</sup>,在 1550 nm 附近,该精度对应 1~2 GHz 的带宽。直接使用该类光谱仪很难判别跳模。使用 Fabry-Pérot 干涉仪是一种常用的跳模检测方法,其最高分辨率能达到 1~10 MHz,但较高分辨率的 Fabry-Pérot 干涉仪体积庞大,价格昂贵。使用零拍法<sup>[4~10]</sup>测量窄线宽激光器线宽的同时,也可观测激光器跳模<sup>[6]</sup>。该方法不足之处在于延时光纤长度须大于激光器相干长度,对于极窄线宽激光器,相干长度往往长达几十公里,从而带来了一定的实现难度。

本文提出一种新的窄线宽激光器跳模测试方法,使用光纤迈克尔逊非平衡干涉仪将模式跳变中的频率变化转化为干涉仪的相位变化,并使用 PGC 调制解调方案来检测相位,实现了对窄线宽激光器跳模的灵敏有效和连续的监控。

## 2 基于光纤非平衡干涉仪的激光器跳模测试方法

图 1 为光纤迈克尔逊非平衡干涉仪的示意图。图中的窄线宽激光光源使用  $\omega_0$  的频率调制,通过 PGC(Phase Generated Carrier, 相位产生载波)解调技术<sup>[11,12]</sup>将干涉仪两臂的相位差解调出来。在干涉型光纤水听器中,PGC 调制解调技术是为了解决干涉仪由于系统的工作点随外界环境变化,导致输出信号的随机涨落现象(称为干涉仪的相位衰落现象)而引入的一种技术。通过调制加入干涉仪的相

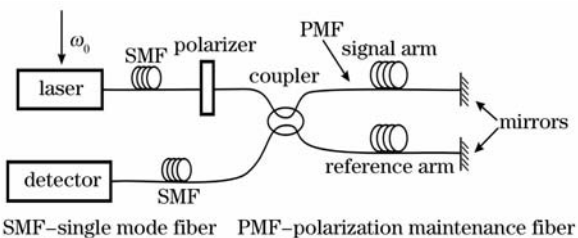


图 1 使用 PGC 内调制的光纤迈克尔逊非平衡干涉仪  
Fig. 1 Unbalanced fiber Michelson interferometer with internally modulated phase generated carrier

位调制器(外调制)或直接调制光频(内调制),在干涉仪中加入了一个周期变化的相位差,使得系统工作点在一个很大的范围内变化,系统既不能停留在相位响应的最高灵敏区,也不会陷在不灵敏区,最终使得系统有一个平均稳定的相位灵敏度。

设干涉仪两臂的相位差为  $\varphi(t)$ ,在没有信号作用与干涉臂上时, $\varphi(t)$  主要为零漂和初相位等因素产生的相位变化。此时干涉仪输出的光强信号为

$$I = A + B\cos[C\cos\omega_0 t + \varphi(t)] = A\{1 + K\cos[C\cos\omega_0 t + \varphi(t)]\} \quad (1)$$

其中  $A$  为光强直流量,  $B$  为光强干涉项的强度,  $B = KA$ ,  $K$  为干涉条纹可见度,  $K \leq 1$ ,  $C$  为 PGC 调制的深度,  $C = \frac{4\pi n l}{c}\Delta\nu$ ,  $n$  为光纤折射率,  $l$  为干涉仪的臂差,  $c$  为真空中的光速,  $\Delta\nu$  为表示最大调制时的光频频移。 $\omega_0$  为 PGC 调制的频率。(1)式使用贝塞尔函数展开后经过锁相,低通滤波、微分、交互相乘、相减、积分等操作后,最后得到相位信息  $\varphi(t)$ 。

在光源跳模时,最直接的影响就是使(1)式中的可见度  $K$  值发生了变化。跳模的过程中引起的两个甚至多个模式的竞争,直接影响到了光源的相干性能,可以使得  $K$  值瞬时减小,而又马上瞬时增大,甚至连续增大减小多次。图 2 为一次跳模时实际测得的干涉仪原始干涉信号和解调后的相位  $\varphi(t)$ 。

如图 2 所示,在光强原始信号中,光强的振荡幅

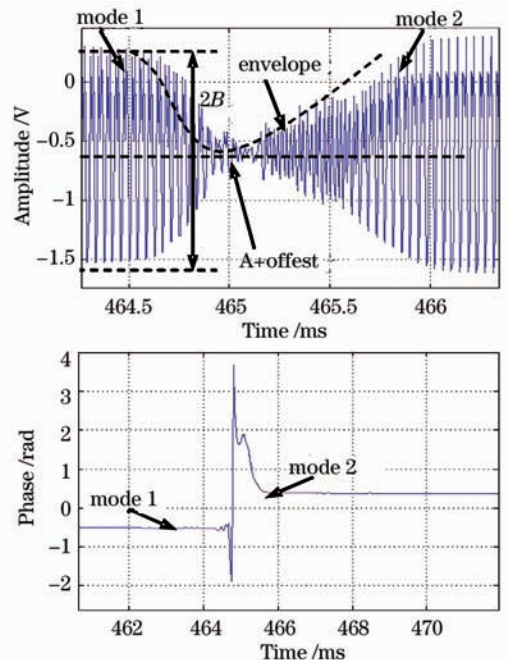


图 2 跳模引起的解调数据突变现象  
Fig. 2 Drastic change in data when mode hopping occurs

度即为  $B$  值,峰峰值为  $2B$ ,而直流量为  $A + \text{Offset}$  ( $\text{Offset}$  是  $A/D$  采样引入的直流偏置,为固定值)。由图可见,跳模的过程中, $B$  值发生了很大的变化,而  $A$  值却保持不变,由  $B = KA$  得  $K = B/A$ 。因此  $B$  值的变化等同于  $K$  值的变化, $K$  值变化形成对光强的包络(envelope)。其从大→小→大的过程典型值大约在  $2 \text{ ms}$  左右。为简化起见,设在跳模的短暂过程中, $K$  的大→小→大变化等价于半个周期的单频变化,即设跳模过程中的  $K$  值为

$$K = K_0 + K_h \cos(\omega_h t_h + \frac{\pi}{2})$$

$$0 < \omega_h t_h < \pi \tag{2}$$

其中  $K_0$  为跳模之前的  $K$  值大小,  $K_h$  为跳模带来的  $K$  值变化的幅值大小,  $\omega_h$  为  $K$  值变化频率,假设  $2 \text{ ms}$  变化半个周期,则变化频率为  $250 \text{ Hz}$ ,即  $\omega_h = 2\pi \cdot 250$ ,  $t_h$  为时间,从跳模的起点开始计时,取半个周期,即  $0 < \omega_h t_h < \pi$ ,则有  $K \leq K_0$ 。将(2)式代入(1)式可得:

$$I = A \{ (1 + K_0) \cos[C \cos \omega_0 t + \varphi(t)] - K_h \cos(\omega_h t_h + \frac{\pi}{2}) \cos[C \cos \omega_0 t + \varphi(t)] \}$$

$$0 < \omega_h t_h < \pi \tag{3}$$

可见,跳模引起光强信号的变化,表现在增加了噪声项

$$I_h = K_h \cos(\omega_h t_h + \frac{\pi}{2}) \times \cos[C \cos \omega_0 t + \varphi(t)]$$

$$0 < \omega_h t_h < \pi \tag{4}$$

设此时  $t = t_0 + t_h$  其中  $t_0$  为常数,即跳模的起始时间,  $t_h$  从  $0$  变为  $\frac{\pi}{\omega_h}$ ,则有  $t_h = t - t_0$ ,则(4)式变为

$$I_h = K_h \cos(\omega_h t - \omega_h t_0 + \frac{\pi}{2}) \times \cos[C \cos \omega_0 t + \varphi(t)]$$

$$0 \leq t - t_0 \leq \frac{\pi}{\omega_h} \tag{5}$$

(5)式经过 PGC 解调的 Bessel 展开,得到

$$I_h = K_h \{ [J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos 2k\omega_0 t] \times \cos(\omega_h t - \omega_h t_0 + \frac{\pi}{2}) \cos \varphi(t) - 2 [ \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos(2k+1)\omega_0 t ] \times \cos(\omega_h t - \omega_h t_0 + \frac{\pi}{2}) \sin \varphi(t) \}$$

$$0 \leq t - t_0 \leq \frac{\pi}{\omega_h} \tag{6}$$

经过积化和差,得到

$$I_h = K_h \{ J_0(C) \cos \left[ \omega_h (t - t_0) + \frac{\pi}{2} \right] \cos \varphi(t) + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \left[ \cos \left( 2k\omega_0 t + \omega_h t - \omega_h t_0 + \frac{\pi}{2} \right) + \cos \left( 2k\omega_0 t - \omega_h t + \omega_h t_0 - \frac{\pi}{2} \right) \right] \cos \varphi(t) - \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \left[ \cos(2k\omega_0 t + \omega_0 t + \omega_h t - \omega_h t_0 + \frac{\pi}{2}) + \cos(2k\omega_0 t + \omega_0 t - \omega_h t + \omega_h t_0 - \frac{\pi}{2}) \right] \sin \varphi(t) \}$$

$$0 \leq t - t_0 \leq \frac{\pi}{\omega_h} \tag{7}$$

由(7)式见,增加的  $I_h$  信号在载波  $\omega_0$  的各个倍频的两侧形成了主频为  $\omega_h$  的边带信号,PGC 解调即为提取载波  $\omega_0$  的一倍频和二倍频两侧的边带信号得到相位信息。因此该边带信号通过解调,会出现在最终的解调结果里。由于跳模时  $K$  值变化很大,变化幅值  $K_h$  值往往接近  $K_0$ ,因此解调得到的  $\omega_h$  信号具有很大的幅值,反映到解调结果  $\varphi(t)$  中,即为较大的突变信号。该过程可等效为瞬间有大信号作用于干涉仪的信号臂,使两臂产生了很大的相位差,从而在解调得到的相位  $\varphi(t)$  中形成明显的突变。

激光器模式的变化是一个比较复杂的过程,有时并非直接从一个模式跳到另外一个模式,而是中间还有不同的模式变化。图 3 为干涉仪测得的另一组跳模时的干涉光强信号和解调后的相位信号。

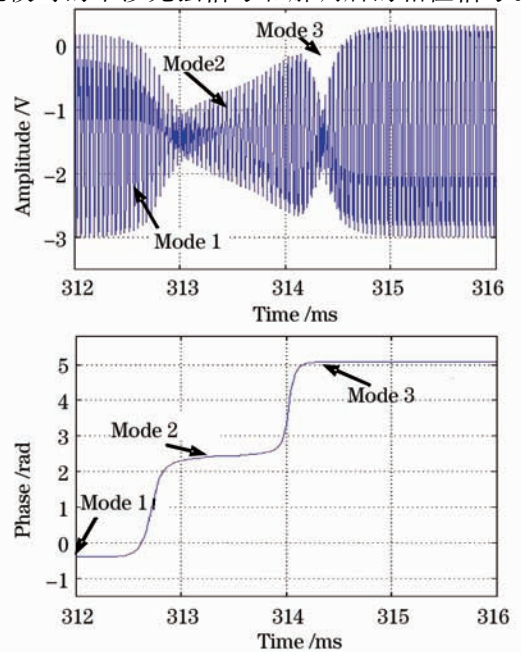


图 3 实测跳模引起的解调数据突变现象

Fig. 3 Drastic change in data when mode hopping occurs

在 313ms 之前激光器处于一种模式 (Mode1) 状态,跳模时该模式渐渐消亡 (312.5~313 ms 之间),而另外一种模式 (Mode2) 产生 (313~314 ms),但该模式的寿命很短,很快被另外一个模式 (Mode3) 取代 (314.5 ms 以后),反映到解调后的相位变化中,分为明显的两个跳变过程。可见,对于复杂的激光器模式的变化过程,该方法也能够进行完

整和详细的捕捉。

### 3 非平衡干涉仪测试方法与 Fabry-Perot 干涉仪的对比测试

实验在采集干涉仪输出的光强信号时,还通过 Fabry-Pérot 干涉仪对光源的输出模式进行了扫描

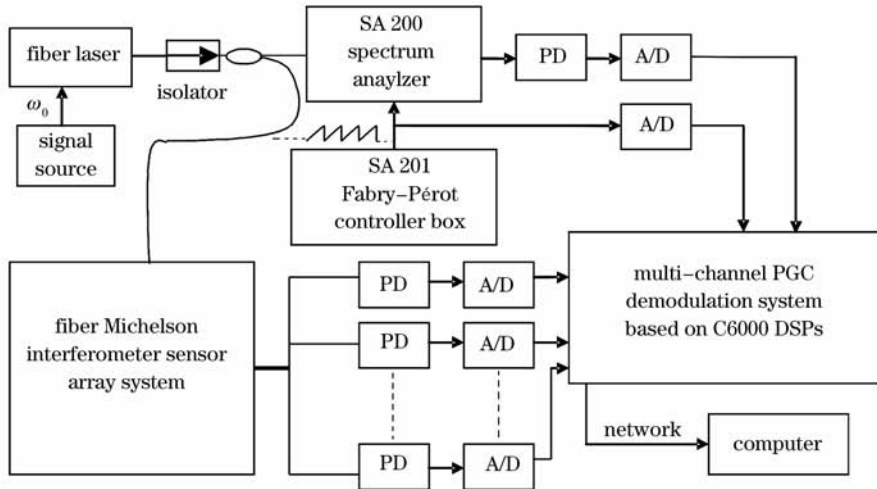


图 4 试验系统原理图

Fig. 4 Schematic of experimental system

测试,从而将两种测试方法进行对比。使用 Thorlab 公司 SA200 型扫描型 Fabry-Pérot 干涉仪,该干涉仪具有 7.5 MHz 的分辨率和 1.5 GHz 的自由谱宽 (free spectrum range, FSR)。由该公司提供的 SA201 控制仪提供扫描驱动。PGC 解调系统使用自主研发的基于 C6000 系列数字信号处理器

图 5 为两种典型的跳模过程,图(a)对应图 2 中的跳模过程,跳模前后激光器的输出模式发生了明显的改变,而图(b)对应图 3 中的跳模过程,跳模前激光器中存在两个纵模 (Mode 1 和 Mode 2),跳模后一个幅值较小的纵模 Mode 2 消失,而主模 Mode 1 的强度稍有所变大, Fabry-Pérot 的输出反映了跳模后的结果,但整体的输出变化并不十分明显。而干涉仪的输出图 3 中则有两次明显的跳模过程, Mode1 和 Mode2 的竞争过程被完整的捕捉下来, Mode2 在 313~314 ms 中崛起,但最终 Mode1 胜出并增强 (图 3 中 Mode3 与 Mode1 为同一模式,但强度增大)。在多次实验过程中,干涉仪还捕捉到连续多次跳模的情况,跳模幅度有大有小。有时通过 Fabry-Pérot 干涉仪观察输出无明显变化,但干涉仪解调信号却有着虽然较小但是依然明显的突变信

(DSP) 和以太网数据传输接口的嵌入式信号处理系统<sup>[13,14]</sup>, 能实现多通道干涉仪的实时连续解调处理。系统原理图如图 4。其中, PD 表示光电探测器。系统同时采集了多路干涉仪的探测信号和光谱仪的输出和锯齿波扫描信号。图 5 为实测的激光器发生跳模时 Fabry-Perot 干涉仪扫描结果。号,即为跳模。

实验中使用单个干涉仪即可以对跳模进行有效的判断和监控,图 2,图 3 均为同一路干涉仪的数据。实验中根据现有的条件,使用了多路阵列系统进行解调,原理上多路与单路没有区别。而由于多路单元由一台激光器提供光源,跳模时会多路同时出现明显的突变信号,更加直观。实验发现,跳模时间往往非常短暂,一般只有一两个毫秒,且常有连续多次跳模。基于非平衡干涉仪的测试方法以其灵敏性和精确性以及时间的连续性,成为一种窄线宽激光光源跳模的实时有效的监测方法。

### 4 非平衡干涉仪测试方法的几点讨论

在光源跳模时,光源的频率  $\nu$  发生了跳变,由干涉仪的相位差  $\varphi = \frac{4\pi n l}{c} \nu$ , 可得  $\nu$  由  $\nu_1 \rightarrow \nu_2$  的跳变

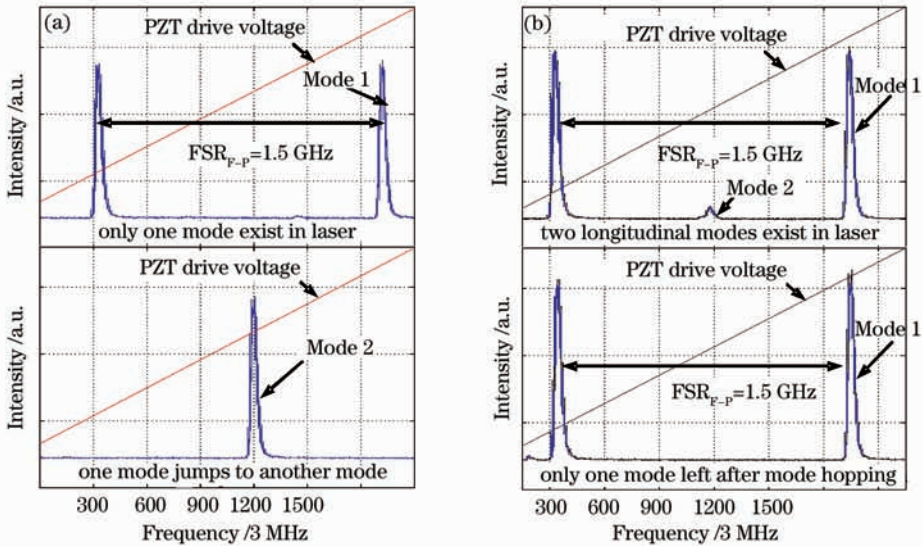


图 5 两种典型跳模现象发生时 Fabry-Pérot 干涉仪输出信号

Fig. 5 Fabry-Pérot interferometer output when two classic kinds of mode hopping occur

过程中,干涉仪的相位差  $\varphi(t)$  也发生了瞬间变化,变化大小为

$$\Delta\varphi_h = \frac{4\pi nl}{c}\Delta v_h, \quad (8)$$

$$\Delta v_h = v_1 - v_2$$

从而有

$$\Delta v_h = v_1 - v_2 = \frac{c\Delta\varphi_h}{4\pi nl} \quad (9)$$

因此通过检测相位差的突变的大小,理论上可计算出跳模时两个模式之间的间距  $\Delta v_h$ 。但由于跳模时严重影响了  $B$  值,导致 PGC 解调过程发生了偏差,使跳模时解调得出的  $\varphi(t)$  信号不能反映真实的相位信息。

使用非平衡干涉仪的测试方法,可以有效监控跳模,同时也为抑制跳模提供了一种可能的实现方案。由图 2,图 3 可知,跳模过程表现在干涉光强的幅值发生了变化。因此通过监测干涉光强的峰峰值,一旦发生突变即使用某种反馈的方法来改变激光器的腔长,使之回到稳定的位置,成为一种可能的减少跳模次数,改善激光器性能的方案。由于  $B$  值突变时间一般在  $1\sim 2$  ms 左右,这也就决定了反馈系统的响应速度应大于  $500$  Hz $\sim 1$  kHz,对于目前的电子器件来说,完全可以实现,因此使用适当的反馈方式和合理的电路设计,应能够实现对跳模提前检测和抑制。

光纤非平衡干涉仪的测试方法不仅可以检测跳模,也可以用来测量窄线宽 (kHz) 激光器的线宽<sup>[15]</sup>,该方法通过直接测量平衡干涉仪的相位噪声。根据简单的理论,当光源的谱宽为  $\delta\nu$  时,干涉

仪中的相位噪声为

$$\delta\varphi = \frac{4\pi nl}{c}\delta\nu \quad (10)$$

实际上产生相位噪声的原因很多,在干涉仪的光程差较小时,干涉仪的相位噪声与光程差没有比例关系。但随着光程差的增大,干涉仪的相位噪声与光程差呈正比。图 6<sup>[15]</sup>为使用非平衡干涉仪测量的 Nd:YAG 激光器的相位噪声与光程差的关系。

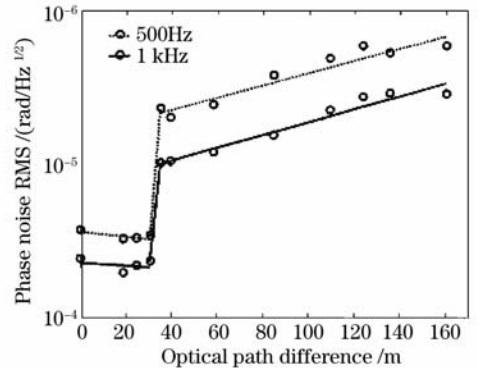


图 6 相位噪声与光程差的关系

Fig. 6 Relationship between laser phase noise and optical path difference

图 6 中在光程差大于 38 m 之后,相位噪声主要来源于光源中心频率具有一定的宽度而产生的  $\delta\nu$ 。在干涉仪没有任何扰动的情況下解调得到干涉仪的噪声  $\delta\varphi$ ,由(10)得到光源的线宽为

$$\delta\nu = \frac{c}{4\pi nl}\delta\varphi \quad (11)$$

使用非平衡干涉仪的跳模检测方案,可对跳模进行各种针对性试验。实验表明,跳模的频率与抽运功

率有一定的关系。图 7 为测试的一种环形腔激光器在不同抽运功率下固定时间内(1h)的跳模次数。随着抽运功率的增大,跳模呈增多趋势,虽然并非完全线性关系。在抽运功率提高到一定程度之后,干涉仪甚至有时会出现不干涉现象,时间长度从几秒到数十秒不等。此时在解调后的信号幅值范围和变化范围非常大,干涉仪不干涉。说明光源模式已十分不稳定,输出光的相干性变差。

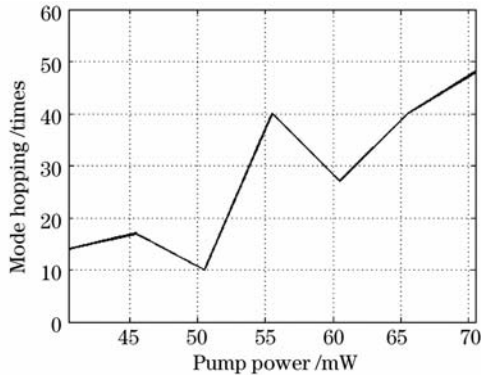


图 7 跳模次数与抽运功率的关系曲线

Fig. 7 Relationship between mode hopping times and pump power

## 5 结 论

使用光纤非平衡干涉仪来对激光光源进行跳模测试。对最小跳模间隔的分辨能力取决于非平衡干涉仪的相位检测能力,可满足常见小模间隔激光器跳模监测的要求。另外,该方法还可以通过相位噪声来推算窄线宽的激光器的线宽,为改善光源性能提供了有效的测试手段。

## 参 考 文 献

- Liang Xun, Xiong Shudong, Hu Yongming *et al.*. The impact of relative intensity noise on fiber optic hydrophone's PGC scheme[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5):716~721  
梁 迅,熊水东,胡永明等.激光器强度噪声对光纤水听器 PGC 解调影响分析[J],中国激光,2008, **35**(5):716~721
- Liang Xun, Ma Lina, Hu Yongming *et al.*. Research on relaxation oscillation in fiber laser with continuous pumping[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, (accepted)  
梁 迅,马丽娜,胡永明等.连续抽运情况下光纤激光器弛豫振荡特性研究[J].半导体光电,(已录用)
- Zhou Meng, George Stewart, Gillian Whitenett. Stable single-mode operation of a narrow-linewidth, linearly polarized, erbium-fiber ring laser using a saturable absorber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(5): 2179~2183
- Yu Benli, Zhen Shenglai, Zhu Jun *et al.*. Experimental study on low-noise fiber laser [J]. *Acta Optic 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
- Mao Hongmin, Zhen Shenglai, Zhu Jun *et al.*. Fiber laser with low noise and narrow line width[J]. *Journal of Anhui University Natural Science Edition*, 2005, **29**(5):33~35  
毛红敏,甄胜来,朱 军等.一种低噪声窄线宽光纤激光器[J].*安徽大学学报*,2005,**29**(5):33~35
- Yu Benli, Qian Jingren. Stable single-frequency fiber ring laser with line-width less than 0.5 kHz[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, **18**(4):345~348  
俞本利,钱景仁.线宽小于0.5 KHz 稳态的单频环形腔激光器[J].*量子电子学报*,2001,**18**(4):345~348
- Takuya Tanaka, Yoshinori Hibino, Toshikazu Hashimoto *et al.*. Hybrid-integrated external-cavity laser without temperature-dependent mode hopping [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, **20**(9):1730~1738
- Liu Hanchen, Wang Qingfei Tang Yuanhe. Spectral line-width measurement enhancement by two united spectrometers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4):710~714  
刘汉臣,王庆飞,唐远河.光谱仪联合使用提高谱线的测量宽度[J].*光学学报*,2008,**28**(4):710~714
- Alberto Ferrari, Giorgio Ghislotti. Subkilohertz fluctuations and mode hopping in high-power grating-stabilized 980-nm pumps [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, **20**(3):515~518
- M. Ohtsu, K. Y. Liou. A simple interferometric method for monitoring mode hopping in tunable external-cavity semiconductor lasers[J]. *Journal of Light wave Technology*, 1989, **7**(1):68~76
- Ni Ming, Investigation of the Key Technologies of the Fiber Optic Hydrophone [D]. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Science, 2003. 61~65  
倪 明.光纤水听器关键技术研究[D].中国科学院研究生博士学位论文,中国科学院声学研究所,2003. 61~65
- Wang Zefeng, Hu Yongming, Meng Zhou *et al.*. Physical mechanism and solution of aliasing in phase generated carrier modulation-demodulation of interferometric fiber-optic hydrophone[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1):92~98  
王泽锋,胡永明,孟 洲等.干涉型光纤水听器相位载波调制—解调中信号混叠产生的机理及解决方案[J].*光学学报*,2008,**28**(1):92~98
- Liang Xun, Xiong Shuidong. The embedded ethernet interface development with DM642[J]. *Computer Engineering*, 2007, **30**(6):277~279  
梁 迅,熊水东. DM642 嵌入式网络接口开发设计[J].*计算机工程*,2007,**30**(6):277~279
- Liang Xun, Xiong Shuidong, Yao Qiong. The signal transmitting through FIFO and network on TMS320C6000 DSPs [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2008, **31**(3):1057~1060  
梁 迅,熊水东,姚 琼.基于 TMS320C6000 DSP 的 FIFO——网络数据传输[J].*电子器件*,2008,**31**(3):1057~1060
- Zhou Meng, Yongming Hu, Shuidong Xiong *et al.*. Phase noise characteristics of a diode-pumped Nd:YAG laser in an unbalanced fiber-optic interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(17):3425~3428
- Hui Yan, Guoqing Yang. Laser frequency stability based on Sagnac interferometric spectroscopy [J]. *Chin. Op. Lett.*, 2008, **6**(4):307~309