

高次谐波锁模飞秒掺镱光纤激光器的噪声情况

柏汉泽 钟艺峰 任焜明 黄俊杰 田劲东 熊德平 孙敬华

Noise of high-order harmonic mode-locked femtosecond Yb fiber laser

Bai Hanze, Zhong Yifeng, Ren Chiming, Huang Junjie, Tian Jindong, Xiong Deping, Sun Jinghua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20210779>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高功率高重复频率飞秒掺镱光纤激光频率梳的研究(特邀)

High power high repetition rate femtosecond Ytterbium-doped fiber laser frequency comb (invited)

红外与激光工程. 2019, 48(1): 103001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0103001>

基于45° 倾斜光栅的重复频率可切换被动谐波锁模光纤激光器

Passively harmonic mode-locked fiber laser with switchable repetition rate based on a 45° tilted fiber grating

红外与激光工程. 2018, 47(8): 803007 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0803007>

6 MHz重频调谐范围的稳定锁模掺镱光纤激光器

Stable mode-locked Yb-fiber laser with a 6 MHz repetition rate tuning range

红外与激光工程. 2021, 50(3): 20200205 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200205>

调Q锁模类噪声方波脉冲掺铒光纤激光器

Q-switched mode-locking noise-like rectangular pulses erbium-doped fiber laser

红外与激光工程. 2018, 47(8): 803009 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0803009>

单频光纤激光器相位噪声的影响因素

Influence factors of phase noise of single frequency fiber laser

红外与激光工程. 2017, 46(3): 305005 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0305005>

纳秒半导体激光器的时间抖动和触发同步特性

Study on time jitter and trigger synchronization characteristics of ns pulsed laser diode

红外与激光工程. 2020, 49(6): 20200147 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200147>

高次谐波锁模飞秒掺镱光纤激光器的噪声情况

柏汉泽^{1,2}, 钟艺峰^{1,3}, 任焜明¹, 黄俊杰¹, 田劲东², 熊德平³, 孙敬华¹

1. 东莞理工学院 电子工程与智能化学院, 广东 东莞 523808;
2. 深圳大学 物理与光电工程学院, 广东 深圳 518060;
3. 广东工业大学 物理与光电工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 高重复频率的飞秒激光在高速激光测距和三维成像等领域有着非常重要的作用。其中基于飞秒光纤激光器的高次谐波锁模是获得 GHz 量级以上高重复频率脉冲的重要手段之一。基于含腔内光栅对色散补偿的非线性偏振旋转 (NPR) 锁模的掺镱 (Yb) 光纤激光器, 在 180 mW 泵浦光时获得了稳定的 143 MHz 基频锁模脉冲序列, 当泵浦光功率升至 1 W 时获得了最高 20 次谐波 (2.86 GHz) 锁模脉冲序列输出。系统地对比研究了基频锁模与高次谐波锁模状态下, 脉冲重复频率精密锁定后的艾伦偏差和相位噪声, 7 次谐波锁模状态下重复频率锁定精度能够保持在 10^{-13} Hz@1 s 的稳定度, 为高次谐波锁模飞秒激光脉冲序列用于精密测量提供了实验依据。

关键词: 高次谐波锁模; 飞秒掺镱光纤激光器; 脉冲重复频率; 时间抖动; 相位噪声
中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210779

Noise of high-order harmonic mode-locked femtosecond Yb fiber laser

Bai Hanze^{1,2}, Zhong Yifeng^{1,3}, Ren Chiming¹, Huang Junjie¹, Tian Jindong², Xiong Deping³, Sun Jinghua¹

1. School of Electronic Engineering and Intelligentization, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China;
2. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
3. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Femtosecond lasers with high repetition rates play important roles in advanced manufacturing, such as high-speed laser ranging and three-dimensional imaging. Among them, high-order harmonic mode-locking based on femtosecond fiber lasers is one of the important methods to obtain high repetition rates above GHz. Based on a nonlinear polarization rotation (NPR) mode-locked Ytterbium (Yb) fiber laser with dispersion compensation from intra-cavity grating, a stable 143 MHz fundamental frequency mode-locked pulse sequence was obtained when the pump light was 180 mW. When the pump power was increased to 1 W, the highest 20th harmonic (2.86 GHz) mode-locked pulse train was obtained. The Allen deviation and phase noise of the output pulse repetition rates of the Yb fiber laser were studied systematically when it was running at high harmonic mode-locking and fundamental mode-locking respectively. The repetition frequency locking accuracy can be maintained at a

收稿日期:2021-12-10; 修订日期:2022-02-15

基金项目:广东省基础与应用基础研究基金区域联合基金重点项目 (2020 B1515120041); 广东省普通高校省级重大科研项目 (2018 KZDXM067)

作者简介:柏汉泽,男,硕士生,主要从事飞秒激光频率梳精密三维测量等方面的研究。

导师简介:孙敬华,男,教授,博士,主要从事飞秒激光技术、飞秒光频梳及其在精密测量领域的应用等方面的研究。

stability of 10^{-13} Hz@1 s in the 7th harmonic mode locking state. This study provides an experimental basis for high harmonic mode-locked femtosecond laser pulse sequence to be used for precise measurement.

Key words: high-order harmonic mode locking; femtosecond Ytterbium-doped fiber laser; pulse repetition frequency; time jitter; phase noise

0 引言

半导体激光器直接泵浦的飞秒光纤激光器由于具有高度的紧凑性、经济性以及能够输出高达几十至上千瓦量级的平均功率,在近 20 年来获得了极大的关注和发展,是飞秒激光在日益广泛的科研和工业生产领域得以大范围应用的重要推动力量。飞秒激光的工业应用基本上有两个发展方向:与材料的相互作用时往往要求较高的脉冲能量,这时脉冲的重复频率通常在 1 MHz 及以下^[1];而在精密测量和信号处理等领域,越高的脉冲重复频率越有利于信号处理速度^[2],更容易在频率域上被分辨和调制^[3-4]。后者可以应用于高精度绝对距离的快速测量^[5]、可以检测高速转动的轮盘甚至飞行中子弹轮廓的激光雷达等^[6]。在高重频光脉冲产生方面,微腔激光器^[7-8]和 VECSEL 等由于紧凑的腔型,其脉冲重复频率可以高达几十乃至几百 GHz,但它们在脉冲宽度、平均功率、相位可控性等方面还是有需要改善的空间。而光纤激光器受限于腔内光纤的物理长度,其重复频率通常在百 MHz 量级及以下。通过一些特别紧凑的设计,目前人们从掺镱光纤激光器中获得了 1 GHz 的脉冲重复频率^[9],但进一步缩短腔长愈发困难。

在特定条件下的高次谐波锁模是有效提高飞秒光纤激光器脉冲重复频率的途径^[10-11]。但是高次谐波锁模是否在时间抖动以及相位噪声等方面具有基频锁模时相近的稳定性需要进一步的研究^[12]。文中在飞秒 Yb 光纤激光器中获得了最高 20 次谐波锁模 (2.8 GHz)。受限于参考微波信号源的限制,笔者对七次谐波锁模的脉冲重复频率 (1 GHz) 以及基频锁模时的脉冲重复频率 (143 MHz) 的 7 次微波谐波进行了精密锁定,从重频的艾伦偏差以及相位噪声两个方面分析了两种锁模状态下的重频锁定结果。

1 实验设置

该实验搭建的飞秒光纤锁模激光器是基于非线性

性旋转偏振旋转 (NPR) 的锁模原理,其示意图如图 1 所示,图中 PBS 为偏振分束棱镜, $\lambda/2$ 、 $\lambda/4$ 分别为二分之一和四分之一波片。为了较容易地调整和控制腔长,激光器采用了 σ 腔型结构,尾端反射端镜粘贴在一块压电陶瓷上 (PZT)。PZT 在反馈锁相回路的控制下发生长度变化,带动其上平面反射镜前后移动,从而控制激光脉冲序列的重复频率。腔内带有一对透射式光栅,用以补偿元器件的正常色散,使激光器工作于孤子锁模状态。通过调节光栅对的间距可以较为精细地控制腔内的总色散量,便于找到理想的基频和高阶锁模状态。图中 Yb 光纤为 Liekki Yb1200 4/12.5,由于具有较高的掺杂浓度,其长度仅为 15 cm,有利于获得较高的重复频率。

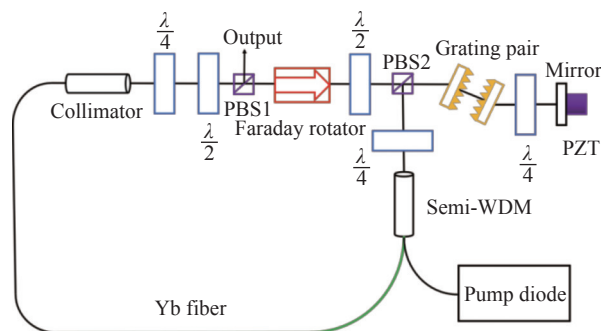


图 1 掺镱光纤激光器示意图

Fig.1 Schematic diagram of Ytterbium-doped fiber laser

为了进一步精简腔内光学结构,该实验使用了一个准波分复用器 (Semi-WDM)^[13]。Semi-WDM 将波分复用器和准直器集成在一起,使得激光腔更加紧凑。法拉第旋转器后面的二分之一波片用于矫正由隔离器引起的偏振态旋转,使振荡光继续保持 p 偏振以穿过 PBS 到达光栅对。法拉第旋转器和 PBS1 以及 PBS2 共同形成了一个隔离器,使腔内的光只能单方向运转。端镜前面的四分之一波片用来改变端镜反射光的偏振态,从而能够在隔离器后面的 PBS 上反射进入到增益光纤内。

该实验利用高精度微波源作为激光器重复频率的锁定参考,对基频锁模和高次谐波锁模后的重频进行精密的锁定,具体示意图见图 2。图 2 中,PD1 和 PD2 为快速光电二极管,LPF 为低通滤波器,橙色线条为光路,激光器的输出脉冲被光电探测器 1(PD1)接收,重频信号与信号发生器 1(Signal generator 1, R&B SMA100 B)在混频器 1(Mixer 1)产生拍频,经过低通滤波器进入比例积分控制器,然后经压电陶瓷控制器放大后用控制激光腔内的压电陶瓷位置,从而精密锁定重复频率。

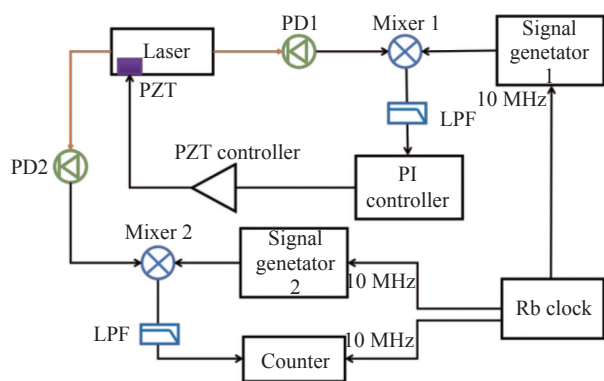


图 2 重频锁定反馈回路及频率计数线路示意图

Fig.2 Schematic diagram of re-frequency locked feedback loop and frequency counting circuit

第二个光电探测器 PD2 与第二个信号发生器(R&B SMB100 A)在 mixer2 上产生拍频信号,经过低通滤波器后进入频率计数器(counter)以测量锁定后重频,计算出锁定后重频的艾伦偏差。图 2 中两个信号发生器和频率计数器都参考到了一个共同的铷钟上。被 PD2 探测到的重复频率信号没有直接输入到频率计数器,而是与一个高精度的信号源拍频到一个较低频率(60 kHz 左右)再输入到计数器进行频率稳定性测量,这是因为所用频率计数器(Keysight53230 A)在几十 kHz 的时候具有最佳的探测精度。

2 实验结果

2.1 基频锁模的重复频率锁定结果

当泵浦光功率大于 180 mW 时,激光器可以输出稳定的基频(143 MHz)锁模脉冲序列。基频锁模脉冲的频谱图以及重频锁定后的艾伦偏差如图 3 所示,

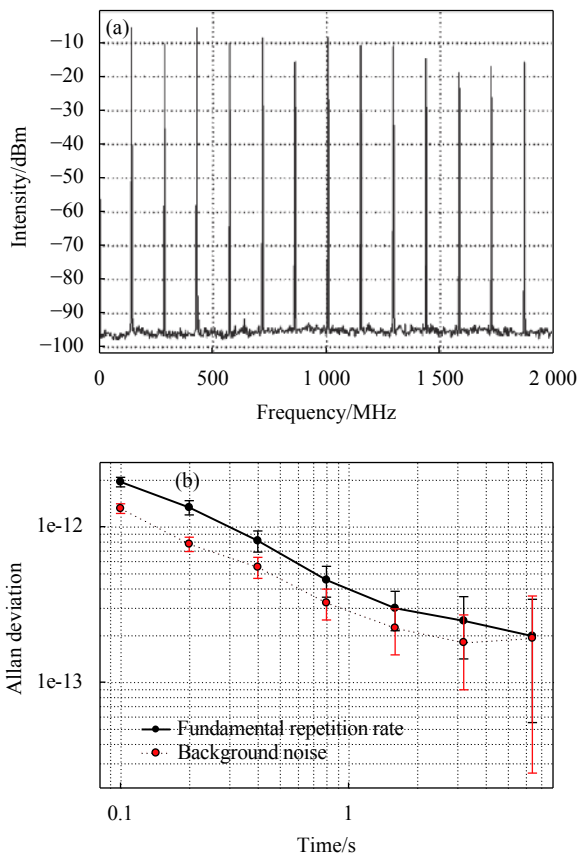


图 3 (a) 基频锁模的脉冲序列频谱图;(b) 重复频率锁定后的艾伦偏差分析结果

Fig.3 (a) Diagram of fundamental frequency mode-locked pulse sequence spectrum; (b) Allen deviation analysis results of stabilized repetition rate

在 5 kHz 分辨率带宽下,信噪比达到了 90 dB,重频锁定结果的艾伦偏差秒稳情况为 3.98×10^{-13} 。

2.2 高次谐波锁模和泵浦功率的关系

对于飞秒锁模光纤激光器,当谐振腔工作在负色散区域时,色散和克尔非线性效应的平衡使光脉冲以孤子形式在腔内传播。这时候增加泵浦功率激光器也不会输出能量更大的单脉冲,而是发生脉冲整形,高斯型脉冲变为平顶光形脉冲,然后发生脉冲分裂。若从能量角度分析,脉冲运转在基阶孤子状态、泵浦光能量调节为适当的倍数关系后脉冲运转在高阶孤子状态。腔内能量越多形成的孤子越多。然而孤子和非孤子成分之间相位不同,孤子之间会形成排斥效应。提高泵浦功率,调整光栅对间距以微调腔内色散值,调整波片方向等,改变孤子与非孤子之间的相位差,可以让脉冲以相同幅度和间隔在腔内运转,形成

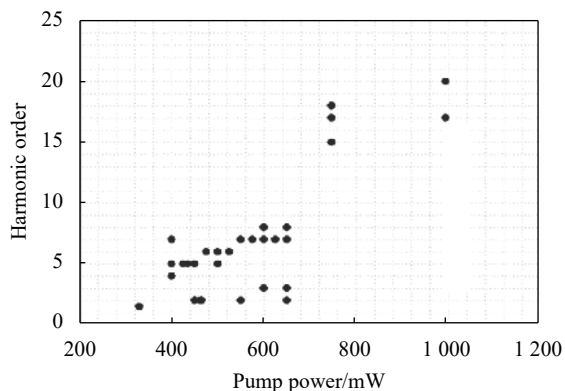


图 4 谐波次数随泵浦功率变化实验结果 (该实验中在泵浦功率高于 650 mW 时, 只是探索了较高重频的锁定, 没有细致去锁定每一阶次的谐波)

Fig.4 Experimental results of the harmonic order varying with the pump power (In this experiment, when the pump power was higher than 650 mW, only coarse power increasement steps were carried out at high hamonic orders of mode-locking)

高次谐波锁模。图 4 是此次高次谐波锁模和泵浦功率的关系, 从图中可以看到, 随着泵浦功率提高可产生的谐波锁模的次数越高。当泵浦源的功率达到最大输出值 1 W 时, 获得了高达 20 次谐波锁模运转, 重复频率达到 2.86 GHz。由于笔者实验所用的信号发生器 (R&B SMB100 A) 最高输出频率为 1.1 GHz, 无

法用于 7 次 (1 GHz) 以上高次谐波锁模重复频率的锁定结果的精密表征, 因此笔者实验将高次谐波锁模的对比实验限定在 7 次谐波锁模。在泵浦功率为 870 mW 时, 记录了不同谐波锁模状态下的光谱, 如图 5 所示。光谱中心波长均在 1037 nm 附近, 基频锁模光谱宽度约为 27 nm; 2 次谐波光谱宽度约为 41 nm; 4 次谐波光谱宽度约为 27 nm; 5 次谐波光谱宽度约为 16 nm; 6 次谐波光谱宽度约为 16 nm。图 6 (a)、(b) 分别为使用自相关仪 (APE Mini PD) 测量的基频锁模与 4 次谐波锁模状态下自相关曲线, 图中 ACF 为自相关曲线宽度, Lorentz 为通过洛伦兹拟合后的脉冲宽度。经腔外一对透射式光栅压缩后, 基频锁模脉宽为 61 fs, 4 次谐波锁模脉宽为 92 fs。

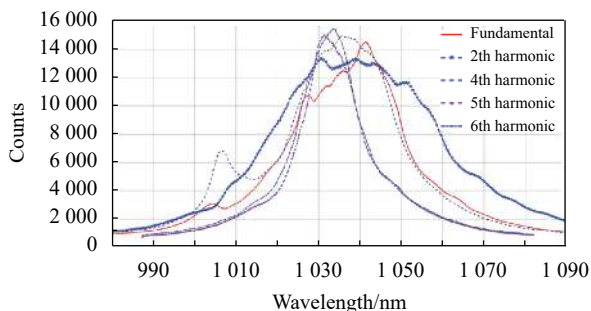


图 5 不同谐波锁模状态下的光谱

Fig.5 Spectra under different harmonic mode-locked states

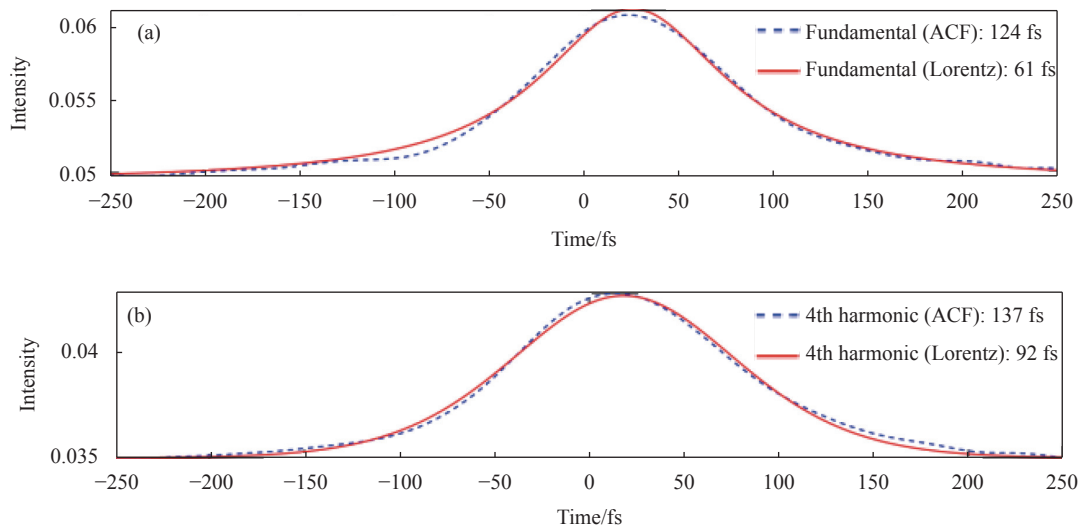


图 6 (a) 基频锁模脉冲宽度; (b) 4 次谐波锁模脉冲宽度

Fig.6 (a) Fundamental frequency mode-locked pulse width; (b) 4th harmonic mode-locked pulse width

2.3 高次谐波锁模和基频锁模的信噪比/超模噪声

图 7 为几个不同阶次锁模时的频谱图, 频谱仪分辨率设置均为 5 kHz。实验中激光器罩有单层有机玻璃罩, 置于常规万级光学洁净室环境下, 没有机箱温控等其他更复杂的环境控制。高次谐波锁模运转相较于基频锁模运转需要更细微的调节, 但一旦锁模稳定以后, 持续时间还是可以长达数小时, 即使重频锁相回路失锁时压电陶瓷剧烈的震动也不会破坏激光脉冲的高次谐波锁模运转。实验中发现随着环境的变化, 高次谐波锁模倾向于向低阶次的谐波跳变。高次谐波锁模的噪声中影响最大的部分在于超模噪声, 这是由于多孤子脉冲运转的性质决定的。该实验中基频锁模时脉冲信噪比达到约 90 dB, 7 次谐波锁模超模抑制比约 60 dB, 15 次谐波和 20 次谐波超模抑制比约为 30 dB。

超模噪声如何抑制值得深入研究, 未来可能通过模式匹配、自相位调节与滤波器结合、复合腔结构等方式抑制超模抑制比。

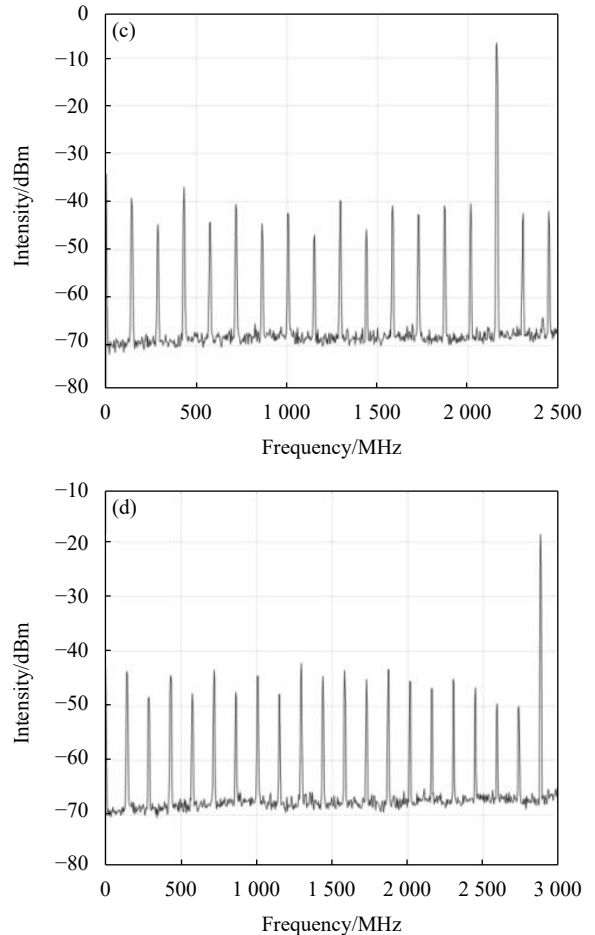
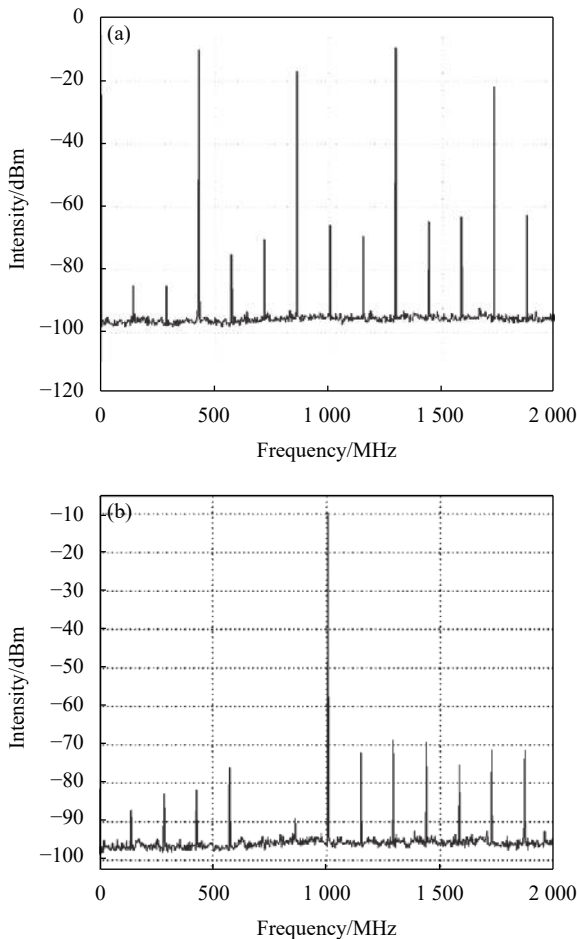


图 7 (a) 3 次谐波锁模脉冲频谱图; (b) 7 次谐波锁模脉冲频谱图; (c) 15 次谐波锁模脉冲频谱图; (d) 20 次谐波锁模脉冲频谱图

Fig.7 (a) The 3th harmonic mode-locked pulse spectrum; (b) The 7th harmonic mode-locked pulse spectrum; (c) The 15th harmonic mode-locked pulse spectrum; (d) The 20th harmonic mode-locked pulse spectrum

2.4 高次谐波锁模与基频锁模重复频率锁定的艾伦偏差

图 8 为最高 7 次谐波锁模时重频精密锁定后的艾伦偏差分析结果。为了有效排除锁相回路在不同频率下的性能差异, 该实验中笔者对基频锁模状态下的重频锁定是利用其 7 次微波谐波 (也是 1 GHz), 也就是无论对基频锁模还是谐波锁模, 锁相回路都是工作在 1 GHz 频率。图中黑线是信号发生器和锁相回路工作在 1 GHz 时的本底噪声。频率计数器的 gate time 设置为 100 ms。泵浦功率为 575 mW 时, 7 次谐波锁模的艾伦偏差最低是: $9.48 \times 10^{-13} @ 1 \text{ s}$; 基频锁模艾

伦偏差最低是 $4.15 \times 10^{-13} @ 1 \text{ s}$ 。泵浦功率为 650 mW 时, 7 次谐波锁模锁模艾伦偏差最低是 $5.39 \times 10^{-13} @ 1 \text{ s}$, 基频锁模艾伦偏差最低是 $3.98 \times 10^{-13} @ 1 \text{ s}$ 。

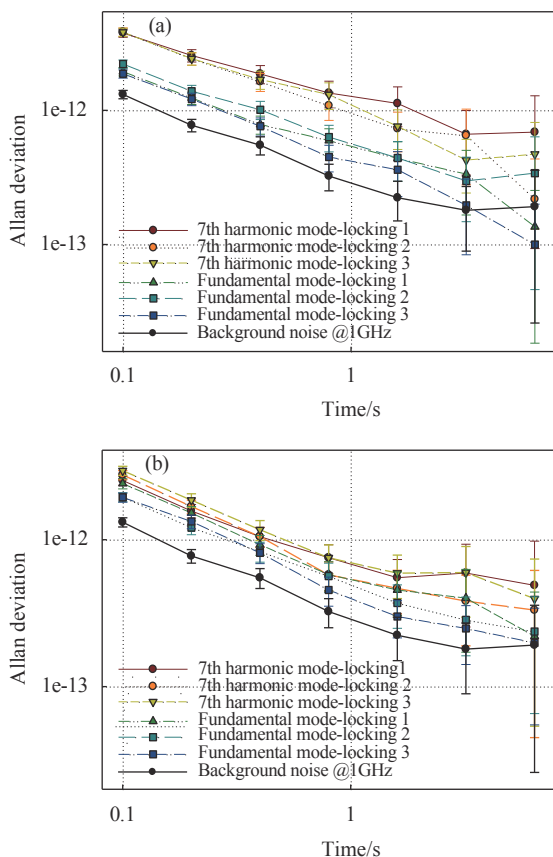


图 8 (a) 泵浦功率为 575 mW 时重复频率锁定的艾伦偏差图; (b) 泵浦功率为 650 mW 时重复频率锁定的艾伦偏差图

Fig.8 (a) Allen deviation diagram of repetition frequency locking when the pump power is 575 mW; (b) Allen deviation diagram of repetition frequency locking when the pump power is 650 mW

2.5 高次谐波锁模与基频锁模重复频率锁定的相位噪声

为了进一步分析锁定后的重频的相位噪声随频率的分布, 该实验使用 R&S FSWP 相位噪声仪对不同锁模状态下精密锁定后的重频进行了相噪分析, 结果如图 9 所示。该实验中仅分析了基频锁模以及 3 次谐波锁模的情况。由图可以看出, 3 次谐波锁模状态下依赖 SMA100 B 微波参考源精密锁定的脉冲重频 (431 MHz) 的相噪在低频时基本同 SMA100 B 直接输出的相噪相当。但是当偏移频率大于 100 Hz 时, 脉冲重频的相噪明显高于微波参考源的, 并在 2 kHz 附

近时出现了一个峰值, 说明锁相回路的带宽在 2 kHz 左右, 主要是受到压电陶瓷的响应速度的限制。锁定后的相噪曲线在 100~15 000 Hz 处的噪声抑制还有比较大的提升空间。值得注意的是在 100 kHz~1 MHz 范围内, 激光脉冲重复频率的相噪都低于对应参考微波的相噪, 这是由激光器是一个优良的低通滤波器所决定的, 也是利用光频率参考的激光频率梳可以获得极低相位噪声的微波源的依据所在。

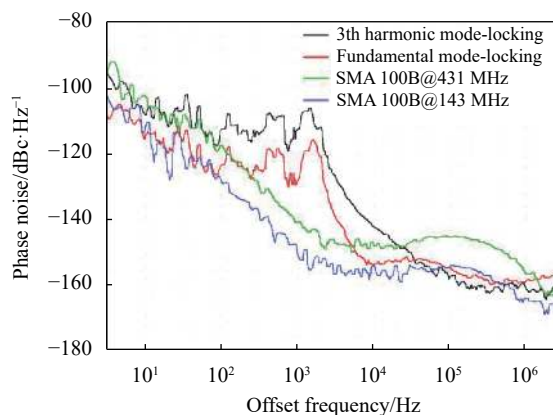


图 9 基频锁模以及 3 次谐波锁模重频锁定的相位噪声

Fig.9 Phase noise of fundamental frequency mode locking and 3th harmonic mode locking and re-frequency locking

3 结 论

该实验研究了基于 Yb 光纤激光器的高次谐波锁模, 最高获得 20 次谐波, 频率达到 2.86 GHz, 在 7 次谐波锁模下对比分析了精密锁定后脉冲重复频率的艾伦偏差, 泵浦功率为 650 mW 时, 7 次谐波锁模锁模艾伦偏差最低是 $5.39 \times 10^{-13} @ 1 \text{ s}$, 基频锁模艾伦偏差最低是 $3.98 \times 10^{-13} @ 1 \text{ s}$ 。在 7 次谐波锁模状态下重复频率锁定精度有所下降, 但依然保持着 10^{-13} 的相对稳定性。在 3 次谐波锁模时对比分析了精密锁定后重频的相位噪声。相比较于基频锁模, 高次谐波锁模具有较大的噪声, 但从获得的 $5.39 \times 10^{-13} @ 1 \text{ s}$ (7 次谐波锁模) 重频艾伦偏差来看, 其完全可以作为精密测量等应用领域的有力工具, 为高速高精度激光测量提供了一种高重频种子源的解决思路。

参考文献:

[1] Ma Y P, Zhang Y, Wei C, et al. Surface polishing of CVD diamond coating by femtosecond laser [J]. *Optics and Precision*

- Engineering*, 2019, 27(1): 164-171. (in Chinese)
- [2] Wang C, Xiai Y C, Lin S Q, et al. Generation of a 49-GHz, high-repetition-rate, all-polarization-maintaining, frequency-locked multicarrier [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 745-751. (in Chinese)
- [3] Geng R F, Wu Z B, Tang K, et al. Precise control of laser emission epoch in laser time transfer with high repetition rate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(10): 20200473. (in Chinese)
- [4] Wang D F, Yao X, Jiao Z K, et al. Time-delay interferometry for space-based gravitational wave detection [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 275-288. (in Chinese)
- [5] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, et al. Rapid and precise absolute distance measurements at long range [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(6): 351-356.
- [6] Trocha P, Karpov M, Ganin D, et al. Ultrafast optical ranging using microresonator soliton frequency combs [J]. *Science*, 2018, 359(6378): 887-891.
- [7] Tan T, Yao B C. Novel functionalized frequency combs based on fiber microcavities [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5): 20211025. (in Chinese)
- [8] Shen B, Chang L, Liu J, et al. Integrated turnkey soliton microcombs [J]. *Nature*, 2020, 582(7812): 365-369.
- [9] Li C, Ma Y X, Gao X. 1 GHz repetition rate femtosecond Yb: Fiber laser for direct generation of carrier-envelope offset frequency [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(28): 8350-8353.
- [10] Zhou S A, Ouzounov D G, Wise F W. Passive harmonic mode-locking of a soliton Yb fiber laser at repetition rates to 1.5 GHz [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(8): 1041-1043.
- [11] Huang X Y, Xiao X S. Harmonic mode-locking of asynchronous dual-wavelength pulses in mode-locked all-fiber lasers [J]. *Optics Communications*, 2020, 474: 126079.
- [12] Xie J D, Yan L P, Chen B Y, et al. Automatic offset-frequency locking of external cavity diode laser in wide wavelength range [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(2): 211-219. (in Chinese)
- [13] Wang A M, Yang H Y, Zhang Z G. 503 MHz repetition rate femtosecond Yb: Fiber ring laser with an integrated WDM collimator [J]. *Optics Express*, 2011, 19(25): 25412-25417.