

多维度脉冲复用传输的单腔多光梳光纤激光器

王晓宇 陈杰 杨玲珍 向挽峰

Single-cavity multi-comb fiber laser based on mechanism of multi-dimensional pulse multiplexing transmission

WANG Xiaoyu, CHEN Jie, YANG Lingzhen, XIANG Wanfeng

引用本文:

王晓宇, 陈杰, 杨玲珍, 等. 多维度脉冲复用传输的单腔多光梳光纤激光器[J]. 应用光学, 2025, 46(2): 458–464. DOI: 10.5768/JAO202546.0208001

WANG Xiaoyu, CHEN Jie, YANG Lingzhen, et al. Single-cavity multi-comb fiber laser based on mechanism of multi-dimensional pulse multiplexing transmission[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(2): 458–464. DOI: 10.5768/JAO202546.0208001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0208001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单腔双光梳拍频信号包络提取方法

Beat frequency signal envelope extraction based on single-cavity dual-comb

应用光学. 2023, 44(4): 914–919 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0408001>

基于腔内滤波效应的双波长光纤激光器

Experimental and simulation study of dual-wavelength fiber laser based on intracavity filtering effect

应用光学. 2024, 45(5): 1079–1084 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0508001>

被动锁模光纤激光器中高阶色散对输出脉冲特性影响

Influence of high-order dispersion on output pulse characteristics in passively mode-locked fiber laser

应用光学. 2023, 44(5): 1102–1108 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0507001>

高信噪比多波长2 μm主动锁模光纤激光器

High SNR multi-wavelength 2 μm actively mode-locked fiber laser

应用光学. 2021, 42(1): 194–199 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0108001>

孤子分子/类噪声脉冲可切换的混合锁模光纤激光器

Switchable soliton molecules and noise-like pulses in hybrid mode-locking fiber laser

应用光学. 2023, 44(2): 456–461 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0208001>

低阈值锁模状态可转换的全保偏光纤激光器

Convertible all polarization-maintaining fiber laser in low threshold mode-locked state

应用光学. 2021, 42(4): 755–760 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0408002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 02-0458-07

引用格式: 王晓宇, 陈杰, 杨玲珍, 等. 多维度脉冲复用传输的单腔多光梳光纤激光器 [J]. 应用光学, 2025, 46(2): 458-464.

WANG Xiaoyu, CHEN Jie, YANG Lingzhen, et al. Single-cavity multi-comb fiber laser based on mechanism of multi-dimensional pulse multiplexing transmission[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(2): 458-464.



在线阅读

多维度脉冲复用传输的单腔多光梳光纤激光器

王晓宇, 陈 杰, 杨玲珍, 向挽峰

(太原理工大学 电子信息与光学工程学院, 山西 太原 030024)

摘 要: 提出了一种结合波长、偏振和方向的多维度复用的单腔多光梳光纤脉冲激光器。在共腔双向支路的不同部分引入保偏光纤, 与在线偏振控制器分别实现基于双折射效应的偏振复用机制和基于 Lyot 的光谱滤波效应。通过调节激光器的泵浦功率、偏振态和腔内损耗, 实现了双光梳、三光梳和四光梳激光脉冲输出。基于此单腔三光梳激光器, 使用希尔伯特算法对所得干涉图拍频信号的包络进行提取, 根据光学游标效应, 实现了 2 km 单模光纤的绝对距离测量, 测距结果与使用标准光学时域反射仪的测量结果相吻合, 验证了光梳间具有良好的互相干性。本研究方案提供了一种低复杂的多光梳光源, 可用于多光梳精密测量领域。

关键词: 激光器; 单腔双光梳技术; 锁模光纤激光器; 三光梳及四光梳生成

中图分类号: TN248

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0208001

Single-cavity multi-comb fiber laser based on mechanism of multi-dimensional pulse multiplexing transmission

WANG Xiaoyu, CHEN Jie, YANG Lingzhen, XIANG Wanfeng

(College of Electronic Information and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: A single-cavity multi-comb fiber laser based on multi-dimensional pulse multiplexing transmission was proposed by combining wavelength multiplexing, polarization multiplexing and direction multiplexing. Polarization-maintaining fibers and inline polarizers were placed on different branches of bidirectional fiber lasers to realize polarization multiplexing mechanism based on birefringence effect and spectral filtering effect based on Lyot. Dual-comb, tri-comb and quad-comb generation could be realized by adjusting the pump powers, laser polarization states and intracavity loss of lasers. Based on the single-cavity tri-comb laser, the envelope of the beat frequency signals of obtained interferogram was extracted by using the Hilbert-transform algorithm, and the absolute distance measurement of 2 km single-mode fiber was realized according to the optical vernier effect. The ranging results coincide with the results by using standard optical time-domain reflectometer, which verifies the good coherence between the optical combs. This scheme provides a low-complexity multi-comb light source, which has the potential to be used in multi-comb precision measurement field.

Key words: lasers; single-cavity dual-comb technology; mode-locked fiber laser; tri-comb and quad-comb generation

收稿日期: 2024-02-19; 修回日期: 2024-04-17

基金项目: 山西省基础研究计划资助项目 (20210302124169)

作者简介: 王晓宇 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光技术及应用研究。E-mail: 986598385@qq.com

通信作者: 陈杰 (1989—), 男, 博士, 副教授, 硕导, 主要从事光纤激光器及其应用研究。E-mail: chenjie@tyut.edu.cn

引言

光频梳(optical frequency comb, OFC)在时域上表现为周期性的超短脉冲序列,在频域上表现为均匀分布的梳齿状谱线^[1],以光频梳作为标尺在精密光谱^[2]、绝对距离测量^[3]、天文物理^[4]和频率测量^[5]等研究领域有广泛的应用前景。近年来,双光梳技术因其具有快速测量与高精度等优点,可以通过2个锁模脉冲序列的微小重复频率差产生的走离效应实现异步光学采样,将光频域信息变频至射频域,实现以相对较低的带宽获得高带宽的采样信息。使用2个独立自由运行激光器的双光梳光源,需要借助复杂精密的伺服系统保证其重复频率稳定性,维持光频梳间的互相干性^[6]。单腔双光梳技术作为一种低复杂度光源,被认为是一种传统稳频双梳光源的有效替代方案。该技术的基本思想是采用不同脉冲复用方式,从一台锁模激光器中生成2个重复频率略有不同的锁模脉冲序列,因其经历相同的外部环境扰动,故可以有效抑制共模噪声,实现良好的互相干性和相对稳定性^[7]。

研究者们基于不同脉冲复用机制,构建了波长^[8]、偏振^[9]、方向^[10]和脉冲波形^[11]等多维度复用的单腔双光梳激光器。相较于双光梳系统,使用3个及以上光频梳构成的多光梳系统可以进一步扩展测量的维度与尺度。2018年,美国密立根大学的 LOMSADZE B 等人^[12]提出了一种采用稳频三光梳的非线性光谱学测量方法,使用单个光电探测器成功实现了亚秒级的实时多维相干光谱测量。同年,天津大学的曲兴华教授课题组^[13]使用基于级联电光调制器的三光梳,建立两套多外差双光梳测距系统,满足高精度测距精度和大尺度的非模糊距离。但基于伺服系统控制的稳频三光梳和电光调制三光梳的多光梳系统均存在高复杂度的问题,使用单腔多光梳技术可以有效降低光源复杂度。2018年,北京航空航天大学郑铮教授课题组^[14]采用一种基于脉冲波长复用的单腔三光频梳光源,实现了大尺度的绝对距离测量。2019年,郑铮教授课题组^[15]再次提出并实现一种结合波长与偏振维度脉冲传输复用的单腔多光频梳生成方案,并对四光梳中的任意两套双光频梳进行相干拍频实验,实验结果验证了光频梳间的良好相干性。2020年,哈尔滨工业大学的 YANG R T 等人^[16]提出了一种双环结构的单腔三梳激光器,通过结合波长复用与方向复用,在一个双环激光器可以实现不同的2种三梳生成,以改变生成频率

梳间的重复频率差。2023年,北京邮电大学的 ZHU E 等人^[17]基于双环结构继续研究,双环中分别使用基于NALM的单波长锁模和基于Lyot滤波器原理的双波长锁模实现三梳生成。

本文提出一种基于多维度脉冲复用传输的单腔多光梳光源方案,通过波长复用、偏振复用和方向复用的组合,在单一激光器中实现在多种工作状态下的双光梳、三光梳和四光梳生成。同时,设计了三光梳绝对距离测量实验,测距结果与标准光学时域反射仪测量结果相一致,验证了光频梳间的互相干性。单腔多光梳激光器有望满足集成化、轻小型化的需求,成为多光梳精密测量的一种替代解决方案。

1 实验原理

1.1 基于双折射的偏振复用原理

基于双折射的偏振复用机制是在锁模光纤激光器中引入有显著双折射的保偏光纤(polarization-maintained fiber, PMF),破坏激光腔内脉冲的偏振简并态。不同偏振态脉冲在腔内传输存在显著群速度差异,最终形成重复频率不同、偏振正交的矢量孤子锁模脉冲序列^[18]。保偏光纤一般通过截面几何尺寸的设计引入双折射效应。如图1(a)所示,不同偏振态的光在快慢轴以不同群速度传输。

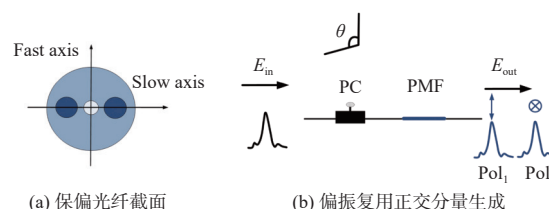


图1 基于双折射的偏振复用原理

Fig. 1 Polarization multiplexing principle based on birefringence

光经过保偏光纤时产生的相位差^[18]可表示为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \Delta n_p}{\lambda} L_{\text{PMF}} \quad (1)$$

式中: Δn_p 为快轴与慢轴的相对折射率差; L_{PMF} 为保偏光纤长度; λ 为入射光波长。调节偏振控制器(polarization controller, PC)改变腔内偏振态,通过保偏光纤后生成正交偏振的双矢量孤子脉冲,如图1(b)所示。

1.2 基于Lyot滤波器的波长复用原理

波长复用双梳光源是通过在锁模光纤激光器内引入光谱滤波效应,产生不同中心波长与重复

频率的锁模脉冲序列。以 Lyot 滤波器为例, 作为一类基于偏振干涉效应的光学滤波器, 光谱透过率呈现出固定的波长间隔, 形成梳状结构光谱。全光纤结构的 Lyot 滤波器由偏振控制器、保偏光纤与起偏器构成, 如图 2 所示。

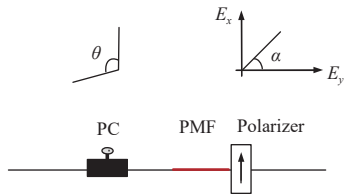


图 2 全光纤结构的 Lyot 滤波器

Fig. 2 Lyot filter for all-fiber structure

Lyot 滤波器的归一化功率传输函数为^[19]

$$T = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{2\pi L_{PMF} \Delta n_w}{\lambda}\right) \quad (2)$$

式中: Δn_w 为双折射光纤在快慢轴上的等效折射率差; θ 是输入光入射时与保偏光纤快轴之间的角度, θ 角度的调节可通过旋转偏振控制器实现。

Lyot 滤波器的自由光谱范围^[19] 可表示为

$$f_{FSR} = \lambda^2 / \Delta n_w L_{PMF} \quad (3)$$

由式 (3) 可知, Lyot 滤波器的自由光谱范围与保偏光纤等效折射率差和长度的乘积成反比。

2 实验装置

图 3 为波长复用、方向复用、偏振复用多维度单腔多光梳光纤激光器装置图。采用长度为 0.8 m 的掺铒光纤 (Er^{3+} -doped fiber, EDF) 作为增益介质, 由 2 个半导体激光器 (pump laser) 通过 2 个 980/1550 波分复用器 (wavelength division multiplexer, WDM) 以相同功率进行双向泵浦。2 个环形器 (circulator, CIR) 用于连接激光器共腔部分与 2 个环路。在本实验中, 2 个自制的单壁碳纳米管 (single-wall carbon nanotube, SWNT) 作为可饱和吸收体分别置于不同环路中实现激光锁模。实验中的自制碳纳米管可饱和吸收体 (saturates absorbers, SA) 是通过透射式的光沉积法制备。使用超声清洗仪分散无水乙醇中的碳纳米管后, 通过泵浦光的光诱导力将乙醇中的碳纳米管吸附至跳线光纤纤芯, 待乙醇挥发后与另一跳线通过法兰连接, 完成碳纳米管可饱和吸收体器件的制作。良好的碳纳米管可饱和吸收体器件的调制深度约为 5%, 插入损耗约为 3 dB, 能够保证激光器稳定锁模 24 h 以上。此外,

在每个环路中配置光学衰减器 (optical attenuator, OA) 和偏振控制器, 实现平衡环路功率和调整腔内偏振态的目的。

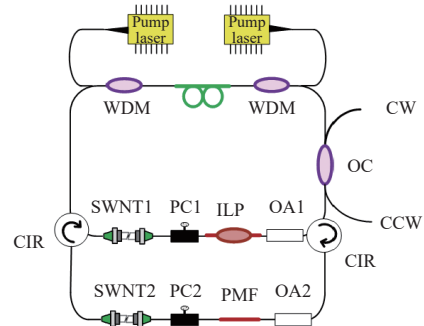


图 3 单腔多光梳光纤激光器装置图

Fig. 3 Experimental setup of single-cavity multi-comb fiber laser

在本实验装置中, 使用双环形器确保光在顺时针 (clockwise, CW) 环路和逆时针 (counter-clockwise, CCW) 环路的单向传播, 由耦合器输出 (optical coupler, OC)。在顺时针环路中, 引入带有 60 cm 保偏光纤尾纤的在线起偏器 (in-line polarizer, ILP), 与偏振控制器组成 Lyot 滤波器, 实现脉冲波长复用机制。在逆时针环路中, 引入一截 50 cm 长的保偏光纤, 增加腔内双折射效应, 实现脉冲偏振复用机制。2 个环路的总长度分别为 5.14 m 和 5.13 m。为避免外界环境干扰, 将激光器所有的光纤和器件固定在一个铝盒内的铝板上。实验结果由光谱分析仪 (OSA, Agilent, 6375B)、示波器 (OSC, Tektronix, MSO72004) 和频谱分析仪 (Siglent, SSA1015X) 监测。

3 实验结果与分析

3.1 偏振复用、波长复用与方向复用单一维度的双光梳生成

将光学衰减器 1 的损耗调至最小, 光学衰减器 2 的损耗调至最大。调节泵浦功率至 207 mW, 微调偏振控制器, 在顺时针环路中可实现波长复用锁模的双波长输出。顺时针功率输出为 5.2 mW, 逆时针环路无输出。双波长光谱中心波长分别为 1551.1 nm 和 1561.9 nm, 计算出的 f_{FSR} (11.0 nm) 与锁模中心波长差 (10.8 nm) 基本吻合, 3 dB 带宽分别为 2.9 nm 和 2.7 nm, 如图 4(a) 所示。重复频率分别为 41.282 027 MHz 和 41.283 133 MHz, 重复频率差值为 1 153 Hz, 如图 4(b) 所示。

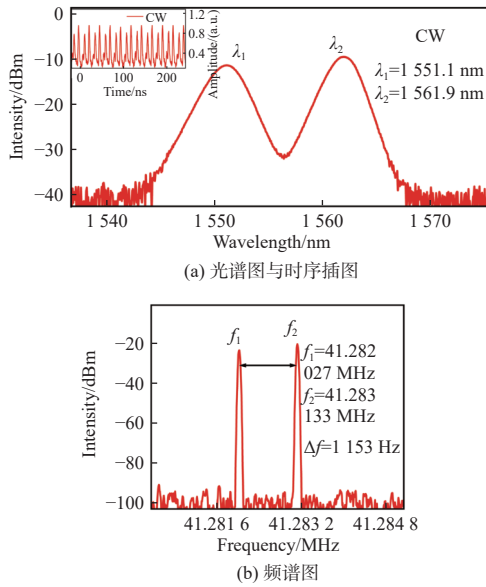


图4 波长复用双光梳输出特性

Fig. 4 Output characteristics of wavelength multiplexing dual comb

将光学衰减器 1 的损耗调至最大, 光学衰减器 2 损耗调至最小。调节泵浦功率至 277 mW, 同时微调 PC2 调节腔内偏振态, 光在传播过程中因双折射效应出现群速度差, 进而在腔内可实现 2 个近似正交偏振的锁模脉冲序列。此时逆时针输出功率为 0.5 mW, 光谱中心波长为 1559.3 nm, 3 dB 带宽为 3.8 nm, 如图 5(a) 所示。通过外接偏振分束器和偏振控制器, 可实现双偏振态输出的分离, 且重复频率具备一定调谐范围, 重复频率分别约为

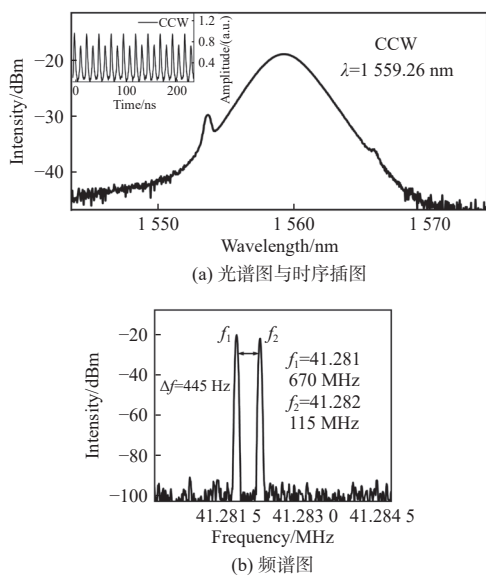


图5 偏振复用双光梳输出特性

Fig. 5 Output characteristics of polarization multiplexing dual comb

41.281 670 MHz 和 41.282 115 MHz, 重复频率之差约为 445 Hz, 如图 5(b) 所示。

为平衡正反环路增益损耗, 调谐光学衰减器 1 至 3 dB, 光学衰减器 2 至 3 dB, 调整偏振控制器 1, 在顺时针环路内输出一个稳定的锁模脉冲序列, 轻微调整光学衰减器 2 与偏振控制 2, 在逆时针环路内同时输出另一个单脉冲锁模脉冲。当泵浦总功率为 270 mW 时, 顺时针输出功率为 2.5 mW, 逆时针输出功率为 0.6 mW。顺时针与逆时针环路输出中心波长分别为 1556 nm 和 1559.3 nm, 3 dB 带宽分别约为 2.5 nm 和 2.9 nm。由于不同的光学器件顺序和非共腔部分单模光纤长度, 2 个脉冲序列会产生一定的重复频率差。输出重复频率分别为 41.281 853 MHz 和 41.282 789 MHz, 重复频率差约 936 Hz, 如图 6(b) 所示。

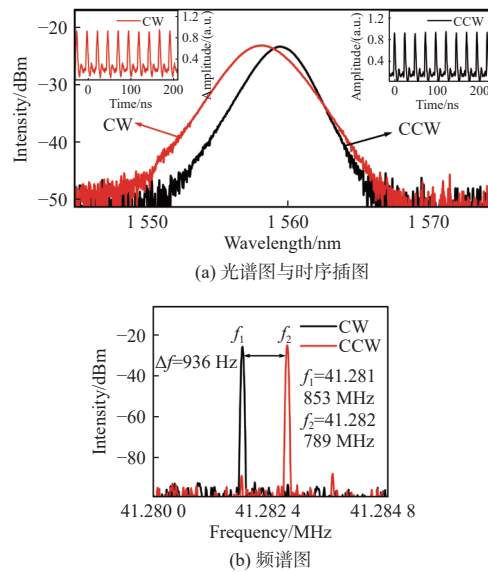


图6 方向复用双光梳输出特性

Fig. 6 Output characteristics of direction multiplexing dual comb

3.2 基于偏振复用、波长复用与方向复用维度相结合的三光梳生成与四光梳生成

在顺时针环路中输出波长双光梳, 逆时针方向输出单个锁模脉冲, 即可以实现单腔三光梳输出。在波长双光梳的工作状态下, 进一步调整光学衰减器 2 的损耗, 增加泵浦功率至 320 mW, 并轻微调节偏振控制器 2 实现单腔三光梳输出。顺时针环路内波长双光梳的中心波长分别为 1551.6 nm 和 1562.4 nm, 3 dB 带宽分别为 3.1 nm 和 2.5 nm, 重复频率分别为 41.281 158 MHz 和 41.282 250 MHz。

逆时针输出单脉冲锁模的中心波长为 1559.5 nm, 3 dB 带宽为 3.7 nm, 重复频率为 41.281 594 MHz, 波长复用与方向复用三光梳输出特性如图 7 所示。

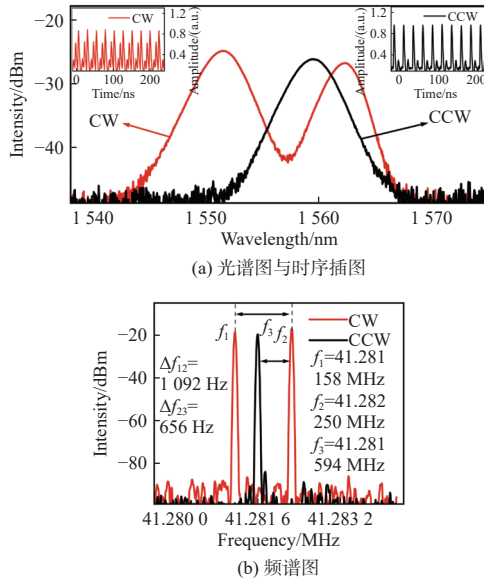


图 7 波长复用与方向复用三光梳输出特性

Fig. 7 Output characteristics of wavelength multiplexing and direction multiplexing tri-comb

在顺时针环路输出单个锁模脉冲, 逆时针环路输出稳定的偏振双梳, 可以实现另一状态的单腔三光梳。在偏振双光频梳的工作模式下, 增加泵浦功率至 296 mW, 轻微调节光学衰减器 1 和偏振控制器 1, 即可实现单腔三光频梳。逆时针输出功率为 0.6 mW, 偏振双光梳中心波长为 1556.0 nm, 3 dB 的带宽约为 2.3 nm, 重复频率约为 41.281 430 MHz; 顺时针输出功率为 2.6 mW, 中心波长为 1559.0 nm, 3 dB 带宽为 2.4 nm, 重复频率为 41.282 472 MHz, 偏振复用与方向复用三光梳输出特性如图 8 所示。

在 2 种单腔三光梳的工作模式下, 进一步调谐偏振控制器和泵浦功率可实现单腔四光梳运行, 即锁模光纤激光器在顺时针环路和逆时针环路中同时实现脉冲波长复用与脉冲偏振复用。此时, 逆时针环路输出光谱中心波长约为 1558.7 nm, 3 dB 带宽为 3.2 nm, 输出功率约为 0.8 mW; 顺时针环路输出光谱中心波长分别为 1549.4 nm 和 1562.1 nm, 3 dB 带宽为 2.2 nm 和 2.1 nm, 输出功率约为 5.6 mW, 如图 9(a) 所示。波长复用双光梳重复频率分别为 41.282 035 MHz 和 41.283 079 MHz, 偏振复用双光梳的重复频率分别约为 41.281 679 MHz 和 41.282 434 MHz, 如图 9(b) 所示。

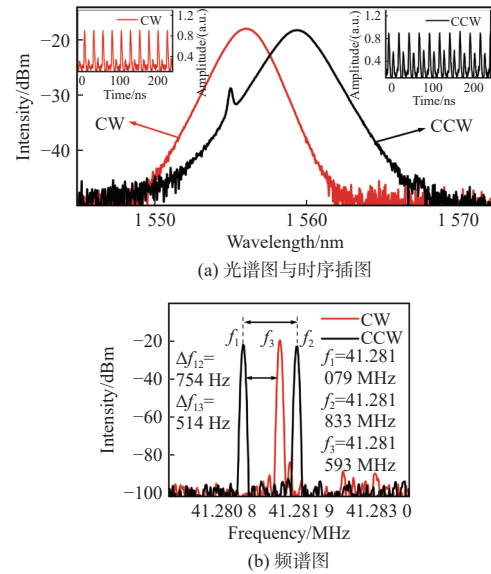


图 8 偏振复用与方向复用三光梳输出特性

Fig. 8 Output characteristics of polarization multiplexing and direction multiplexing tri-comb

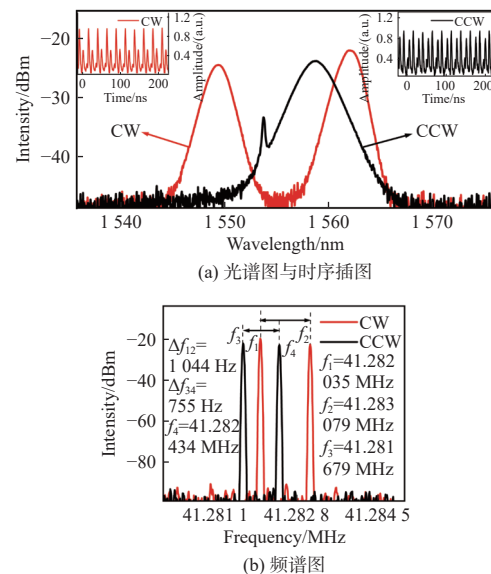


图 9 四光梳生成输出特性

Fig. 9 Output characteristics of quad-comb generation

综上所述, 讨论了基于多维度脉冲复用传输的单腔多光梳光纤激光器多种工作状态的实现, 不同状态间的自由切换展现了其在不同应用场景的高适应性和高灵活性, 这为其应用于各计量领域提供了更多可能性。

4 三光梳绝对距离测量实验

为了验证各个光频梳对间的互相干性, 搭建了如图 10 所示的三光梳绝对距离测量实验装置。通

激光器输出通过隔离器(optical isolator, ISO)后,使用粗波分复用滤波器(coarse wavelength division multiplexing filter, CWDM)将多维度脉冲传输复用单腔三光梳光纤激光器的3个异步锁模脉冲序列进行分离。为避免光谱混叠,将3个锁模序列分别经过掺铒光纤放大器(Erbium-doped fiber amplifier, EDFA)与光滤波器(dense wavelength division multiplexing filter, DWDM)进行非线性展宽与光谱滤

波,测量装置如图10所示。顺时针方向的波长复用双梳(λ_1 和 λ_2)作为2个探测光梳经过一个马赫-曾德尔光纤装置,分别进入目标臂(target arm, TA)和参考臂(reference arm, RA),由第三光梳(λ_3)作为本征光梳分别与2个探测光梳在OC中发生拍频,随后由平衡探测器(balanced photodetector, BPD)进行光电转换,并通过数据采集板卡(analog-to-digital conversion board, A/D)进行信号采集。

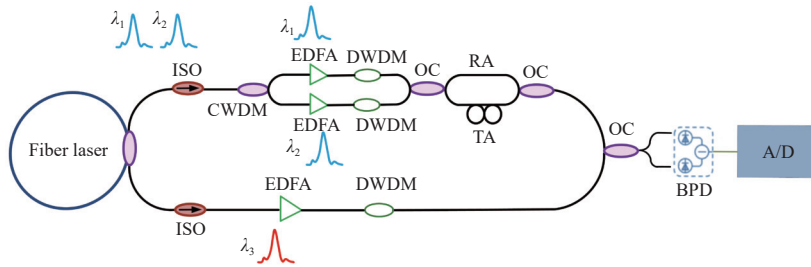


图10 三梳绝对距离测量装置

Fig. 10 Experimental setup of tri-comb absolute distance measurement

如图11(a)所示,拍频信号之间的周期取决于所选光频梳对的重复频率差,图中T与R分别对应2个不同干涉周期的目标信号与参考信号。可采用希尔伯特变换进行包络提取^[20],如图11(b)所示,取包络峰值计算不同干涉周期的参考与目标拍频信号距离,通过光学游标原理^[21]可精确计算测量光纤长度。

式中:双梳测距的非模糊距离 R_A 是指在进行测距时不会出现测距歧义的最大测量距离;本系统重复频率 f_{rep} 约为41.281 MHz,本征光梳与2个探测光梳的重复频率差分别约为361 Hz与684 Hz; n 为光纤的折射率; c 为光速。当使用双梳测距系统,测量距离超出非模糊距离 R_A 时,为避免测距模糊,需通过先验知识确定非模糊距离倍数。而测量光纤的绝对距离 L 可以表示为

$$L = m \times R_{A1} + d_1 \quad (5)$$

$$L = m \times R_{A2} + d_2 \quad (6)$$

式中:整数 m 取决于测量的绝对距离, R_{A1} 和 R_{A2} 为对应2个不同周期的测距系统的模糊范围, d_1 和 d_2 与干涉图中的目标与参考拍频信号距离相关,分别约为3.667 m与3.718 m。

$$m \times R_{A1} + d_1 = m \times R_{A2} + d_2 \quad (7)$$

$$m = (d_2 - d_1) / (R_{A1} - R_{A2}) \quad (8)$$

根据式(8)计算出对应绝对距离的 m 值为405,代入式(5)或式(6)可得光纤的绝对距离。实验测得的光纤长度为2018.7 m,使用标准光学时域反射仪的测量结果为2018.4 m $\pm$ 0.5 m,两者相吻合。

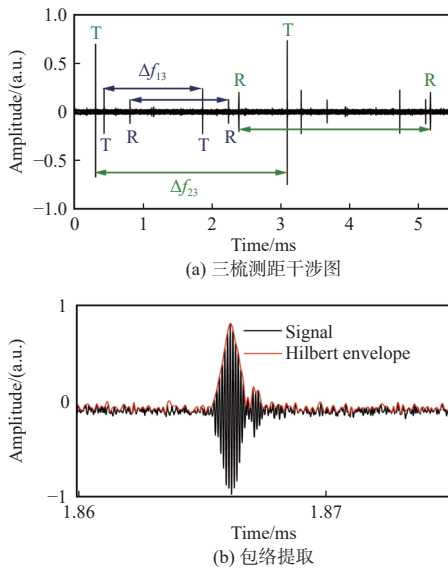


图11 三梳绝对距离结果图

Fig. 11 Results diagrams of tri-comb absolute distance

测距系统的模糊距离 R_A 可以表示为^[22]

$$R_A = c / (n \times f_{\text{rep}}) \quad (4)$$

5 结论

在本文中,提出一种方向、波长与偏振维度脉冲复用传输方式结合的单腔多光梳光纤激光器。通过调节泵浦功率、损耗及偏振态可实现重复频

率不同的三光梳生成,并基于此激光器搭建三光梳绝对距离测量装置,测距结果与标准光学时域反射仪测量结果相吻合。本研究为多光梳精密测量系统提供了一种新型单腔多光梳光源。

参考文献:

- [1] UDEM T, HOLZWARTH R, HÄNSCH T W. Optical frequency metrology[J]. *Nature*, 2002, 416(6877): 233-237.
- [2] CODDINGTON I, NEWBURY N, SWANN W. Dual-comb spectroscopy[J]. *Optica*, 2016, 3(4): 414-426.
- [3] TANG G Q, QU X H, ZHANG F M, et al. Absolute distance measurement based on spectral interferometry using femtosecond optical frequency comb[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 120: 71-78.
- [4] MURPHY M T, UDEM T, HOLZWARTH R, et al. High-precision wavelength calibration of astronomical spectrographs with laser frequency combs[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2007, 380(2): 839-847.
- [5] ZHAO X, LI C, LI T, et al. Dead-band-free, high-resolution microwave frequency measurement using a free-running triple-comb fiber laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 2770098.
- [6] ZHAO X, ZHENG Z, LIU L, et al. Switchable, dual-wavelength passively mode-locked ultrafast fiber laser based on a single-wall carbon nanotube modelocker and intracavity loss tuning[J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 1168-1173.
- [7] 赵欣, 杨建军, 张力钎, 等. 单腔双光梳技术[J]. *中国激光*, 2022, 49(19): 43-64.
ZHAO Xin, YANG Jianjun, ZHANG Liqian, et al. Single-cavity dual-comb technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19): 43-64.
- [8] CHEN J, ZHAO X, YAO Z, et al. Dual-comb spectroscopy of methane based on a free-running Erbium-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 11406-11412.
- [9] ZHAO X, LI T, LIU Y, et al. Polarization-multiplexed, dual-comb all-fiber mode-locked laser[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(9): 853-857.
- [10] LI B W, XING J, KWON D, et al. Bidirectional mode-locked all-normal dispersion fiber laser[J]. *Optica*, 2020, 7(8): 961-964.
- [11] LIU Y, ZHAO X, HU G Q, et al. Unidirectional, dual-comb lasing under multiple pulse formation mechanisms in a passively mode-locked fiber ring laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 21392-21398.
- [12] LOMSADZE B, SMITH B C, CUNDIFF S T. Tri-comb spectroscopy[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(11): 676-680.
- [13] ZHAO X Y, QU X H, ZHANG F M, et al. Absolute distance measurement by multi-heterodyne interferometry using an electro-optic triple comb[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 807-810.
- [14] LI T, ZHAO X, CHEN J, et al. Absolute distance measurement with a long ambiguity range using a tri-comb mode-locked fiber laser[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. San Jose, California: OSA, 2019: 1-2.
- [15] LI T, ZHAO X, CHEN J, et al. Tri-comb and quad-comb generation based on a multi-dimensional multiplexed mode-locked laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 37(20): 5178-5184.
- [16] YANG R T, SUN H, LV H S, et al. A multidimensional multiplexing mode-locked laser based on a dual-ring integrative structure for tri-comb generation[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(22): 8260-8270.
- [17] ZHU E, ZHU M W, JIANG T W, et al. Tri-comb generation with a dual-ring structure[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(22): 6039-6045.
- [18] LIU J U and XU T H. Revisiting the stress-induced birefringence in polarization-maintaining fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 41(15): 5097-5106.
- [19] GUO Z G, LIU T T, PENG J S, et al. Self-started dual-wavelength mode-locking with well-controlled repetition rate difference[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 39(11): 3575-3581.
- [20] 陈杰, 王晓宇, 郭雨清, 等. 单腔双光梳拍频信号包络提取方法[J]. *应用光学*, 2023, 44(4): 914-919.
CHEN Jie, WANG Xiaoyu, GUO Yuqing, et al. Beat frequency signal envelope extraction based on single-cavity dual-comb[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(4): 914-919.
- [21] CODDINGTON I, SWANN W C, NENADOVIC L, et al. Rapid and precise absolute distance measurements at long range[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3: 351-356.
- [22] CAMENZIND S L, FRICKE J F, KELLNER J, et al. Dynamic and precise long-distance ranging using a free-running dual-comb laser[J]. *Optics Express*, 2022, 30(21): 37245-37260.