

单腔双光梳拍频信号包络提取方法

陈杰 王晓宇 郭雨清 向挽峰

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

CHEN Jie, WANG Xiaoyu, GUO Yuqing, XIANG Wanfeng

引用本文:

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. DOI: 10.5768/JAO202344.0408001

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. DOI: 10.5768/JAO202344.0408001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0408001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双飞秒激光频率梳光谱测量技术研究进展

Research progress of double femtosecond laser frequency comb spectroscopy measurement technology

应用光学. 2021, 42(1): 157–175 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0107003>

水下探测用高重频双波段激光器

High repetition rate dual-wavelength laser for under water detection

应用光学. 2017, 38(4): 670–673 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0407003>

高重复频率锁模光纤激光器及其超连续谱产生

High repetition-rate mode-locked fiber laser and generation of supercontinuum

应用光学. 2018, 39(6): 916–920 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0607001>

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>

基于多波长布里渊光纤激光器的温度传感特性

Temperature sensing characteristics based on multi-wavelength Brillouin fiber laser

应用光学. 2018, 39(4): 585–589 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0408001>

2.1 μm 可调谐多波长掺铥光纤激光器

Tunable multi-wavelength holmium-doped fiber laser operating at 2.1 μm

应用光学. 2019, 40(3): 500–504 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0307003>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 04-0914-07

单腔双光梳拍频信号包络提取方法

陈杰, 王晓宇, 郭雨清, 向挽峰

(太原理工大学 光电工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 对单腔双光梳拍频信号的包络提取方法进行了实验研究。在单个光纤激光器中引入具有强双折射的保偏光纤, 使脉冲沿偏振正交的两个方向进行复用传输和锁模。精细调节腔内偏振态, 实现了重频差在 337 Hz~2.33 kHz 范围内连续可调的双光梳生成。通过激光器腔外偏振态调节和偏振分束, 获得了消光比分别为 28.5 dB 和 38.2 dB 的两路光频梳。两路光频梳经过异步采样后, 采用所设计的包络检波电路对拍频信号的包络进行提取, 与采用基于样条插值和希尔伯特变换的包络提取算法计算结果相比, 所提取的包络峰值位置基本保持一致, 验证了该方法的可行性。双光梳拍频信号包络提取实验研究可以快速实时提取包络形状和包络峰值位置, 可进一步应用于包络信号触发和精密测距等领域。

关键词: 激光器; 光学频率梳; 单腔双光梳; 包络提取

中图分类号: TN248

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0408001

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

CHEN Jie, WANG Xiaoyu, GUO Yuqing, XIANG Wanfeng

(College of Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The experimental study of beat frequency signal envelope extraction based on single-cavity and dual-comb was carried out. A piece of polarization-maintaining fiber (PMF) with strong birefringence was introduced into a single fiber laser to make the pulses multiplexed and mode-locked in two directions with orthogonal polarization. By finely adjusting intracavity polarization states, the continuous adjustable dual-comb generation was realized in the range of 337 Hz~2.33 kHz. The dual optical frequency combs with extinction ratios of 28.5 dB and 38.2 dB were obtained by laser extra-cavity polarization states regulation and polarization beam splitting. After asynchronous sampling of the dual optical frequency combs, the designed envelope detection circuit was used to extract the envelope of the beat frequency signal. Compared with the results of envelope extraction algorithm based on spline interpolation and Hilbert transform, the extracted peak position of the envelope was basically consistent, which verified the feasibility of the method. The experimental study of dual-comb beat frequency signal envelop extraction can quickly extract envelope shape and envelope peak position in real time, which can be further applied in the fields of envelope signal triggering and precise ranging.

Key words: laser; optical frequency combs; single-cavity dual-comb; envelope extraction

收稿日期: 2023-01-09; 修回日期: 2023-02-08

基金项目: 国家自然科学基金 (62105232); 山西省基础研究计划资助项目 (20210302124169)

作者简介: 陈杰 (1989—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事双光梳光纤激光器及其精密测量应用研究。

E-mail: chenjie@tyut.edu.cn

引言

光学频率梳(简称光频梳)是指在时域上分布严格等周期的激光脉冲序列,在频域上则为数以百万计的离散、稳定的‘梳齿’状频率分量^[1]。光频梳具有频率稳定性高、位置间隔固定、光谱覆盖范围广的优良特性,使其在长度、频率、空间等基本物理量的高精度测量方面具有重要的科学意义和应用价值。近年来,发展迅速的双光频梳技术通过采用两台激光器输出重复频率稍有差别、相位关系稳定的两组光频梳来进行精密测量^[2-4]。通过异步采样相干拍频,可将待测时域飞秒或皮秒量级的信号延缓微秒或毫秒量级,更加容易被具有通用带宽和速度的电子系统采集和处理,从而实现大带宽、高分辨率性能的双光梳精密测量。

目前双光梳的产生方法主要依赖两套独立的锁模激光器,通过复杂精密的电子反馈控制系统,对激光器的输出频率进行相位锁定,来消除两套激光器输出频率的不相关性^[2-4]。相比采用两套独立激光器进行频率锁定实现双光梳生成,研究在单个激光器中实现光频梳锁模复用传输新机制,从波长^[5-8]、偏振^[9]、双向传播^[10-11]、锁模机制^[12]等不同维度上来实现,极大地简化了双光梳光源结构。两组光频梳所对应的锁模脉冲在同一激光器内传输,经历相同的外界环境干扰,共模噪声得到有效抑制,保持了良好的互相干和时频特性,并已在光谱学测量^[6,13-16]、泵浦探测^[17]、距离测量^[18-22]、太赫兹光谱测量^[23-25]等方面得到应用。然而,在双光梳距离测量过程中,由于异步采样技术为欠采样以及后续模数转换采样率受限,脉冲采样点有限,有时无法获得实际脉冲峰值的精确时刻,需借助复杂的信号包络重构算法,精确计算出信号的包络峰值,再结合脉冲时间飞行法等算法对待测距离进行精密测量^[22]。在双光梳太赫兹光谱学测量应用中,所激发太赫兹脉冲信号较为微弱且占空比低,需进一步生成与光激发太赫兹脉冲信号相同步的拍频触发信号,对太赫兹脉冲进行实时触发采集和平均,减少数据采集冗余度。然而触发信号的产生通常采用双光梳在非线性晶体中进行拍频,要精细调节两束光的强度、偏振、距离等参数,且严格满足两束光相位匹配条件,才能实现拍频信号输出^[25],结构复杂,不利于系统集成。

基于上述问题,提出了一种基于偏振复用单腔双光梳激光器的拍频信号包络提取硬件实现方法。在单个光纤激光器内引入具有强双折射的保

偏光纤,结合腔内偏振控制器对偏振态的调节,破坏原有的光的简并态传输模式,实现在单一激光器内重频差为 337 Hz~2.33 kHz 范围内的偏振正交的两组双光梳输出。通过对偏振正交的双光梳进行异步采样后,采用所设计包络提取电路实现了快速干涉拍频信号提取,并和基于包络算法提取的结果相比基本吻合。该包络信号提取方法为精密测距和信号实时触发采集等应用提供了一种有效的方法。

1 双光梳拍频信号包络提取原理

1.1 双光梳异步采样基本原理

双光梳拍频主要是基于异步采样原理,利用重复频率略有差别的两组激光锁模脉冲进行采样,如图 1 所示。设重频为 f_1 的激光脉冲为信号光,重频为 f_2 的激光脉冲为探测光。假设在起始时刻,两组激光脉冲相重合,由于重频差 ($\Delta f=f_1-f_2$) 的存在,时域上在下一组脉冲之间将会产生一个微小的时间差,在随后的双光梳脉冲对中都会叠加相同的时间差,直到两组脉冲时间上相重合。当信号光和探测光同时输入至 2×2 耦合器时,两路激光脉冲将会发生混频,其效果可以等效为如图 1 所示的探测光对信号光的采样。由于两组脉冲的重频相差较小,不满足奈奎斯特采样定理的要求,这种采样属于欠采样,也将这种采样方式称为异步采样。利用异步采样方法,不仅可以代替传统的机械延迟扫描采样,简化系统结构,提高采样稳定性和效率,还可将信号光脉冲从飞秒或皮秒量级延缓至微秒或毫秒量级,频率范围下变频至微波频段,便于被低带宽的标准采集模块快速采集和处理。

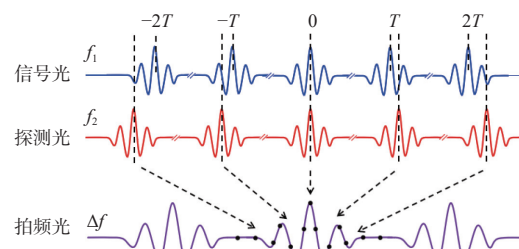


图 1 双光梳激光脉冲异步采样原理

Fig. 1 Principle of asynchronous sampling based on dual-comb laser pulses

1.2 异步采样拍频信号包络提取电路

双光梳异步采样后的拍频光脉冲可以看作是以重频差 Δf 的倒数为时间间隔的激光脉冲。对其包络进行提取,可以获得拍频信号在振幅、脉宽、

脉冲上升下降的速度以及激光器输出双光梳的稳定性进行判断。双光梳技术应用于精密距离测量时,通常采用数据插值结合希尔伯特变换或小波变换对拍频信号包络进行提取,获得拍频信号的峰值信息,通过计算出包络峰值时间差,根据光传播速度,可获得最终的距离信息。

提出采用如图2所示的硬件电路代替传统的算法来获取拍频信号包络。异步采样拍频信号经过光电探测器后,通过低通滤波器,滤除信号光和探测光对信号的影响。随后拍频信号进入基于二极管的包络检波电路进行包络检波。该电路工作的原理为:当输入信号 U_i 大于电容和电阻两端电压 U_0 时,二极管导通,输入信号 U_i 对电容 C 进行充电;当 U_i 小于 U_0 时,二极管反向截止,电容 C 停止充电,并对 R 进行充电。充电时,由于二极管的内阻 R_d 比 R 小很多,充电速度快,放电时, R 比 R_d 大很多,放电较慢,所以最终 U_0 输出电压波动较小,基本接近于输入拍频信号的 U_i 包络线,完成包络检波工作。在包络检波电路中,合理选择电容 C 可改变电容的充电时间常数。提高充电时间常数,可使得包络检波输出信号和输入信号的误差减小。为了满足后续数据采集需求,包络检波后经过低噪声放大器对包络信号进一步放大。

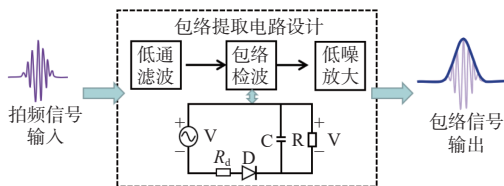


图2 双光梳拍频信号包络检波电路

Fig. 2 Envelope power detector circuit of dual-comb beat frequency signal

2 偏振复用双光梳异步采样包络提取实验装置

偏振复用单腔双光梳拍频包络提取实验装置如图3所示。系统主要包括偏振复用双光梳光纤激光器、异步采样拍频模块、包络提取电路模块以及数据采集和处理模块。偏振复用双光梳激光器主要包括980 nm激光泵浦管(laser diode, LD), 980/1550 nm波分复用器(wavelength division multiplexer, WDM), 0.6 m长的掺铒光纤(Er-doped fiber, EDF), 偏振控制器(polarization controller, PC)和耦合比为6:4的光耦合器(output coupler, OC)。偏振无关光

隔离器(isolator, ISO)保证腔中锁模脉冲沿单一方向传输。可饱和吸收体(SA)为光沉积法自行制备的基于单壁碳纳米管(single-wall carbon nanotube, SWNT)材料的锁模器件,插入损耗约为4.2 dB。此外,光纤激光器腔内引入长度为0.5 m的保偏光纤(polarization-maintained fiber, PMF),对应拍长为3 mm,用于两组脉冲在偏振正交方向上的复用传输。双光频梳光纤激光器的总腔长为3.91 m,净腔色散约为 -0.23 ps^2 ,激光器工作在反常色散状态下。

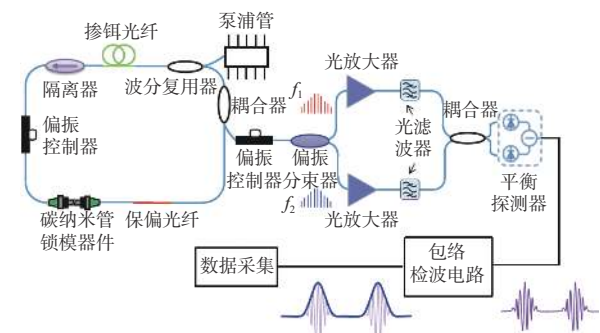


图3 偏振复用双光梳拍频包络提取实验装置

Fig. 3 Experimental setup for beat frequency envelope extraction based on polarization-multiplexing dual-comb

光纤激光器输出偏振复用双光梳经过偏振控制器和偏振分束器(polarization beam splitter, PBS)后,分成偏振正交的两路光频梳,一路光频梳重频为 f_1 ,另一路光频梳重频为 f_2 。为了避免两路光频梳异步采样拍频时光谱发生混叠,两路光频梳经过光放大器(EDFA)后分别进行光谱滤波。选用的光带通滤波器(band-pass filter, BPF)的中心波长均为 $\sim 1550 \text{ nm}$,带宽为1 nm。随后两路信号在2×2耦合器(OC)中发生拍频,并被平衡探测器(balanced photo-detector, BPD)探测进行光电转换。最后,经过设计的包络检波电路对包络信号进行提取以及后续的数据采集和处理。

3 实验结果与分析

当980 nm泵浦LD功率调节至72 mW时,精细调节腔内偏振控制器,脉冲在两个垂直偏振上以不同的群速度在激光器中传播,通过可饱和吸收体器件,输出的偏振复用锁模光谱如图4(a)所示。两个偏振的锁模光谱的中心波长为1555.4 nm,光谱3 dB处带宽为3.5 nm。锁模光谱两侧出现明显的Kelly边带,进一步说明激光器工作在反常色散状态。采用带宽为150 MHz的光电探测器进行光电转换后,频谱分析仪测得射频频谱图如图4(b)

所示。可以看出双光梳的重频分别为 $f_1 \sim 52.527169$ MHz 和 $f_2 \sim 52.527506$ MHz, 频谱信噪比均大于 60 dB, 重频差约为 $\Delta f = 337$ Hz。通过调节光纤激光器腔内偏振态和腔内双折射大小, 重频差可实现 337 Hz $\sim$ 2.33 kHz 连续可调双光梳输出, 图 4(b) 展示了调节过程中重频差为 337 Hz、1154 Hz 和 2334 Hz 的频谱图。从结果分析可知, 通过在激光腔内引入具有强双折射的保偏光纤, 破坏脉冲以简并模式在腔内进行传输的方式, 使脉冲沿不同偏振方向进行复用传输和锁模, 实现了重频差可调的两组锁模激光脉冲输出。由于两组脉冲在腔内传输时共享相同的物理传播路径, 这两组激光脉冲受到外界干扰基本相同, 共模噪声相互抑制, 可以保持良好的互相关性和时频特性。

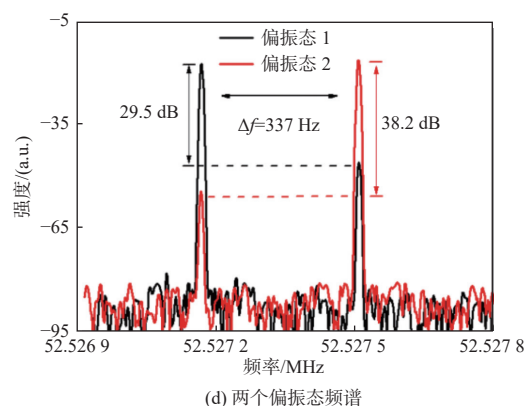
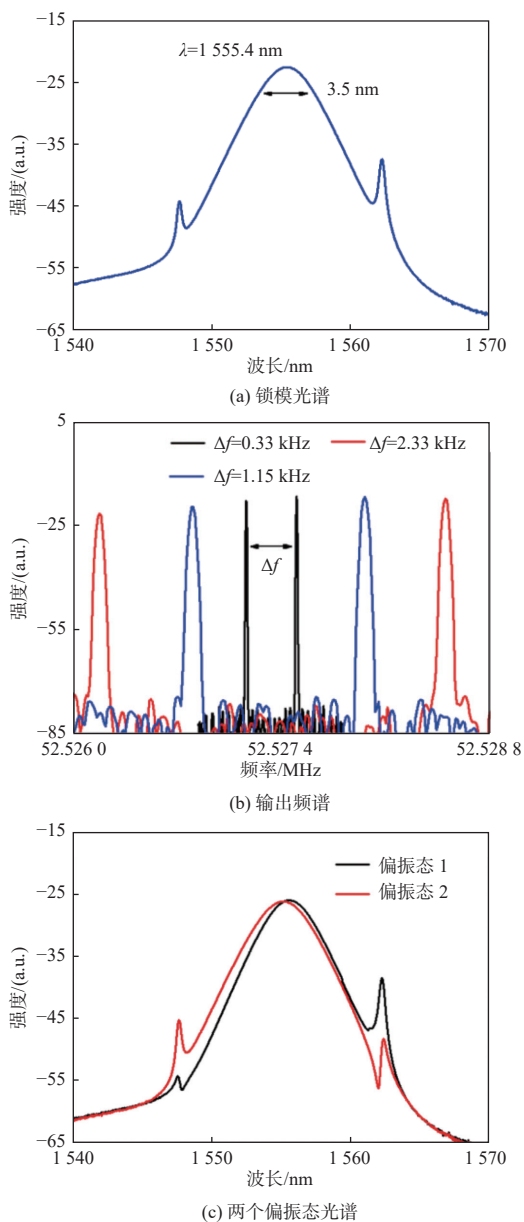


图 4 偏振复用双光梳激光器输出特性

Fig. 4 Output characteristics of polarization-multiplexing dual-comb laser

当激光器输出重频差为 337 Hz 的偏振复用双光梳后, 通过调节腔外偏振控制器改变双光梳偏振态, 使得偏振正交的双光梳分别沿偏振分束器 PBS 两个轴进行传输。偏振分离后两路光谱和频谱分别如图 4(c) 和 4(d) 所示。从光谱图可以看出, 偏振态 1 和偏振态 2 光谱形状基本相似, 表现出明显的矢量孤子特性, 且光谱基本相重合, 便于后续光谱展宽和光信号异步采样。从偏振分束后的频谱图可以看出, 两个光频梳重频大小基本不变, 重频的消光比分别为 29.5 dB 和 38.2 dB, 满足后续双光梳光异步采样的要求。

双光梳经过偏振分束和功率放大后, 两路分别通过中心波长为 1550 nm, 带宽为 1 nm 的带通滤波器进行滤波, 以防光谱发生混叠。滤波后通过调节偏振态, 使得两束光以近似相同的线偏振态进入平衡探测器, 以消除两路共模噪声的影响, 提高拍频信号的信噪比。两束光在耦合器中进行如图 1 所示的异步采样, 采样后拍频信号如图 5(a) 所示。图 5 中所示该电场信号中包含两组干涉信号, 且干涉信号周期与偏振复用双光梳激光器重频差 337 Hz 所对应的时间相一致。从图 5(b) 中显示的拍频信号放大图中可以进一步看出, 该采样拍频信号时域波形是一个典型的电场干涉波形, 且具有较高的时域信噪比。由图 5(b) 时域放大的拍频信号可以看出, 拍频信号的电场持续时间约为 2.2 ms。为了快速精准获得拍频信号包络, 需确保包络检波电路电容充电时间远低于拍频信号持续时间。在实际的电路设计过程中, 考虑到电路寄生电容和杂散电容的影响, 最终设置电路的充电常数为 1.3 ns。值得注意的是, 充电常数过小, 电路对拍频信号放电过度, 会导致包络波形不光滑或者失真。

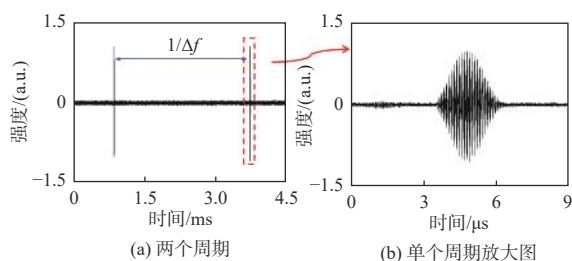


图5 异步采样拍频信号图

Fig.5 Beat frequency signal diagram of asynchronous sampling

图6展示了包络提取电路输出拍频信号的包络曲线,可以看出包络提取失真较小,所设置的充电常数满足拍频信号包络提取要求。为了进一步验证包络提取的准确性,采用样条插值和希尔伯特变换包络提取算法对图4(b)所示的拍频信号进行包络提取,结果对比如图6所示。

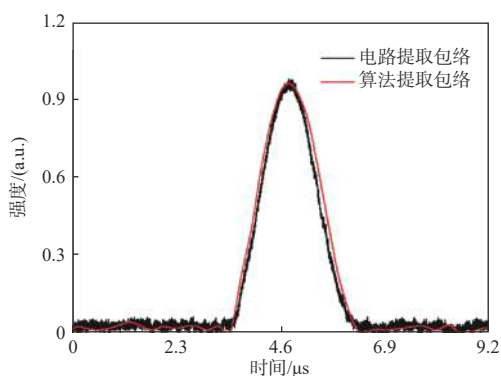


图6 包络提取结果对比

Fig.6 Comparison of envelope detection results

从图6中可以看出,采用电路和算法对拍频信号提取的峰值位置基本一致,两侧曲线有所差别的主要原因是包络提取电路中,电容的充放电会存在微小的延迟。值得一提的是在距离精密测量等应用中,只需对拍频信号峰值位置进行精确定位。采用电路对相干光拍频信号包络提取可进一步提高距离测量的速度和减少算法的复杂度。利用包络提取电路对图4(a)中的拍频信号进行包络提取和峰值位置测量,可得两个拍频信号的包络峰值间隔为2.9 ms,这与理论值 $1/\Delta f$ 相一致,进一步说明采用所设计的包络提取电路用于双光梳拍频信号包络提取的可行性。

4 结论

在单个光纤激光器腔内引入具有强双折射的保偏光纤,突破原有脉冲光在单个激光器腔内简

并传输模式,使得激光器腔内脉冲沿两个偏振正交的方向进行传输和锁模。调节腔内偏振态,实现了光谱重叠性好、重频差在337 Hz~2.33 kHz范围内连续可调的双光梳生成。在激光器腔外对双光梳进行偏振分束,获得了消光比为28.5 dB和38.2 dB的两束光梳生成。经过异步采样和光电转换后,分别采用所设计的包络检波电路和基于样条插值和希尔伯特变换的包络提取算法对拍频信号的包络进行提取,测量结果表明,所提出的电路提取和算法包络提取的峰值位置基本保持一致。本文所提出的包络提取方法能够实时快速对拍频信号的包络形状和包络峰值位置进行提取,可应用于精密测距和信号同步触发采集等应用领域。

参考文献:

- [1] HANSCH T W. Nobel lecture: passion for precision[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1297-1309.
- [2] SCHILLER S. Spectrometry with frequency combs[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(9): 766-768.
- [3] CODDINGTON I, SWANN W C, NEWBURY N R. Coherent multiheterodyne spectroscopy using stabilized optical frequency combs[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(1): 013902.
- [4] CODDINGTON I, NEWBURY N R, SWANN W C. Dual-comb spectroscopy[J]. *Optica*, 2016, 3(4): 414-426.
- [5] ZHAO X, ZHENG Z, LIU L, et al. Switchable, dual-wavelength passively mode-locked ultrafast fiber laser based on a single-wall carbon nanotube modelocked and intracavity loss tuning[J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 1168-1173.
- [6] ZHAO X, HU G Q, ZHAO B F, et al. Picometer-resolution dual-comb spectroscopy with a free-running fiber laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 21833-21845.
- [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): 1901003.
ZHAO Xin, YANG Jianjun, ZHANG Liqian, et al. Single-cavity dual-comb technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19): 1901003.
- [8] 赵铭, 王天枢. 色散管理掺铒光纤激光器高能量脉冲的产生[J]. *应用光学*, 2019, 40(4): 551-556.
ZHAO Ming, WANG Tianshu. Generation of high-energy pulses in dispersion-managed Tm-doped fiber laser[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(4): 551-

- 556.
- [9] ZHAO X, LI T, LII Y, et al. Polarization-multiplexed, dual-comb all-fiber mode-locked laser[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(9): 853-857.
 - [10] KIEU K, MANSURIPUR M. All-fiber bidirectional passively mode-locked ring laser[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(1): 64-66.
 - [11] ZHAO X, ZHENG Z, LIU Y, et al. Dual-wavelength, bidirectional single-wall carbon nanotube mode-locked fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(17): 1722-1725.
 - [12] 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.
 - [13] LINK S M, MAAS D J H C, WALDBURGER D, et al. Dual-comb spectroscopy of water vapor with a free-running semiconductor disk laser[J]. *Science*, 2017, 356(6343): 1164-1168.
 - [14] LIAO R Y, SONG Y J, LIU W, et al. Dual-comb spectroscopy with a single free-running thulium-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 11046-11054.
 - [15] CHEN J, ZHAO X, YAO Z J, et al. Dual-comb spectroscopy of methane based on a free-running Erbium-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 11406-11412.
 - [16] 高宇炜, 方守龙, 武腾飞, 等. 双飞秒激光频率梳光谱测量技术研究进展[J]. *应用光学*, 2021, 42(1): 157-175.
GAO Yuwei, FANG Shoulong, WU Tengfei, et al. Research progress of double femtosecond laser frequency comb spectroscopy measurement technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(1): 157-175.
 - [17] ZHAO X, ZHENG Z, LIU L, et al. Fast, long-scan-range pump-probe measurement based on asynchronous sampling using a dual-wavelength mode-locked fiber laser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(23): 25584-25589.
 - [18] 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.
 - [19] 周小珊, 李岩. 相位激光测距与外差干涉相结合的绝对距离测量研究[J]. *应用光学*, 2010, 31(6): 1013-1017.
ZHOU Xiaoshan, LI Yan. Absolute distance measurement by combining phase distance meter and heterodyne interferometer[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(6): 1013-1017.
 - [20] ZHU Z B, WU G H. Dual-comb ranging[J]. *Engineering*, 2018, 4(6): 772-778.
 - [21] LI Y P, CAI Y W, LI R M, et al. Large-scale absolute distance measurement with dual free-running all-polarization-maintaining femtosecond fiber lasers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(9): 091202.
 - [22] 吴冠豪, 周思宇, 杨越棠, 等. 双光梳测距及其应用[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 244-261.
WU Guanhao, ZHOU Siyu, YANG Yuetang, et al. Dual-comb ranging and its applications[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15): 244-261.
 - [23] YASUI T, HAYASHI K, ICHIKAWA R, et al. Real-time absolute frequency measurement of continuous-wave terahertz radiation based on dual terahertz combs of photocarriers with different frequency spacings[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11367-11377.
 - [24] HU G Q, MIZUGUCHI T, OE R, et al. Dual terahertz comb spectroscopy with a single free-running fibre laser[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 11155.
 - [25] CHEN J, NITTA K, ZHAO X, et al. Adaptive-sampling near-Doppler-limited terahertz dual-comb spectroscopy with a free-running single-cavity fiber laser[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(3): 036004.