

doi:10.3788/gzxb20164506.0614001

全保偏双飞秒光纤光频梳系统的频率联动特性

徐昕¹, 冯野¹, 刘元山¹, 吴冠豪², 王屹山¹, 魏儒义³, 赵卫¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 清华大学 精密仪器系 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

(3 中国科学院西安光学精密机械研究所 中国科学院光谱成像技术重点实验室, 西安 710119)

摘 要:采用跟踪反馈控制法, 实现了双飞秒光频梳系统的频率联动, 研究了主动光频梳自动扫频和手动扫频情况下, 双光梳间的频率联动特性. 结果显示, 对主动光频梳进行自动扫频或手动扫频时, 从动光频梳的频率跟随变化, 且双光梳频率间的相关系数最大可达 0.99, 说明双光梳的频率间保持了较好的联动特性. 最后, 将频率联动的全保偏双光梳系统用于测距实验中, 测量距离为 1.332 m, 时间间隔为 0.2 s, 连续进行 16 次测量, 测得数据的标准差为 0.35 μm , 测量精度可达亚微米量级.

关键词:超快光学; 锁模激光器; 光学频率梳; 频率联动; 绝对距离测量

中图分类号: O438

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)06-0614001-5

Frequency Linkage between the Dual Frequency Combs Based on the Polarization-Maintaining Femtosecond Fiber Laser

XU Xin¹, FENG Ye¹, LIU Yuan-shan¹, WU Guan-hao², WANG Yi-shan¹, WEI Ru-yi³, ZHAO Wei¹

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(3 Key Laboratory of Spectral Imaging technology of Chinese Academy of Sciences, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: The frequency linkage between the dual frequency combs was realized by using of the tracking feedback controlling circuit. The linkage characteristic was studied when the master frequency comb's frequency is changed automatically and manually respectively. The results show that, the frequency of the slave frequency comb is varied following the automatic or manual frequency scanning of the master frequency comb. The max correlation coefficient between the frequency of the dual frequency combs is up to 0.99, which demonstrates the better linkage characteristic. Finally, the linked dual frequency combs was used in the absolute distance measurement. The measured distance is 1.332 m, the interval is 0.2 s, the standard deviation of the experimental results is 0.35 μm with 16 times, and the measurement precision is less than 1 μm .

Key words: Ultrafast optics; Mode-locked laser; Frequency comb; Frequency linkage; Absolute distance measurement

OCIS Codes: 140.3518; 320.0320; 320.7100; 140.4050

基金项目: 国家重大科学仪器设备专项 (No. 2011YQ120022), 国家自然科学基金 (Nos. 61275164, 11573058) 和 CAS/SAFEA 国际创新团队合作计划资助

第一作者: 徐昕 (1986-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为超快光纤技术及应用. Email: xuxin_1007@163.com

导 师: 王屹山 (1970-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为超快光纤技术及应用. Email: yshwang@opt.ac.cn

通讯作者: 刘元山 (1975-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为超快光纤技术及应用. Email: liuyuanshan@opt.ac.cn

收稿日期: 2015-12-08; **录用日期:** 2016-01-11

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

近年来,光学频率梳技术日趋成熟,并被广泛地应用于精确频率测量、任意波形产生、光谱测量等领域^[1-3].特别是在绝对距离测量领域,采用双光频梳测距的方式,测量准确度明显被提高^[4].对于双光梳测距方案^[5],为获得高测量精度,不仅要求每个光频梳稳定,还要求两台光频梳间的频率差也保持稳定,即当一个光频梳的频率变化时,另一个光频梳的频率跟随发生变化,也就是双光频梳频率的联动.此外,为了方便双光梳系统在测距中的使用,需要双光频梳间频率差可调.目前,仅在光学异步采样的研究中,将两台锁模激光器的重复频率差锁定,但是没有对它们的载波包络偏移频率加以限制^[6-7].在光脉冲合成的实验中,实现了两台锁模激光器的重复频率差的锁定,但是这两个频率差值始终被锁定在 0 值,不能在一定范围内可调^[8-9].

针对于双光梳在绝对距离测量中的应用要求,本文搭建了频率差可调的双联动飞秒光纤光频梳系统;同时,为提高光频梳系统的稳定性,避免在实际使用过程中外部振动、环境温度变化等因素对光频梳的稳定性产生影响,提出了全保偏的光纤光频梳方案.最后,对其基本结构及输出特性进行了研究,详细讨论多种情况下双光梳频率联动效果,并实验获得了使用联动双光梳系统进行测距的结果.

1 全保偏飞秒光频梳系统

飞秒光频梳的基础是锁模激光器,锁模激光器的稳定性决定了光梳系统的稳定性^[10-12].搭建了全保偏的环型腔振荡器,由半导体饱和吸收体实现自锁模^[13],借助于振荡器内的光延迟线,单个光频梳的重复频率(Repetition Frequency, f_r)可以在 49.5 MHz~50.5 MHz 范围内连续调节,因此,双光梳的频率差可在 0~1 MHz 内连续可调^[14].光延迟线在数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)电路的控制下可自动进行调节.振荡器输出的脉冲经过全保偏光纤低噪放大.通过高非线性保偏光纤实现保偏超连续谱(1.03 μm ~2.06 μm)的产生,并通过 $f-2f$ 干涉仪拍频

表 1 全保偏飞秒光纤光梳的主要指标

Table 1 Output parameters of the frequency comb based on all polarization-maintaining femtosecond fiber lasers

Output parameters	Experimental data
Centre wavelength/nm	1 550
Repetition frequency/MHz	49.5~50.5
Output power/mW	>200
Pulse width/fs	<300
Stability of the frequency	1×10^{-12} @1s
Stability of the phase	5×10^{-10} @1s

得到载波包络偏移频率信号,其信噪比可达 30 dB^[14].实验采用精调锁定、粗调主动跟踪法,实现了系统的稳频,保证了长时间、大动态温度范围工作.载波偏移频率信号由注入锁定放大器实现锁定.单个光频梳的主要技术指标如表 1.

2 双光频梳频率的联动

2.1 双光频梳频率联动的实验结构

为表明两台光频梳之间的联动关系,将两台光频梳分别称为主动光频梳和从动光频梳,且用于实现联动的光频梳均为第 1 节介绍的全保偏飞秒光频梳.双光频梳频率联动的实验结构如图 1.

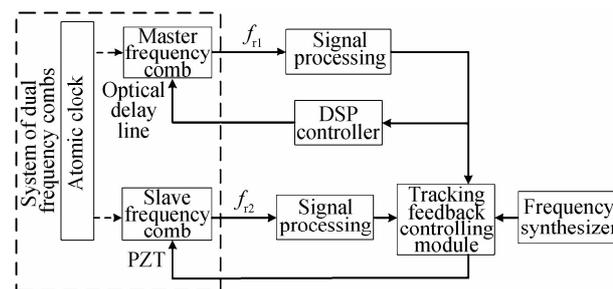


图 1 双光频梳 f_r 联动的实验结构

Fig. 1 The electronics used to realize the synchronization of the dual frequency combs' f_r

双光频梳联动第一步要实现的是主动光频梳的重复频率 f_{r1} 控制.首先,主动光频梳的光延迟线会在 DSP 电路的控制下进行自动调节. DSP 电路中包含了信号采样、信号处理和串口命令发送的功能.当主动光频梳的重复频率 f_{r1} 变化到预设范围内时, DSP 电路停止对光延迟线发送串口命令,光延迟线停止变化.此时,开启主动光频梳内部的控制系统,对 f_{r1} 信号进行精确控制,将 f_{r1} 锁定到某一固定频率上.使用频率计数器对主动光频梳频率变化过程进行计数,结果如图 2,计数时间间隔为 1s.整个频率变化过程分为两个阶段,分别是光延迟线在 DSP 电路的控制下自动变化,对 f_{r1} 进行粗调阶段,以及光频梳内部控制系统对 f_{r1} 进行精确控制阶段,即 f_{r1} 锁定阶段.主动光频梳的频率最终锁定在 50 MHz.

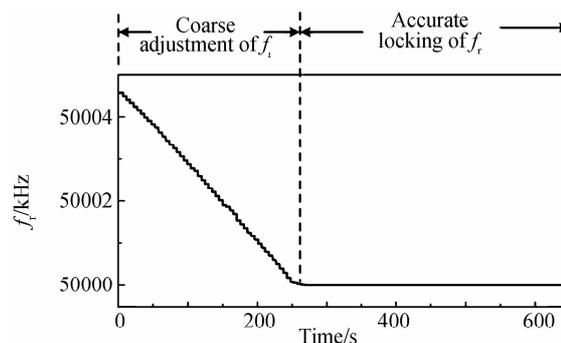


图 2 主动光频梳稳频过程中的重复频率变化

Fig. 2 Frequency counter result for the f_r of the master frequency comb during the process of locking the f_r

当主动光频梳的 f_{r1} 锁定之后,利用图 1 中的跟踪反馈控制模块,将主动光频梳的重复频率信号 f_{r1} 和被动光频梳的重复频率信号 f_{r2} 通过混频器混频,得到两者的差频信号 $\Delta f_r = f_{r1} - f_{r2}$. 实验中使用的跟踪反馈控制电路带宽为 20 kHz,满足双光频梳频率联动的需求. 通过对从动光频梳振荡器内的压电陶瓷 (Piezoelectric Ceramic Transducer, PZT) 进行反馈控制,锁定 Δf_r 信号. 在这里,可以通过设定频率综合器的输出频率,将 Δf_r 锁定在 0~1MHz 范围内的任意值上,因此在测距中可根据需要,在 0~1MHz 范围内任意调节 Δf_r 的大小.

2.2 双光频梳频率联动的实验结果

为验证双光梳间频率联动的特性,通过改变主动光频梳的参考信号来改变主动光频梳的 f_{r1} ,由于 f_{r1} 和 f_{r2} 之间存在联动的关系,因此,当 f_{r1} 发生变化时, f_{r2} 应跟随变化. 使用两台频率计数器同时记录 f_{r1} 和 f_{r2} 的值,观察它们的变化过程,并且使用两组数据间的相关系数表征双光梳的频率联动能力. 所谓的相关系数,即互相关函数的最大值. 两个随时间变化的信号序列 $x(t)$ 和 $y(t)$ 间的互相关函数的表达式为^[15]

$$r_{xy}(\Delta) = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \bar{x}][y(t+\Delta) - \bar{y}] dt}{\sigma_x \sigma_y}$$

式中, Δ 为延迟时间, T 是记录数据的时间, \bar{x} 和 \bar{y} 分别为 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的平均值, σ_x 和 σ_y 分别是 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的标准差.

在图 1 的实验装置中,主动光频梳的参考信号是由频率综合器(型号: Agilent N5181a)产生的,可以设置自动扫频模式. 将双光梳间的 Δf_r 锁定在 5KHz,设置频率综合器以匀速进行自动扫频,使用两台频率计数器同时记录 f_{r1} 和 f_{r2} 的值. 相关的实验结果在文献[7]中已给出,此时得到的双光梳重复频率间的互相关系数为 0.99,双光梳频率间有非常好的联动性. 在文献[7]的实验基础上,进一步研究多种情况下双光梳联动的频率特性. 增加主动光频梳的扫频范围,当主动光频梳的参考信号变化较大时,振荡器内 PZT 不足以补偿 f_{r1} 的变化, f_{r1} 会发生失锁. 如图 3(a) (记数时间间隔为 1s),开始阶段主动光频梳的 f_{r1} 仍可在保持锁定的情况下以匀速增加,但在曲线的后半部分出现跳变点后, f_{r1} 失锁. 由于在主动光频梳 f_{r1} 失锁阶段,主动光频梳的控制系统仍然对 f_{r1} 信号进行控制,此外在这一阶段频率综合器 1 的频率增加并没有停止,因而 f_{r1} 的曲线出现大的频率跳变. 但此时 Δf_r 信号还是锁定的,因此, f_{r2} 仍然跟随 f_{r1} 变化,并且表现出很强的同步性. 绘制图 3(a) 中两组数据的互相关曲线,如图 3(b),相关系数为 0.83. 因为在 f_{r1} 出现大的跳变点时,跟踪反馈控制模块对 Δf_r 信号的控制能力减弱,所以在跳变点

处 f_{r2} 相对 f_{r1} 出现了一些小的毛刺,导致相关系数降低.

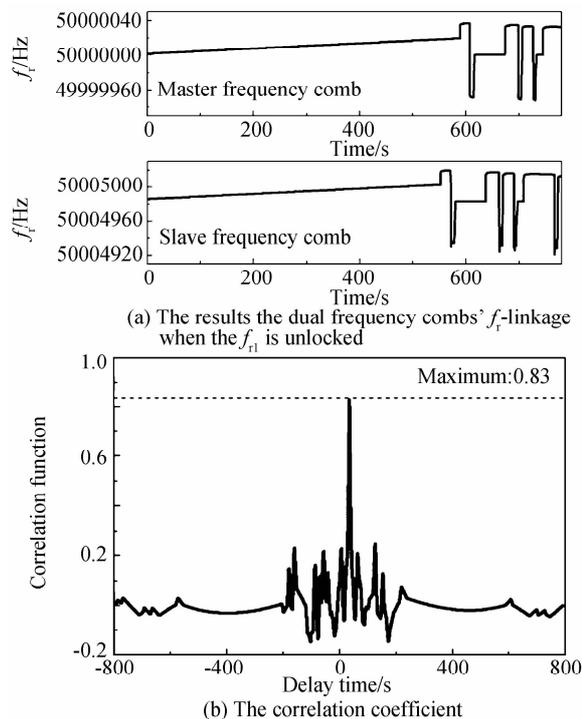


图 3 主动光频梳 f_{r1} 失锁时双光梳重复频率的联动计数结果和相关系数

Fig. 3 Experimental results of the dual frequency combs' f_r -linkage when the f_{r1} is unlocked and the correlation coefficient

除了自动扫频以外,对主动光频梳的参考信号进行了手动扫频,逐渐降低主动光频梳参考信号的频率值. 为准确观察两台光频梳 f_{r1} 和 f_{r2} 的联动,将实验中频率计数器记录数据的时间间隔设为 0.1s. 实验结果如图 4(a). 主动光频梳 f_{r1} 的大小一直降低,且变化速度非匀速,变化中, f_{r1} 没有失锁. 在跟踪反馈控制电路的作用下,从动光频梳的 f_{r2} 立刻跟随变化. 但是由于外界扰动, f_{r2} 在跟随扫频过程中出现了一个大的跳变点,最终 f_{r1} 和 f_{r2} 的相关系数为 0.93.

由于光频梳的振荡器内含有光延迟线,两台光频梳的重复频率差 Δf_r 可以锁定到 0~1MHz 范围内的任意值. 为验证 $\Delta f_r = 0$ 时双光梳间的联动性能,我们进行如下的实验:将 Δf_r 锁定在零值,主动光频梳的参考信号以 0.02Hz/s 的速度自动扫频,此时频率计数器计数的时间间隔为 0.1s,因此,主动光频梳的计数曲线呈台阶状,但其整体上表现为锯齿状的频率变化,如图 5(a). 而此时从动光频梳的计数曲线虽然存在一些细小的毛刺,但其整体上也保持锯齿状的变化. 此时,两组频率曲线间存在的大约 0.5Hz 的差异,是由频率计数器本身的测量误差造成的. 计算图 5(a) 中两组数值的相关函数,结果如图 5(b). 由于图 5(a) 中包含了多个扫频周期,因此它们的相关函数也表现出很多的调

制周期, 相关函数的最大值, 即相关系数为 0.95.

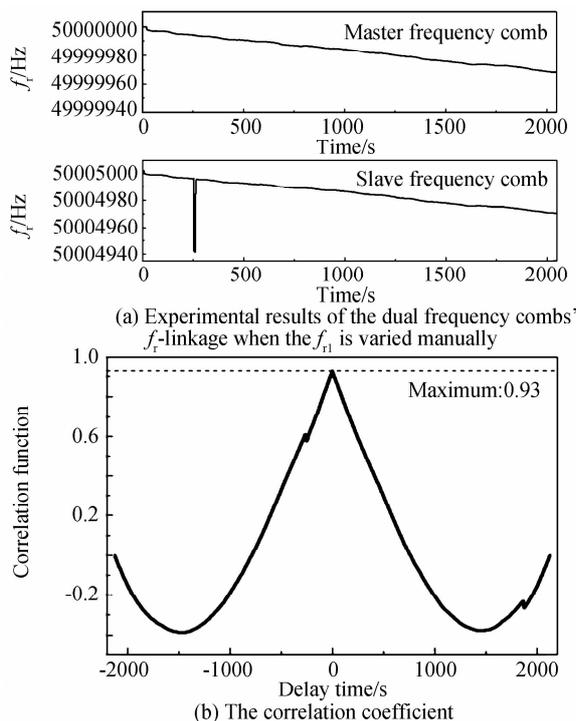


图 4 主动光频梳 f_{r1} 手动扫频时双光梳 f_r 联动的计数结果和相关系数

Fig. 4 Experimental results of the dual frequency combs' f_r -linkage when the f_{r1} is varied manually and the correlation coefficient

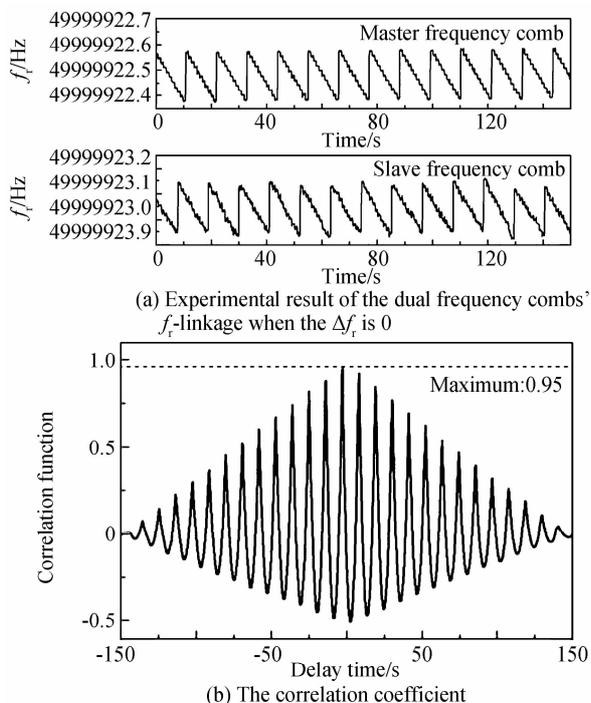


图 5 $\Delta f_r = 0$ 时双光梳 f_r 联动的计数结果和相关系数

Fig. 5 Experimental result of the dual frequency combs' f_r -linkage when the Δf_r is 0 and the correlation coefficient

3 联动双飞秒光频梳测距结果

为方便操作和使用, 整个双飞秒光频梳系统集成在机柜中, 如图 6, 其中包括了两个集成的光学模块、温控系统、跟踪反馈控制模块、电流源、频率综合器、原子钟和频率计数器. 此台样机已成功用于测距实验中, 测量方法为“时间飞行法”, 其基本原理是将其中一台光频梳入射到一台迈克尔逊干涉仪上, 再用另一台光频梳对从参考臂和测量臂返回的两个交错的脉冲序列进行采样, 获得两个干涉波包. 从干涉波包中提取两个脉冲序列的时延信息, 即可获得被测距离^[5]. 图 7 是使用双联动飞秒光纤光频梳系统进行测距的实验结果. 测量过程中, 我们将靶镜放置于测量距离在距离约为 1.332 m 处, 利用该样机搭建的测距系统对其进行了连续 16 次测量, 时间间隔测量的时间间隔为 0.2 s, 测得数据距结果的标准差为 0.35 μm . 该测距结果证明了基于双飞秒光频梳频率构建的测距系统能实现亚微米级的测量精度.



图 6 联动双飞秒光纤光频梳系统

Fig. 6 The system consisting of linked dual femtosecond fiber frequency combs

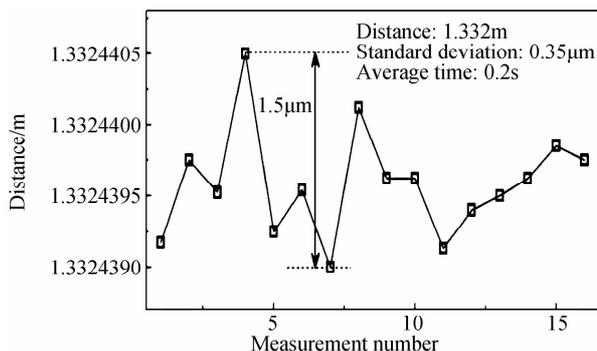


图 7 测距实验结果

Fig. 7 The experimental result of the distance measurement

4 结论

本文对双飞秒光频梳系统在绝对距离测量中的应用,以及在多种情况下全保偏双光梳间的频率联动特性进行了研究.通过使用跟踪反馈控制模块,将双光梳间的频率差锁定在 0~1 MHz 范围内的任意值上.这样,当主动光频梳的频率发生变化时,从动光频梳的频率立刻跟随变化,即双光梳发生频率的联动.当主动光频梳的频率自动扫频时,双光梳间的联动能力最强,相关系数可达到 0.99.当主动光频梳的频率失锁时,双光梳间的频率联动仍然存在,但是相关系数降低到 0.83.在对主动光频梳的频率进行手动扫频,以及双光梳频差为 0 的情况下,相关系数分别为 0.93 和 0.95.因此,实验证明了在跟踪反馈控制模块的作用下,双光梳频率间可保持非常好的联动特性.此外,频率联动的全保偏双光梳系统具有很高的集成度、稳定性以及抗干扰的能力,并已成功应用在绝对距离测量的实验中,在国内光频梳实用化领域迈出了重要一步.在今后的研究中,我们将采用稳定的连续激光器作为频率参考,进一步改善联动双光频梳系统的稳定性,提高测距精度.

参考文献

- [1] YASUI T, YOKOYAMA S, INABA H, *et al.* Terahertz frequency metrology based on frequency comb [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, **17** (1): 191-201.
- [2] CUNDIFF S, WEINER A. Optical arbitrary waveform generation[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**: 760-766.
- [3] BERNHARDT B, OZAWA A, JACQUET P, *et al.* Cavity-enhanced dual-comb spectroscopy [J]. *Nature Photonics*, 2009, **29**:55-57.
- [4] 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.
- [5] WU G H, ZHOU Q, SHEN L F, *et al.* Experimental optimization of the repetition rate difference in dual-comb ranging system[J]. *Applied Physics Express*, 2014, **7**(10): 106602.
- [6] YASUI T, SANEYOSHI E, ARAKI T. Asynchronous optical sampling terahertz time-domain spectroscopy for ultrahigh spectral resolution and rapid data acquisition [J] *Applied Physics Letters*, 2005, **87**(6): 061101.
- [7] STOICA V, YU-MIIN S, REIS D, *et al.* Wideband detection of transient solid-state dynamics using ultrafast fiber lasers and asynchronous optical sampling[J]. *Optics Express*, 2008, **16** (4): 2322-2335.
- [8] SHELTON R, MA L, KAPTEYN H, *et al.* Phase-coherent optical pulse synthesis from separate femtosecond lasers[J]. *Science*, 2001, **293**(5533): 1286-1289.
- [9] KIM J, KARTNER F. Attosecond-precision ultrafast photonics[J]. *Laser Photonics Review*, 2010, **4**(3): 432-456.
- [10] CAO Shi-ying, MENG Fei, LIN Bai-ke, *et al.* Precise frequency control of an Er-doped fiber comb [J]. *Acta Physica sinica*, 2012, **61**(13): 134205.
曹士英,孟飞,林百科,等.长时间精密锁定的掺 Er 光纤飞秒光学频率梳[J]. *物理学报*, 2012, **61**(13):134205.
- [11] WASHBURN B, FOX R, NEWBURY N, *et al.* Fiber-laser-based frequency comb with a tunablerepetition rate [J]. *Optics Express*, 2004, **12**(20):4999-004.
- [12] KIM Y, KIM Y, CHUN B, *et al.* All-fiber single optical frequency generation from an Er-doped fiber frequency comb [J]. *Optics Express*, **17**(13):10939-10945.
- [13] FENG Y, XU X, LIU Y S, *et al.* Environmental-adaptability analysis of an all polarization-maintaining fiber-based optical frequency comb[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(13):17549-17550.
- [14] XU X, FENG Y, LIU Y S, *et al.* Linkage of dual frequency combs based on all polarization-maintaining femtosecond fiber lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27** (23): 2421-2424.
- [15] Cross-correlation [EB/OL]. [2015-12-08]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Cross-correlation>.