

# 带宽为 56.978 GHz 光拍频信号实时测量

陶世兴, 邓向阳, 李建中, 王 竞, 彭其先

中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900

**摘要** 瞬态宽带光信号广泛存在于激光干涉测速、光通信等领域, 具有宽带宽、非重复性的特点, 但现有的直接或间接光脉冲测量技术还无法应用于此类信号的测量。利用时间-波长映射的啁啾光脉冲和四波混频效应对瞬态光信号进行超高速光采样, 通过采用时间拉伸技术和色散介质, 放大其时间尺度, 成倍提高了后端电子记录系统的带宽及采样率。实验结果表明, 该方法可以实时测量带宽为 56.978 GHz 的光拍频信号, 等效测量时间分辨率为 3.7 ps, 证实了所提方法的有效性。

**关键词** 光通信; 光拍频信号; 时间-波长映射; 四波混频; 啁啾光脉冲

**中图分类号** O434.4 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0306004

## Real-Time Measurement of Light Beat-Frequency Signal with Bandwidth of 56.978 GHz

Tao Shixing, Deng Xiangyang, Li Jianzhong, Wang Jing, Peng Qixian

*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*

**Abstract** The transient optical signal with wide bandwidth widely exists in laser interference velocity measurement, optical communication and some other fields. It has wide bandwidth and non-repeatability. The existing direct or indirect optical pulse measurement technologies cannot be applied to the measurement of such signal. We use time-wavelength mapping chirped optical pulse to sample the transient optical signal at a high rate under the four wavelength mixing effect, and magnify the signal time scale by using time-stretching technology and dispersive medium. The bandwidth and sampling rate of the back-end electrical record system are increased by times. The experimental results show that the measurement of light beat-frequency signal with bandwidth of 56.978 GHz in real-time is feasible and the equivalent measurement time resolution is 3.7 ps, which verifies the validity of the proposed method.

**Key words** optical communications; light beat-frequency signal; time-wavelength mapping; four wavelength mixing; chirped optical pulse

**OCIS codes** 060.2360; 070.6020; 140.7090; 190.4380

## 1 引 言

超快光脉冲测量在高速光通信、激光光谱学、光纤传感器、激光雷达等领域均有着非常重要的应用<sup>[1-2]</sup>。目前, 测量超快光脉冲的方法通常可分为两类: 间接测量法和直接测量法<sup>[3]</sup>。间接测量法利用非线性光学效应进行测量, 包括二次谐波产生 (SHG)、频率分辨光学选通 (FROG) 以及光谱相位相干直接电场重建 (SPIDER) 等。直接测量法利用快速光电效应进行测量, 包括光电条纹相机、快速脉冲取样等。其中, SHG 通过测定光脉冲二次自相关函数的脉宽来反推得到被测脉冲宽度<sup>[4]</sup>, 其结构简单, 时间分辨率可达几个飞秒, 能测量高重复频率、低能量的脉冲, 适用于测量连续锁模激光器的脉宽。但是, SHG 只能测量脉冲宽度, 无法得到相位信息。Kane 等<sup>[5]</sup>在 1993 年提出了 FROG 的脉冲测量新方法, 第一次通过实验实现了脉冲强度和相位信息的完全重现。之后, 基于光谱错位干涉原理, 研究者们又提出了一种新型的超短光脉冲测量方法——SPIDER<sup>[6]</sup>。上述两种方法通常需要较长时间重建脉冲, 并且 FROG 仅能测量高能量的飞秒脉冲, SPIDER 不能直接测得脉宽。条纹相机是一种比较常用的直接测量超短脉冲宽度的工具, 目前分辨率最

**收稿日期:** 2016-08-26; **收到修改稿日期:** 2016-11-04

**基金项目:** 中国工程物理研究院科学基金 (2015B0401079, 2015B0401080, 2015B0403081)

**作者简介:** 陶世兴 (1983—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事瞬态光信号测量技术方面的研究。E-mail: taoshixing109@163.com

高可达到 500 fs,且动态范围极小<sup>[7]</sup>。基于四波混频(FWM)的光采样技术能够达到皮秒量级的分辨率,但目前只能应用于重复光脉冲宽度的测量<sup>[8]</sup>。近年来,时间透镜技术<sup>[9]</sup>和时间拉伸技术<sup>[10-14]</sup>得到了研究者的广泛关注。时间透镜与空间域中透镜的作用类似,其输入色散、二阶相位调制、输出色散需要满足相应的成像方程才能起到对输入脉冲的压缩、放大等作用。与时间透镜技术不同,时间拉伸技术主要针对宽带宽模拟信号,通过电光调制方式将目标模拟信号加载在预啾啾光脉冲上,之后将该啾啾脉冲进行时间拉伸,从而等效地降低了模拟信号的带宽。时间拉伸技术的最大特点是不需要对输入信号进行色散处理,也不需要满足特定的成像方程。

目前,对于重复频率光脉冲的宽度可进行较好地测量,而对于单次瞬态光脉冲,如激光干涉测速中的光拍频信号,其上升沿小于 1 ns,甚至只有几十皮秒到几百皮秒<sup>[15-17]</sup>,信号带宽超出了电子记录系统带宽,引起“条纹丢失”问题,极大地影响了对物理过程的精细解读<sup>[18]</sup>。由于此类信号属于窄带信号,不易进行色散拉伸,不适于直接采用时间透镜技术或时间拉伸技术进行处理。因此,本文利用高非线性光纤中的 FWM 效应采样超快光信号,将窄带信号转换为宽光谱闲频信号,之后利用时间拉伸技术对闲频信号进行处理,最终实现对窄带光脉冲信号的高时间分辨率、宽带宽测量。

## 2 基本原理

时间-波长映射啾啾光脉冲通过 FWM 效应对瞬态光信号采样的时域、频域过程如图 1 所示<sup>[19]</sup>,图中  $\lambda_i$ 、 $\lambda_p$ 、 $\lambda_s$  分别代表闲频光、抽运光、信号光的波长。宽光谱抽运光与信号光通过 FWM 效应产生宽光谱闲频光,闲频光加载了信号光的所有信息,滤波之后利用色散介质的群速度色散效应对闲频光进一步进行时间拉伸,在时域上将其放大,等效于频域上的压缩。为保证通过高效率的 FWM 效应对信号波进行无失真波长转换,入射到高非线性光纤(HNLF)中的时间-波长映射的啾啾抽运光与被探测弱信号光需要满足相位匹配条件,这就对相位失配条件提出了较高要求,有效相位失配为

$$\kappa = \Delta k_M + \Delta k_w + \Delta k_{NL}, \quad (1)$$

式中  $\Delta k_M$ 、 $\Delta k_w$ 、 $\Delta k_{NL}$  分别为材料色散、波导色散和非线性色散对相位失配的贡献。FWM 过程中允许的波矢失配量大小取决于光纤长度  $L$  和相干长度  $L_{coh}$  的大小。其中,相干长度可表示为

$$L_{coh} = \frac{2\pi}{\kappa}. \quad (2)$$

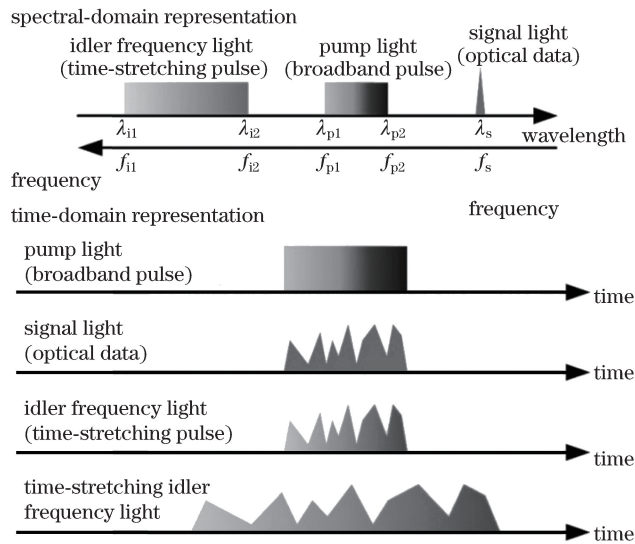


图 1 时间-波长映射啾啾光脉冲测量瞬态光信号示意图

Fig. 1 Diagram of measuring transient optical signal with time-wavelength mapping chirped optical pulse

在单模光纤中,除了零色散波长  $\lambda_D$  附近的波导色散  $\Delta k_w$  和材料色散  $\Delta k_M$  可以相比拟外,对于偏振态相同的波, $\Delta k_w$  远小于  $\Delta k_M$ 。因此,实现近似相位匹配的 3 种条件为:利用小频移和低功率抽运来减小  $\Delta k_M$

和  $\Delta k_{NL}$ ; 工作在零色散波长附近, 使  $\Delta k_w$  几乎能抵消  $\Delta k_M + \Delta k_{NL}$ ; 工作在反常群速度色散区, 使  $\Delta k_M$  为负, 则可用  $\Delta k_w + \Delta k_{NL}$  抵消。本文研究中的抽运波长选择光纤零色散波长附近。

在满足近似相位匹配条件且只有预啁啾抽运波和信号波入射的情况下, 光纤长度  $z$  处的信号波功率和闲频波功率分别为

$$P_s(z) = P_s(0)[1 + (1 + \kappa^2/4g^2) \sinh^2(gz)], \quad (3)$$

$$P_1(z) = P_s(0)(1 + \kappa^2/4g^2) \sinh^2(gz), \quad (4)$$

式中  $g$  为参量增益,  $g = \sqrt{(\gamma P_0 r)^2 - (\kappa/2)^2}$ , 其中  $r = 2(P_1 P_2)^{1/2}/P_0$ ,  $P_0 = P_1 + P_2$ ,  $P_1, P_2$  为  $z=0$  处的抽运功率。若采用单抽运放大, 则  $r=1$ ,  $\gamma = n_j \omega_j / (c A_{eff})$  为非线性系数,  $n_j$  为频率  $\omega_j$  的信号在光纤中传输时光纤的有效折射率,  $c$  为真空中光速,  $A_{eff}$  为光纤模场有效面积。由(3)、(4)式可知, 信号光入射到光纤中后, 几乎同时产生了闲频波, 闲频波功率最初按照  $z^2$  增加, 但随着传输距离的增大, 满足  $gz > 1$  后, 信号波和闲频波功率均按照指数形式增大。由于闲频波和信号波一起沿光纤传输并放大, 在光纤输出端几乎与信号光功率相同。信号波放大倍数为

$$G_s = 1 + (\gamma P_0 r / g)^2 \sinh^2(gL). \quad (5)$$

放大倍数随信号频率的变化而变化, 在信号频率固定、抽运波为宽光谱的情况下, 放大倍数随抽运波频率的变化而变化, 同时与相位失配  $\kappa$  有关。闲频波和信号波一起被放大, 因此闲频波放大带宽与抽运光频率、光纤色散特性等参数有关。通过优化光纤色散量和选择抽运光功率及带宽, 可以控制闲频光功率及带宽。

对宽光谱抽运 FWM 的非饱和增益进行了仿真分析, 选取信号光波长为 1550 nm、高非线性光纤非线性系数为  $11 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 、零色散斜率为  $0.019 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ 、零色散波长为 1535 nm、长度为 1.0 km、抽运光功率为 0.324 W、信号光功率为 0.01 W, 计算得到了抽运光波长在 1530~1550 nm 范围内的系统相位失配量、信号光非饱和增益及闲频光非饱和增益, 如图 2 所示。在 1537~1543 nm 范围内, 相位失配量接近于 0, 信号光和闲频光都有较高的增益且增益平坦度较好。

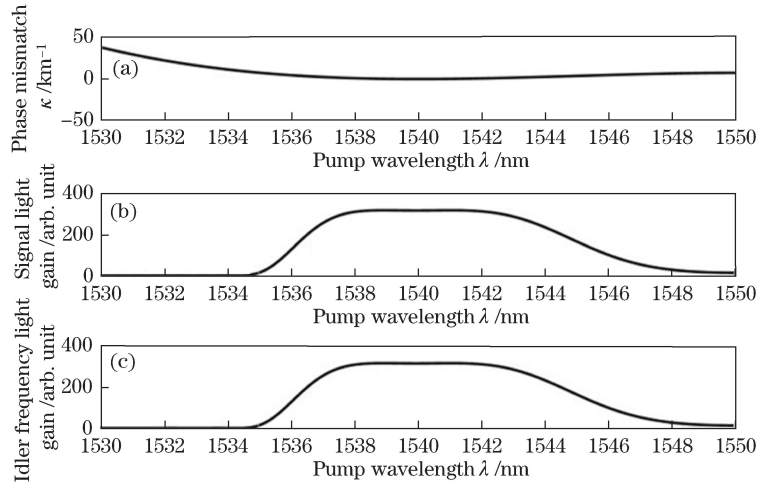


图 2 宽光谱抽运光 FWM 增益计算结果。(a) 相位失配量随抽运波长的变化; (b) 信号光增益随抽运波长的变化; (c) 闲频光随抽运波长的变化

Fig. 2 Results of FWM gain with wideband pump light. (a) Variation in phase mismatch with pump wavelength; (b) variation in signal light gain with pump wavelength; (c) variation in idler frequency light gain with pump wavelength

### 3 实验结果与分析

实验装置如图 3 所示, 飞秒锁模激光器作为宽光谱光源, 光源发出的光先经过 ITU-T 标准的 200 GHz 带宽的膜片式滤波器(CH43, 中心波长为 1542.94 nm), 再经过 46 km 的普通单模光纤形成时间-波长( $t-\lambda$ ) 映射的宽光谱抽运光  $f_p$ , 两激光器输出频率为  $f_{s1}, f_{s2}$  的单频信号光, 并经偏振控制器(PC)对信号光进行偏振控制, 经偏振控制后的信号光与抽运光通过耦合比为 3:7 的耦合器进入长度为 500 m 的高非线性光纤

(HNLF)。该 HNLF 在 1550 nm 处的非线性系数大于  $10 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ，色散系数小于  $0.03 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ 。经过 HNLF 之后，光路中除信号光  $f_{s1}$ 、 $f_{s2}$  和抽运光  $f_p$  之外，通过 FWM 效应产生了宽光谱闲频信号  $f_{i1} = 2f_p - f_{s1}$  和  $f_{i2} = 2f_p - f_{s2}$ 。经过 ITU-T 标准的 400 GHz 带宽膜片式滤波器 (CH50，中心波长为 1537.40 nm) 滤波后得到闲频信号，闲频信号经过掺铒光纤放大器 (EDFA) 和光纤拉曼放大器 (FRA) 的综合光放大后，最终由电子学系统进行探测。

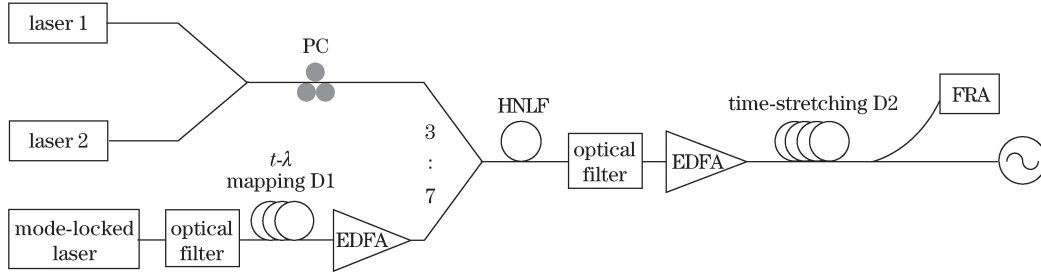


图 3 实验装置图

Fig. 3 Sketch of experimental setup

为避免单模光纤与色散补偿光纤熔接时产生较大的连接损耗，系统的色散介质采用长飞光纤光缆股份有限公司的 G.652 单模光纤，其色散系数为  $18 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ ，第一段色散介质长度  $L_1$  为 46.0 km，第二段色散介质长度  $L_2$  为 100 km。由于前后均采用相同的光纤，拍频信号拉伸倍数与色散系数无关，只与前后两段光纤长度有关，拉伸倍数为

$$M = 1 + 2L_2/L_1 = 5.34. \quad (6)$$

系统的插入损耗约为  $-30 \text{ dB}$ ，功率补偿方式采用 EDFA 与后向 FRA 结合使用的方式。掺铒光纤放大器在光纤接入点处放大，放大功率过高将会引起较大的非线性效应。非线性效应主要包括自相位调制 (SPM) 效应和交叉相位调制 (XPM) 效应。因此，EDFA 将滤波后的闲频光功率放大到  $-30 \text{ dBm}$  左右，大于 FRA 输入阈值功率  $-40 \text{ dBm}$ ，然后后向 FRA 将闲频光功率放大到  $-20 \text{ dBm}$ ，实验结果如图 4 所示。图 4 中，43.006 GHz 和 56.978 GHz 的拍频信号经过拉伸之后得到的 8.057 GHz 和 10.670 GHz 的拍频信号及其傅里叶变换，其信噪比为 10 dB，大幅提升了后端电子记录系统的记录能力，提升系数等于光纤系统的拉伸倍数。在后端电子记录系统的时间分辨率为 20 ps 的情况下，系统的等效时间分辨率为 3.7 ps。在上述拍频信号测量中，第二组数据的拉伸倍数为 5.340，与 (6) 式计算结果相符，但第一组数据的拉伸倍数为 5.337，与 (6) 式相比的误差为 0.43%。经过分析，该误差主要来源于以下几方面：1) 在前后两段色散介质相同的情况下，系统拉伸倍数取决于其长度。目前光纤长度主要通过光背向散射仪测量，存在几十米的测量盲区，导致光纤长度测量有一定误差。2) 通过光纤光谱仪测量两单波长光频率，光拍频为其频率差。目前基于光栅分光的光谱仪测量精度在 0.01 nm 左右，则对应 1550 nm 波段的频率测量误差为 1.25 GHz。但由于两单波长光频率为对同一次光谱扫描得到的，理论上仪器测量误差对于每一个波长应该相等，因此实际光拍频率误差远小于 1.25 GHz。3) 通过对记录数据进行傅里叶变换得到实测光拍频率，离散傅里叶变换中选取不同的步长将会引起一定的计算误差。

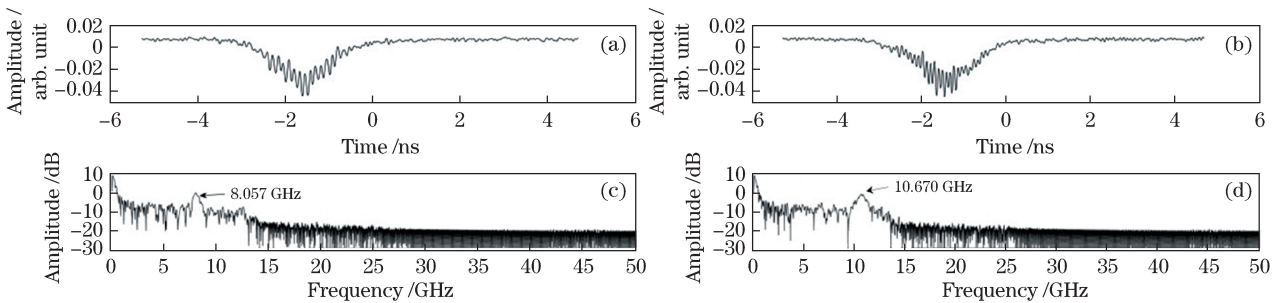


图 4 光拍频信号测量结果。(a)(c) 43.006 GHz; (b)(d) 56.978 GHz

Fig. 4 Measuring results of light beat-frequency signals. (a)(c) 43.006 GHz; (b)(d) 56.978 GHz

滤波可采用啁啾光纤光栅(CFBG)或膜片式滤波器,两者的结果对比如图 5 所示。图 5(a)为利用啁啾光纤光栅滤出闲频波,其插入损耗为-1.0 dB,消光比为-30 dB;图 5(b)为利用膜片式滤波器滤出闲频波,其插入损耗为-2.0 dB,消光比为-70 dB。采用膜片式滤波器极大地提高了闲频信号的信噪比,且滤波之后的闲频信号功率约为-35 dBm,大于一般的光放大器输入阈值(一般为-40 dBm),这有利于后端采用 EDFA 和 FRA 进行光放大。

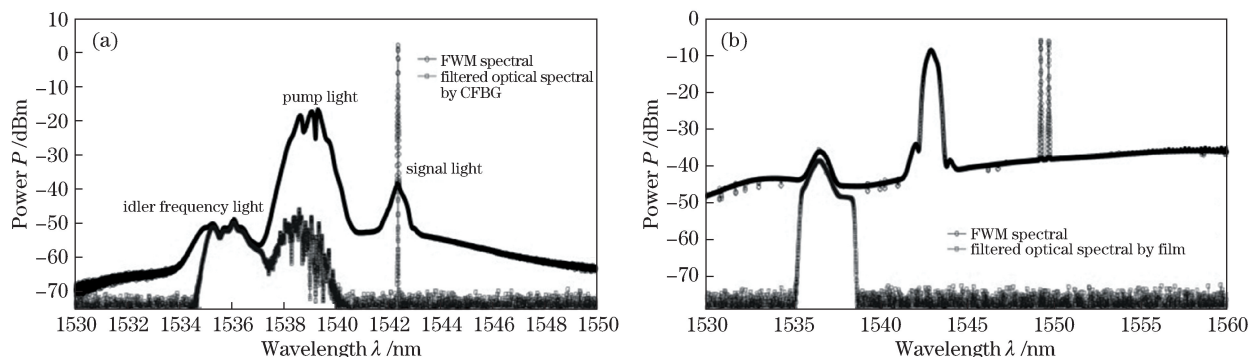


图 5 经(a)啁啾光纤光栅和(b)膜片式滤波器滤波后闲频信号的功率对比

Fig. 5 Comparison of idler frequency light powers after (a) chirped fiber grating and (b) diaphragm filter

FWM 属于光纤非线性效应的一种,而光纤非线性效应直接与光功率相关。在其他实验条件不变的情况下,随着宽光谱抽运功率的增大,由于 SPM 效应引起抽运光光谱的展宽,且以中心频率左右对称。同时,由信号光和抽运光通过 FWM 效应产生的闲频光也受到 SPM 效应的影响,且以中心频率左右对称。系统除产生  $2f_p - f_s$  频率之外,将产生频率为  $3f_p - 2f_s$  的另一闲频成分,且随着抽运功率的增大,SPM 效应和 FWM 效应相互作用将形成超连续谱,如图 6(a)所示。当保持抽运功率不变,增大信号光功率时,SPM 效应作用不明显,FWM 效应得到加强,除频率  $2f_p - f_s$  之外,闲频  $3f_p - 2f_s$  也进一步增强,如图 6(b)所示。

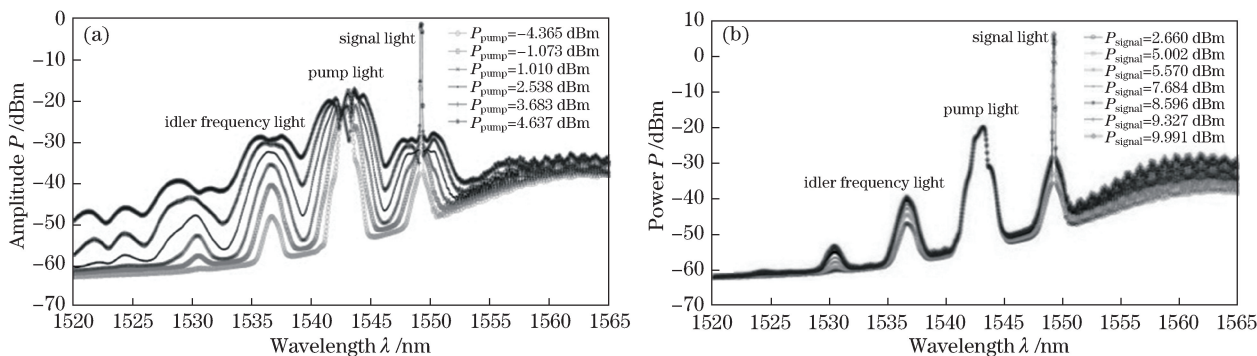


图 6 光谱变化。(a) 增加抽运光功率;(b) 增加信号光功率

Fig. 6 Spectral changes. (a) Increasing pump light power; (b) increasing signal light power

## 4 结 论

FWM 过程源于光纤非线性的电本性,在超快信号处理中具有皮秒量级的响应尺度。采用时间-波长映射的宽光谱抽运光,利用 FWM 效应对宽带宽光拍频信号进行实时采样,之后将加载了信号光信息的闲频信号进行时间拉伸,降低了带宽,成倍地提高了后端电子记录系统的带宽及采样率。但目前只完成了该技术的原理验证性实验,接下来将进一步提高采样时间门,即时间-波长映射抽运光的时间长度,并在保证信号信噪比的条件下提高拉伸倍数和解决时间同步问题,以便将该技术应用到各类物理实验中。

## 参 考 文 献

[1] Zhang Zhuoning, Li Jianzhong, Wang Jing, *et al.* Research of the optical time-division multiplexing with the same polarization and test method[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0207001.

- 张卓宁, 李建中, 王 竟, 等. 偏振态一致的时分复用系统及其测试方法研究[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0207001.
- [2] Zhang Liuyang, Sun Peijing, Huang Jinzhe, *et al.* Optical design of frequency-doubling system for ultrashort pulses based on prism pairs[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0922006.  
张留洋, 孙培敬, 黄金哲, 等. 基于棱镜对的超短脉冲倍频系统的光学设计[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0922006.
- [3] Mcewan T E, Kilkenny J D, Dallum G. World's fastest solid-state digitizer[J]. *Energy and Technology Review*, 1994(4): 1-6.
- [4] Kimbrough J R, Bell P M, Bradley D K, *et al.* Standard design for national ignition facility x-ray streak and framing cameras[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10): 10E530.
- [5] Kane D J, Trebino R. Characterization of arbitrary femtosecond pulses using frequency-resolved optical gating[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronic*, 1993, 29(2): 571-579.
- [6] Wen Guoqing, Zhang Shukui. Measurement of the ultrashort laser pulse width[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1995, 7(2): 309-312.  
文国庆, 张树葵. 超短脉冲激光的脉宽测量[J]. 强激光与粒子束, 1995, 7(2): 309-312.
- [7] Feng Da, Li Zheng, Tang Dan. Measurement methods for high speed optical pulses[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(9): 863-868.  
酆 达, 李 铮, 唐 丹. 高速光脉冲的测量方法[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(9): 863-868.
- [8] Ma Jingui, Wang Yongzhi, Yuan Peng, *et al.* Single-shot pulse-contrast measurement for high-intensity lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(8): 080008.  
马金贵, 王永志, 袁 鹏, 等. 高强度激光脉冲信噪比的单次测量技术[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080008.
- [9] Salem R, Foster M A, Gaeta A L. Application of space-time duality to ultrahigh-speed optical signal processing[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2013, 5(3): 274-317.
- [10] Fard A M, Buckley B, Zlatanovic S, *et al.* All-optical time-stretch digitizer[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(5): 051113.
- [11] Coppinger F, Bhushan A S, Jalali B. 12 Gsample/s wavelength division sampling analog-to-digital converter[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(4): 316-318.
- [12] Chou J, Boyraz O, Solli D. Femtosecond real-time single-shot digitizer[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(16): 161105.
- [13] Kärtner F X, Amatya R, Araghchini M, *et al.* Photonic analog-to-digital conversion with electronic-photonic integrated circuits[C]. *SPIE*, 2008, 6898: 689806.
- [14] Coppinger F, Bhushan A S, Jalali B. Photonic time stretch and its application to analog-to-digital conversion[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(7): 1309-1314.
- [15] Wang Meng, He Bi, Jiang Ming, *et al.* Experimental studies on shock pressure of laser-driven flyer system[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2013(1): 1-4.  
王 猛, 何 碧, 蒋 明, 等. 激光驱动飞片冲击应力实验研究[J]. 火工品, 2013(1): 1-4.
- [16] Liu H, Shen Z, Wang X, *et al.* Feasibility investigations on a novel micro-embossing using laser-driven flyer[J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, 44(6): 1987-1991.
- [17] Di J, Zhou M, Li J, *et al.* Micro-punching process based on spallation delamination induced by laser driven-flyer[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(7): 2339-2343.
- [18] Hu Shaolou. Laser interferometry for measuring velocities[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.  
胡绍楼. 激光干涉测速技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [19] Zhang Zhuoning, Peng Qixian, Wang Jing, *et al.* Design and simulation on all optical real-time measurement of transient optical signal[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 011202.  
张卓宁, 彭其先, 王 竟, 等. 瞬态光信号全光实时测量技术设计与仿真[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 011202.