

瞬态光信号全光实时测量技术设计与仿真

张卓宁 彭其先 王 竞 温伟峰 陶世兴*

中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 在全光网络中光码流的性能监控、强场物理中单次激光脉冲性能评估、干涉测速以及其他许多物理过程中都需要对瞬态光信号进行实时测量。提出了一种结合宽光谱抽运四波混频光-光采样和时间拉伸的瞬态光信号实时测量技术,拟利用特种光纤的超快非线性效应对光信号进行超分辨率采样,同时将单波长信号转换为宽光谱信号,进而利用光纤色散傅里叶变换对信号进行时间拉伸,可大为降低初始光信号带宽。对宽光谱四波混频和时间拉伸过程进行了理论分析,表明该方案是完全可行的。

关键词 测量;实时测量;四波混频;时间拉伸;瞬态光信号

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.011202

Design and Simulation on All Optical Real-Time Measurement of Transient Optical Signal

Zhang Zhuoning Peng Qixian Wang Jing Wen Weifeng Tao Shixing

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

Abstract Real-time measurement of the transient optical signal provides invaluable information about the dynamic processes, such as optical data stream monitoring in all-optical network, velocity interferometry and performance evaluation of single optical pulse in physics of intense fields. An all optical system based on wide spectral pump four wave mixing optical-optical sampling and time stretch is reported to measure the transient optical signal in real time. The proposed technique samples the optical signal with super-resolution, converts the single wavelength signal to wide spectral signal and stretches it using dispersive Fourier transformation. The process of four wave mixing and time stretch in theory are analyzed and its feasibility is verified.

Key words measurement; real-time measurement; four wave mixing; time stretch; transient optical signal

OCIS codes 190.4380; 070.1170; 320.7100

1 引言

超短激光脉冲为人类提供了强有力的研究超快现象的手段。利用超短脉冲组成的抽运/探测系统,人们可以研究物理、化学、生物学中的许多基本过程,如超晶格量子阱材料中载流子的行为、有机偶极分子的光致电荷转移及电荷分离特性、高等植物光合作用的原初过程、血红蛋白动力学、DNA内能量转移的过程等等^[1-6]。超短脉冲的宽度及功率发展到今天,不仅使人们得以研究许多需要飞秒级时间分辨能力的仪器才能实现的深入到原子、分子层次的超快现象,而且呈现出控制化学反应方向及进程和实现分子剪裁的科学前景^[7-8]。超短超强激光聚焦还为人类开辟了新的研究方向——强场物理^[9]。越来越多的应用表明,研究高速光脉冲振幅和相位的测量方法,对研究超短光脉冲产生的物理机理以及进一步促进超短脉冲激光技术的发展和有着重要的现实意义。尤其是在瞬态光信号测量领域,可以解决国防、经济发展中的关键问题:全光网络中对光码流性能的监控^[10],强场物理中单次激光脉冲性能评估,以及提高干涉测速中的测速能力等。

收稿日期:2015-08-11;收到修改稿日期:2015-08-17;网络出版日期:2015-11-13

基金项目:中国工程物理研究院X09专项(991100)、中国工程物理研究院科学技术发展基金(2015B0401079、2015B0401080)

作者简介:张卓宁(1989—),男,硕士研究生,主要从事瞬态信号处理技术方面的研究。E-mail: dzn-123@163.com

导师简介:彭其先(1970—),男,博士,研究员,主要从事瞬态光电诊断技术等方面的研究。

E-mail: qixianpeng109@163.com

*通信联系人。E-mail: taoshixing109@163.com

目前测量超快光脉冲的方法归纳起来可分为两类^[11]:间接测量法和直接测量法。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)以及光谱相位干涉直接电场重建(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。

针对瞬态光信号测量方法主要是在FROG基础上发展起来的瞬态光栅衍射频率分辨光学开关法(TG-FROG)^[12-14],其基本原理是获得待测脉冲的自相关信号,然后利用成像光谱仪对自相关信号进行频率分辨,获得时间-频率域正交的二维谱图,最后利用计算机迭代法还原出脉冲详细的相位信息。另外复旦大学报道了高强度激光脉冲信噪比的单次测量技术,已成功应用于我国的拍瓦激光装置^[14-15]。

本文提出了一种基于宽光谱抽运四波混频光-光采样和时间拉伸的瞬态光信号全光实时测量技术,采用时间-波长映射抽运光通过四波混频效应将单一波长信号光脉冲无失真转换为时间-波长映射闲频光脉冲,从而对信号光脉冲实现超分辨连续光-光采样^[16-17]。时间拉伸则能极大压缩被测光脉冲信号带宽。将两种技术有机结合,优势互补,实现对瞬态光信号的实时测量。

2 基本原理

如图1所示,测量系统由抽运光源、时间-波长映射模块、四波混频波长转换、滤波、时间拉伸、信号处理等部分组成。其原理为:光源发出的超短宽光谱光脉冲经过色散补偿光纤 L_1 后,形成时间-波长映射;然后通过功率放大形成色散啁啾抽运光脉冲;信号光与抽运光脉冲经偏振控制器控制偏振态之后通过波分复用器进入高非线性光纤,通过四波混频效应进行波长转换,得到除相位共轭外与信号光完全一样的啁啾闲频光;经过滤波之后,闲频光经过第二段光纤 L_2 进一步拉伸,进而在频域被压缩。时间拉伸的啁啾闲频光经光电探测器(PD)变成电信号,通过波形融合和数据重构还原为被测量信号光。

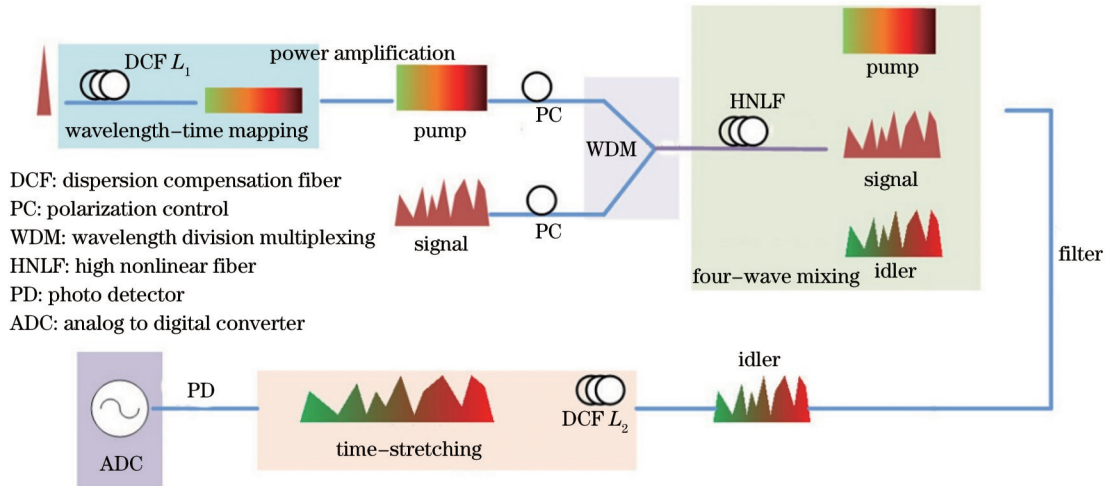


图1 瞬态光信号测量原理图

Fig.1 Sketch map of transient optical signal measurement

2.1 宽光谱抽运四波混频光-光采样

四波混频频域及时域变换如图2所示。为保证高效率的四波混频从而对信号波进行波长转换,将时间-波长映射的预啁啾抽运光同被探测弱信号入射到光纤中需要满足相位匹配条件,才能将弱信号放大的同时产生闲频信号。闲频信号除了相位反转(或共轭)外,复制了输入信号的所有特征。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 Δk_M 、 Δk_W 、 Δk_{NL} 分别代表由材料色散、波导色散和非线性色散效应对相位失配的贡献,四波混频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

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

在单模光纤中,除了零色散波长 λ_D 附近波导贡献 Δk_W 和材料贡献 Δk_M 可以相比拟外,对于偏振态相同的波, Δk_W 远小于 Δk_M ,因此实现近似相位匹配的三种条件是:利用小频移和低功率抽运来减小 Δk_M 和

Δk_{NL} ; 工作在零色散波长附近, 使 Δk_w 几乎能抵消 $\Delta k_M + \Delta k_{NL}$; 工作在反常群速度色散区, 使 Δk_M 为负, 则可用 $\Delta k_w + \Delta k_{NL}$ 抵消。这里拟采用抽运波长选择在光纤零色散波长附近的方法。

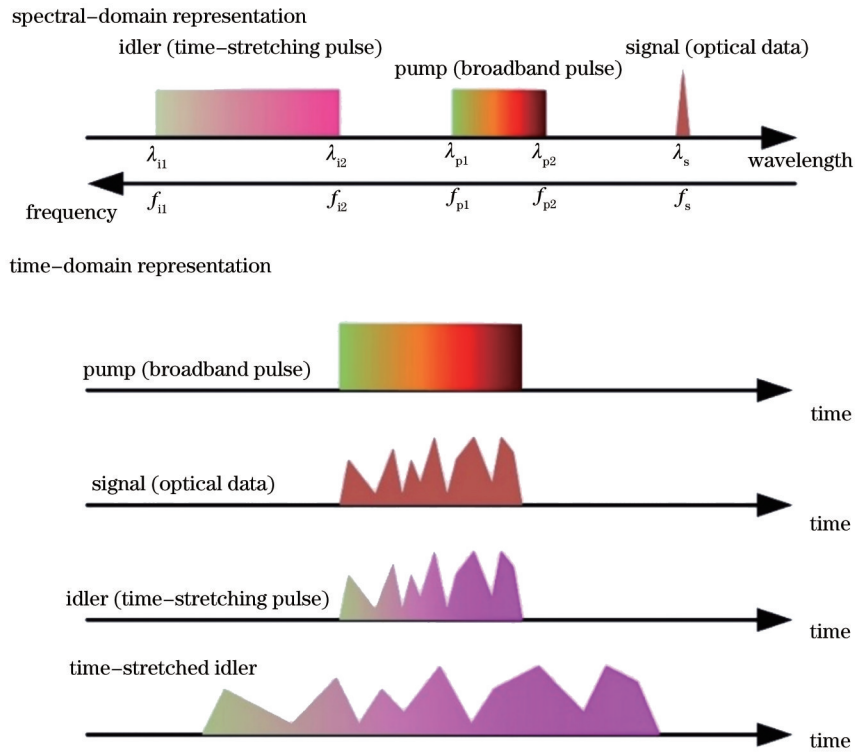


图2 宽光谱抽运四波混频频域及时域表示

Fig.2 Denotation of wide spectral pump four wave mixing in frequency domain and time domain

在满足近似相位匹配条件下, 只有预啾啾抽运波和信号波入射, 在光纤长度 z 处, 信号波功率和闲频波功率分别为

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

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

式中 g 为参量增益, $g = \sqrt{(\gamma P_0 r)^2 - (\kappa/2)^2}$, 采用单抽运放大情况下, $r = 1$, $\gamma = n_j \omega_j / (cA_{eff})$ 为非线性系数, n_j 为频率 ω_j 的有效折射率。由(3)、(4)式可知, 在输入信号入射到光纤中后, 几乎同时产生了闲频波, 其功率最初按照 z^2 增加, 但当传输距离满足 $gz > 1$ 后, 信号和闲频波均按照指数形式增大。由于闲频波和信号波一起沿光纤放大, 在光纤输出端几乎可以达到和信号同样的功率。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变化, 在信号频率固定、抽运波为宽光谱情况下, 其随抽运波频率变化, 同时和相位失配 κ 有关, 由于闲频波和信号波一起放大, 因此闲频波放大带宽和抽运光频率、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。

2.2 时间拉伸

系统利用光纤的线性群速度色散(GVD), 即是二阶群速度色散 β_2 对光-光采样的瞬态信号进行时间拉伸。然而, 光纤包含有高阶非线性群速度色散 β_3, β_4, \dots , 且高阶群速度参量是波长相关的, 由于不同时间段拉伸量不同, 高阶群速度色散可能会引起被测量信号畸变。下面对此现象进行理论分析, 结果表明, 非线性色散不对时间拉伸系统的拉伸因子产生影响。

设 $D(\lambda)$ 为包含高阶色散(β_3, β_4, \dots)的光纤色散参量, 以 SMF-28 为例

$$D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right), \quad (6)$$

式中 λ_0 是零色散波长, S_0 是 λ_0 处的斜率, 经过传输单位长度光纤的群延迟为

$$\tau_g(\lambda) = \int_{\lambda_{REF}}^{\lambda} D(\lambda) d\lambda, \quad (7)$$

式中 λ_{REF} 为参考波长, 因此, 经过四波混频光-光采样的波长相关信号时间长度为

$$t_{in} = L_1 \cdot \tau_{g1}(\lambda), \quad (8)$$

式中 L_1 为第一段光纤长度, τ_{g1} 为第一段光纤单位长度群延迟, 在第二段光纤输出端, 波长相关信号时间长度为

$$t_{out} = L_1 \cdot \tau_{g1}(\lambda) + L_2 \cdot \tau_{g2}(\lambda), \quad (9)$$

式中 L_2 为第二段光纤长度, τ_{g2} 为第二段光纤单位长度群延迟。根据(8)、(9)式, 在前后两段光纤有相同色散参量情况下 ($\tau_{g1} = \tau_{g2}$), 时间拉伸过程为线性, 且拉伸倍数为

$$M = \frac{t_{out}}{t_{in}} = \frac{L_1 + L_2}{L_1}. \quad (10)$$

由(10)式, 波长相关高次群速度色散项 β_3, β_4, \dots 被消掉了, 因此整个拉伸过程中不存在非均匀性。

3 仿真分析

对宽光谱抽运四波混频非饱和增益进行了仿真分析, 对各参数进行优化之后, 当信号光波长为 1550 nm、高非线性光纤非线性系数为 $1 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 、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 时, 计算了抽运光波长 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 3 所示, 在 1537~1543 nm 范围相位失配量接近于 0, 信号光和闲频光都有较高的增益且增益平坦度较好。

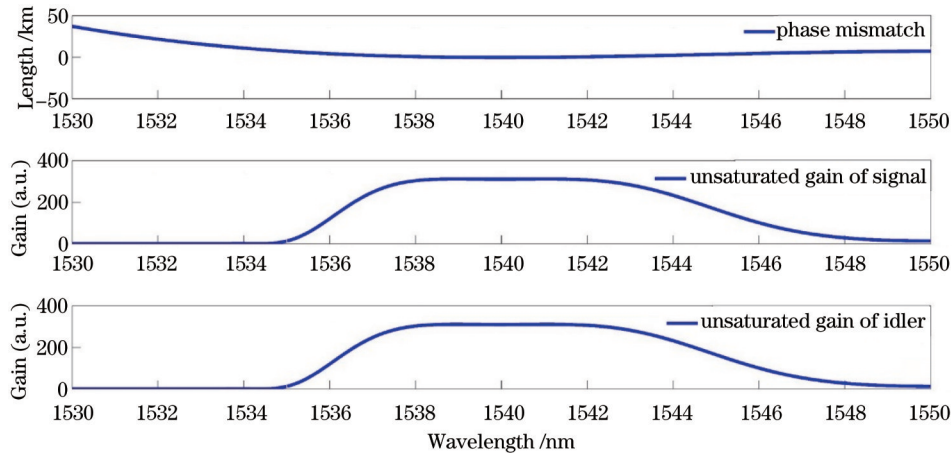


图3 宽光谱抽运光四波混频增益计算

Fig.3 Gain calculation of wide spectral pump four wave mixing

4 结 论

本文提出了一种基于宽光谱抽运四波混频光光采样和色散傅里叶变换相结合的瞬态光信号实时测量技术, 其基于光纤非线性效应超快特性对瞬态光信号实现超分辨光-光采样, 将单一波长信号转换为宽光谱信号且保持信号波形不变, 之后基于光纤色散特性对信号进行时间拉伸降低信号带宽, 理论分析及仿真结果表明, 在优化各参数情况下, 在 1537~1543 nm 范围能实现较为平坦四波混频效应。在前后色散介质相同情况下, 系统时间拉伸没有非线性效应。

参 考 文 献

- 1 De Rességuier T, Signor L, Dragon A, *et al.*. Experiment investigation of liquid spall in laser shock-loaded tin[J]. J Appl Phys, 2007, 101(1): 013506.
- 2 Grigsby W, Bowes B T, Dalton D A, *et al.*. Diagnosis of mbar laser produced shocks in tin using short pulse probes[C].

- Baltimore: Shock Compression of Condensed Matter-2005: Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, 2006, 845(1): 1337-1340.
- 3 Gahagan K T, Moore D S, Funk D J, *et al.*. Measurement of shock wave rise times in metal thin films[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 85(15): 3205-3208.
- 4 Funk D J, Moore D S, McGrane S D, *et al.*. Ultrafast studies of shock waves using interferometric methods and transient infrared absorption spectroscopy[J]. *Thin Solid Films*, 2004, 453-454: 542-549.
- 5 Gahagan K T, Moore D S, Funk D J, *et al.*. Ultrafast interferometric microscopy for laser-driven shock-wave characterization [J]. *J Appl Phys*, 2002, 92(7): 3679-3682.
- 6 Wei Zhiyi, Wang Zhaohua, Han Hainian, *et al.*. Progress on ultrashort and ultraintense laser pulse technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 773-777.
魏志义, 王兆华, 韩海年, 等. 超短及超强脉冲激光研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(6): 773-777.
- 7 Zhang Haibo, Zin Li. Ultrashort laser pulse distortion in fiber due to third-order dispersion[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 742-745.
张海波, 辛 丽. 光纤三阶色散导致超短激光脉冲畸变的研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S): 742-745.
- 8 Wei Zhiyi, Zhong Xin, Zhou Binbin, *et al.*. Frequency extending of ultrashort laser pulse with linear and nonlinear processes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 987-992.
魏志义, 钟 欣, 周斌斌, 等. 超短脉冲激光频率的线性及非线性扩展[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(6): 987-992.
- 9 Yamakawa K, Aoyama M, Matsuoka S, *et al.*. 100-TW sub-20-fs Ti: sapphire laser system operating at a 10-Hz repetition rate[J]. *Opt Lett*, 1998, 23(18): 1468-1470.
- 10 Wielandy S, FISHTEYN M, Zhu B. Optical performance monitoring using nonlinear detection[J]. *J Lightwave Technol*, 2004, 22(3): 784-793.
- 11 Iaconis C, Walmsley I. Self-referencing spectral interferometry for measuring ultrashort optical pulses[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1999, 35(4): 501-509.
- 12 Sweetser J N, Fittinghoff D N, Trebino R, *et al.*. Transient-grating frequency-resolved optical gating[J]. *Opt Lett*, 1997, 22(8): 519-521.
- 13 Nagy T, Simon P. Single-shot TG FROG for the characterization of ultrashort DUV pulses[J]. *Opt Express*, 2009, 17(10): 8144-8151.
- 14 Xu Yongsheng, Tang Xiuzhang, Zhang Ji, *et al.*. Single-shot measurement of UV ultra short pulse laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(9): 2381-2385.
徐永生, 汤秀章, 张 骥, 等. 紫外超短脉冲激光的单次测量[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(9): 2381-2385.
- 15 Ouyang Xiaoping, Yang Lin, Peng Yonghua, *et al.*. Analysis on reliability of diagnostics system for picosecond petawatt laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0108003.
欧阳小平, 杨 琳, 彭永华, 等. 皮秒拍瓦激光的参数测量系统可靠性分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0108003.
- 16 Liang Junqiang, Wang Juanfen, Li Pu, *et al.*. Optical sampling of chaotic laser based on four-wave mixing in highly nonlinear fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0402009.
梁俊强, 王娟芬, 李 璞, 等. 基于高非线性光线中四波混频效应实现对混沌激光的采样[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0402009.
- 17 Huang Xinning, Xie Xiaoping, Zhao Wei, *et al.*. A high-efficiency tunable polarization-insensitive wavelength convertor based on degenerate four-wave mixing in a highly nonlinear photonic crystal fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 0505005.
黄新宁, 谢小平, 赵 卫, 等. 基于光子晶体光纤中简并四波混频效应的高效可调谐偏振不敏感波长变换器[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0505005.

栏目编辑: 何卓铭