

基于单模光纤的交叉相位调制型频率分辨光学开关超短脉冲测量

马晓璐 李培丽 郭海莉 张一 朱天阳 曹凤娇

Cross-phase modulation typed frequency resolved optical gating measurement for ultra-short pulses using a single mode fiber

Ma Xiao-Lu Li Pei-Li Guo Hai-Li Zhang Yi Zhu Tian-Yang Cao Feng-Jiao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **63**, 240601 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.240601

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.240601>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2014/V63/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同入射脉冲强度线性啁啾对 BaF₂ 晶体交叉偏振波输出特性影响的数值模拟研究

Investigation on the influences of linear chirp with different input pulse intensities on BaF₂ cross-polarized wave generation

物理学报.2015, 64(2): 020602 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.020602>

飞秒激光烧蚀金属靶的冲击温度

Shock temperature of femtosecond laser ablation of solid target

物理学报.2013, 62(21): 210601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.210601>

飞秒激光烧蚀固体靶的冲击压强

Shock pressure in femtosecond laser ablation of solid target

物理学报.2013, 62(17): 170601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.170601>

利用非线性脉冲预整形实现脉冲快速自相似放大

Fast self-similar amplification through passive nonlinear pulse pre-shaping

物理学报.2013, 62(14): 140601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.140601>

飞秒激光精细加工含能材料

Femtosecond laser fine machining of energetic materials

物理学报.2013, 62(6): 060601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.060601>

基于单模光纤的交叉相位调制型频率分辨光学开关超短脉冲测量*

马晓璐 李培丽[†] 郭海莉 张一 朱天阳 曹凤娇

(南京邮电大学光电工程学院, 南京 210003)

(2014年4月22日收到; 2014年8月5日收到修改稿)

利用单模光纤中的光弹效应和交叉相位调制(XPM)效应, 提出了一种频率分辨光学开关法测量超短脉冲的新方案. 在本方案中, 单模光纤的前一部分产生可变延迟, 后一部分作为非线性介质产生非线性效应. 该方案只需一根单模光纤, 无须复杂的光路校准, 结构简单, 损耗低; 光纤中的XPM效应易发生, 无须相位匹配. 对提出的方案进行了数值模拟, 采用基于矩阵的主元素广义投影算法, 恢复出待测脉冲的幅度和相位信息, 并研究了光纤长度和待测超短脉冲的脉冲宽度对测量结果的影响. 结果表明: 测量准确度随着光纤长度的增加而提高, 选取长度为2 km的光纤, 就可以实现对超短脉冲的准确测量; 本文方案适用于脉冲宽度不小于80 fs的超短光脉冲的测量.

关键词: 频率分辨光学开关, 超短脉冲, 单模光纤, 交叉相位调制

PACS: 06.60.Jn, 42.30.Wb, 42.30.Rx, 42.81.Gs

DOI: 10.7498/aps.63.240601

1 引言

自20世纪90年代以来, 超短脉冲^[1,2]技术得到了迅速的发展. 超短脉冲的超快特性使其广泛应用于化学、生物学、医学、物理学、等离子体物理等多个领域^[3], 从而进一步促进了超短脉冲测量技术的发展. 目前常用的超短脉冲测量方法主要有自相关法^[4]、频率分辨光学开关法(FROG)^[5,6]和光谱相位相干直接电场重建法(SPIDER)^[7]. 和其他测量方法相比, FROG能够同时实现超短脉冲幅值和相位的测量, 并且装置简单, 因此更具吸引力.

根据介质中不同的非线性效应, 常用的FROG包括: 二次谐波频率分辨光学开关法(SHG-FROG)^[8-10]、交叉相位调制频率分辨光学开关法(XPM-FROG)^[11,12]、偏振频率分辨光学开关法(PG-FROG)^[13]、自衍射频率分辨光学开关法(SD-FROG)^[14]和互相关频率分辨光学开关法(X-

FROG)^[15,16]等. 但是其中大部分方案中都包含透镜、反射镜、棱镜和非线性晶体等光学元件, 需要复杂的光路调节. 并且为了提高测量准确性, 需要满足特定的相位匹配条件.

本文基于单模光纤中的光弹效应和交叉相位调制(XPM)效应, 提出了一种FROG法测量超短脉冲的新方案. 该方案中, 单模光纤的前一部分产生可变延迟, 后一部分作为非线性介质产生非线性效应. 只需一根单模光纤, 无须复杂的光路校准和调节, 结构简单, 成本低廉; 系统的损耗低, 寿命长, 抗电磁干扰. 同时光纤中的XPM效应容易发生, 无须相位匹配, 可测量全波段、宽频谱的超短脉冲.

2 工作原理

基于单模光纤的XPM-FROG超短脉冲测量的原理如图1所示. 初始待测超短脉冲以与单模光纤主轴平行的方向入射到单模光纤内. 单模光纤的

* 国家自然科学基金(批准号: 61275067, 61302026)、高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20123223120005)、江苏省自然科学基金(批准号: BK2012830, BK2012432)和江苏省普通高校研究生科研创新计划(批准号: CXLX13_448)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: lipl@njupt.edu.cn

总长度为 $l + L (l \ll L)$, 对其中长度为 l 的一段施加均匀的侧向压力 F . 单模光纤在 F 的作用下发生光弹效应, 产生应力双折射, 导致待测超短脉冲在这段光纤中发生偏振模色散, 形成两个偏振正交、相对延迟为 τ 的线偏振模. 通过改变外加应力 F 的大小, 可以得到可变的相对延迟 τ ^[17]. 这两个线偏振模分别作为待测脉冲和门脉冲, 继续在单模光纤 L 中传输, 并发生 XPM 效应^[18,19], 待测脉冲在门脉冲的调制下产生相移, 从而生成信号脉冲. 通过偏振分束器 (PBS) 滤出信号脉冲后, 利用电荷耦合元

件 (CCD)^[20] 和光谱仪 (OSA) 记录 XPM-FORG 行迹. 最后, 利用基于矩阵的主元素广义投影算法 (PCGP)^[21] 恢复待测超短脉冲的幅度和相位特性.

对于脉宽 (FWHM) 为飞秒 (10^{-15} s) 量级的超短脉冲而言, 产生足够延迟 τ 所需的光纤长度 l 非常短, 约为几厘米, 因此这段光纤中的非线性作用可以忽略. 而长为 L 的单模光纤没有外加应力, 本征双折射很小, 因此忽略这段光纤中的偏振模色散.

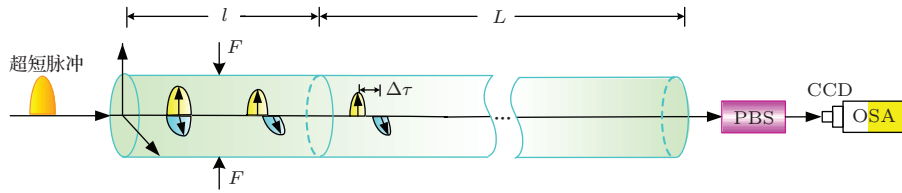


图1 (网刊彩色) 基于单模光纤的 XPM-FORG 超短脉冲测量原理图

3 理论模型

假设入射待测超短脉冲的光场为 $E(t)$, 则经过长度为 l 、外加应力 F 的单模光纤传输后形成的两个正交的线偏振模的相对延迟^[22] 为

$$\tau = \frac{3.63 \times 10^{-12} F^2 l}{c r^2}, \quad (1)$$

其中, c 为真空中的光速, r 是单模光纤的半径.

这两个正交的线偏振模, 即待测超短脉冲和门脉冲的光场分别为 $E_p(t)$ 和 $E_G(t, \tau)$. 在 XPM 效应的作用下, 在长度为 L 的单模光纤内产生的信号脉冲^[10] 表示为

$$E_{\text{sig}}(t, \tau) = E_p(t, \tau) \exp\left(\frac{4}{3} i \gamma L |E_G(t - \tau)|^2\right), \quad (2)$$

其中, γ 是单模光纤的非线性系数, L 是在光纤中发生 XPM 效应的长度.

将 (2) 式中的信号脉冲进行傅里叶变换^[23,24] 后得到的频谱为

$$I_{\text{sig}}^{\text{XPM}}(\omega, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} E_p(t, \tau) \exp\left(\frac{4}{3} i \gamma L |E_G(t - \tau)|^2\right) \times \exp(-i\omega t) dt \right|^2. \quad (3)$$

$I_{\text{sig}}^{\text{XPM}}(\omega, \tau)$ 即为 CCD 和光谱仪记录的 XPM-FORG 迹线, 是信号脉冲光强关于频率和时间延

迟的二维分布. 利用 PCGP 算法, 可以同时恢复待测超短脉冲的幅度和相位信息.

基于矩阵的 PCGP 算法如图 2 所示. 首先分别猜测待测超短脉冲的光场 $E_p(t)$ 和门脉冲光场 $E_G(t)$ 作为运算的初始值, 并计算出它们的外积矩阵 \mathbf{O} . 经过一系列行列变换后, 得到一个时间延迟的外积矩阵 $\mathbf{O}(t - \tau)$, 再对矩阵的每一列做傅里叶变换 (FFT), 就得到了模拟的 FROG 行迹图. 根据数据约束条件, 相位保持不变, 用测量的 FROG 频谱的强度代替数值模拟得到的强度值, 再利用傅里叶逆变换 (IFFT) 和行列反向移动, 得到新迭代的外积矩阵 \mathbf{O}_p . 最后, 利用奇异值矩阵分解 (SVD) 得到最大权重的外积矩阵, 对应的矢量分别为下一次迭代的待测超短脉冲和门脉冲光场的值. 如此不断循环迭代, 直到达到收敛标准 ($G < 10^{-10}$) 为止. FROG 行迹图的误差 G 定义为

$$G = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \left| I_{\text{FROG}}(\omega_i, \tau_j) - I_{\text{FROG}}^{(k)}(\omega_i, \tau_j) \right|^2}, \quad (4)$$

其中, N 是采样点的个数, $I_{\text{FROG}}(\omega_i, \tau_j)$ 表示真实的强度值, $I_{\text{FROG}}^{(k)}(\omega_i, \tau_j)$ 表示第 k 次迭代后恢复的强度值.

采用 PCGP 算法的优势在于: 利用完全无参数限制的奇异值矩阵分解 (SVD) 取代最小化过程, 最大限度地保持了原有数据的信息, 从而获得稳定、高效、准确的测量.

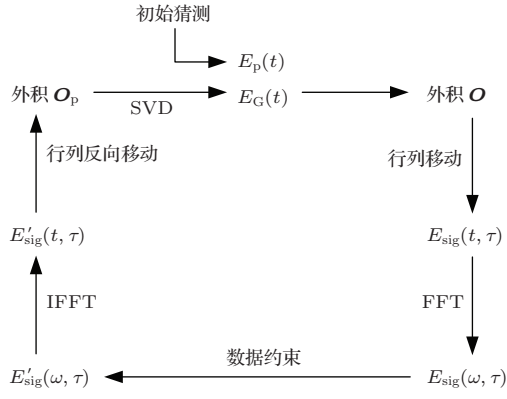


图2 PCGP^[17]算法示意图

为了定量分析恢复的幅度和相位相似度, 分别引入幅度均方差 A 和相位均方差 P :

$$A = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\text{abs}[E(t_i)] - \text{abs}[E^k(t_i)]|^2}, \quad (5)$$

$$P = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\text{angle}[E(t_i)] - \text{angle}[E^k(t_i)]|^2}, \quad (6)$$

其中, N 是采样点的个数, i 表示第几个采样点, k 表示迭代次数.

4 仿真结果与分析

对提出的方案进行模拟, 并利用基于矩阵的 PCGP 算法恢复幅度和相位信息. 在模拟中, 待

测超短脉冲的波长为 1550 nm, 外加应力 F 的范围^[22] 为 $(1.64\text{--}2.81) \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{m}^2$, 单模光纤的半径 r 为 62.5 μm , 非线性系数 γ 为 $2.857 \text{ W}^{-1}/\text{km}$.

4.1 无啁啾高斯脉冲

图 3 是 XPM 有效长度 L 分别为 0.02, 0.20, 2.00 和 2.50 km 时, 对应的 XPM-FROG 行迹图. 从图中可以看出, 随着 L 的不断增大, 系统的频移越来越明显. 这是因为发生 XPM 效应的光纤长度越大, XPM 效应越明显, 产生的信号脉冲的相位变化越大.

图 4 给出了 L 分别为 0.02, 0.20, 2.00 和 2.50 km 时, 待测无啁啾高斯脉冲 (红色) 和恢复脉冲 (蓝色) 的幅度和相位. 从图 4(a)–(d) 可以看出, 从 XPM-FROG 行迹图中恢复的幅度和相位均和待测脉冲基本符合. 此外, A 和 P 的值均小于 10^{-10} , 测量的相似度很高.

4.2 负啁啾高斯脉冲

图 5 是 L 分别为 0.02, 0.20, 2.00 和 2.50 km 时, 待测负啁啾高斯脉冲 (红色) 和恢复脉冲 (蓝色) 的幅度和相位. 在图 5(a) 中, 从 XPM-FROG 行迹图中恢复的幅度、相位、待测脉冲均有一定误差, 此时, A 和 P 的值分别为 0.0250 和 1.1697, 与图 4(a) 相比

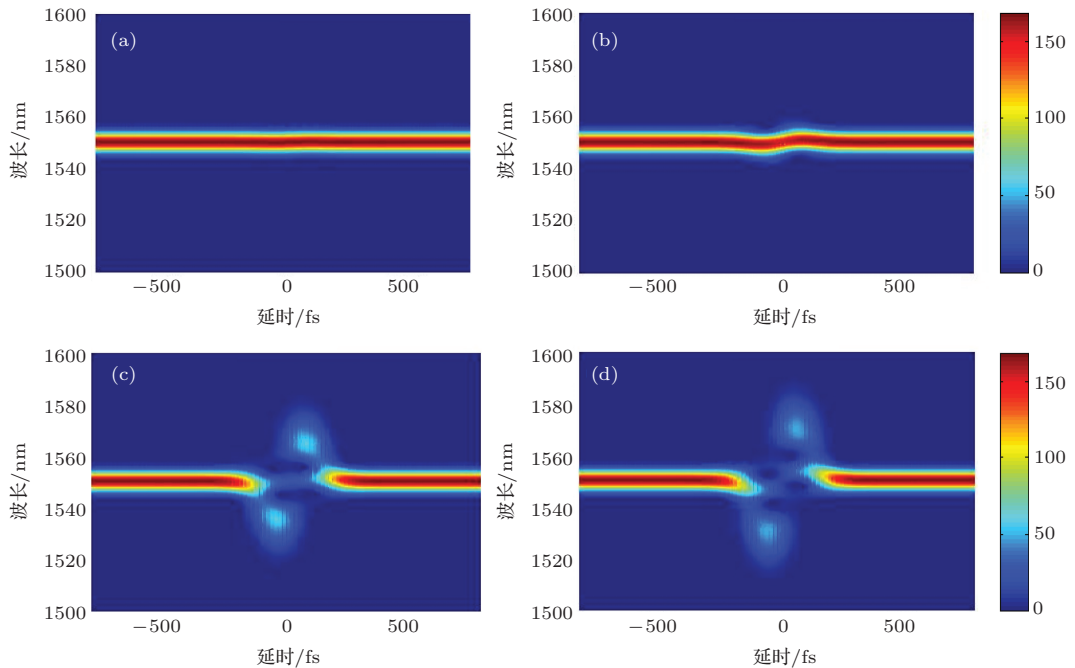


图3 (网刊彩色) L 不同时无啁啾高斯脉冲对应的 XPM-FROG 行迹图 (a) $L = 0.02 \text{ km}$; (b) $L = 0.20 \text{ km}$; (c) $L = 2.00 \text{ km}$; (d) $L = 2.50 \text{ km}$

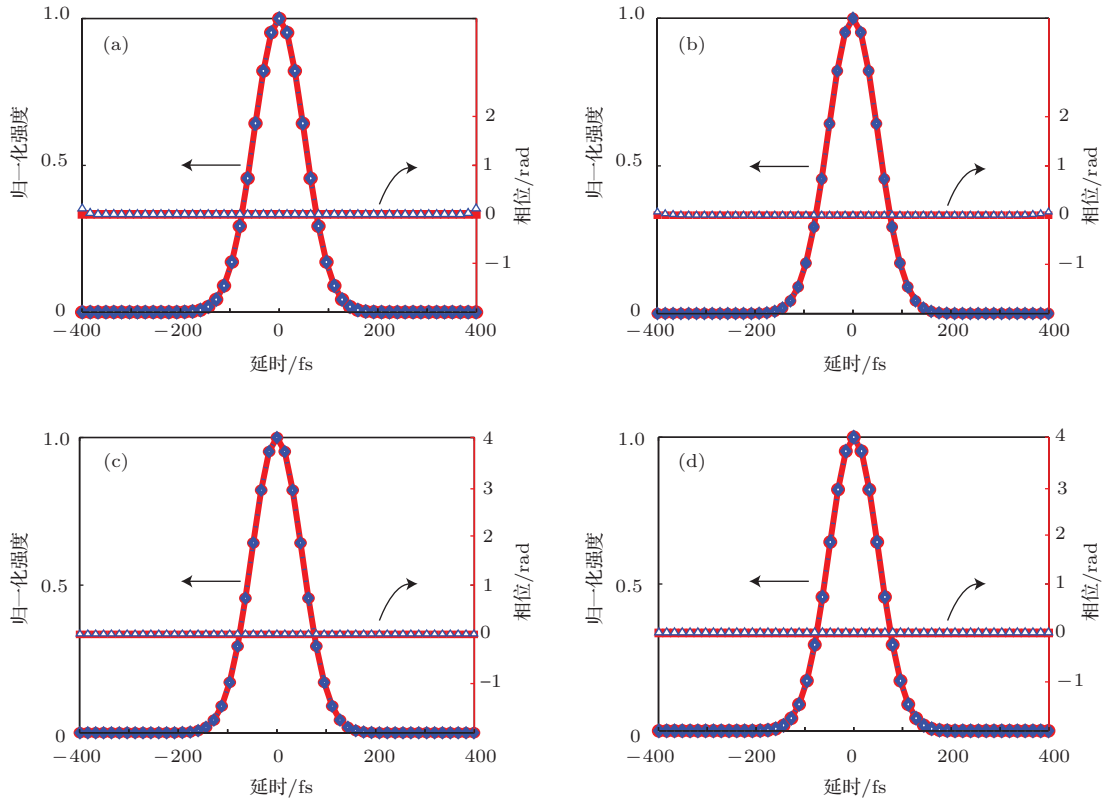


图4 (网刊彩色) L 不同时初始的(红色)和恢复的(蓝色)无啁啾高斯脉冲的幅度和相位 (a) $L = 0.02$ km; (b) $L = 0.20$ km; (c) $L = 2.00$ km; (d) $L = 2.50$ km

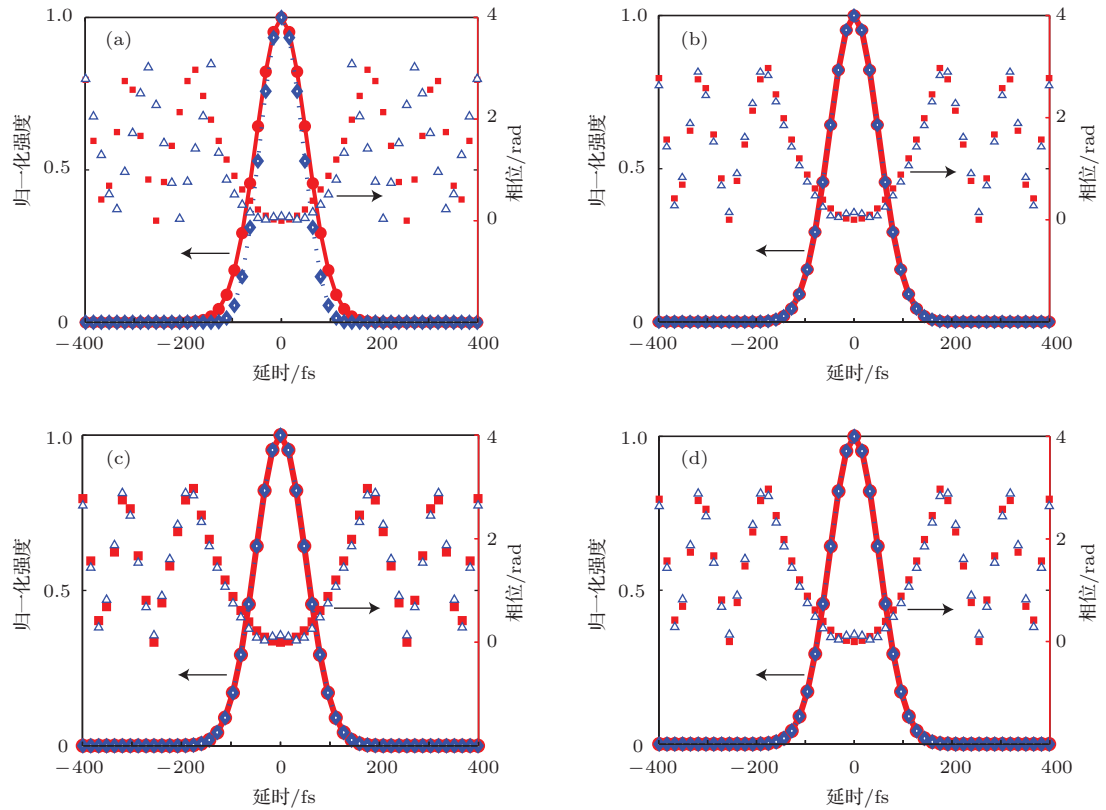


图5 (网刊彩色) L 不同时初始的(红色)和恢复的(蓝色)负啁啾高斯脉冲的幅度和相位 (a) $L = 0.02$ km; (b) $L = 0.20$ km; (c) $L = 2.00$ km; (d) $L = 2.50$ km

误差很大. 这是因为与无啁啾高斯脉冲相比, 负啁啾高斯脉冲的相位比较复杂, 要求信号脉冲携带更多的信息, 才能准确恢复出幅度和相位信息. 所以当发生 XPM 效应的长度 L 过短时, 待测脉冲和门脉冲之间的 XPM 效应较弱, 导致信号脉冲携带的信息较少, 误差较大. 随着长度 L 的增加, XPM 效应不断增强, 恢复的脉冲幅度和待测脉冲逐渐符合, A 的值也逐渐减小到 10^{-10} 以下; 相位的准确度也逐渐改善, 但是并不明显, P 的值均小于 0.0012, 有一定的失真, 如图 5 (b)–(d) 所示.

因此, 对于相位信息比较复杂的超短脉冲, 本方案中的测量系统有一定失真, 可以通过增加单模光纤的长度减小误差.

4.3 双峰脉冲

图 6 是 L 分别为 0.02, 0.20, 2.00 和 2.50 km 时, 待测双峰脉冲 (红色) 和恢复脉冲 (蓝色) 的幅度和相位. 从图 6 (a) 可以看出, 当长度 L 很小时, 恢复的幅度、相位与待测脉冲相比均有一定误差, 此时 A 和 P 的值分别为 0.1107 和 1.9910. 当长度 L 变

大时, 恢复的脉冲幅度和待测脉冲逐渐符合, A 的值减小到 1.8699×10^{-10} ; 相位的准确度也逐渐改善, 但是 P 的值仍大于 0.0100, 有一定的失真, 如图 6 (b) 所示. 从图 6 (c), (d) 可以看出, 随着长度 L 的增加, XPM 效应不断增强, 恢复的脉冲幅度和相位与待测脉冲逐渐符合, A 和 P 的值均减小到 10^{-10} 以下.

因此, 对于强度包络比较复杂的超短脉冲, 选取足够长度的单模光纤就可以实现精确的测量.

4.4 脉冲宽度的影响

图 7 是长度 L 为 2 km, 待测超短脉冲的脉宽分别为 80 和 60 fs 时, 待测双峰超短脉冲 (红色) 和恢复脉冲 (蓝色) 的幅度和相位. 从图 7 (a) 可以看出, 当待测双峰超短脉冲的脉冲宽度为 80 fs 时, 恢复的脉冲幅度和相位与待测脉冲的相似度很高, A 和 P 的值均小于 10^{-10} . 当待测脉冲的脉宽减小到 60 fs 时, 恢复的脉冲幅度与待测脉冲十分符合, A 的值为 7.2598×10^{-10} ; 但是相位的恢复效果不理想, P 的值为 3.8356, 误差很大, 如图 7 (b) 所示. 这是因

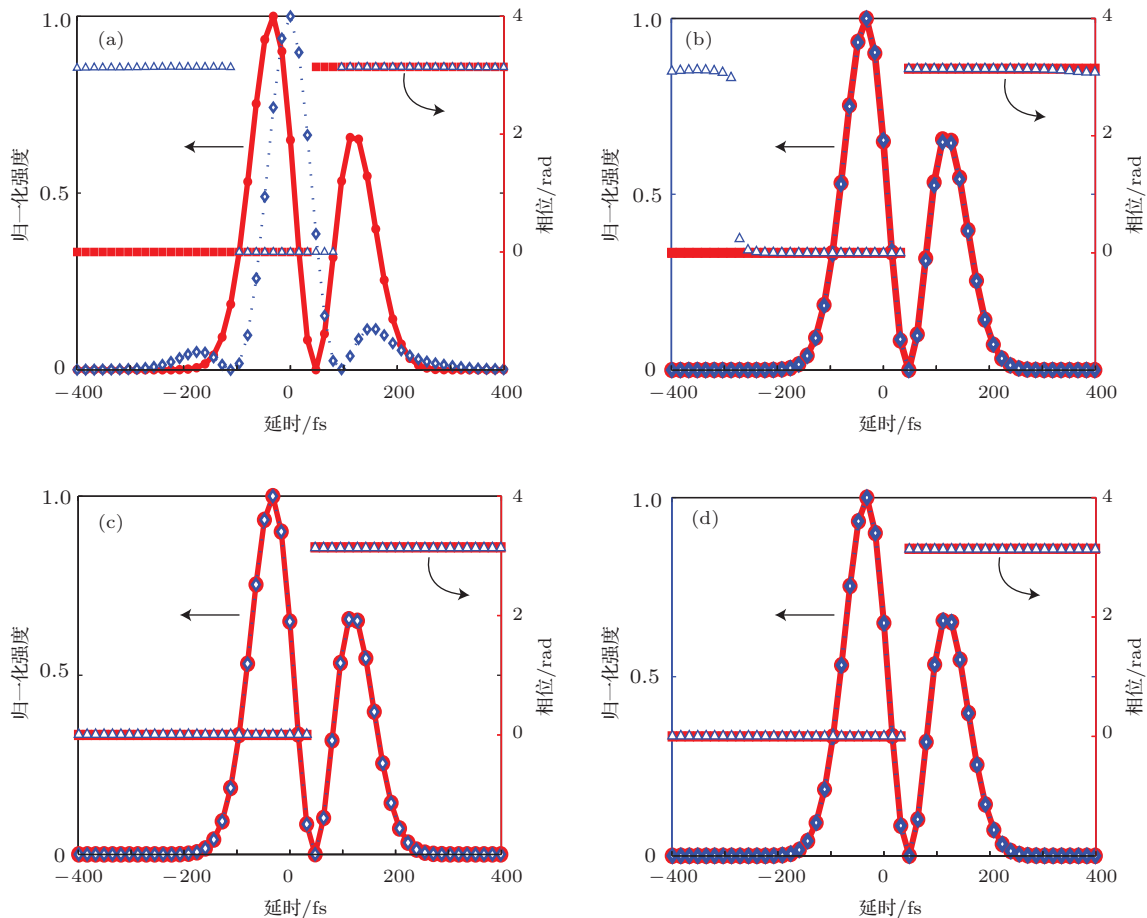


图 6 (网刊彩色) L 不同时初始的 (红色) 和恢复的 (蓝色) 双峰脉冲的幅度和相位 (a) $L = 0.02$ km; (b) $L = 0.20$ km; (c) $L = 2.00$ km; (d) $L = 2.50$ km

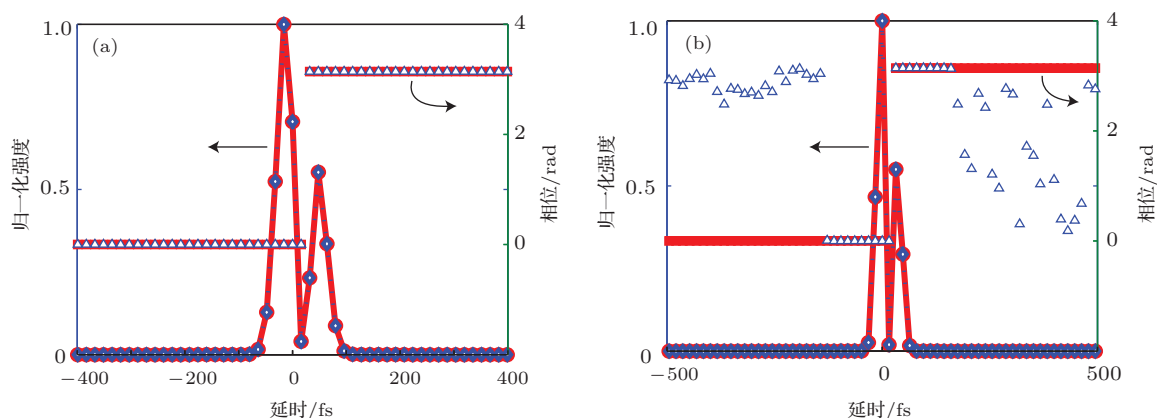


图7 (网刊彩色) 脉冲宽度不同时待测双峰超短脉冲(红色)和恢复脉冲(蓝色)的幅度和相位 (a) 80 fs; (b) 60 fs

为当待测超短脉冲的脉宽很小时, 门脉冲的脉宽也很小, 在门脉冲的持续时间内对单模光纤的折射率调制较弱, 导致XPM效应较弱, 信号脉冲携带的信息较少, 所以恢复脉冲的误差较大. 因此, 本文方案适用于脉冲宽度不小于80 fs的超短光脉冲的测量.

5 结 论

基于单模光纤的光弹效应和XPM效应, 提出一种测量超短光脉冲的新方案. 在本方案中, 单模光纤分别作为可变延迟线和非线性介质, 无须复杂的光路校准, 结构简单, 成本低廉; 光纤中的XPM效应容易发生, 无须相位匹配, 可测量全波段、宽频谱的超短脉冲. 建立了这种测量方案的理论模型, 并利用基于矩阵的PCGP算法恢复待测超短脉冲的幅度和相位信息. 结果表明, 测量准确性随着光纤长度的增加而提高, 选取长度为2 km的单模光纤, 就可以实现对超短脉冲的准确测量; 本文方案适用于脉冲宽度不小于80 fs的超短光脉冲的测量.

参考文献

[1] Simon J D 1989 *Rev. Sci. Instrum.* **60** 3597
 [2] Tien E K, Sang X Z, Qing F, Song Q, Boyraz O 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 051101
 [3] Yu Y L, Mu C J, Bai J T, Hou X 2005 *Laser Technol.* **29** 358 (in Chinese) [于云龙, 穆参军, 白晋涛, 侯洵 2005 激光技术 **29** 358]
 [4] Diels J C M, Fontaine J J 1985 *Appl. Opt.* **24** 1270
 [5] Trebino R 2000 *Frequency-Resolved Optical Gating: the Measurement of Ultrashort Laser Pulses* (1st Ed.) (Berlin: Springer)

[6] Walmsley I A, Dorrer C 2009 *Adv. Opt. Photon.* **1** 308
 [7] Iaconis C, Walmsley I A 1999 *IEEE J. Quantum Electron.* **35** 501
 [8] Delong K W, Trebino R 1994 *Opt. Soc. Am. B* **11** 10
 [9] Wang Z H, Wei Z Y, Teng H, Wang P, Zhang J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 362 (in Chinese) [王兆华, 魏志义, 滕浩, 王鹏, 张杰 2003 物理学报 **52** 362]
 [10] Wen R H 2012 *Appl. Laser* **32** 143 (in Chinese) [文汝红 2012 应用激光 **32** 143]
 [11] Honzatko P, Kanka J, Vraný B 2004 *Opt. Express* **12** 6046
 [12] Pang J 2012 *M. S. Dissertation* (Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications) (in Chinese) [庞杰 2012 硕士学位论文 (北京: 北京邮电大学)]
 [13] Wang Z H, Wei Z Y, Zhang J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1194 (in Chinese) [王兆华, 魏志义, 张杰 2005 物理学报 **54** 1194]
 [14] Kane D J, Trebino R 1993 *IEEE J. Quantum Electron.* **29** 571
 [15] Zhang J Y, Lee C K, Huang J Y, Pan C L 2004 *Opt. Express* **12** 574
 [16] Selm R, Krauss G, Leitenstorfer A, Zumbusch A 2012 *Opt. Express* **20** 5955
 [17] Ruan Y L, Xiang Q, Huang D X 1996 *Chin. J. Lasers* **23** 901 (in Chinese) [阮迎澜, 向清, 黄德修 1996 中国激光 **23** 901]
 [18] Agrawal G P, (translated by Jia D F, Yu Z H, Tan B, Hu Z Y) 2002 *Nonlinear Fiber Optics and Applications of Nonlinear Fiber Optics* (3rd Ed.) (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) (in Chinese) [阿戈沃 G P 著 (贾东方, 余震虹, 谭斌, 胡智勇译) 2002 非线性光纤光学原理及应用 (北京: 电子工业出版社)]
 [19] Zhong X Q, Xiang P A 2007 *Chin. Opt. Lett.* **5** 534
 [20] Wang D J, Zhang T 2011 *Chin. Phys. B* **20** 087202
 [21] Kane D J 1998 *IEEE J. Quantum Electron.* **4** 278
 [22] Wan J, Huang Y Q 2002 *Chin. J. Sci. Instrum.* **23** 111 (in Chinese) [万瑾, 黄元庆 2002 仪器仪表学报 **23** 111]
 [23] Qiao N S, Zou B J 2013 *Chin. Phys. B* **22** 014203
 [24] Fan T Y, Xie L Y, Fan L, Wang Q Z 2011 *Chin. Phys. B* **20** 076102

Cross-phase modulation typed frequency resolved optical gating measurement for ultra-short pulses using a single mode fiber*

Ma Xiao-Lu Li Pei-Li[†] Guo Hai-Li Zhang Yi Zhu Tian-Yang Cao Feng-Jiao

(College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

(Received 22 April 2014; revised manuscript received 5 August 2014)

Abstract

A new scheme of measuring ultra-short optical pulses, based on the photo-elastic effect and cross-phase modulation (XPM) effect in a single-mode fiber, is proposed. In this novel scheme, a variable delay is generated in the former part of the single-mode fiber, and the nonlinear effect is produced in the latter part as a nonlinear medium. The structure including only one single-mode fiber is very simple and low-cost, and needs no complex optical circuit calibration. In addition, XPM effect in the fiber can be realized easily without phase matching. Measured pulses can be retrieved by using principal component generalized projects algorithm based on matrix, and the influences of fiber length and the pulse width on amplitude and phase are studied by numerically simulating the scheme proposed. The results show that the ultra-short optical pulses can be measured when fiber length is equal to 2 km, and the accuracy of measurement is improved by increasing the fiber length. The proposed scheme can realize the measurement of optical ultra-short pulse whose pulse width is above 80 fs.

Keywords: frequency resolved optical gating, ultra-short optical pulse, single-mode fiber, cross-phase modulation

PACS: 06.60.Jn, 42.30.Wb, 42.30.Rx, 42.81.Gs

DOI: [10.7498/aps.63.240601](https://doi.org/10.7498/aps.63.240601)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61275067, 61302026), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20123223120005), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant Nos. BK2012830, BK2012432), and the Colleges and Universities in Jiangsu Province Plans to Graduate Research and Innovation, China (Grant No. CXLX13_448).

[†] Corresponding author. E-mail: lipl@njupt.edu.cn