

## 基于空谱干涉和频域分割的超快激光时空耦合特性的单次测量方法

李伟 王道 洪义麟 曾小明 母杰 胡必龙 左言磊 吴朝辉 王晓东 李钊历 粟敬钦

### Single-frame measurement of complete spatiotemporal field of ultrashort laser pulses using frequency domain separate spectral interferometry

Li Wei Wang Xiao Hong Yi-Lin Zeng Xiao-Ming Mu Jie Hu Bi-Long Zuo Yan-Lei Wu Zhao-Hui  
Wang Xiao-Dong Li Zhao-Li Su Jing-Qin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 034203 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211665

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211665>

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

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于空谱干涉扫描法测量超宽带激光时空耦合特性

Measurement of spatiotemporal coupling characteristics of ultra broadband pulsed laser beam based on spatial spectrum interferometric scanning

物理学报. 2021, 70(23): 234201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210996>

#### 基于二维材料异质结可饱和吸收体的超快激光器

Ultrafast pulse lasers based on two-dimensional nanomaterial heterostructures as saturable absorber

物理学报. 2020, 69(18): 188102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201235>

#### 外场对分子纳米结电流-电压特性的影响

Effect of external field on the I-V characteristics through the molecular nano-junction

物理学报. 2018, 67(2): 027304 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171604>

#### 双重复频率锁模Yb:YAG陶瓷激光器

Dual repetition-rate mode-locked Yb: YAG ceramic laser

物理学报. 2018, 67(9): 094206 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172345>

#### 超快光脉冲照射GaAs晶体产生的干涉环

Interference rings induced by ultrafast laser pulse in GaAs crystal

物理学报. 2020, 69(21): 214202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201055>

#### 基于旋转不变技术信号参数估计的激光扫频干涉测量方法

Laser frequency scanning interferometry based on estimating signal parameters via rotational invariance technique

物理学报. 2021, 70(3): 034205 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201135>

# 基于空谱干涉和频域分割的超快激光时空耦合特性的单次测量方法\*

李伟<sup>1)2)4)</sup> 王逍<sup>2)†</sup> 洪义麟<sup>3)</sup> 曾小明<sup>2)</sup> 母杰<sup>2)</sup> 胡必龙<sup>2)</sup>  
左言磊<sup>2)</sup> 吴朝辉<sup>2)</sup> 王晓东<sup>2)</sup> 李钊历<sup>2)</sup> 栗敬钦<sup>2)</sup>

1) (中国科学技术大学光学与光学工程系, 合肥 230026)

2) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 等离子体物理重点实验室, 绵阳 621900)

3) (中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥 230026)

4) (中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088)

(2021年9月7日收到; 2021年10月12日收到修改稿)

大口径超高峰值功率激光的时空耦合 (spatiotemporal couplings, STCs) 畸变会严重影响焦斑的功率密度, 为了准确预测远场处的光场分布、补偿 STCs 畸变以提升远场的峰值功率密度, 亟须一种有效的时空耦合特性的单次测量方法. 本文提出了一种基于空谱干涉和频域分割的超快激光时空耦合特性测量方法, 对该测量方法的基本原理与实现方式进行了详细的阐述, 并对其进行了模拟计算与分析, 模拟结果表明该测量方法能够精确表征超短脉冲激光的时空耦合特性.

**关键词:** 空谱干涉, 时空耦合特性, 超快激光

**PACS:** 42.30.Rx, 42.40.Kw

**DOI:** 10.7498/aps.71.20211665

## 1 引言

超高峰值功率激光聚焦后可以产生前所未有的极端物理条件, 在研究激光加速、实验室天体物理、核物理、等离子体物理等方面有重要的应用价值, 目前人们能实现的超高峰值功率激光聚焦功率密度可达  $10^{22}$ — $10^{23}$  W/cm<sup>2</sup> [1–3]. 然而由于超高峰值功率激光装置光路复杂, 近场光束口径大, 极易引入时空耦合 (spatiotemporal couplings, STCs) 畸变, 从而严重影响激光远场的峰值功率密度 [4–6]. 因此, 准确测量超高峰值功率激光的时空耦合特性, 对于预测其远场处的光场时空分布、主动补偿时空畸变以提高远场峰值功率密度有重要的意义.

目前有很多学者开展了超短脉冲时空耦合特性测量相关的研究: 2016年 Pariente 等 [7] 提出了基于迈克耳孙干涉仪的时域扫描三维电场重建方法, 可以测量光电场的时空分布, 但是需要极高的扫描精度以及复杂的迭代算法; Li 等 [8] 于 2019 年提出了用杨氏双缝干涉法测脉冲前沿畸变的方法, 该方法可以通过扫描方式获得激光束的脉冲前沿分布, 但无法获取脉冲的时域波形信息; 同时也有一些学者提出了时空耦合特性的单次测量方法, 如多光谱数字全息测量 [9]、多光谱哈特曼传感器 [10] 等, 但是这些方法的光谱分辨能力不足, 难以得到精确的脉冲时域特征.

1997 年 Meshulach 等 [11] 提出了空谱干涉法, 用于测量超快激光的时间波形, 由于空谱干涉测量

\* 中国工程物理研究院等离子体物理重点实验室自主科研项目 (批准号: JCKYS2018212024) 和国家重点研发计划 (批准号: 2018YFA0404804) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangxiaocn@263.net

法便于操作且精度较高,之后被广泛应用于精确的延时测量、光谱调节等方面<sup>[12,13]</sup>.也有学者用空谱干涉法测时空耦合特性,如2008年Bowlan等<sup>[14]</sup>用光纤对光束进行点取样,用空谱干涉法获取取样点的谱强度和谱相位信息,通过逐点扫描获得光束的时空耦合特性;2016年,Bahk等<sup>[15]</sup>用光栅和成像光谱仪实现了自参考的一维空间分辨时空特性测量,通过一维扫描可以获得待测光完整的时空耦合特性,该方法也是基于空谱干涉原理.上述基于空谱干涉测量时空耦合特性的方法都需要多次扫描测量,无法应用于单次运行的大型超高峰值功率激光装置.本文提出了基于空谱干涉和频域分割的超快激光时空耦合特性的单次测量方法,通过单次测量即可获得待测光完整的时空耦合特性,具有光路简单、分辨率高的特点,有望应用于大型超高峰值功率激光装置时空耦合特性的测量.

## 2 测量原理与方法

本文提出的基于空谱干涉和频域分割的时空耦合特性的单次测量方法,其光路结构如图1所示,待测光( $\text{Beam}_{\text{test}}$ )与参考光( $\text{Beam}_{\text{ref}}$ )传输方向在 $xz$ 平面内存在夹角,在 $yz$ 平面内夹角为0,两束光经过透镜L1和L2缩束到合适的口径后到达成像光谱仪(SPECT)入口处,成像光谱仪入口处放置狭缝阵列(slit array)对光束进行采样,由成像光谱仪获取空谱干涉图像; $\text{PF}_{\text{ref}}$ 和 $\text{PF}_{\text{test}}$ 分别表示参考光与待测光的脉冲前沿.二维空谱干涉图像的两个维度分别代表 $y$ 方向和激光电场角频率 $\omega$ (或激光波长 $\lambda$ ),干涉场的光强分布 $I(y, \omega)$ 遵循如下规律:

$$(y, \omega) = \sum_{j=1}^n \left\{ I_r(x_j, y, \omega + p_j \cdot x_j) + I_t(x_j, y, \omega + p_j \cdot x_j) + 2\sqrt{I_r(x_j, y, \omega + p_j \cdot x_j) \cdot I_t(x_j, y, \omega + p_j \cdot x_j)} \times \cos [\Delta\phi(x_j, y, \omega + p_j \cdot x_j) + (\omega + p_j \cdot x_j) \cdot \Delta\tau(x_j)] \right\}. \quad (1)$$

(1)式中 $I_r$ 和 $I_t$ 分别表示参考光和待测光强度; $x_j = x_1 - x_n$ 为待测光覆盖的 $n$ 条狭缝所处的 $x$ 坐标位置; $y$ 是 $y$ 方向空间坐标; $\omega$ 表示光电场角频率; $p_j$ 表示成像光谱仪入口处狭缝位置变化导致采集到的光谱图沿 $\omega$ 方向整体移动的系数,需要通过

预先标定确定; $\Delta\phi$ 表示待测光与参考光相对相位差; $\Delta\tau(x_j)$ 表示 $x_j$ 处待测光与参考光的相对延迟,其大小由待测光与参考光之间的夹角 $\theta$ 以及两光束中心位置相对延迟 $\Delta\tau_0$ 确定,满足如下关系:

$$\Delta\tau(x_j) = \Delta\tau_0 + \frac{2x_j}{c} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right). \quad (2)$$

(2)式中 $\Delta\tau_0$ 为 $x = 0$ 处待测光与参考光的相对延迟, $c$ 为光速, $\theta$ 为待测光与参考光之间的夹角.

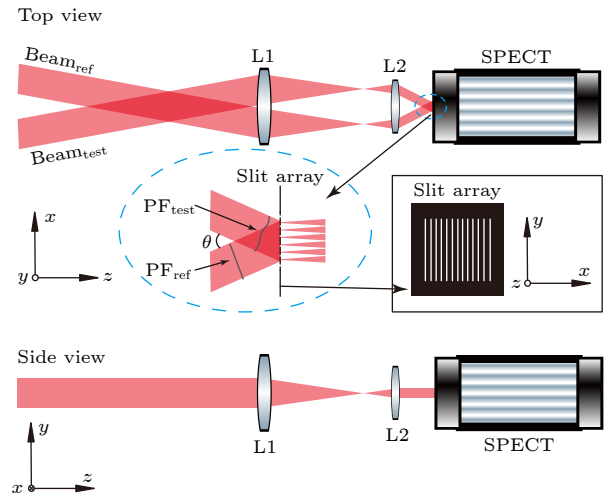


图1 光路示意图  
Fig. 1. Schematic of light path.

采集到干涉图像后,需要从干涉图像中提取每一条狭缝采样区的光场信息,提取过程如图2所示:首先将采集到的干涉图进行二维傅里叶变换,得到二维频域图,频域图中心亮斑为0级亮斑,代表干涉图像的直流分量,左侧一系列亮斑为-1级亮斑,右侧为+1级亮斑.由于待测光与参考光之间存在夹角,故狭缝阵列中不同狭缝处待测光与参考光的相对延迟不同,形成的干涉条纹图调制频率不同,因此二维频域图中一级亮斑的位置也不同,如图3所示.待测光与参考光相对延迟越大,形成的干涉条纹调制频率越高,二维频域图中一级亮斑就越远离中心位置,因此虽然不同狭缝形成的干涉条纹在 $(\omega, y)$ 域中是混叠在一起的,但是在二维频域图中却能够分开,本文标题中的“频域分割”由此而来.

从二维频域图中任意一个一级亮斑中可以提取对应狭缝采样区的谱强度和谱相位信息:如图2第3步所示,将对应的一级亮斑单独提取出来,该步骤可以理解为在频域进行带通滤波,经第4步二维傅里叶逆变换后得到一个 $(\omega, y)$ 域的二维复数矩

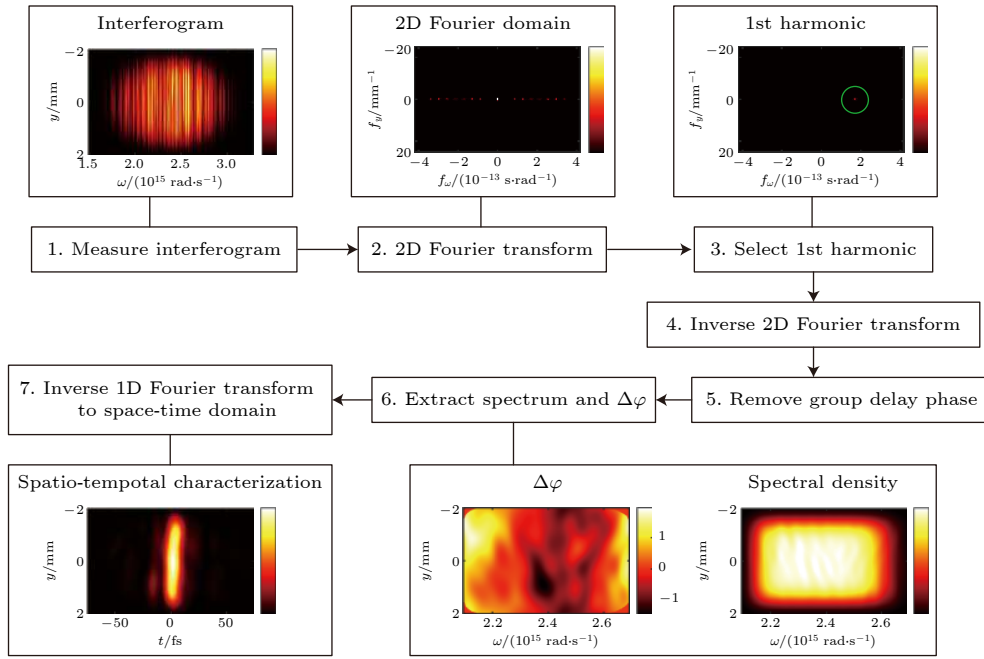


图 2 狭缝与+1级亮斑对应关系

Fig. 2. Correspondence between slits and +1st harmonic.

阵, 记为  $S(\omega, x_j, y)$ ; 第 5 步要去掉因待测光与参考光相对延迟导致的附加一阶色散, 即群延迟, 计算方法为  $S'(\omega, x_j, y) = S(\omega, x_j, y) \cdot \exp(-i\omega \cdot \Delta\tau(x_j))$ , 其中  $\Delta\tau(x_j)$  是第  $j$  条狭缝处待测光与参考光之间的相对延迟, 可由 (2) 式计算得出; 第 6 步提取谱强度和谱相位, 谱强度是二维复数矩阵的模,  $I(\omega, x_j, y) = |S'(\omega, x_j, y)|$ , 谱相位是二维复数矩阵的辐角,  $\phi(\omega, x_j, y) = \arg(S'(\omega, x_j, y))$ ; 第 7 步, 根据待测光谱强度和谱相位计算时域特征, 对各位置处的频域信息做一维傅里叶逆变换, 得到对应位置的时域信息:

$$E(t, x_j, y) = F^{-1} \left\{ \sqrt{I(\omega, x_j, y)} \cdot \exp[i\phi(\omega, x_j, y)] \right\}. \quad (3)$$

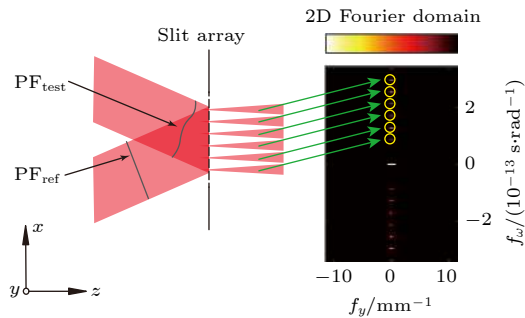


图 3 根据干涉图还原时空耦合特性的方法

Fig. 3. Procedure of reducing the interferogram into STCs.

(3) 式中,  $F^{-1}$  表示一维傅里叶逆变换,  $E(t, x_j, y)$  是  $x = x_j$  处激光电场的时空分布, 光强分布  $I(t, x_j, y) = |E(t, x_j, y)|^2$ . 通过以上步骤可得待测光在第  $j$  条狭缝处的时空耦合特性, 对所有狭缝对应的一级亮斑都执行上述操作, 即可获得完整的三维时空耦合特性  $I(t, x, y)$ .

在二维频域图中,  $x_j$  处狭缝对应的正一级亮斑位置与相对延迟之间满足关系:

$$f_\omega(x_j) = \Delta\tau(x_j)/(2\pi). \quad (4)$$

结合 (2) 式和 (4) 式, 相邻狭缝对应的一级亮斑之间的距离为

$$\begin{aligned} d_{f_\omega} &= f_\omega(x_j) - f_\omega(x_{j-1}) = \frac{x_j - x_{j-1}}{\pi c} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ &= \frac{d}{\pi c} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right), \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $d$  表示相邻狭缝间距.

若干涉图中  $\omega$  方向像素数为  $N_\omega$ , 相邻像素间距为  $\Delta\omega$ , 则二维频域图中单个像素宽度  $\Delta f_\omega = \frac{1}{\Delta\omega \cdot N_\omega}$ ,  $f_\omega$  方向的窗口长度  $\Delta f_\omega = \frac{1}{\Delta\omega}$ , 窗口范围为  $-\frac{\Delta f_\omega}{2} + \frac{\Delta f_\omega}{2}$ , 进行频域滤波选择出一级亮斑时, 为避免不同狭缝间产生频谱混叠, 滤波窗口的宽度  $\Delta f_{\omega \text{ filter}}$  与待测光覆盖的狭缝数  $N_x$  之间需满足关系:

$$N_x \cdot \Delta f_{w\text{filter}} \leq \Delta f_\omega / 2, \quad (6)$$

滤波窗口的宽度直接决定了能够测量到的谱相位和谱强度的最高调制频率  $f_{\omega_m} = \Delta f_{w\text{filter}}/2$ , 更高频的谱强度和谱相位调制信号在二维频域图中处于滤波窗口之外, 在选取一级亮斑时被滤除. 因此, 该测量方法  $x$  方向的采样数  $N_x$  和频域分辨能力是相互制约的,  $N_x$  直接与相邻狭缝的间距  $d$  相关, 实际应用中应根据需要综合考虑频域和  $x$  方向的分辨能力, 选取间距合适的狭缝阵列.

当 (6) 式等号条件满足时, 整体分辨能力最佳, 此时二维频域图中一级亮斑均匀分布在整个  $f_\omega$  方向, 满足  $N_x \cdot d f_\omega = \Delta f_\omega / 2$ . 结合 (2), (4), (5) 式, 此时参考光与待测光之间夹角  $\theta$  以及两束光中心位置相对延迟  $\Delta\tau_0$  满足:

$$\theta = 2 \tan^{-1} \frac{\pi c}{2 N_x d \Delta\omega}, \quad (7)$$

$$\Delta\tau_0 = 2\pi \cdot \frac{\Delta f_\omega}{4} = \frac{\pi}{2\Delta\omega}. \quad (8)$$

### 3 模拟结果

为了验证该测量方法的有效性, 对其进行了模拟计算. 首先生成具有理想波前的参考光以及带有谱强度和谱相位畸变的待测光, 参考光为理想的傅里叶变换极限脉冲, 光束类型为 6 阶超高斯型, 1/10 强度处光束口径为 4 mm, 光谱为 6 阶超高斯型, 半高宽为 170 nm, 各频率成分的波前均为平面, 无 STCs 畸变. 待测光与参考光具有相同的光束类型、光束口径和光谱, 同时添加了随空间位置变化的随机谱强度和谱相位畸变; 待测光与参考光之间夹角为  $\theta = 0.157 \text{ rad}$ , 光束中心位置相对延迟  $\Delta\tau_0 =$

1.33 ps. 根据 (1) 式计算参考光和待测光产生的空谱干涉图, 式中  $p_j = 2.24 \times 10^{14} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 如图 4(a) 所示, 干涉图中添加了强度为峰值强度 1% 的随机噪声信号, 来模拟现实环境中的图像噪声. 将干涉图进行二维傅里叶变换到频域, 其 +1 级亮斑如图 5 所示, 图中包含 9 个 +1 级亮斑 (第 1 个和第 9 个亮斑对应待测光边缘位置, 能量较弱, 频域图中不易观察到), 分别对应沿  $x$  方向排列的 9 条狭缝, 9 条狭缝的  $x$  坐标分别为  $[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9] = [-2, -1.5, -1, -0.5, 0, 0.5, 1, 1.5, 2] \text{ mm}$ .

根据原理部分的计算方法, 分别提取 9 条狭缝处的谱强度和谱相位信息, 再通过一维傅里叶逆变换可获得待测光完整的时空耦合特性. 下面以第 2 条狭缝为例说明该处时空耦合特性的计算方法和模拟结果: 首先选取第 2 条狭缝对应的一级亮斑, 如图 4(b) 所示, 蓝色实线为选取一级亮斑所用的滤波器函数; 然后进行图 2 中第 4—6 步, 提取待测光谱强度和谱相位, 结果见图 5, 其中图 5(a) 和图 5(b) 分别为谱强度和谱相位的预设值, 图 5(c) 和图 5(d) 分别为谱强度和谱相位的模拟测量结果, 模拟测量结果与预设值高度一致; 将频域信息通过一维傅里叶逆变换回时域, 得到第 2 条狭缝处待测光的时空耦合特性, 结果如图 6 所示, 图 6(a) 和图 6(b) 分别为时空耦合特性的预设值与测量值, 二者具有极高的相似度.

图 7 所示为待测光时空耦合特性的单次测量模拟结果, 实现了脉冲时域特征在  $x$  方向的离散测量以及  $y$  方向的准连续测量. 图 8 是脉冲峰值功率、脉冲宽度以及脉冲前沿随空间位置变化的情况, 其中图 8(a)—(c) 是脉冲峰值功率、脉冲宽度和脉冲前沿的预设值, 图 8(d)—(f) 是  $x$  方向线性

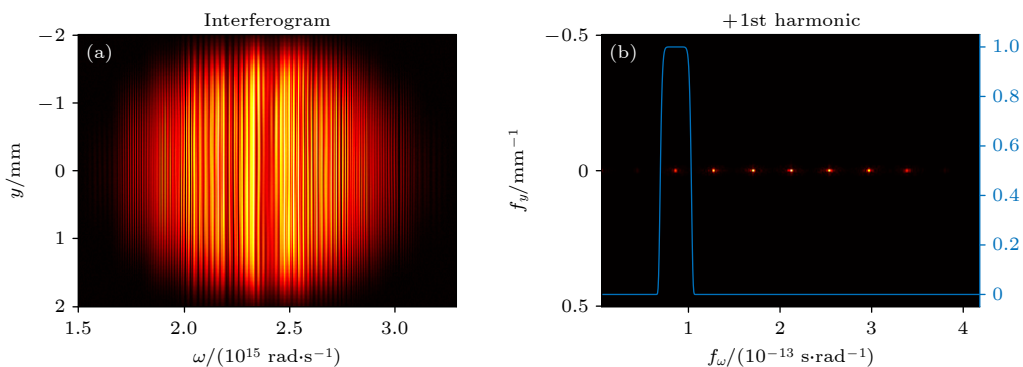


图 4 (a) 空谱干涉图; (b) 频域+1 级亮斑

Fig. 4. (a) Spatial-spectral interferogram; (b) +1st harmonic in the frequency domain.

插值后的脉冲峰值功率、脉冲宽度和脉冲前沿的模拟测量结果, 模拟结果与预设值保持一致.  $x$  方向

虽为离散测量, 经插值后依然可以反映脉冲峰值、脉冲宽度和脉冲前沿随空间位置的低频变化规律.

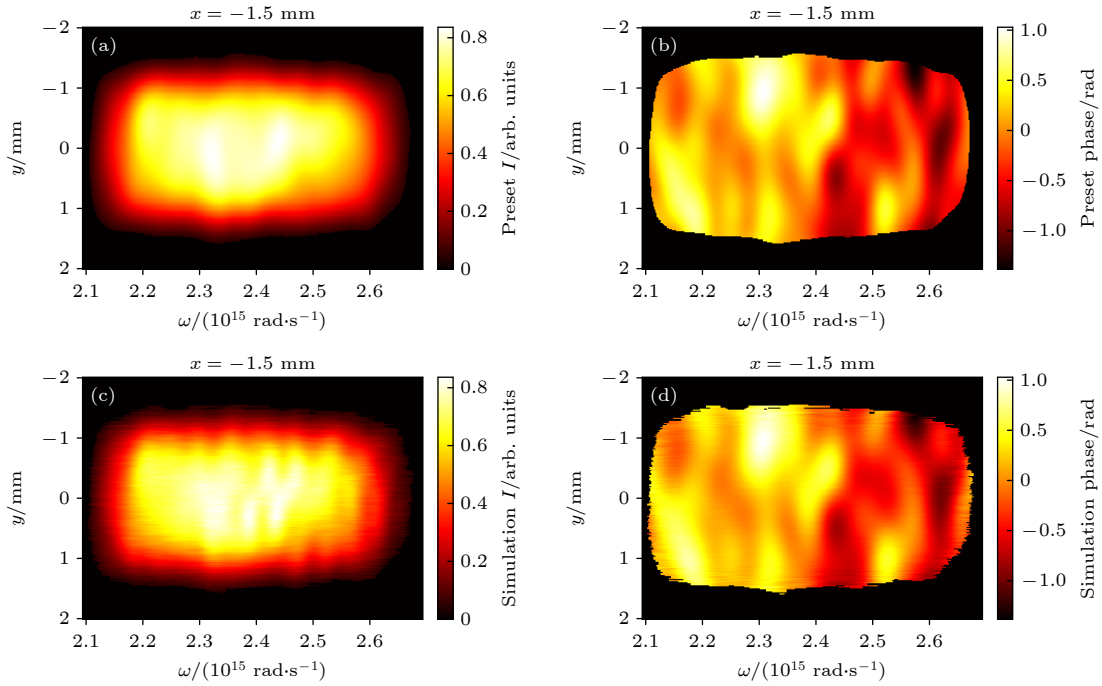


图 5 频域特征 (a) 谱强度预设值; (b) 谱相位预设值; (c) 谱强度模拟测量值; (d) 谱相位模拟测量值

Fig. 5. Frequency-domain characteristics: (a) Preset spectral intensity; (b) preset spectral phase; (c) spectral intensity simulation results; (d) spectral phase simulation results.

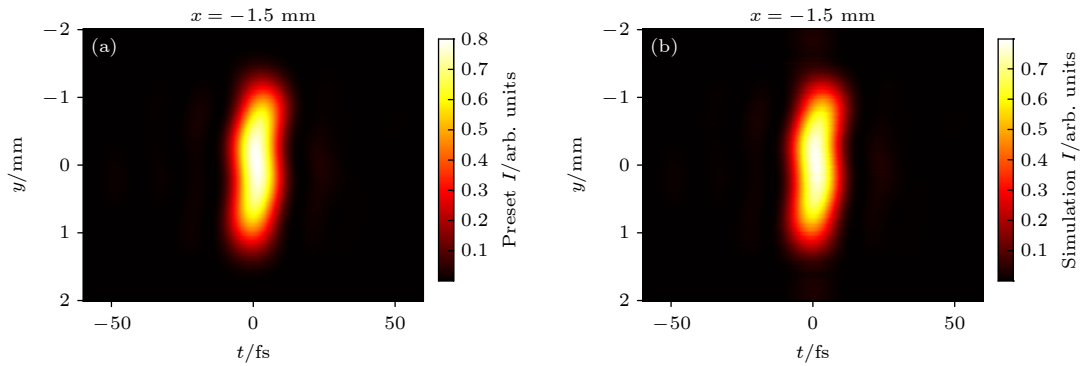


图 6 时空耦合特性 (a) 时空耦合特性预设值 (b) 时空耦合特性模拟测量值

Fig. 6. STCs: (a) Preset value; (b) simulation results.

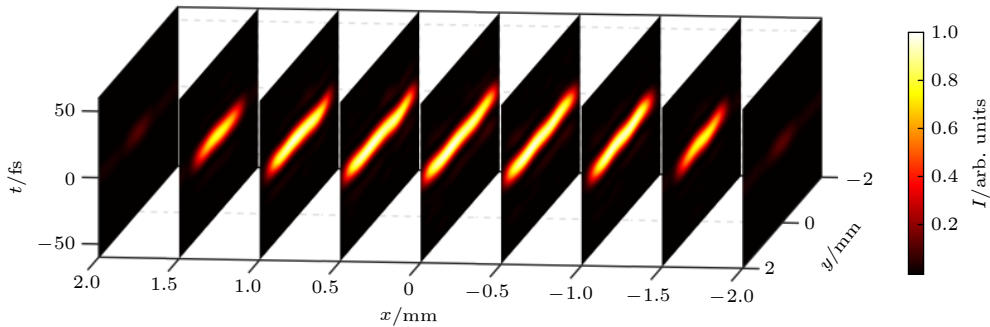


图 7 时空耦合特性单次测量模拟结果

Fig. 7. Simulation results of single-frame measurement of STCs.

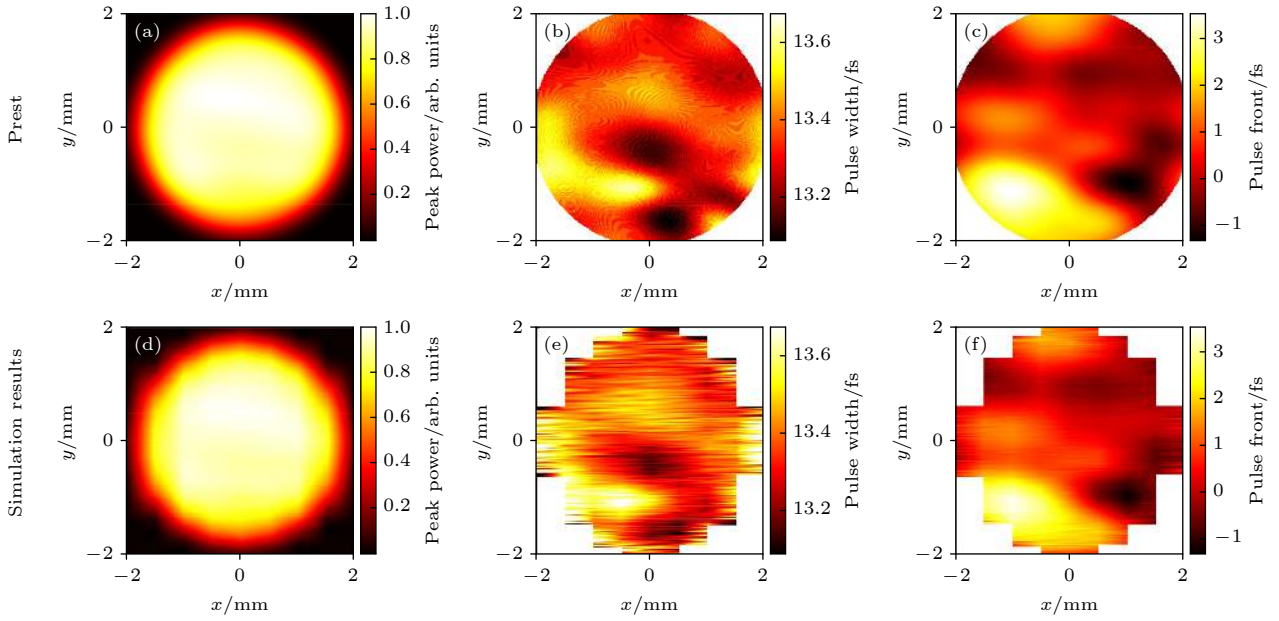


图 8 (a) 脉冲峰值功率预设值; (b) 脉冲宽度预设值; (c) 脉冲前沿预设值; (d) 脉冲峰值功率模拟测量结果; (e) 脉冲宽度模拟测量结果; (f) 脉冲前沿模拟测量结果

Fig. 8. (a) Preset peak power; (b) preset pulse width; (c) preset pulse front; (d) peak power simulation results; (e) pulse width simulation results; (f) pulse front simulation results.

为了说明该测量方法的准确性, 模拟了多次测量过程并计算了谱相位和谱强度识别结果的均方根误差, 单次测量的均方根误差表示为

$$R_I = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \sum_{k=1}^{N_\omega} (I(x_i, y_j, \omega_k) - I_{\text{preset}}(x_i, y_j, \omega_k))^2}{N_x \cdot N_y \cdot N_\omega}}, \quad (9)$$

$$R_\varphi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \sum_{k=1}^{N_\omega} (\varphi(x_i, y_j, \omega_k) - \varphi_{\text{preset}}(x_i, y_j, \omega_k))^2}{N_x \cdot N_y \cdot N_\omega}}, \quad (10)$$

式中  $R_I$  和  $R_\varphi$  表示谱强度和谱相位的均方根误差值,  $N_x$ ,  $N_y$  和  $N_\omega$  分别表示  $x$ ,  $y$  和  $\omega$  方向的采样数;  $I(x_i, y_j, \omega_k)$  和  $I_{\text{preset}}(x_i, y_j, \omega_k)$  以及  $\varphi(x_i, y_j, \omega_k)$  和  $\varphi_{\text{preset}}(x_i, y_j, \omega_k)$  分别表示  $(x_i, y_j, \omega_k)$  处谱强度的模拟测量值和预设值以及谱相位的模拟测量值和预设值.

每次模拟时给待测光引入随机谱强度和谱相位畸变, 经过 50 次模拟, 计算谱强度和谱相位识别结果的均方根误差并求平均值, 最终得到谱相位识别结果的均方根误差为 0.03 rad, 归一化谱强度识别结果的均方根误差为 0.011, 谱强度和谱相位以及时空耦合特性的模拟测量结果均与预设值相符.

## 4 结论

本文提出了一种基于空谱干涉和频域分割的超短脉冲时空耦合特性的单次测量方法, 并对该方法进行了模拟计算. 模拟结果表明该测量方法能够得到谱强度和谱相位的高精度测量结果, 在文中的模拟条件下, 谱相位识别结果的均方根误差为 0.03 rad, 归一化谱强度识别结果的均方根误差为 0.011, 谱强度和谱相位以及时空耦合特性的模拟测量结果均与预设值高度一致. 该测量方法所需器件较少、光路简单, 有望应用于大型超高峰值功率激光装置的时空耦合特性测量, 后续将通过实验进一步验证和改进该测量方法.

## 参考文献

- [1] Bahk S W, Rousseau P, Planchon T A, Chvykov V, Kalintchenko G, Maksimchuk A, Mourou G A, Yanovsky V 2004 *Opt. Lett.* **29** 2837
- [2] Leng Y X 2019 *Chinese J. Lasers* **46** 0100001 (in Chinese) [冷雨欣 2019 *中国激光* **46** 0100001]
- [3] Perry M D, Mourou G A 1994 *Science* **264** 917
- [4] Bourassin-Bouchet C, Stephens M, Rossi S D, Delmotte F, Chavel P 2011 *Opt. Express* **19** 17357
- [5] Li Z Y, Tsubakimoto K, Yoshida H, Nakata Y, Miyanaga N 2017 *Appl. Phys. Express* **10** 102702
- [6] Li Z Y, Miyanaga N 2018 *Opt. Express* **26** 8453

- [7] Pariente G, Gallet V, Borot A, Gobert O, Quéré F 2016 *Nat. Photonics* **10** 547
- [8] Li Z Y, Ogino J, Tokita S, Kawanaka J 2019 *Opt. Express* **27** 13292
- [9] Gabolde P, Trebino R 2008 *Opt. Soc. Am. B* **25** A25
- [10] Dorrer C, Bahk S W 2018 *Opt. Express* **26** 33387
- [11] Meshulach D, Yelin D, Silberberg Y 1997 *Opt. Soc. Am. B* **14** 2095
- [12] Zhao D, Wang X, Mu J, Zuo Y L, Zhou S, Zhou K N, Zeng X M, Li Z L, Su J Q, Zhu Q H 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 024201 (in Chinese) [赵丹, 王道, 母杰, 左言磊, 周松, 周凯南, 曾小明, 李志林, 粟敬钦, 朱启华 2017 *物理学报* **66** 024201]
- [13] Mu J, Wang X, Zuo Y L, Hu B L, Li W, Zeng X M, Zhou K N, Wang X D, Sun L, Wu Z H, Su J Q 2020 *Chinese J. Lasers* **47** 0401003 (in Chinese) [母杰, 王道, 左言磊, 胡必龙, 李伟, 曾小明, 周凯南, 王晓东, 孙立, 吴朝辉, 粟敬钦 2020 *中国激光* **47** 0401003]
- [14] Bowlan P, Gabolde P, Trebino R 2007 *Opt. Express* **15** 10219
- [15] Bahk S W, Dorrer C, Roides R G 2016 *Appl. Opt.* **55** 2413

# Single-frame measurement of complete spatiotemporal field of ultrashort laser pulses using frequency domain separate spectral interferometry\*

Li Wei<sup>1)2)4)</sup> Wang Xiao<sup>2)†</sup> Hong Yi-Lin<sup>3)</sup> Zeng Xiao-Ming<sup>2)</sup> Mu Jie<sup>2)</sup>  
 Hu Bi-Long<sup>2)</sup> Zuo Yan-Lei<sup>2)</sup> Wu Zhao-Hui<sup>2)</sup> Wang Xiao-Dong<sup>2)</sup>  
 Li Zhao-Li<sup>2)</sup> Su Jing-Qin<sup>2)</sup>

1) (*Department of Optics and Optical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

2) (*Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

3) (*National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

4) (*Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China*)

( Received 7 September 2021; revised manuscript received 12 October 2021 )

## Abstract

The spatiotemporal coupling distortion of large aperture ultra-high peak power laser will degrade the pulsed beam in both near-field and far-field. To accurately predict the light field distribution at the focus and compensate for the spatiotemporal coupling distortion, a single-frame measurement of full three-dimensional spatiotemporal coupling distortion is proposed based on the frequency domain separate spatial-spectral interference. The setup requires only a slit array attached to the front of an Imaging spectroradiometer. The whole procedure of carrier frequency distinguished spectral interference measurement is simulated in this study. The simulation results prove that the presented measuring method is correct and effective. The effectiveness of this method will be further verified experimentally in next step.

**Keywords:** spatial spectrum interferometry, spatiotemporal coupling, ultrafast laser

**PACS:** 42.30.Rx, 42.40.Kw

**DOI:** 10.7498/aps.71.20211665

\* Project supported by the Science and Technology on Plasma Physics Laboratory Independent Research Projects of China Academy of Engineering Physics (Grant No. JCKYS2018212024) and the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2018YFA0404804).

† Corresponding author. E-mail: wangxiaocn@263.net