

基于空谱干涉扫描法测量超宽带激光时空耦合特性

李伟 王道 母杰 胡必龙 曾小明 左言磊 吴朝辉 王晓东 李钊历 粟敬钦

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

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

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 234201 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210996

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210996>

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\*

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

1) (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)

2) (中国科学技术大学光学与光学工程系, 合肥 230026)

3) (中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088)

(2021年5月26日收到; 2021年7月6日收到修改稿)

大口径超高峰值功率激光装置中展宽器、压缩器、透镜等光学元件会导致不同空间位置的脉冲波形及延时各有不同, 称为“时空耦合效应”。常规的测量手段仅能反映激光近场的局部时间特性, 本文设计并验证了一种基于空谱干涉线扫描的时空特性测试方案: 采用空谱干涉方法单次测量可获得一个空间维度上的时空耦合特性, 通过沿另一空间维度扫描, 即可获得完整的近场时空耦合特征。利用该方法实验测量了劈板引入的角色散以及近场不同空间位置处的脉冲波形、脉冲前沿、脉冲宽度等信息, 与理论计算结果符合得较好, 说明该方法能够有效地测量超宽带激光的时空耦合特性。

**关键词:** 空谱干涉, 时空耦合特性, 超宽带激光

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

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210996

## 1 引言

超高峰值功率激光是研究激光核物理、实验室天体物理、高温高密度等离子体物理等极端条件下物理规律的重要工具。为了实现超高峰值功率, 在有限的单脉冲能量下脉冲持续时间被压缩到极短, 通常仅有十几到数十飞秒, 远短于光电探测器的响应时间, 需要用一些特殊的测量方法来获取其时域特征。目前常用的成熟测量方法如频率分辨光学快门法 (frequency-resolved optical gating, FROG)<sup>[1,2]</sup>、基于谱相位干涉的直接电场重建法 (spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction, SPIDER)<sup>[3,4]</sup>、自参考光谱干涉测量法 (self-

referenced spectral interferometry, SRSI)<sup>[5,6]</sup>、色散扫描法 (dispersion-scan, D-Scan)<sup>[7,8]</sup>、多光子脉冲内干涉相位扫描法 (multiphoton intrapulse interference phase scan, MIIPS)<sup>[9,10]</sup> 等都认为光束横截面内各空间点具有相同的时域特征, 但事实上超高峰值功率激光在聚焦前口径达数十厘米, 同时整个系统中展宽器、压缩器、透镜、非线性晶体、取样元件及带楔角的窗口等元件会给不同频率成分的波前引入不同的畸变, 最终导致整个光束横截面内不同位置的时域脉冲波形各有不同, 该现象称为“时空耦合效应”<sup>[11–13]</sup>。

精确测量超高峰值功率激光的时空耦合特性具有重要意义, 许多学者开展了相关的研究。2019年, 李朝阳等<sup>[14]</sup>提出了利用杨氏双缝干涉测量双缝间

\* 等离子体物理重点实验室自主科研项目 (批准号: JCKYS2018212024) 资助的课题。

† 通信作者。E-mail: wangxiaocn@263.net

脉冲前沿相对延迟的方法,通过一维扫描可以获得整个光束近场的脉冲前沿分布,但是该方法无法获取光束横截面内各点的脉冲宽度、时域波形等信息;2016年,Pariente等<sup>[15]</sup>提出用迈克耳孙干涉仪时域扫描实现三维电场重建的方法,该方法能够恢复出三维光电场分布,但是需要极高的扫描精度以及复杂的迭代算法;此外还有时空分辨全息测量<sup>[16]</sup>、多光谱哈特曼传感器<sup>[17]</sup>等时空耦合特性单次测量方法,均是牺牲了一定的空间分辨能力来换取光谱分辨能力,但是仅能测量数个波长的谱相位和谱强度,频域分辨能力有限,难以根据频域信息准确得到脉冲的时域信息.虽然目前已经提出了多种测量时空耦合特性的方法,但大都存在一些问题,无法广泛应用.

超高峰值功率激光的时域脉冲宽度极窄,仅有数十飞秒量级,难以直接探测,相比之下频域的信息更容易获得——用空谱干涉法可以将频域信息映射到空间域,并用CCD采集,频谱强度和频谱相位信息都包含在CCD采集到的条纹图中.空谱干涉法最早于1997年由Meshulach等<sup>[18]</sup>提出,首先用柱透镜将参考光与待测光线聚焦,两者入射方向存在微小夹角,再利用光栅将参考光与待测光沿垂直焦线方向色散展开,用CCD采集干涉条纹图,根据条纹图可获取待测光与参考光的谱相位差,并进一步获得激光的时域特性.空谱干涉法被提出后,被广泛用于精确的延时测量、光路调节等方面<sup>[19,20]</sup>.2007年,Bowlan等<sup>[21]</sup>用光纤对光束进行点取样,然后用空谱干涉获取该点的谱强度和谱相位信息,并通过在光束口径内网格化取点扫描,获取激光脉冲的时空耦合特性.

事实上,用空谱干涉法得到的条纹图是一个二维图像,可以包含两个维度的信息,以上方法都只用它反映了频域一个维度的信息,另一维度信息并没有利用.本方案用狭缝对激光近场进行一维空间采样,再用空谱干涉法将其在频域展开,得到的条纹图包含了频域以及一个空间维度的信息,只需要在另一空间维度上扫描即可获得完整的近场时空耦合特性,相比于点扫描空谱干涉,更便捷、效率更高.该方法的重点在于根据条纹图像恢复频域和空域的谱相位信息.

## 2 理论模型

用狭缝对激光近场  $x = x_i$  处采样,该处参考光

与被测光发生干涉,假设参考光与信号光  $y$  方向波前夹角为  $\theta$ ,参考光相对于信号光延时为  $\Delta\tau$ ,则干涉后光强为:

$$I(\omega, y) = I_r(\omega, y) + I_t(\omega, y) + 2\sqrt{I_r(\omega, y) \cdot I_t(\omega, y)} \times \cos\left(\Delta\phi(\omega, y) + \omega \cdot \Delta\tau + \frac{y\omega}{c} \tan\theta\right), \quad (1)$$

式中  $c$  表示光速,  $(\omega, y)$  表示频域和  $y$  方向(狭缝方向)的坐标,  $I_r(\omega, y)$  表示参考光强,  $I_t(\omega, y)$  表示待测光强,  $\Delta\phi(\omega, y)$  表示待测光与参考光的谱相位差.该处假设参考光具有理想平面波前,则  $\Delta\phi(\omega, y)$  表示待测光的波前畸变.通过与参考光的干涉,将待测光谱相位信息转化为了光强分布,用CCD采集干涉区光强分布,即可恢复出  $\varphi(\omega, y)$ .

以上方法每次只能获取狭缝采样区的谱相位信息  $\varphi(\omega, y)$ ,还缺少  $x$  方向的信息.为了获取完整的近场谱相位  $\varphi(\omega, x, y)$ ,需要将狭缝沿着  $x$  方向(垂直于狭缝)移动,对激光近场不同  $x$  位置进行扫描采样,然后将不同  $x$  位置的信息拼接起来形成完整的三维波前信息.拼接时需要考虑不同  $x$  位置的相对延时,提取相对延时的方法为首先提取  $(x_0, y_0)$  处的谱相位  $\varphi_{(x_0, y_0)}(\omega)$ ,将其分解为线性项与非线性项相加的形式:

$$\varphi_{(x_0, y_0)}(\omega) = \varphi_L(x_0, y_0)(\omega) + \varphi_{NL}(x_0, y_0)(\omega), \quad (2)$$

式中  $\varphi_L$  为谱相位的线性项,  $\varphi_{NL}$  为非线性项.其中  $\varphi_L(x_0, y_0)(\omega) = \omega \cdot \Delta\tau_{(x_0, y_0)}$ ,包含了  $(x_0, y_0)$  处待测光相对于参考光的延迟;  $\varphi_{NL}(x_0, y_0)(\omega) = \Delta\varphi(\omega, x_0, y_0)$ ,决定  $(x_0, y_0)$  处待测光的时域脉冲波形.同理  $(x_1, y_0)$  处的谱相位曲线为

$$\begin{aligned} \varphi_{(x_1, y_0)}(\omega) &= \varphi_L(x_1, y_0)(\omega) + \varphi_{NL}(x_1, y_0)(\omega) \\ &= \omega \cdot \Delta\tau_{(x_1, y_0)} + \Delta\varphi(\omega, x_1, y_0). \end{aligned} \quad (3)$$

谱相位的线性项中包含了群延迟  $\Delta\tau$ ,待测光完整的近场谱相位信息为

$$\varphi(\omega, x_i, y) = \omega \cdot \Delta\tau_{(x_i, y_0)} + \Delta\varphi(\omega, x_i, y). \quad (4)$$

至此得到了待测光近场任一空间点的频谱信息,对该点频谱信息做傅里叶逆变换,可以获得该点的时域信息:

$$E(t, x_i, y_j) = \mathcal{F}^{-1}\{E(\omega, x_i, y_j)\}, \quad (5)$$

式中

$$E(\omega, x_i, y_j) = \sqrt{I(\omega, x_i, y_j)} \cdot \exp[i(\omega t + \varphi(\omega, x_i, y_j))],$$

$\mathcal{F}^{-1}$ 表示傅里叶逆变换,  $E(t, x_i, y_j)$ 表示激光的时域电场复振幅.

### 3 实验方法及结果分析

#### 3.1 实验装置

为了验证空谱干涉扫描获取超短脉冲近场时空特性的有效性,搭建了测试平台,光路图如图1所示.

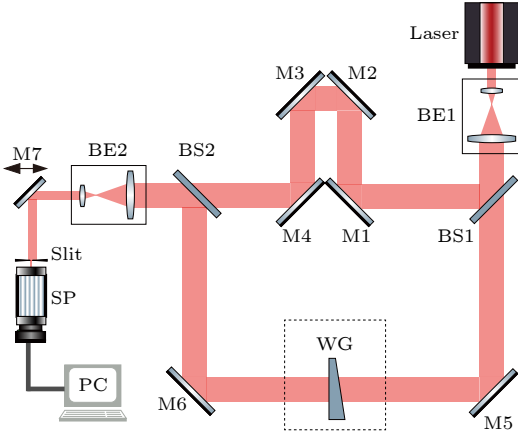


图1 实验平台光路示意图  
Fig. 1. Schematic of the experimental light path.

图1中 Laser 是激光器, M1—M7 为平面反射镜, BE1 和 BE2 为扩束和缩束透镜组, BS1 和 BS2 为分光镜, Slit 是狭缝, SP 为成像光谱仪, PC 是计算机, WG 是楔形玻璃. 激光首先被 BE1 扩束至 1.5 cm, 经 BS1 分成参考光和待测光, 待测光经 M5 和 M6 反射后到达 BS2 处, 在待测光路中插入楔形玻璃可引入时空耦合; 参考光经过 M1—M4 构成的延时调节器到达 BS2 处与待测光汇合, 经 BE2 缩束、M7 反射后使用狭缝 slit 采样, 最终输入成像光谱仪 SP; 平面镜 M7 可以沿垂直于狭缝 slit 的方向移动, 以使用狭缝对光束口径内不同位置进行采样. 成像光谱仪采集到的空谱干涉条纹图经计算机处理, 恢复激光近场谱强度和谱相位信息.

#### 3.2 实验方法

在空谱干涉实验光路部分, 调节光路使参考光与待测光传输方向一致、光斑重合, 此时参考光与待测光夹角  $\theta = 0$ , 干涉条纹平行于狭缝方向, 如图2所示. 通过调节参考光和待测光的相对延迟可将干涉条纹间距调节到合适的大小, 方便后续数据处理.

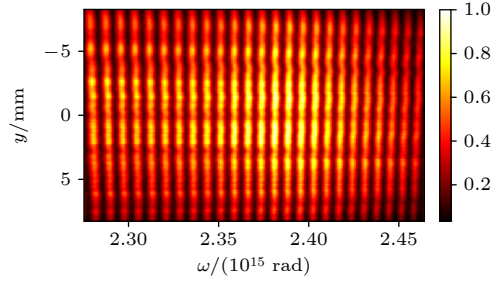


图2 干涉条纹图  
Fig. 2. Interference fringes.

获取激光近场时空耦合特性需要知道近场各空间点的谱强度和谱相位信息, 空谱干涉扫描得到的数据是一系列的干涉条纹图, 从干涉条纹图中提取近场谱强度和谱相位的过程如下.

- 1) 成像光谱仪标定, 确定像素坐标与波长的对应关系;
- 2) 对图像重新抽样, 使像素点在角频率域等间隔分布, 方便后续图像处理;
- 3) 条纹图二值化, 将原灰度图像变换到频率域 (如图3(a)) 进行带通滤波 (如图3(b)), 去掉高频噪声, 同时去掉直流成分, 使图像亮条纹处像素值大于 0, 暗条纹处像素值小于 0 (如图3(c)), 将图像与 0 比较可将图像二值化 (如图3(d));
- 4) 条纹中心提取, 对二值化图像进行开运算与闭运算, 去掉图像的噪点、孔洞、断裂等, 再将图像细化, 得到条纹骨架, 即亮条纹中心位置 (如图3(e));
- 5) 条纹级次标记, 先进行连通域识别, 区分单条条纹并分别进行标记, 再根据条纹位置依次重新标记条纹的级次 (如图3(f));
- 6) 计算图像中任一像素点的谱相位, 条纹级次乘以  $2\pi$  得到亮条纹中心处的谱相位, 再进行离散数据点插值, 得到所有  $(y, \omega)$  位置的谱相位 (如图3(g));
- 7) 不同扫描位置结果拼接, 获取完整的近场谱相位信息; 提取单幅谱相位图  $y = 0$  处相位变化的线性项, 其中包含了该幅图像  $y = 0$  处待测光与参考光的相对延迟, 根据其可计算出各扫描位置之间的相对延迟, 根据各扫描位置的相对延迟与相位的非线性项, 可以获得整个光束的近场谱相位.

提取谱强度信息时, 遮挡参考光, 使干涉条纹消失, 通过  $x$  方向扫描狭缝可以获得近场光束横截面内任意空间点的谱强度; 也可以预先标定参考光谱强度, 根据干涉条纹图即可恢复待测光谱强度信息, 不需要重复扫描.

得到近场光束横截面内各个空间点的谱强度和谱相位信息后, 便可通过对各个空间点进行频域到时域的傅里叶逆变换, 从而获得近场时空特性.

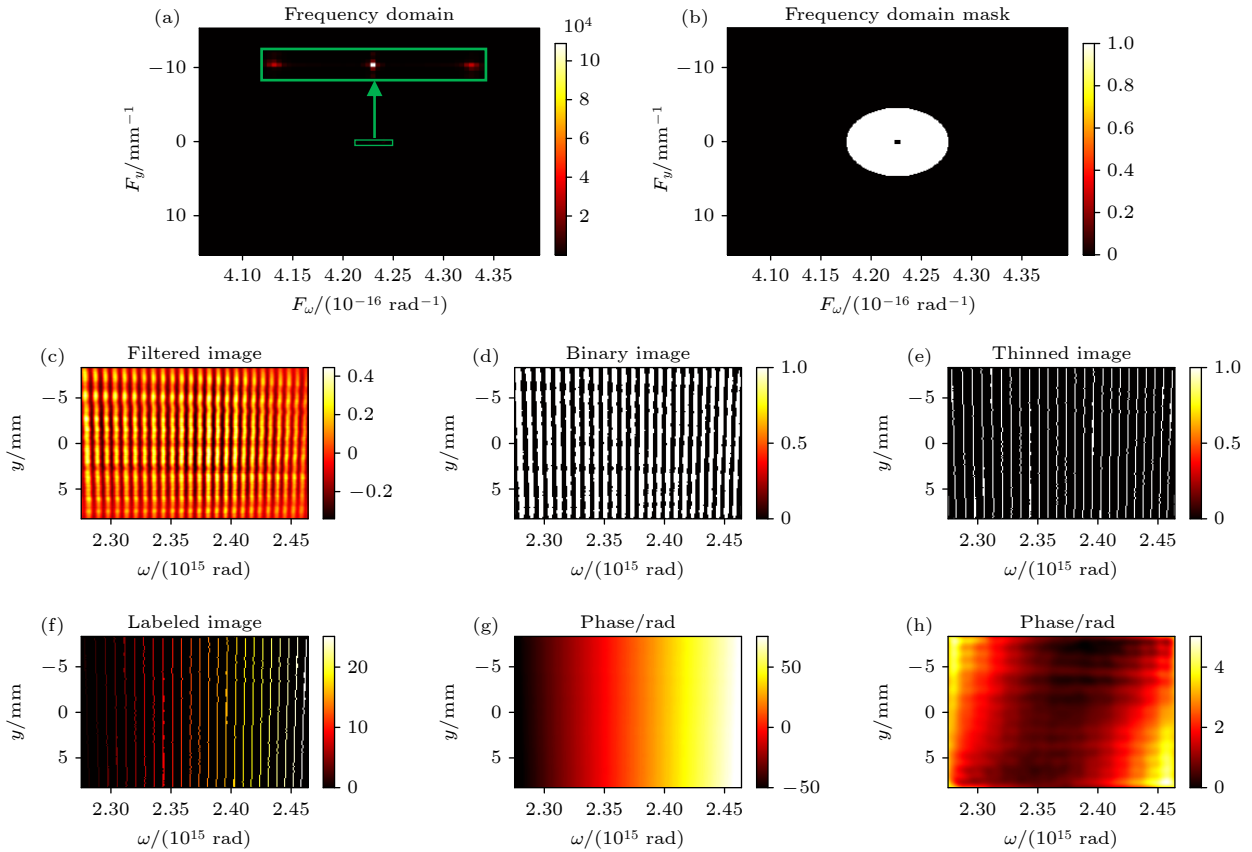


图3 谱相位提取过程 (a) 干涉条纹频域图像; (b) 频域带通滤波器; (c) 频域滤波后干涉条纹图; (d) 二值化干涉条纹图; (e) 细化图像, 提取干涉条纹中心; (f) 干涉条纹级次标记; (g) 谱相位图; (h) 去除线性项后的谱相位图

Fig. 3. Spectral phase recovery process: (a) Frequency domain image; (b) frequency domain bandpass filter; (c) filtered image; (d) binary image; (e) thinning image and identify the center of the stripe; (f) labeled the order of stripes; (g) spectral phase; (h) spectral phase (remove the linear terms).

图3(a)为条纹图的频域图像, 其中中心的亮斑是条纹图的直流成分; 图3(b)是频域滤波器, 白色部分值为1, 黑色部分值为0, 构成一个带通滤波器, 过滤掉0频率附近的直流成分以及一些高频噪声, 只保留条纹的主要信息; 图3(c)是滤波后的条纹图, 由于在频域中过滤掉了其直流分量, 所以亮条纹部分的值大于0, 暗条纹部分的值小于0, 将像素值与0比较即可获得它的二值化图像(图3(d)). 图3(e)是图3(d)经过细化处理后得到的亮条纹中心, 图3(f)是对亮条纹中心进行级次标记的结果, 图中不同颜色表示不同条纹级次; 图3(g)是经过插值拟合后初步得到的相位图, 其中包含了谱相位的线性项(一阶色散), 它仅表示参考光与信号光的相对延迟; 图3(h)是图3(g)去掉谱相位线性项后的结果; 取图3(h)中某一行, 即代表该行所在 $y$ 坐标、狭缝所在 $x$ 坐标位置处的谱相位曲线, 根据该点的谱强度和谱相位就能计算出其时域特征.

### 3.3 实验结果

为了验证以上方法的测量精度, 在近场待测光路中插入参数已知的劈板引入时空耦合畸变, 对比模拟计算结果和实际测量结果. 由于材料的色散特性, 不同波长的光在材料中折射率不同, 宽带光经过劈板后, 不同波长成分折射角不同, 使激光产生角色散. 根据劈板的参数, 模拟计算得到其引入的角色散, 与根据空谱干涉测量得到的角色散对比如图4所示.

1号劈板(记为WG1)楔角为 $2.4^\circ$ , 材料为K9玻璃, 中心厚度7.5 mm, 引入的角色散如图4(a)所示; 2号劈板(记为WG2)楔角为 $0.5^\circ$ , 材料为K9玻璃, 中心厚度3.2 mm, 引入的角色散如图4(b)所示. 1号劈板引起的角色散测量值与理论计算值最大误差为 $4.2 \mu\text{rad}$ , 2号劈板测量值与理论计算值最大误差为 $2.0 \mu\text{rad}$ , 测量结果与理论计算值符合得较好.

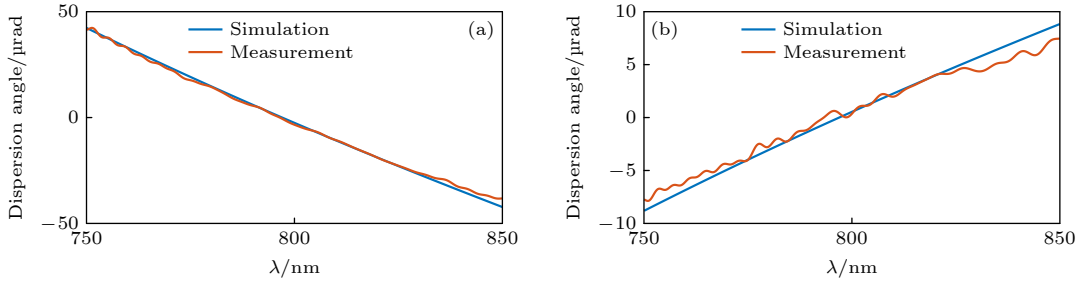


图 4 劈板引入角色散图 (a) 1号劈板引入角色散; (b) 2号劈板引入角色散

Fig. 4. Angular dispersion caused by wedged glass: (a) Angular dispersion caused by wedged glass No.1; (b) angular dispersion caused by wedged glass No.2.

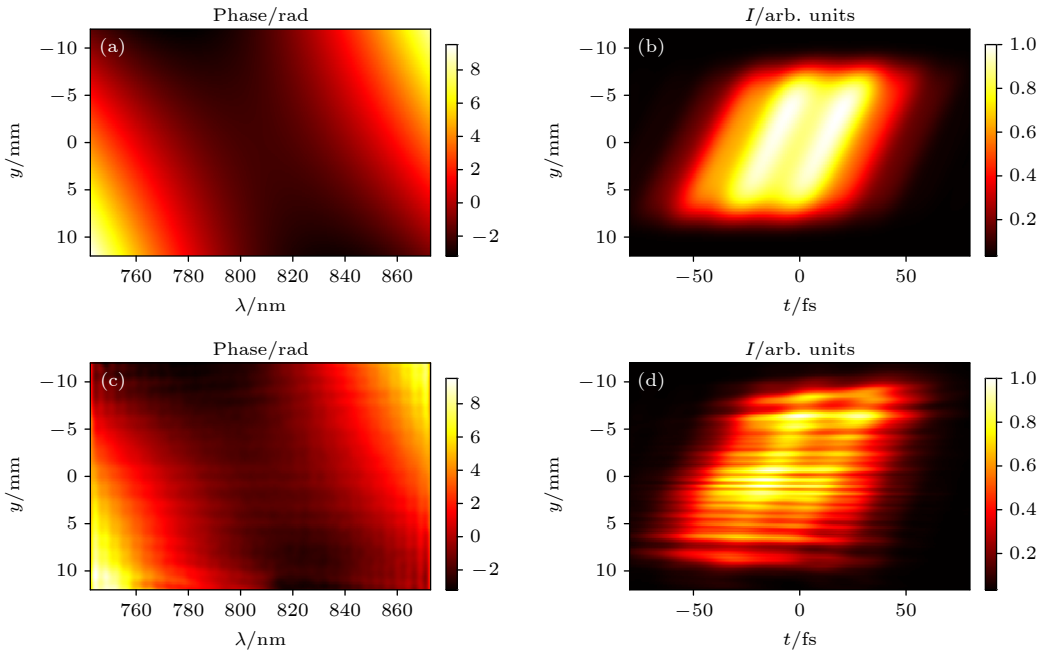


图 5 加入 1号劈板单次采样 (a) 谱相位信息模拟计算结果; (b) 时空耦合特性模拟计算结果; (c) 谱相位信息测量结果; (d) 时空耦合特性测量结果

Fig. 5. Single sampling results (insert WG1): (a) Spectral phase simulation results; (b) spatiotemporal coupling characteristics simulation results; (c) spectral phase measurement results; (d) spatiotemporal coupling characteristics measurement results.

图 5 是在待测光路中加入 1 号劈板, 并根据单次采集结果恢复的谱相位测量结果和时空特性, 由于是单次采集, 所以只包含了一个空间维度的测量结果. 图 5(a) 是根据 1 号劈板参数模拟计算得到的谱相位, 对某一特定波长, 谱相位随  $y$  坐标是线性变化的, 且随着波长改变, 谱相位随  $y$  坐标变化的斜率也发生变化, 这说明劈板引入了角色散, 使各波长的波前方向不同; 对频域信息做傅里叶逆变换, 可以得到时域信息, 如图 5(b) 所示. 可以看出, 脉冲包络出现时间随  $y$  坐标变化, 说明劈板引起了近场的脉冲前沿倾斜. 图 5(c) 和图 5(d) 分别是谱相位和时空特性的实际测量结果, 分别与图 5(a) 和图 5(b) 对应, 测量结果与模拟计算结果高度一致,

说明该测量方法可以有效反映待测光的时空特性.

图 6 是整个光斑近场时空特性的模拟和实际测量结果. 图 6(a), 图 6(b) 和图 6(c) 分别是光强随空间分布、脉冲前沿随空间分布和脉冲宽度随空间分布的模拟结果; 图 6(d), 图 6(e) 和图 6(f) 分别是光强随空间分布、脉冲前沿随空间分布和脉冲宽度随空间分布的实际测量结果. 测量结果是通过沿  $x$  方向移动狭缝, 对不同  $x$  位置进行扫描, 并将各  $x$  位置的测量结果进行拼接得到的. 实际测量得到的脉冲前沿和脉冲宽度随空间位置的变化规律与模拟结果符合得较好. 从实验测量结果看, 脉冲前沿的测试值与模拟结果在数值上符合得更好, 但脉冲宽度的测试值与模拟结果差异相对较大, 这是

因为超宽带激光的脉冲宽度对谱相位和谱强度的变化非常敏感, 谱相位提取误差、谱强度空间分布不均匀 (模拟计算中假定谱强度的空间分布是均匀的)、实验中空气扰动及光学元件面型畸变 (模拟计

算中未考虑) 等因素共同叠加, 最终导致了脉冲宽度的测量值与模拟结果差别较大。

图 7 和图 8 是在光路中加入 2 号劈板的模拟和测量结果, 由于 2 号劈板相比于 1 号劈板楔角更

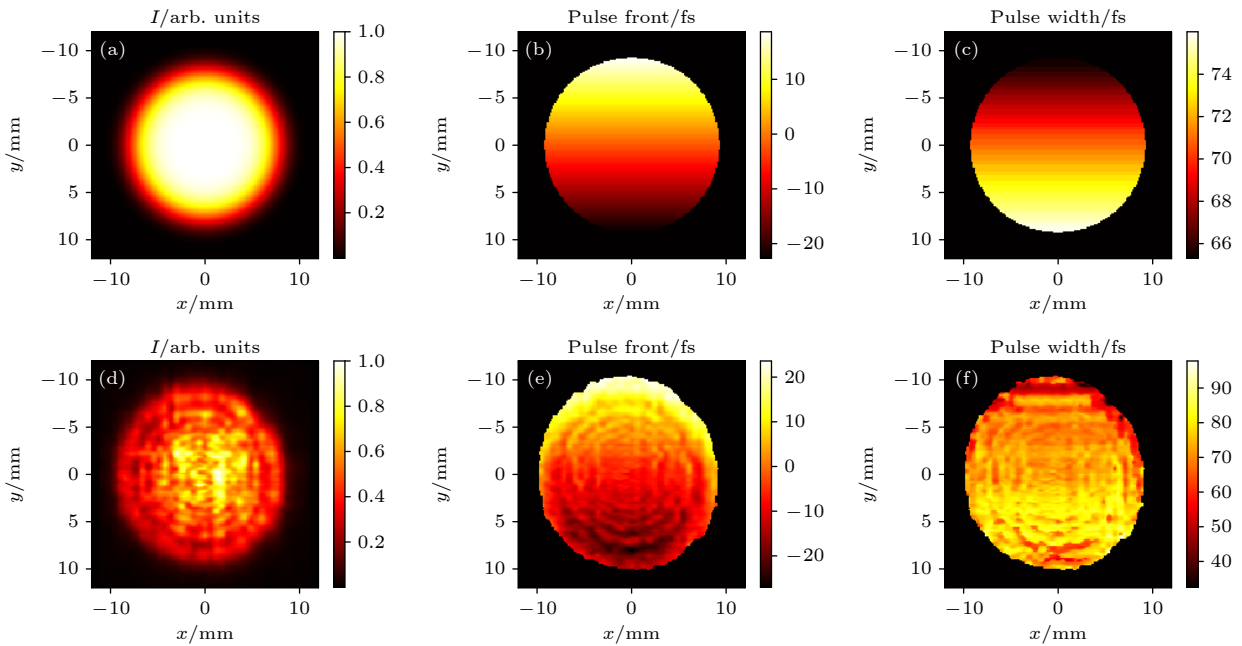


图 6 加入 1 号劈板近场时空特性 (a) 近场光斑模拟结果; (b) 近场脉冲前沿模拟结果; (c) 近场脉冲宽度模拟结果; (d) 近场光斑测量结果; (e) 近场脉冲前沿测量结果; (f) 近场脉冲宽度测量结果

Fig. 6. Near-field spatiotemporal characteristics (insert WG1): (a) Near field intensity simulation results; (b) near field pulse front simulation results; (c) near field pulse width simulation results; (d) near field intensity measurement results; (e) near field pulse front measurement results; (f) near field pulse width measurement results.

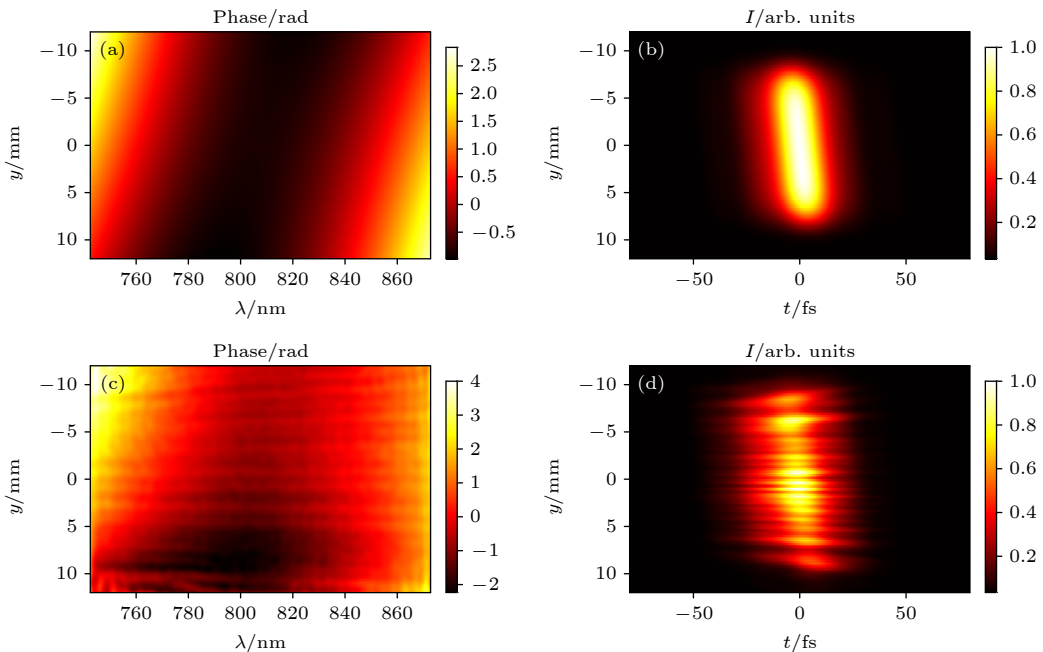


图 7 加入 2 号劈板单次采样 (a) 谱相位信息模拟计算结果; (b) 时空耦合特性模拟计算结果; (c) 谱相位信息测量结果; (d) 时空耦合特性测量结果

Fig. 7. Single sampling results (insert WG2): (a) Spectral phase simulation results; (b) spatiotemporal coupling characteristics simulation results; (c) spectral phase measurement results; (d) spatiotemporal coupling characteristics measurement results.

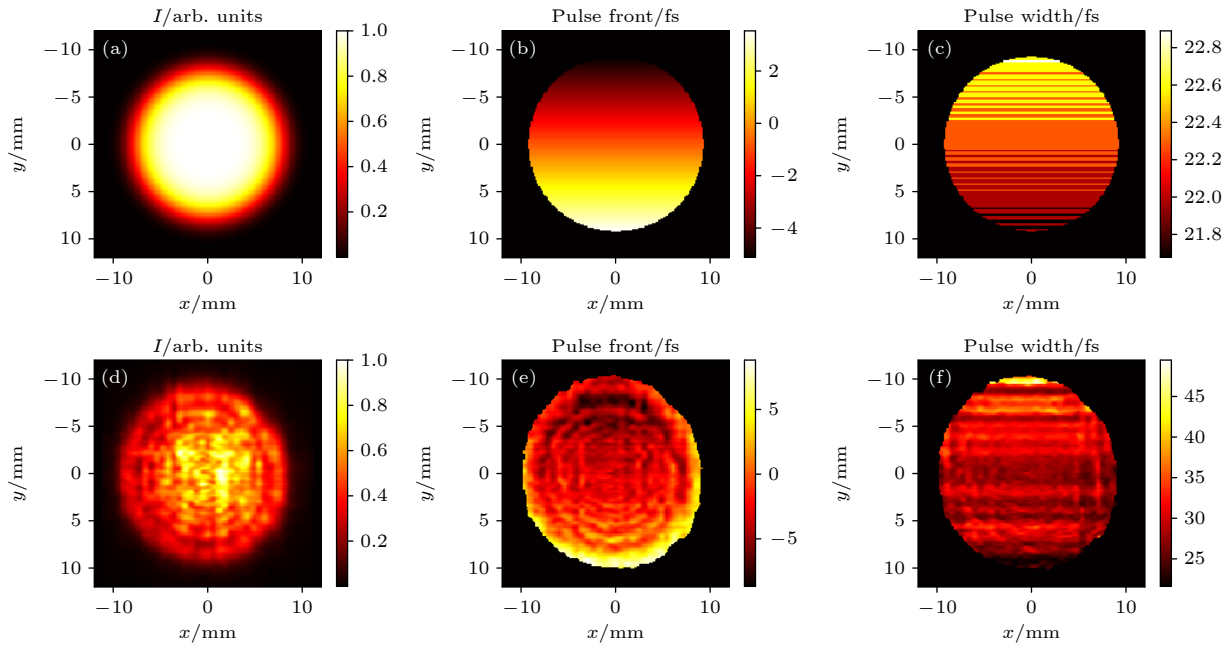


图 8 加入 2 号劈板近场时空特性 (a) 近场光斑模拟结果; (b) 近场脉冲前沿模拟结果; (c) 近场脉冲宽度模拟结果; (d) 近场光斑测量结果; (e) 近场脉冲前沿测量结果; (f) 近场脉冲宽度测量结果

Fig. 8. Near-field spatiotemporal characteristics (insert WG1): (a) Near field intensity simulation results; (b) near field pulse front simulation results; (c) near field pulse width simulation results; (d) near field intensity measurement results; (e) near field pulse front measurement results; (f) near field pulse width measurement results.

小, 厚度更薄, 所以对测量精度有更高的要求. 对比图 7 和图 8 中的模拟和测量结果可以看到, 测量结果可以正确反映脉冲前沿、脉冲宽度随空间位置变化的规律, 但是在数值上与模拟计算结果存在一定差距, 需要进一步优化实验装置和计算方法来达到更高的精度.

### 3.4 不足及改进措施

目前的实验和计算方法还有一些不足之处有待改进, 在计算方法方面, 谱相位的计算是先提取条纹中心位置, 再插值拟合获取各波长、各空间点的谱相位, 相当于只利用了亮条纹中心的数据点, 对于调制周期小于亮条纹间隔的谱相位变化无法识别, 后续需进一步优化算法, 直接利用干涉条纹图的灰度信息来恢复谱相位, 有利于提高识别精度.

在实验方面, 观察图 6(d) 和图 8(d) 可以发现, 光斑存在衍射环, 这种衍射效应在图 5(d) 和图 7(d) 中也有体现, 表现为光强在  $y$  方向上有明显调制, 这些衍射环会对条纹图造成影响, 引起谱相位识别误差, 后续计划利用软边光阑及像传递等方式降低自由传输引起的衍射调制的影响.

前述的实验中需要多次扫描才能获得完整的

近场时空特性, 不便于在大型单发次的超高峰值功率激光装置使用, 下一步考虑用多组并行的一维空间分辨空谱干涉系统同时对近场  $x$  方向和  $y$  方向进行阵列化测量, 以便通过单次测量获取激光束完整的时空特性.

## 4 结论

本文提出并验证了一种基于空谱干涉法测量激光近场时空耦合畸变的方法, 通过单次测量可获得一个空间维度的时空耦合信息, 沿另一维度扫描, 即可获得完整的近场时空耦合特性. 实验测量了劈板引入的时空耦合特性, 与理论计算符合得较好, 说明该方法可以有效地测量超宽带激光的时空耦合特征, 可以用于激光装置的调试、运行、畸变测量及补偿. 后续考虑进一步改进实验装置, 优化算法, 利用条纹图的灰度信息以达到更高的测量精度. 如果采用多组并行的阵列化测量, 有望在大型超高峰值功率激光装置中通过单次测量获得较全面的时空耦合特性.

### 参考文献

- [1] Trebino R, Kane D J 1993 *Opt. Soc. Am. A* **10** 1101

- [2] Li Y Y, Chen Y, Li W K, Wang P F, Shao B J, Peng Y J, Leng Y X 2019 *Opt. Laser Technol.* **120** 105671
- [3] Iaconis C, Walmsley I A 1998 *Opt. Lett.* **23** 792
- [4] Radunsky A S, Walmsley I A, Gorza S P, Wasylezyk P 2007 *Opt. Lett.* **32** 181
- [5] Oksenhendler T, Coudreau S, Forget N, Grabielle S, Kaplan D, Gobret O 2010 *Appl. Phys. B* **99** 7
- [6] Trisorio A, Grabielle S, Divall M, Forget N, Hauri C P 2012 *Opt. Lett.* **37** 2892
- [7] Miranda M, Fordell T, Arnold C, Huillier A L, Crespo H 2012 *Opt. Express* **20** 688
- [8] Lorient V, Gitzinger G, Forget N 2013 *Opt. Express* **21** 24879
- [9] Walowicz K A, Pastirk I, Lozovoy V V, Dantus M 2002 *J. Phys. Chem. A* **106** 9369
- [10] Zhao G K, Liu J, Li R X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 164207 (in Chinese) [赵冠凯, 刘军, 李儒新 2014 *物理学报* **63** 164207]
- [11] Zuo Y L, Zeng X M, Huang X J, Zhao L, Wang X, Zhou K N, Zhang Y, Huang Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8264 (in Chinese) [左言磊, 曾小明, 黄小军, 赵磊, 王道, 周凯南, 张颖, 黄征 2009 *物理学报* **58** 8264]
- [12] Jolly S W, Gobert O, Quéré F 2020 *J. Opt.* **22** 103501
- [13] Dorrer C 2019 *IEEE J. Quantum. Electron.* **25** 3100216
- [14] Li Z Y, Ogino J, Tokita S, Kawanaka J 2019 *Opt. Express* **27** 13292
- [15] Pariente G, Gallet V, Borot A, Gobert O, Quéré F 2016 *Nat. Photonics* **10** 547
- [16] Gabolde P, Trebino R 2008 *Opt. Soc. Am. B* **25** A25
- [17] Dorrer C, Bahk S W 2018 *Opt. Express* **26** 33387
- [18] Meshulach D, Yelin D, Silberberg Y 1997 *Opt. Soc. Am. B* **14** 2095
- [19] 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]
- [20] 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 *Chin. 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]
- [21] Bowlan P, Gabolde P, Trebino R 2007 *Opt. Express* **15** 10219

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

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

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

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

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

( Received 26 May 2021; revised manuscript received 6 July 2021 )

### Abstract

Optical elements such as stretcher, compressor and thick lenses will lead to spatially-dependent temporal properties of a large aperture laser pulse, which is called spatiotemporal coupling (STC). Beyond pure temporal characterization measurement, a measure of spatiotemporal coupling distortion based on spatial-spectral interference is proposed in this study. Full one-dimensional spatiotemporal coupling characteristics can be obtained in a single-shot measurement, and the complete spatiotemporal coupling characteristics in the near field can be obtained by scanning along another spatial dimension. The spatiotemporal coupling characteristics introduced by the wedge glasses are measured, and the experimental results accord well with the theoretical results.

**Keywords:** spatial spectrum interferometry, spatiotemporal coupling, ultra broadband laser

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

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210996

\* Project supported by the Science and Technology Research Project on Plasma Physics Laboratory Independent, China (Grant No. JCKYS2018212024).

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