

# 大口径超短脉冲聚焦系统波前误差对时间信噪比的影响

朱 坪<sup>1,2</sup> 谢兴龙<sup>1\*</sup> 焦兆阳<sup>1,2</sup> 朱健强<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 理解大口径光学系统离轴抛物面镜聚焦后超短脉冲时间信噪比(SNR)在焦斑处空间分布的特性有助于更准确地认识超快激光物理实验中的脉冲时空特性。利用空间上菲涅耳近似下的分两步聚焦的坐标变换快速傅里叶变换(FFT)算法,结合时间域的傅里叶积分变换方法,引入了光学系统波前误差,对聚焦过程进行时空仿真。解释了大口径光学系统波前误差造成时间信噪比退化的原因,计算分析随机波前误差参数(误差大小、空间尺度)对聚焦时间信噪比的影响,并针对不同频段的光学系统波前误差控制提出要求。明确大口径光学系统中随机波前误差与时间信噪比之间的关系,为大口径超短脉冲系统的设计指标分配与波前误差控制提供了理论基础。

**关键词** 超快光学;时间信噪比;波前误差;傅里叶变换;坐标变换

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1032001

## Influence of Wave-Front Error on Temporal Signal-to-Noise Ratio in Large Aperture Ultrashort Pulse Focusing System

Zhu Ping<sup>1,2</sup> Xie Xinglong<sup>1</sup> Jiao Zhaoyang<sup>1,2</sup> Zhu Jianqiang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Understanding of the spatial distribution of ultrashort pulse temporal signal-to-noise ratio (SNR) characteristics at the focal spot in large aperture off-axis parabolic mirror focusing optical system is helpful for more accurate understanding of ultrafast laser pulse temporal and spatial characteristics in the ultrafast laser physics experiments. With wave-front error of optical system under consideration, the two-step focusing fast Fourier transform (FFT) algorithm with the coordinate transform based on Fresnel approximation in space domain and Fourier integral transform method in time domain are used to simulate the focusing process spatially and temporally. SNR degradation by wave-front error in large aperture optical system is explained, SNR ratio characteristics influenced by the parameters of the random wave-front error such as error magnitude and space scale are calculated and analyzed, and control requirements for different spectra of optical wave-front error of optical system are put forward. Explicating the relationship between SNR and random wave-front error in large diameter optical system is theoretical basis of designing large aperture ultrashort pulse system and wave-front error control.

**Key words** ultrafast optics; temporal signal-to-noise ratio; wave-front error; Fourier transform; coordinate transform

**OCIS codes** 320.7120;260.1960;120.4820

收稿日期: 2014-05-29; 收到修改稿日期: 2014-06-10

基金项目: 国家 863 计划(2013AA8044010)

作者简介: 朱 坪(1990—),男,博士研究生,主要从事超短脉冲光学系统设计、波前质量控制等方面的研究。

E-mail: zhp1990@siom.ac.cn

导师简介: 朱健强(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光驱动器的总体光学设计结构设计相关检测技术和测控技术等方面的研究。E-mail: jqzhu@mail.shenc.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: xiexl329@mail.shenc.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticjournal.net

# 1 引 言

现今高功率超短脉冲激光越来越多地应用于惯性约束核聚变“快点火”、强场物理、激光等离子体等领域。Chambaret 等<sup>[1]</sup>做出了 25PW、 $10^{25}$  W/cm<sup>2</sup> 的设计,如此高功率与高聚焦功率密度对光脉冲时间信噪比(SNR)有着极高要求。已有研究工作分析了不同因素对时间信噪比的影响,如增益饱和<sup>[2]</sup>、光谱剪切<sup>[3]</sup>、自相位调制<sup>[4]</sup>等,也设计出了多种提升时间信噪比的方案,如双啁啾脉冲放大(CPA)时域滤波<sup>[5-6]</sup>、交叉极化波(XPW)<sup>[7]</sup>、自衍射<sup>[8]</sup>、等离子镜<sup>[9]</sup>等。将时间信噪比作为单一数值的时间参数分析时,光脉冲近似为一束细光束,忽略了时间特性在空间上的分布。然而高能量的激光驱动装置通常通过扩大光束口径来降低能量(功率)密度以解决元件破坏阈值受限的问题,大口径(直径百毫米以上)光学系统的波前误差是一个很难控制的随机量,波前误差对光束空间特性的影响已有成熟的分析手段<sup>[10]</sup>,波前误差对光束的时间特性中脉宽的影响也在文献<sup>[11]</sup>中被讨论。由于波前误差的空间分布,时间信噪比在空间上存在分布,对这个特性的认识将有助于短脉冲与物质相互作用物理实验中细节的把握,为超快激光物理实验的分析模型修正给出依据。

本文主要研究超短脉冲(10 fs)在 500 fs 时间窗口的时间信噪比问题,采用分两步坐标变换快速傅里叶变换(FFT)方法的傅里叶积分变换方法,对聚焦过程进行时空仿真,从而使得分析超短脉冲时间特性在焦斑空间尺度上的分布成为可能,对时间信噪比的空间分布进行评价,利用该算法分析大口径光学系统波前误差参数对脉冲时间信噪比在空间上分布特性的影响,并对光学系统的波前误差控制提出要求。

## 2 存在波前误差情况聚焦的时间信噪比

根据美国利弗莫尔实验室的研究<sup>[12-13]</sup>,可以将光学元件产生的波前误差分为低频(大于 33 mm)、中频(0.12~33 mm)、高频(小于 0.12 mm)3 个频段,评价参数有相位均方根梯度(GRMS)、峰谷值(PV)。为了模拟波前误差,对文献<sup>[14]</sup>中的相位模型加以改进,随机波前误差可以表示为

$$\phi(x, y) = \sum C_i R_i(-1, 1) * \exp\left\{-\left[\left(\frac{x}{s_{ix}}\right)^2 + \left(\frac{y}{s_{iy}}\right)^2\right]\right\},$$

式中  $C_i$  为误差的大小,  $R_i(-1, 1)$  为  $(-1, 1)$  区间分布的随机函数, \* 表示卷积运算,  $s_{ix}$  和  $s_{iy}$  分别为  $x$  和  $y$  方向上不同的空间尺度, 决定误差起伏周期。总的波前误差即为各空间尺度误差的总和。

大口径超短脉冲系统离轴抛物面镜聚焦传输过程是一个反射聚焦过程,因此无非线性增长、无 B 积分增加,可以近似为超短脉冲在线性介质中的传输,其次大口径离轴抛物面镜作为理想聚焦元件,无单色像差,无穷远与焦点为一对共轭点,同时无色差,无色散与脉宽展宽效应,因此在理想情况下可以近似为一个理想透镜。杨美霞等<sup>[15]</sup>提出分两步短焦距聚焦方法,利用坐标变换的优势,避免了空间缩放与衍射极限之间的矛盾。采用分两步坐标变换 FFT 方法的傅里叶积分变换方法(图 1)模拟利用口径为 320 mm, 焦距为 800 mm 的大口径小  $F$  数的离轴抛物面镜对中心波长为 808 nm, 脉宽为 10 fs, 时间与空间上形状都为高斯型的超短脉冲进行聚焦。计算机空间一维(1D)采样率为 2048, 空间计算窗口为  $-160 \sim 160$  mm, 时间采样率为 2048, 时间计算窗口  $-1000 \sim 1000$  fs, 模拟得到 1D 随机波前误差, 如图 2(a) 所示, GRMS 值为  $0.78\lambda/\text{cm}$  ( $633.2 \text{ nm}/\text{cm}$ ), PV 值为  $0.56\lambda$  ( $452 \text{ nm}$ )。聚焦后的光场归一化光强分布, 如图 2(b) 所示, 横坐标为空间一维分布, 纵坐标为时间分布。利用上述算法计算的聚焦后光场分布有良好的分辨率, 可以看清焦斑内的细节。图 2(c) 为聚焦后归一化脉冲的整体时间波形, 针对不同时间窗口的归一化强度在数值上等于不同时间窗口的单一整体时间信噪比数值。

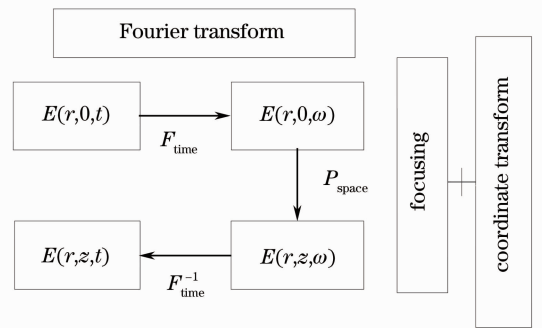


图 1 聚焦传输时空仿真算法

Fig. 1 Simulation algorithm of time and space focusing

超短脉冲的时间信噪比针对不同的物理实验有着不同的定义方式与指标要求<sup>[16-17]</sup>, Koga 等<sup>[18]</sup>分析 J-KAREN(40 fs)CPA 系统预脉冲与自发辐射对时间信噪比的影响时,考虑纳秒级与皮秒级时间窗

口,钱列加等<sup>[19]</sup>分析百飞秒光学参量啁啾脉冲放大(OPCPA)系统参量荧光、抽运噪声、前后表面反射对时间信噪比的影响时,考虑 5 ps 时间窗口。这是因为超短脉冲的脉宽不同,各影响因素造成的噪声范围不同,定义时间信噪比的时间窗口也各不相同,在分析波前误差对于时间信噪比的影响时,模拟脉冲宽度为 30 fs,首先由于波前误差对于时间信噪比影响时间尺度有限,其次目前商用测量仪器检测水平为 500 fs,因此模拟计算时间窗口选取 500 fs。考

虑到波前误差对于脉冲的影响主要是对其进行调制,即脉冲将出现次峰结构,时间信噪比定义为对于每个空间位置处,脉冲主峰强度与次峰结构中次极大光强的旁瓣强度之比,这样时间信噪比在空间尺度上存在分布,如图 2(d)所示。这样的定义与作为单一数值的整体时间信噪比相比是有区别的,整体时间信噪比是一个累加效果,时间信噪比分布体现出时间信噪比在空间上的局部特性,对于物理实验中光与物质相互作用的真实形态的认知有着重要意义。

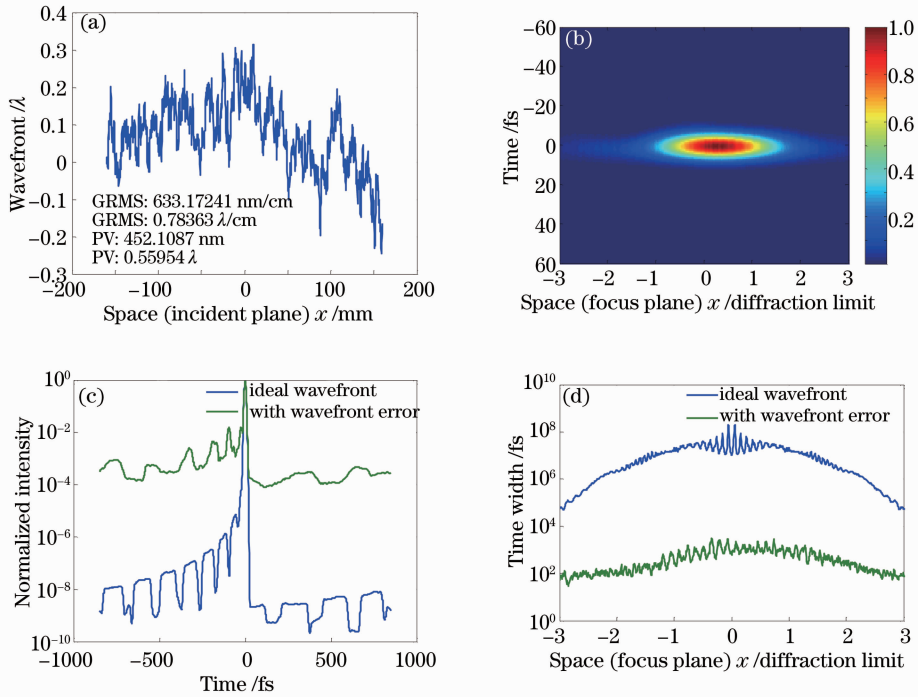


图 2 (a) 1D 随机波前误差空间分布; (b) 引入波前误差聚焦后脉冲时空分布; (c) 聚焦后整体时间信噪比; (d) 聚焦后时间信噪比横向  $x$  空间分布

Fig. 2 (a) Spatial distribution of 1D random wave-front error; (b) temporal and spatial distribution of focused pulse with wave-front error; (c) overall SNR of focused pulse; (d) spatial  $x$  distribution of SNR of focused pulse

根据提出的定义,对于无波前误差的聚焦结果进行分析,得到理想情况下时间信噪比在空间尺度上的分布,如图 2(d)蓝线所示,中心处时间信噪比优于  $10^8$ ,但是存在光斑边缘时间信噪比退化的情况,两倍衍射极限(直径  $5 \mu\text{m}$ )外时间信噪比退化两个数量级,将差于  $10^6$ 。分析中以相对此标准的退化程度来标定聚焦脉冲的时间信噪比品质。分析有波前误差时的超短脉冲聚焦结果发现:在超短脉冲聚焦的过程中,波前误差除了影响焦斑大小、能量集中度等空间质量的同时,对于脉冲的时间特性也有着很大的影响,特别是会使时间信噪比发生大幅度退化。有波前误差时超短脉冲聚焦时间信噪比,如图 2(d)绿线所示,中心时间信噪比退化 5 个数量

级,边缘退化 3 个数量级,并且时间信噪比存在调制现象。

在这个模拟的过程中,各频谱分量的传播情况相同,不存在色散量,所以并非高阶色散导致时间信噪比退化。时间信噪比退化的机理可以理解为:由于引入了波前误差在大口径上的分布,使得空间上分布的光脉冲产生不同角度的衍射,在空间不同位置的光脉冲在聚焦过程中将经历不同的光程,从而造成脉冲达到焦平面的时间有先后,最终导致了超短脉冲聚焦过程中时空上的耦合。因此可以得到结论:大口径超短脉冲光学系统中,在空间上调制的波前误差在聚焦中会通过时空耦合影响最终聚焦后的脉冲时间特性,使得脉冲时间信噪比受到调制,从而

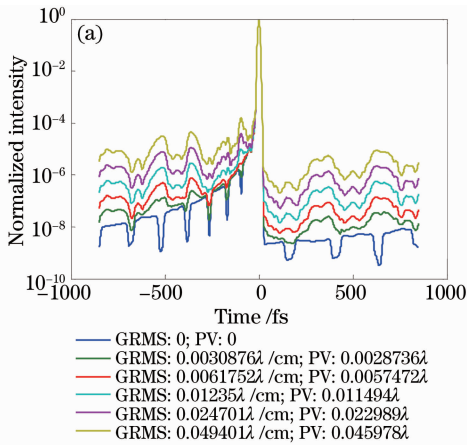
大幅度退化。

### 3 影响时间信噪比的波前误差参数分析

根据(1)式的定义,影响随机波前误差分布的两个参数为误差大小和空间尺度(周期)。利用前文描述的超短脉冲聚焦计算模型,对于不同的误差大小、空间尺度计算分析时间信噪比退化的程度。

#### 3.1 波前误差大小对时间信噪比的影响

在波前误差空间尺度相同、误差分布形状相同的情况下,改变波前误差的大小,参数体现在 PV 值的不同。模拟中,波前误差空间尺度取 2.5 mm,中心波长为 808 nm,脉宽为 10 fs 的超短脉冲经过口径为 320 mm,焦距为 800 mm 的离轴抛物面镜聚焦



之后的时间信噪比(时间窗口 500 fs)在焦斑处的分布如图 3 所示。图中蓝线代表理想时间信噪比,其余 5 条曲线分别代表波前误差 PV 值从 0.0028λ 到 0.046λ 递增,GRMS 值从 0.003 λ/cm 到 0.049λ/cm 递增,可以看出,GRMS 值对于时间信噪比的影响效果与 PV 值有同样的退化趋势,当 PV 值增加一倍,时间信噪比质量就退化一个数量级。这表明波前误差空间尺度相同时,GRMS 值、PV 值越小,即波前误差越小,聚焦脉冲的时间信噪比质量越好。但是对比理想聚焦时间信噪比分布也可以发现,波前误差空间尺度为 2.5 mm 时,即使 PV 值在 λ/100 水平,时间信噪比也将退化两个数量级。

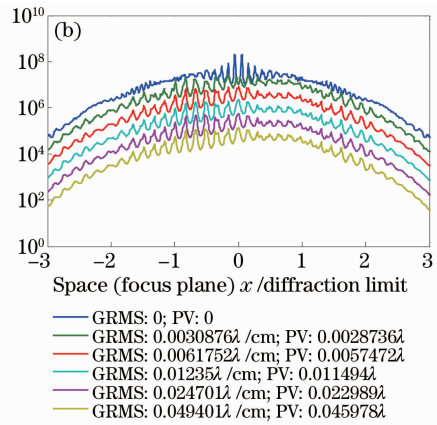


图 3 波前误差大小对于时间信噪比的影响。(a)整体,  $T=2.5$  mm; (b) 横向  $x$  空间分布,  $T=2.5$  mm

Fig. 3 Influence of wave-front error magnitude on SNR. (a) Overall SNR,  $T=2.5$  mm; (b) spatial  $x$  distribution at focus spot,  $T=2.5$  mm

#### 3.2 波前误差空间尺度(周期)对时间信噪比的影响

把波前误差大小限制在同一个等级上,针对不同的空间尺度分析聚焦脉冲的时间信噪比分布,可以得到波前误差空间尺度(周期)对时间信噪比的影响。波前误差空间尺度本身将影响 GRMS 值的大小,所以模拟中波前误差大小参数采用 PV 值评价,将 PV 值保持在 λ/20 的等级上,空间尺度取值从 160 mm 到 0.1562 mm 递减,该尺度覆盖了低中高频段。中心波长为 808 nm,脉宽为 10 fs 的超短脉冲经过口径为 320 mm,焦距为 800 mm 的离轴抛物面镜聚焦之后的时间信噪比在焦斑处的分布结果如图 4 所示。图中蓝色实线为理想情况,从图 4(a)中可以看出,不同的波前误差空间尺度对于时间波形(即整体时间信噪比)的影响是不同的:尺度越小,频率越高,时间窗口大的时间信噪比退化越严重;尺度越大,频率越低,对于时间波形在主脉冲附近的影响

大,即时间窗口小的时间信噪比退化越严重。

从图 4(b)中可以明显看出,当波前误差空间尺度不同时,即使 PV 值保持恒定,时间信噪比分布仍将出现差异,然而,存在部分频率成分的时间信噪比品质相近的情况,按照影响时间信噪比分布的特性可以将波前误差空间尺度(周期)分为以下 3 个频段:

1) 空间尺度小于 1.25 mm 的频率较高的中频波前误差和低频波前误差(图 4 中点划线),对于时间信噪比的影响在于使得整体的时间信噪比退化,即使波前误差大小保持在 λ/20 的等级时,时间信噪比也将退化 3 个数量级,退化程度最大。

2) 空间尺度大于 20 mm 的低频波前误差(图 4 中虚线),波前误差大小保持在 λ/20 的等级时,聚焦后的脉冲时间信噪比与理想聚焦情况下的结果相近,对于时间信噪比的影响可以忽略。

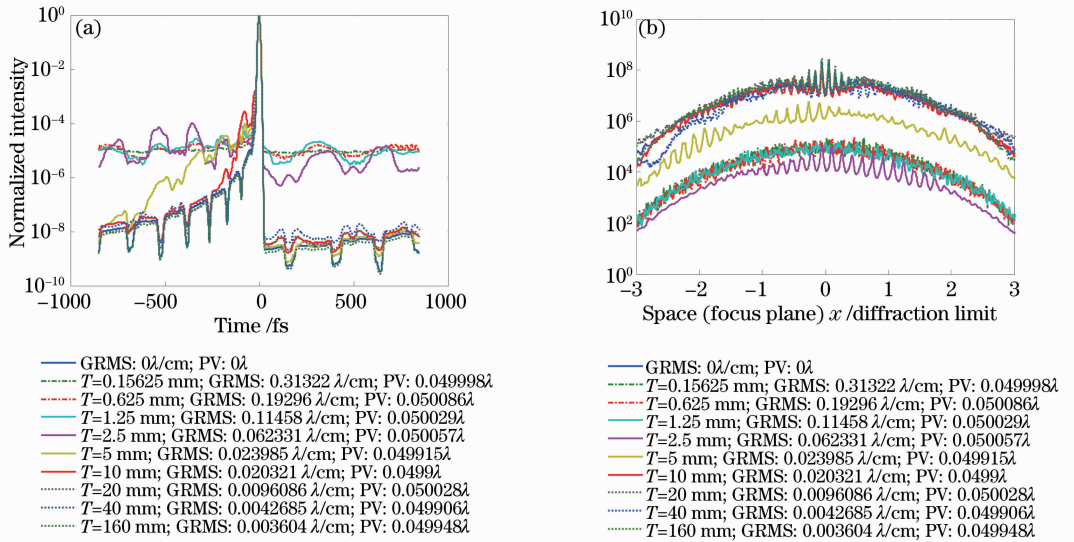


图 4 波前误差空间尺度(周期)对时间信噪比的影响。(a)整体 SNR；(b) 横向( $x$ )空间分布  
Fig. 4 Influence of wave-front error space scale (period) on SNR. (a) Overall SNR; (b) spatial ( $x$ ) distribution at focus point

3) 空间尺度在 1.25~20 mm 的中频波前误差(图 4 中实线),对时间信噪比的影响量级介于高频与低频之间,但是与理想聚焦情况下的结果相比,聚焦后的脉冲时间信噪比随着波前误差在横向空间分布上有很大的调制,波前误差大小保持在  $\lambda/20$  的等级时,调制幅度达到一个数量级,造成时间信噪比在焦斑处局部退化现象严重。时间信噪比受波前误差空间尺度影响最敏感,频率越高影响越大。

### 3.3 对光学系统波前误差控制的要求

基于随机波前误差两个参数对时间信噪比影响的特点,可以针对不同的频段,分析不同频段所对应的实际物理影响因素,可以对波前误差控制提出 PV 值的要求。这里将对比理想聚焦情况的时间信噪比分布,近似理想聚焦时间信噪比的标准对光

学系统的波前误差控制提出严格的要求。

高频是对超短脉冲聚焦系统影响最强的成分,高频波前误差主要由系统内光学元件表面粗糙引入。由于该频段内时间信噪比品质相近,所以取空间尺度为 0.3125 mm 的随机波前误差作为分析对象同样具有普遍性,不同 PV 值的随机波前误差导致时间信噪比退化的结果,如图 5 所示。高频的波前误差曲线重叠过多,难以直接辨认,改用波前误差的功率频谱密度(PSD)曲线表示,如图 5(a)所示;图 5(b)中,对比理想情况(蓝线),高频波前误差 PV 值优于  $\lambda/250$ (绿线)时,焦斑中心与边缘时间信噪比的退化量小于一个数量级,因此要对光学元件引入的高频噪声进行空间滤波,使得残余高频波前误差小于  $\lambda/250$ 。

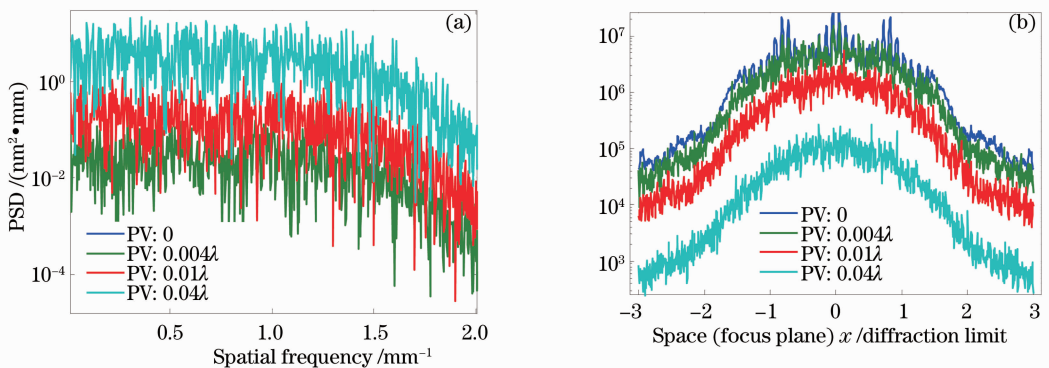


图 5 空间尺度为 0.3125 mm 时波前误差 PV 值对时间信噪比的影响。(a)波前误差的功率频谱密度；  
(b)时间信噪比的横向  $x$  空间分布

Fig. 5 Influence of wave-front error PV on SNR (error space scale is 0.3125 mm). (a) PSD of wave-front error; (b) spatial  $x$  distribution of SNR

随机波前误差的低频成分对时间信噪比的影响较小。低频成分主要为光学系统的各类像差。取 40 mm 的频率成分进行分析,结果如图 6 所示,图 6(a)为波前误差,图 6(b)中 PV 值仅须优于  $\lambda/10$  (绿线)即可达到时间信噪比退化小于一个数量级的

要求。此要求远远低于高频的 PV 值要求 ( $\lambda/250$ ),这也进一步证明,随机波前误差的低频成分对于时间信噪比的影响较小。对于低频波前误差的控制主要采取自适应光学的途径,使得 PV 值优于  $\lambda/10$ 。

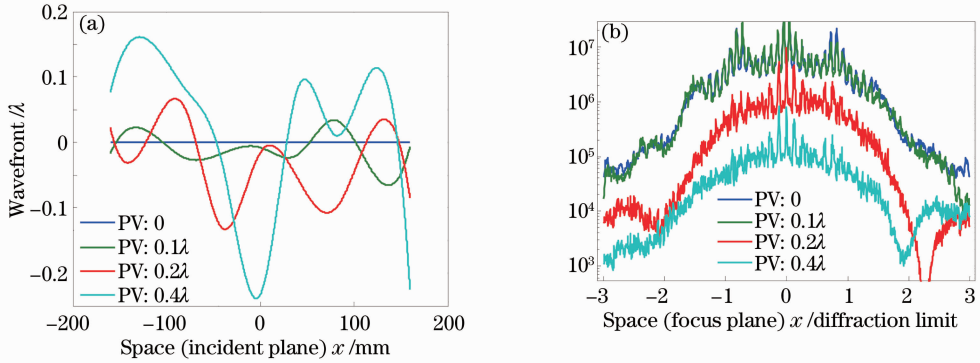


图 6 空间尺度为 40 mm 时波前误差 PV 值对时间信噪比的影响。(a)波前误差;(b)时间信噪比的横向  $x$  空间分布

Fig. 6 Influence of wave-front error PV on SNR (error space scale is 40 mm). (a) Wave-front error; (b) spatial  $x$  distribution of SNR

频率较低的中频成分主要起着对时间信噪比进行大幅度调制的作用。中频成分主要是空间滤波器与自适应光学分别对高频与低频优化后的剩余量,由光学元件面型瑕疵产生,选择空间尺度为 10 mm 的频率成分进行分析,结果如图 7 所示,图 7(a)为

不同 PV 值的波前误差,根据时间信噪比退化量不大于一个数量级的标准,图 7(b)中频率较低的中频成分应优于  $\lambda/10$  (绿线)。这个标准要求分配到每个光学元件的加工表面质量要求中去。

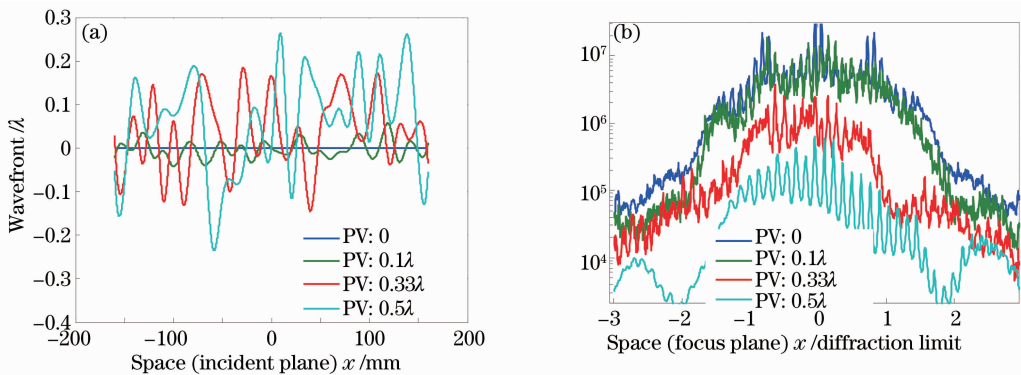


图 7 空间尺度为 10 mm 时波前误差 PV 值对时间信噪比的影响。(a)波前误差;(b)时间信噪比的横向  $x$  空间分布

Fig. 7 Influence of wave-front error PV on SNR (error space scale is 10 mm). (a) Wave-front error; (b) spatial  $x$  distribution of SNR

良好的超短脉冲时间信噪比对于大口径光束波前误差控制的要求要远远高于连续或者长脉冲光束良好的空间特性(焦斑尺寸、环围能量、斯特列尔比等)<sup>[10]</sup>,其中对于高频误差的要求最高。

噪比在焦斑空间尺度上的分布得以展示。进一步在模型中加入随机波前误差,观察到时间信噪比的退化,并对该现象做出了解释。其原因是在空间不同位置的光脉冲在聚焦过程中将经历不同的光程,从而造成脉冲达到焦平面的时间有先后。分析波前误差大小、空间尺度(周期)对时间信噪比的影响,得出结论:随机波前误差的 PV 值大小决定了时间信噪比的品质;不同的空间尺度对时间信噪比有着不同的影响,高频成分使得时间信噪比整体退化,中频成

## 4 结 论

利用分两步坐标变换 FFT 方法的傅里叶积分变换方法,利用该方法对大口径超短脉冲系统离轴抛物面镜聚焦传输过程进行模拟仿真,使得时间信

分使得时间信噪比受到大幅度调制,低频随机噪声对于时间信噪比影响相对较小。为了获得近似理想的时间信噪比分布,针对不同的空间尺度随机噪声的时间信噪比特性,分别对光学系统3个频段的波前误差控制提出了要求,比空间特性需求更为严格。通过理论模拟计算,明确了大口径光学系统中随机波前误差与时间信噪比之间的关系,为大口径超短脉冲系统的设计指标分配与波前误差控制提供了理论基础。

### 参 考 文 献

- 1 J P Chambaret, F Canova, R Lopez-Martens, *et al.*. ILE 25PW single laser beamline: the French step for the European extreme light infrastructure (ELI) [C]. Quantum Electronics and Laser Science Conference, 2007. JWC4.
- 2 Li Chuandong, Zhang Zhengquan, Xu Zhizhan. Effects of gain saturation in chirped pulse amplification [J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(3): 299-304.  
李传东, 张正泉, 徐至展. 增益饱和在啁啾脉冲放大中的影响 [J]. 光学学报, 1996, 16(3): 299-304.
- 3 Yang Qingwei, Guo Ailin, Xie Xinglong, *et al.*. Effects of asymmetric spectral clipping in the stretcher on the output pulse contrast [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(12): 1970-1974.  
杨庆伟, 郭爱林, 谢兴龙, 等. 展宽器中非对称光谱剪切对输出脉冲对比度的影响 [J]. 中国激光, 2008, 35(12): 1970-1974.
- 4 Ma Zairu. Improving the Contrast Ratio of High Power Femtosecond Laser by Using of OPCPA Technique [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006.  
马再如. 采用OPCPA技术提高高功率飞秒激光对比度研究 [D]. 成都: 四川大学, 2006.
- 5 M P Kalashnikov, E Risse, H Schönagel, *et al.*. Double chirped-pulse-amplification laser; a way to clean pulses temporally [J]. Opt Lett, 2005, 30(8): 923-925.
- 6 M Kalashnikov, E Risse, H Schönagel, *et al.*. Characterization of a nonlinear filter for the front-end of a high contrast double-CPA Ti:sapphire laser [J]. Opt Express, 2004, 12(21): 5088-5097.
- 7 Y Xu, Y Leng, X Guo, *et al.*. Pulse temporal quality improvement in a petawatt Ti:sapphire laser based on cross-polarized wave generation [J]. Opt Commun, 2014, 313: 175-179.
- 8 J Liu, K Okamura, Y Kida, *et al.*. Temporal contrast enhancement of femtosecond pulses by a self-diffraction process in a bulk Kerr medium [J]. Opt Express, 2010, 18(21): 22245-22254.

- 9 C Thauray, F Quéré, J P Geindre, *et al.*. Plasma mirrors for ultrahigh-intensity optics [J]. Nature Physics, 2007, 3(6): 424-429.
- 10 Guo Ailin, Zhu Haidong, Yang Zeping, *et al.*. Wave-front propagation modeling and verification of the SG-II updated laser facility [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0214001.  
郭爱林, 朱海东, 杨泽平, 等. 神光II升级装置波前传输计算模型与验证 [J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0214001.
- 11 Liu Qiangsheng, Cen Zhaofeng, Li Xiaotong, *et al.*. Spatial-temporal-property analysis of ultrashort pulse propagating through real optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0132001.  
刘强生, 岑兆丰, 李晓彤, 等. 超短脉冲通过实际光学系统的时空特性分析 [J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0132001.
- 12 C R Wolfe, J K Lawson. Measurement and analysis of wave-front structure from large-aperture ICF optics [C]. Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion, 1995. 361-385.
- 13 J K Lawson, J M Auerbach, R E English Jr, *et al.*. NIF optical specifications: the importance of the RMS gradient [C]. 3rd International Conference on Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion, 1999. 336-343.
- 14 Chen Yuanhua, Zheng Wanguo, Chen Wenjing, *et al.*. Phase RMS gradient of the distorted wave-front for high power optical components [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(3): 0403.  
陈源画, 郑万国, 陈文静, 等. 高功率光学元件畸变波前相位均方根梯度计算 [J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(3): 0403.
- 15 Yang Meixia, Zhong Ming, Ren Gang, *et al.*. Discussion of short-wavelength laser beam focus using fast Fourier transform method [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0507001.  
杨美霞, 钟鸣, 任钢, 等. 快速傅里叶变换方法计算短波长激光束聚焦的讨论 [J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0507001.
- 16 Cao Huabao, Lu Xingqiang, Fan Dianyuan. Signal-to-noise ratio degradation due to the tiled-grating gap [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1005004.  
曹华保, 卢兴强, 范滇元. 拼接光栅压缩器中光栅拼缝对脉冲时间信噪比的影响 [J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1005004.
- 17 Wang Ke, Qian Liejia. Signal to noise ratio of ultrashort high-power pulse [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(1): 0001.  
王科, 钱列加. 高功率超短激光脉冲时间信噪比的研究 [J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(1): 0001.
- 18 T Z Esirkepov, J K Koga, A Sunahara, *et al.*. Prepulse and amplified spontaneous emission effects on the interaction of a petawatt class laser with thin solid targets [J/OL]. arXW.org, 2013, <http://arXW.org/abs/1310.568>.
- 19 J Wang, J Ma, Y Wang, *et al.*. Noise filtering in parametric amplification by dressing the seed beam with spatial chirp [J]. Opt Lett, 2014, 39(8): 2439-2442.

栏目编辑: 张 雁