

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0285-04

# 强激光束波前 PSD 恢复算法及聚焦特性的研究

栗敬钦 魏晓峰 马驰 袁静

(中国工程物理研究院高温高密度等离子体国家重点实验室, 绵阳 621900)

**摘要** 首先简述了激光束波前的功率谱密度(power spectral density, PSD)描述方法,基于光传输模拟计算需要,提出了一种基于 PSD 的波前恢复算法,并对光束中的高频波前畸变对焦斑光强分布的影响作了初步探讨。

**关键词** 功率谱密度, G-S 算法, 波前畸变, 聚焦特性

中图分类号 TN012 文献标识码 A

## Study on the Wavefront PSD Retrieved Algorithm and Focal Properties of High Power Laser Beam

SU Jing-qin WEI Xiao-feng MA Chi YUAN Jing

(National Key Laboratory of Laser Fusion, Mianyang 621900)

**Abstract** In this paper, power spectrum density (PSD) for laser beam wavefront is described and wavefront retrieved algorithm based on PSD is presented for the simulation of laser propagation. The effect of middle and high frequency distorted wavefront on intensity distribution of sidelobe of focal spot is also discussed.

**Key words** power spectral density, G-S algorithm, distorted wavefront, focal property

### 1 引言

在高功率激光系统中,光束传输过程中表现出来的非线性效应是影响光束质量下降的主要原因<sup>[1]</sup>。实验表明,中高频的波前噪声与光束非线性效应增长以及光束聚焦后焦斑旁瓣的光强分布有着密切联系<sup>[2]</sup>。目前采用功率谱密度(power spectral density PSD)可对光束在传输过程中波前产生的中高频调制进行有效描述。PSD 克服了传统的 Zernike 多项式只对圆形孔径有效的缺点,以频谱的形式给出一类空间波前的分布<sup>[3]</sup>。

在激光器系统的优化设计过程中,我们总是模拟计算光在空域中进行传输的过程,对于一已知的波前 PSD 分布,需要知道在空域中与其相对应的空间分布,方能带入光传输模拟计算程序进行模拟计算。为通过模拟计算分析清楚波前的中高频分量和焦斑旁瓣的分布的一般规律,如何根据频域中 PSD 分布获取空域中合理的高频畸变波前是关键的一步。

### 2 高频波前的 PSD 描述方法

传统上,波前形状通过 Zernike 多项式表达<sup>[4]</sup>,

但 Zernike 多项式仅对圆形孔径的波前有效,这是因为 Zernike 多项式是定义在单位圆上的正交多项式的集合。而且,Zernike 多项式的分析方法只能处理低频的波前畸变,对于中高频成分的波像差,只能作“残差”近似,不能对其作出准确的描述<sup>[3]</sup>。另一方面,目前随着测量手段的不断改进,可获得空间分辨率很高的波前测量数据,由于 Zernike 多项式有限,不能充分利用这些数据。另外,波前 P-V 值, RMS 值亦不足以表征波前的空间细节。针对 ICF 驱动器这样大型激光装置的设计和优化的而言,为反映远场焦斑分布与近场光束波前的定量关系,客观上需要提出一种新的波前描述方法。

在电子学中,功率谱密度是一个十分成熟的概念。而在光学中,最先引用 PSD 是用于分析光散射以及其与光学表面粗糙度的关系<sup>[5]</sup>,1985 年 Church 等最先给出 PSD 的表达式<sup>[6]</sup>,后来 Janeczko 将其用于分析红外材料的表面粗糙度<sup>[7]</sup>。

一维情况下,设波前函数为  $\varphi(x)$ ,其频谱形式  $\phi(\nu)$  可写为

$$\phi(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x) \exp(-i2\pi\nu x) dx \quad (1)$$

根据 PSD 基本定义,波前 PSD 定义为波前  $\varphi(x)$  各频率分量 Fourier 频谱振幅的平方,

$$\text{PSD}(\nu) = \frac{\phi(\nu)\phi(\nu)^*}{\Delta\nu} \quad (2)$$

上式中  $\nu$  为空间频率,  $\Delta\nu$  为频率间隔, \* 表示复共轭。

实际情况下,我们只能处理有限长度和有限频谱范围函数的频谱分析,作离散化处理,设在长度为  $l$  的距离上测量得到  $N$  个均匀采样值  $\varphi(n)$ , 根据离散有限傅里叶变换算法,可计算得

$$\phi(\nu) = \frac{1}{N} \sum_1^N \phi(n) \exp\left(-\frac{i2\pi nx}{N}\right) \quad (3)$$

则 PSD 可由下式计算得到。

$$\text{PSD}(\nu) = \phi(\nu)\phi^*(\nu)l \quad (4)$$

其二维形式为

$$\text{PSD}(\nu_x, \nu_y) = \phi(\nu_x, \nu_y)\phi^*(\nu_x, \nu_y)l_x l_y \quad (5)$$

在傅里叶域中, PSD 以频谱的形式给出了波前的结构,一定的波前 PSD 分布,代表了一类的波前空间分布。从波前的 PSD 分布,可直接获知波前的一些信息,可从 PSD 分布计算任意频段波前的 RMS 值等。

### 3 PSD 波前恢复算法的研究

#### 3.1 PSD 波前恢复算法

从 PSD 的定义式(2)可知,畸变波前在频域中的位相信息是被丢失了的。因此,为获得空域中相应的波前,在傅里叶域中,需要构建一位相分布  $\varphi(u, v)$ , 该位相分布与 PSD 所定义的振幅分布一起构成畸变波前在傅里叶域中的完整信息。再通过逆傅里叶变换,便得到空域中的高频畸变波前的分布  $\varphi(u, v)$ 。

由于位相分布  $\varphi(u, v)$  的选取具有盲目性,可以预料的是得到的  $\varphi(x, y)$  将是包含有虚部的复数分布函数,而实际的波前函数应为一实函数。因此,仅通过一次逆傅里叶变换获取  $\varphi(x, y)$  是不够的。其过程将是一反复迭代的过程。

在衍射光学元件的设计中,几乎所有的过程都可归结为位相恢复问题<sup>[8]</sup>。

图 1 为衍射光学元件设计的一般理论模型。其一般过程为:已知输入面上的光场分布  $f(x, y)$  和输出面的光场分布  $g(u, v)$ , 输入输出之间存在光学变换关系  $T(x, y, u, v)$ 。基于变换关系  $T(x, y, u, v)$ , 通过反复迭代逼近的算法,求出位相函数  $\varphi(x, y)$ 。

基于 PSD 的波前恢复问题可用图 2 所示模型描述。已知空域存在位相分布  $\varphi(x, y)$  [因为波前分布为实函数,因此这里位相分布  $\varphi(x, y)$  等于零]

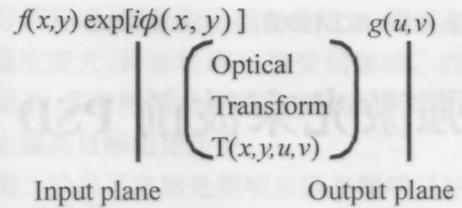


图 1 衍射光学元件设计理论模型

Fig. 1 Theoretical design model of diffractive optical element and frequency domain power spectrum density  $\text{PSD}(\mu, \nu)$  distribution, frequency domain space domain exists transformation relationship (Fourier transform). Based on this transformation relationship, how to solve the wavefront function  $f(x, y)$ .

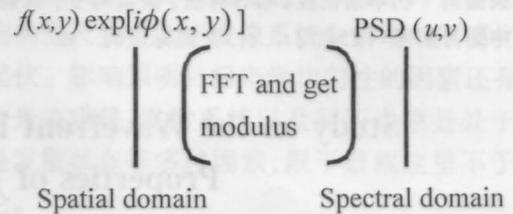


图 2 波前 PSD 恢复算法模型

Fig. 1 Model of wavefront PSD retrieved algorithm

比较这两种模型发现他们的差别仅在于:前者是已知  $f(x, y)$  求  $\varphi(x, y)$ , 而后者是已知  $\varphi(x, y)$  求  $f(x, y)$ 。因此可以借用衍射元件设计的迭代算法解决 PSD 的波前恢复问题。

在衍射元件设计的迭代算法中, G-S 算法是一种常用的算法<sup>[9]</sup>。受 G-S 算法的启发,我们提出了 PSD 波前恢复的算法,其迭代过程分为以下几个步骤(见图 3):

- 1) 随机生成一位相分布  $w(x, y)$ ;
- 2) 对  $w(x, y)$  作 FFT, 得到其频谱分布  $A(u, v) \exp[i\varphi(u, v)]$ ;
- 3) 根据已知的  $\text{PSD}(u, v)$ , 求出频谱振幅分布  $A'(u, v)$ ;
- 4) 将  $A(u, v)$  替换为  $A'(u, v)$ , 得到新的频谱分布  $A'(u, v) \exp[i\varphi(u, v)]$ ;
- 5) 对  $A'(u, v) \exp[i\varphi(u, v)]$  作逆傅里叶变换; 得到分布  $w(x, y) \exp[i\varphi(x, y)]$ ;
- 6) 令  $w(x, y)$  等于  $w'(x, y)$ ;
- 7) 重复以上(2)到(6)过程;
- 8) 条件满足, 终止迭代, 得到波前分布  $w(x, y)$ 。

#### 3.2 模拟计算结果分析

根据 3.1 中所述算法,我们用 Matlab 编制了相应的计算程序并对算法作了验证。

图 4(a)为一给定的 PSD 分布曲线,采用 PSD 恢复算法计算得到的空间波前如图 4(b)所示。图中不同曲线为计算得到的不同波前。

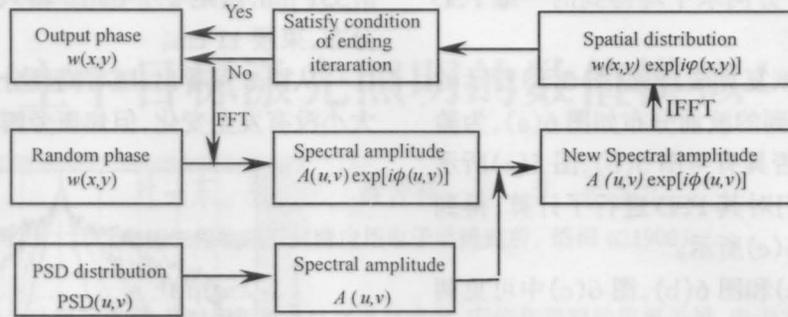


图3 PSD波前恢复算法迭代过程示意图

Fig. 3 Iterated process of PSD wavefront retrieved algorithm

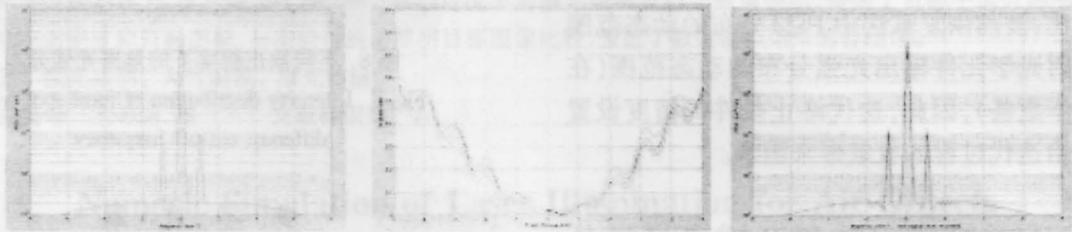
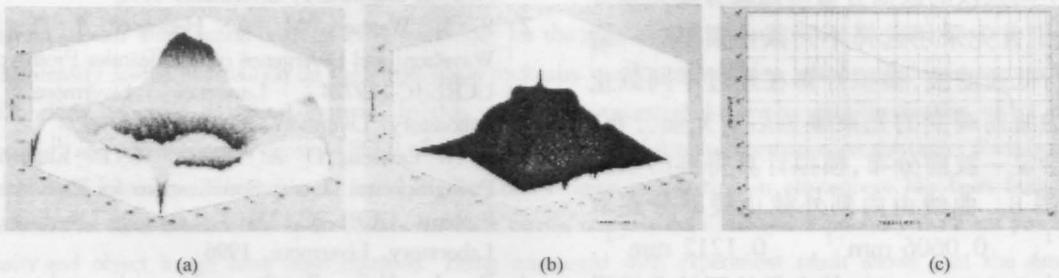


图4 给定 PSD 分布(a); 恢复空间波前分布(b); 恢复波前的 PSD 分布(c)

Fig. 4 Specified PSD distribution (a); Retrieved spatial wavefront (b); PSD distribution of retrieved spatial wavefront (c)



(a)

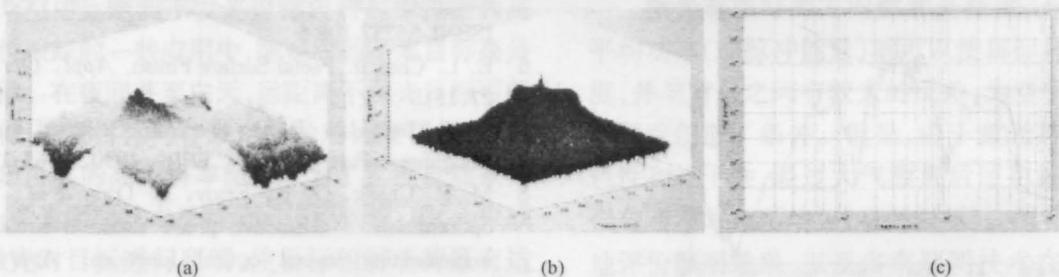
(b)

(c)

图5 经低通滤波后的透射波前及其 PSD 分布. (a) 波前空间分布; (b) 二维 PSD 分布; (c) 一维平均 PSD 分布

Fig. 5 Transmitted wavefront and Its PSD distribution after low-passed filter. (a) spatial distribution of wavefront;

(b) 2-D PSD distribution; (c) 1-D averaged PSD distribution



(a)

(b)

(c)

图6 由恢复算法计算得到的波前及其 PSD 分布. (a) 波前空间分布; (b) 二维 PSD 分布; (c) 一维平均 PSD 分布

Fig. 6 Retrieved wavefront and Its PSD distribution. (a) Spatial distribution of wavefront;

(b) 2-D PSD distribution; (c) 1-D averaged PSD distribution

为验证其正确性,我们计算了恢复波前相应的 PSD 分布曲线[如图 4(c)所示]。比较图 4(a)和图 4(c),发现两条曲线基本一致,恢复得到的空间波前分布具有与原来 PSD 分布一致的频谱分量。由此可知迭代得到的波前分布对应于频域中的 PSD 分布。

同时从图 4(b)可看出,同一 PSD 分布代表了空域中一系列具有相同频谱结构的波前。

同时我们也对二维情况进行模拟计算,图 5(a)为一典型的经过低通滤波处理的光学元件透射波前,图 5(b)为由图 5(a)所示波前的二维 PSD 分布;

将二维 PSD 数据沿  $x$  方向求平均得到的一维 PSD 分布如图 5(c)。

采用上述的波前恢复算法,根据图 6(b)所示的二维 PSD 分布计算得到的波前分布如图 6(a),为验证恢复得到的波前是否具有与图 5(b)、图 5(c)所示的二维 PSD 分布,我们对其 PSD 进行了计算,得到的结果如图 6(b)、图 6(c)所示。

从图 5(b)、图 5(c)和图 6(b)、图 6(c)中可见两者的 PSD 分布基本一致。同时发现两者的二维 PSD 存在微小差别。这种差别来源于 G-S 迭代算法的计算精度有限,与一般衍射光学元件设计的迭代算法相比,波前恢复算法中 PSD 分布的动态范围远大于衍射光学元件输出光强分布的动态范围(在二维情况下更甚),因此,迭代终止条件的精度设置过高将会给迭代过程的收敛带来困难。

#### 4 高频波前畸变对焦斑旁瓣斑光强分布的影响

为分析不同频段的波前分量对焦斑旁瓣光强分布的影响,我们首先采用选择不同截止频率对一给定的波前进行低通滤波,模拟计算在经过不同截止频率滤波后的波前畸变的光束聚焦后的光强分布。图 7 为预先给定一波前分布,模拟计算得到的焦斑光强分布见图 8。曲线由内到外截止频率分别取  $0.0303 \text{ mm}^{-1}$ ,  $0.0606 \text{ mm}^{-1}$ ,  $0.1212 \text{ mm}^{-1}$ ,  $0.1818 \text{ mm}^{-1}$ ,  $0.2424 \text{ mm}^{-1}$ ,其中最外面的曲线没有作滤波处理。其余计算参数如下:采样点 512,近场采样范围 300 mm,远场采样范围 1 mm,波长

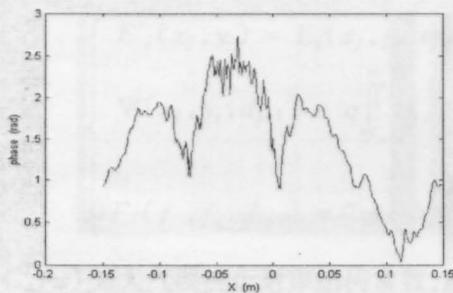


图 7 给定的波前分布

Fig. 7 Specified wavefront distribution

$0.351 \mu\text{m}$ , 焦距 2.2 mm。输入光束为 6 阶超高斯分布,束腰 11 cm。

从图 8 可看出,随着高频分量的增加,焦斑主瓣大小没有发生变化,但焦斑旁瓣的强度逐渐增大。

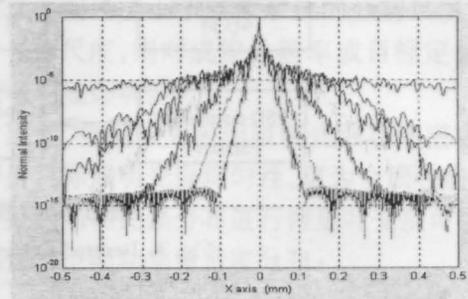


图 8 不同截止频率下的焦斑光强分布

Fig. 8 Intensity distribution of focal spot with different cut-off frequency

#### 参 考 文 献

- 1 W. Williams, J. M. Auerbach, M. A. Henesian *et al.*. Modeling Characterization of the National Ignition Facility Focal Spot. UCRL-JC-127907, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, 1998
- 2 P. J. Wegner, M. A. Henesian, J. T. Salmon. Wavefront and Divergence of the Beamlet Prototype Laser. UCRL-JC-129724, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, 1998
- 3 J. K. Lawson, D. A. Aikens, R. E. English *et al.*. Power Spectral Density Specifications for High-Power Laser Systems. UCRL-JC-123105, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, 1996
- 4 R. J. Noll. Zernike polynomials and atmospheric turbulence. *J. Opt. Sci. Am.*, 1976, **66**(3):207~211
- 5 J. M. Bennett, L. Mattsson. Scattering Theories and Surface Statistics, chapter 4 in Introduction to Surface Roughness and Scattering, published by OSA, 1989, ISBN1-55752-108-5
- 6 E. L. Church. Factual Surface Finish. *Appl. Opt.*, 1988, **27**:1518
- 7 D. J. Janeczko. Power Spectrum Standard for Surface Roughness: Part I. *Proc. SPIE*, 1990, **1165**:175
- 8 M. P. Chang, O. K. Ersoy, B. Dong *et al.*. Iterative optimization of diffractive phase elements simultaneously implementing several optical functions. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(17):3069~3076
- 9 R. W. Gerchberg, W. O. Saxton. Phase determination for image and diffraction plane pictures in the electron microscope. *Optik*, 1971, **34**:275~284