

有振幅调制和位相畸变激光通过 空间滤波器的传输*

张彬 吕百达

(四川大学激光物理与化学研究所 成都 610064)

提要 用广义惠更斯-菲涅耳衍射积分和统计光学方法对有振幅调制和位相畸变激光通过空间滤波器的传输特性作了详细研究,并对空间滤波器中滤波小孔最佳尺寸的选取条件进行了讨论。数值计算结果表明,最佳滤波小孔尺寸与系统菲涅耳数、光束截断参数以及光束的位相畸变参数等有关。

关键词 振幅调制,位相畸变,空间滤波器,传输特性

1 引言

由于空间滤波器能消除光束截面强度分布上的高频空间调制,抑制小尺寸自聚焦,且多级空间滤波器具有像传递特性,能有效地改善光束质量,因此,成为高功率激光系统(例如惯性约束聚变驱动器)中必不可少的重要部件。对于理想平面波和高斯光束通过空间滤波器的变换特性已作了详细研究^[1~3]。然而,在高功率激光系统中,由于工作介质的增益饱和效应、增益非均匀性、非线性光学效应等的影响,使激光常具有振幅调制和位相畸变^[4]。本文从广义惠更斯-菲涅耳衍射积分出发,对有振幅调制和位相畸变高功率激光光束通过有限孔径空间滤波器的传输特性作了详细研究,并对空间滤波器中滤波小孔最佳尺寸的选取条件进行了讨论。

2 理论分析

为简单起见,且不失一般性,本文研究二维情况。在准单色场近似和高斯型随机位相畸变假设下有振幅调制和位相畸变的光束在 $z=0$ 处的场分布可由互强度描述^[4]

$$J_0(x_1, x_2) = \exp\left[-\left(\frac{x_1^2 + x_2^2}{w_0^2}\right)\right] \exp\left[-\frac{(x_1 - x_2)^2 \sigma_l^2}{L_l^2}\right] + \sigma_a^2 \exp\left[-\left(\frac{1}{L_l^2} + \frac{\sigma_l^2}{L_a^2}\right)(x_1 - x_2)^2\right] \quad (1)$$

式中, x_1, x_2 表示在 x 轴上二点的坐标, w_0 为光束的束腰半宽度, L_l, L_a 分别表示位相畸变和振幅调制的尺度, σ_l^2, σ_a^2 分别为位相和振幅误差幅度。

设空间滤波器二透镜 F_1, F_2 的焦距分别为 f_1, f_2 ,半宽度为 b 的滤波小孔置于二透镜共同焦面上,由(1)式描述的光束经半宽度为 a 的光阑后通过空间滤波器的传输遵从广义惠更斯-菲

* 国家高技术惯性约束聚变项目资助课题。

涅耳衍射积分^[5]

$$J(X_1, X_2) = \frac{k}{2\pi B} \iint J_0(x_1, x_2) \exp\left\{-\frac{ik}{2B}[A(x_1^2 - x_2^2) - 2(x_1 X_1 - x_2 X_2) + D(X_1^2 - X_2^2)]\right\} dx_1 dx_2 \quad (2)$$

式中, X_1, X_2 为在出射参考面 X 轴上二点坐标, J_0 为光学系统入射面上的互强度, J 为光学系统出射面的互强度, A, B, C, D 为光学系统传输矩阵元, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数, λ 为波长。将空间滤波器的传输矩阵代入(2)式, 经过较冗长计算得到有振幅调制和位相畸变光束通过空间滤波器传输后, 在距 F_2 为 l 处的互强度为

$$\begin{aligned} J(u_1^*, u_2^*) = & N_{w1} N_{w2} \int_{-b/w_0}^{b/w_0} \int_{-b/w_0}^{b/w_0} \int_{-a/w_0}^{a/w_0} \int_{-a/w_0}^{a/w_0} \left\{ \exp[-(u_1^2 + u_2^2)] \exp\left[-\left(\frac{\sigma_f}{L_f/w_0}\right)^2 (u_1 - u_2)^2\right] + \right. \\ & \sigma_a^2 \exp\left[-\left(\frac{1}{L_a^2/u_0^2} + \frac{\sigma_f^2}{L_f^2/u_0^2}\right) (u_1 - u_2)^2\right] \left. \right\} \exp[i2\pi N_{w1} (u_1 u_1' - u_2 u_2')] \times \\ & \exp\left[-i\pi\left(N_{w2} - N_{w1} + \frac{N_{w2}}{N_l}\right) (u_1' - u_2')\right] \times \\ & \exp[-i2\pi N_{w2} (u_1' u_1' - u_2' u_2')] du_1 du_2 du_1' du_2' \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $u_i = \frac{x_i}{w_0}$ ($i = 1, 2$), $u_i' = \frac{x_i'}{w_0}$ ($i = 1, 2$), $N_{w1} = \frac{w_0^2}{\lambda f_1}$ 为与光束和透镜 F_1 有关的菲涅耳数, $\frac{a}{w_0}$ 为截断参数, $u_i' = \frac{x_i'}{w_0}$ ($i = 1, 2$), $N_{w2} = \frac{w_0^2}{\lambda f_2}$ 为与光束和透镜 F_2 有关的菲涅耳数, $N_l = \frac{w_0^2}{\lambda l}$ 为与光束和传输距离 l 有关的菲涅耳数, $N_w = \frac{a^2}{\lambda l}$ 为与光阑和传输距离有关的菲涅耳数。当透镜 F_1 和 F_2 的焦距相同时, 即 $N_{w1} = N_{w2} = N_w$, 若令 $u_1' = u_2' = u'$, 由(3)式可得光强分布为

$$\begin{aligned} I(u^*) = & N_w^2 \int_{-b/w_0}^{b/w_0} \int_{-b/w_0}^{b/w_0} \int_{-a/w_0}^{a/w_0} \int_{-a/w_0}^{a/w_0} \left\{ \exp[-(u_1^2 + u_2^2)] \exp\left[-\left(\frac{\sigma_f}{L_f/w_0}\right)^2 (u_1 - u_2)^2\right] + \right. \\ & \sigma_a^2 \exp\left[-\left(\frac{1}{L_a^2/w_0^2} + \frac{\sigma_f^2}{L_f^2/w_0^2}\right) (u_1 - u_2)^2\right] \left. \right\} \exp[i2\pi N_w (u_1 u_1' - u_2 u_2')] \times \\ & \exp\left[-i\pi\left(\frac{N_w}{N_l}\right) (u_1' - u_2')\right] \exp[-i2\pi N_w u' (u_1' - u_2')] du_1 du_2 du_1' du_2' \end{aligned} \quad (4)$$

3 数值计算结果

数值计算用(4)式对有振幅调制和位相畸变光束进行, 计算例示于图1, 图2。

图1给出有振幅调制和位相畸变光束在强截断情况下 ($a/w_0 = 0.2$) 通过空间滤波器传输后, 距其出射面菲涅耳数为 N_w 处的横向光强分布 $I(u^*)$ (a. u.)。分析图1可知, 有振幅调制和位相畸变光束通过空间滤波器传输后的横向光强分布随滤波小孔尺寸而变。在强截断情况下, 有振幅调制和位相畸变光束在透镜焦面的光强分布与无畸变光束几乎相同^[6], 因此, 入射光束在透镜焦面上的衍射极限几乎不随振幅调制和位相畸变参数而变, 可表示为

$$b' = 0.61 \frac{\lambda f}{a} = \frac{0.61 w_0}{N_w (a/w_0)} \quad (5)$$

将计算参数 $N_w = 100$, $a/w_0 = 0.2$ 代入(5)式, 可求出 $b'/w_0 = 0.03$ 。当滤波小孔相对尺寸 $b/w_0 < b'/w_0$ 时(如图1(a)), 滤波小孔将在焦面处成为强截断的硬边光阑, 因此, N_w 处的光强分布存在衍射调制。当滤波小孔相对尺寸 $b/w_0 = b'/w_0$ 时(如图1(b)), 因滤波小孔滤掉了空间高频

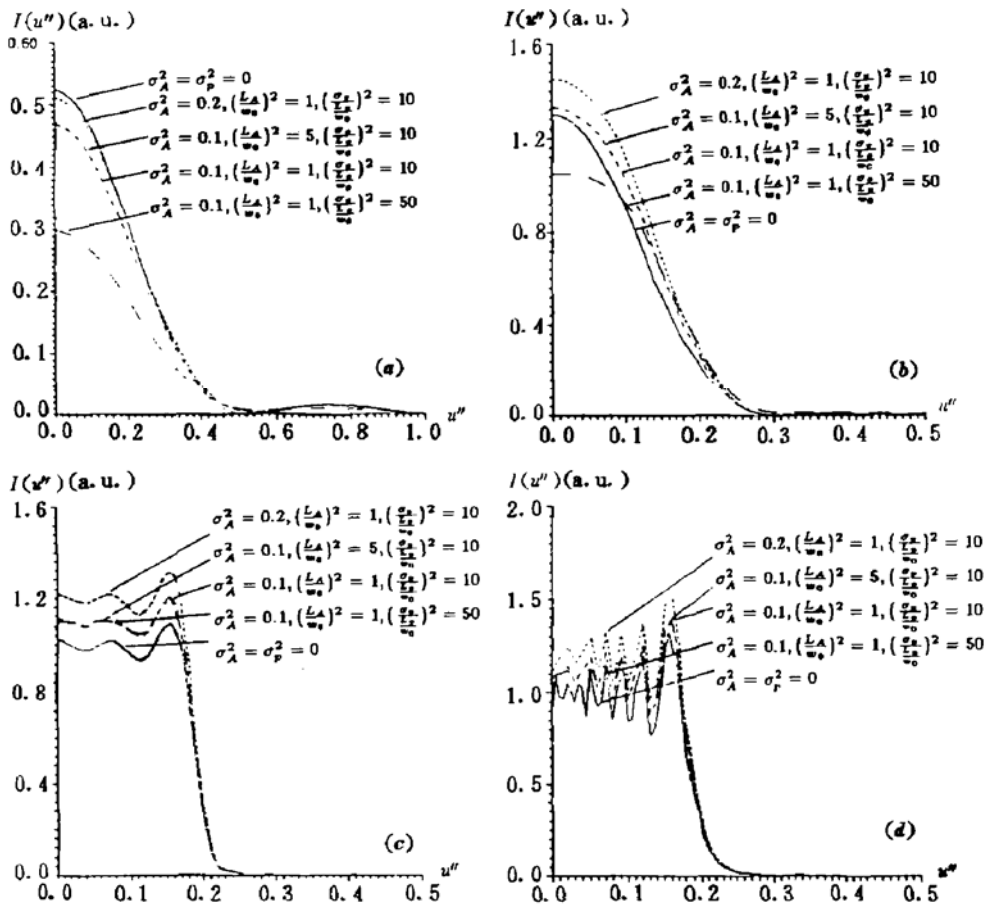


图 1 有振幅调制和位相畸变光束在强截断情况下通过空间滤波器传输后的

横向光强分布 $I(u'')$ (a. u.), $N_w = 100, a/w_0 = 0.2, N_u = 16$

(a) $b/w_0 = 0.01$; (b) $b/w_0 = 0.03$; (c) $b/w_0 = 0.12$; (d) $b/w_0 \rightarrow \infty$

Fig. 1 The transverse intensity $I(u'')$ (arbitrary units) of the beam with amplitude modulation and phase fluctuations when passing through a spatial filter in the strong truncation case, $N_w = 100, a/w_0 = 0.2, N_u = 16$

成分,且只保留了中心亮斑,因此, N_u 处的光强分布较平缓。当滤波小孔相对尺寸 $b/w_0 > b'/w_0$ 时(如图 1(c) ~ (d)),因滤波小孔保留了一些中心亮斑以外的空间高频成分,光强分布仍存在起伏,且滤波小孔越大,光强起伏越大。同时可以看出,光强起伏随位相畸变参数 $(\frac{\sigma_p}{L_p/w_0})^2$ 的增大而减小,这是由于光束的位相畸变越大,空间相干性越差的缘故。在强截断情况下,振幅调制参数 σ_A^2 和 $(L_A/w_0)^2$ 对光强分布的影响较小。另一方面,由于在透镜焦面上引入了小孔,使光能量损失,小孔越小,光能损失越大,因此,综合考虑到空间滤波器的滤波作用以及光能损失以后,可定义在强截断情况下的最佳滤波小孔相对尺寸为

$$\frac{b_{opt}}{w_0} = 4 \frac{b'}{w_0} = \frac{2.44}{N_w(a/w_0)} \tag{6}$$

由(6)式可知,强截断情况下的最佳滤波小孔相对尺寸几乎与振幅调制和位相畸变参数无关,但随系统菲涅耳数和光束截断参数的增大而减小。

图 2 给出有振幅调制和位相畸变光束在弱截断情况下 ($a/w_0 = 2$) 通过空间滤波器传输后, 距其出射面菲涅耳数为 N_l 处的横向光强分布 $I(u'')$ (a. u.). 在弱截断情况下, 有振幅调制和位相畸变光束的衍射极限(焦面处光斑尺寸)几乎只由位相畸变参数决定^[6], 因此, 有振幅调制

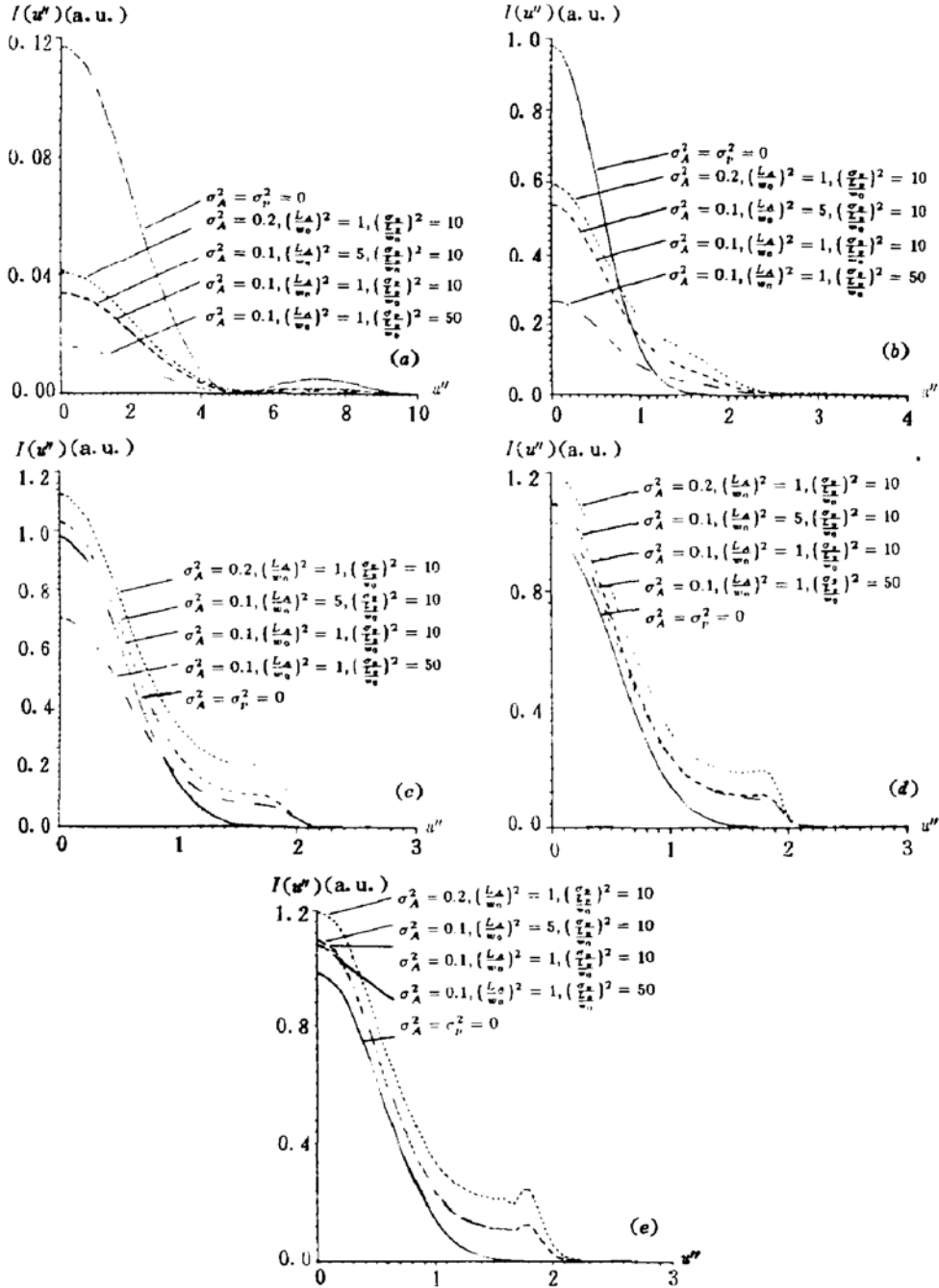


图 2 有振幅调制和位相畸变光束在弱截断情况下通过空间滤波器传输后的
横向光强分布 $I(u'')$ (a. u.), $N_w = 100$, $a/w_0 = 2$, $N_l = 16$

(a) $b/w_0 = 0.001$; (b) $b/w_0 = 0.006$; (c) $b/w_0 = 0.015$; (d) $b/w_0 = 0.03$; (e) $b/w_0 \rightarrow \infty$

Fig. 2 The transverse intensity $I(u'')$ (a. u.) of the beam with amplitude modulation and phase fluctuations when passing through a spatial filter in the weak truncation case. $N_w = 100$, $a/w_0 = 2$, $N_l = 16$

和位相畸变光束的衍射极限为^[6,7]

$$b'' = \frac{\left[1 + 2\left(\frac{\sigma_r}{L_r/w_0}\right)^2\right]^{1/2}}{\frac{\pi w_0}{\lambda f}} = \frac{\left[1 + 2\left(\frac{\sigma_r}{L_r/w_0}\right)^2\right]^{1/2} w_0}{\pi N_*} \quad (7)$$

将 $N_* = 100$ 代入(7)式,可求得 $\sigma_r^2 = 0$ (无畸变光束)时 $\frac{b''}{w_0} = 0.003$; $\left(\frac{\sigma_r}{L_r/w_0}\right)^2 = 10$ 时 $\frac{b''}{w_0} = 0.015$; $\left(\frac{\sigma_r}{L_r/w_0}\right)^2 = 50$ 时 $\frac{b''}{w_0} = 0.03$ 。分析图 2 可知,对于无畸变光束,若滤波小孔尺寸小于衍射极限时,光强分布将会产生明显的衍射调制(如图 2(a)),当滤波小孔尺寸大于衍射极限时,光强分布几乎不随滤波小孔尺寸而变(如图 2(b)~(e))。对于有振幅调制和位相畸变光束,只有在滤波小孔尺寸远小于其衍射极限时,光强分布才存在起伏(如图 2(a)),而当滤波小孔尺寸比衍射极限小得不多时,由于位相畸变参数对空间相干性的影响,光强分布的起伏较小(如图 2(b)),但此时的光能量损失较大。当滤波小孔尺寸等于衍射极限时,光强分布因振幅调制的存在而略有起伏(对于 $\left(\frac{\sigma_r}{L_r/w_0}\right)^2 = 10$,如图 2(c),对于 $\left(\frac{\sigma_r}{L_r/w_0}\right)^2 = 50$,如图 2(d)),当滤波小孔尺寸大于衍射极限时,由于振幅调制参数 σ_a^2 和 $(L_s/w_0)^2$ 的影响,光强分布存在明显的起伏,且光强起伏随振幅调制参数 σ_a^2 和滤波小孔的增大而增大,随位相畸变参数 $\left(\frac{\sigma_r}{L_r/w_0}\right)^2$ 的增大而减小,但在振幅调制参数 σ_a^2 较小时, $(L_s/w_0)^2$ 对光强分布的影响很小。因此,在弱截断情况下,综合考虑到空间滤波器的滤波作用以及光能损失后,可定义弱截断情况下的最佳滤波小孔相对尺寸为

$$\frac{b_{\text{opt}}}{w_0} = \frac{b''}{w_0} = \frac{\left[1 + 2\left(\frac{\sigma_r}{L_r/w_0}\right)^2\right]^{1/2}}{\pi N_*} \quad (8)$$

由(8)式可知,弱截断情况下的最佳滤波小孔相对尺寸不仅随系统菲涅耳数的增大而减小,且随位相畸变参数的增大而增大。

4 结束语

本文用广义惠更斯-菲涅耳衍射积分和统计光学方法对有振幅调制和位相畸变光束通过空间滤波器的传输特性作了详细研究,并对最佳滤波小孔的选取条件进行了分析。研究表明,与无畸变光束不同,位相畸变和振幅调制参数均对光束传输特性产生影响,但在不同情况下(例如强、弱截断)这种影响是不同的。最佳滤波小孔尺寸与系统菲涅耳数、光束截断参数以及光束的位相畸变参数有关,它随系统菲涅耳数的增大而减小。最佳滤波小孔尺寸在强截断情况下几乎与振幅调制和位相畸变参数无关,在弱截断情况下则随光束的位相畸变参数的增大而增大。由于按文献[4]引入光学模型(1)式中总功率(能量)未归一,因此计算中有振幅调制和位相畸变光束通过空间滤波器传输的光强值可能大于无畸变光束的光强值。值得指出的是,经与国内外^[1]已有的有关实验数据和空间滤波器工程设计参数相比较,证明本文所得的结论是合乎实际的,并且与从傅里叶光学空间截止频率观点分析在方法上也是等价的。最后,本文虽然仅对二维情况进行了详细研究,但所用方法和所得结果可直接推广用于三维情况。

参 考 文 献

- 1 J. T. Hunt, P. A. Renard, W. W. Smmons. Improved performance of fusion lasers using the imaging properties

- of multiple spatial filters. *Appl. Opt.*, 1977, 16(4): 779
- 2 王桂英, 陈时胜, 余文炎等. 窄频带及宽频带激光束的传输特性. *光学学报*, 1984, 4(1): 1
 - 3 王桂英, 赵九源, 张明科等. 钎玻璃高功率激光系统中的空间滤波器的基本研究. *物理学报*, 1985, 34(2): 171
 - 4 K. R. Manes, W. W. Simmon. Statistical optics applied to high-power glass lasers. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1985, 2(4): 528
 - 5 T. Shirai, T. Asakura. Spatial coherence of light generated from a partially coherent source and its control using a source filter. *Optik*, 1993, 94(1): 1
 - 6 张 彬, 吕百达. 有振幅调制和位相畸变光束的聚焦特性. *中国激光*, 1997, A24(5): 415~420
 - 7 B. Lü, B. Zhang. The intensity distribution of a Gaussian Schell-model beam focused by an aperture lens. *J. Mod. Opt.*, 1995, 42(3): 523

Propagation of Laser Beams with Amplitude Modulations and Phase Fluctuations Through a Spatial Filter

Zhang Bin Lü Baida

(*Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064*)

Abstract In this paper, using the generalized Huygens-Fresnel diffraction integral and statistical-optics method, the properties of laser beams with amplitude modulation and phase fluctuations propagating through a spatial filter have been studied in detail. The condition for the optimum pinhole size of the spatial filter has been analyzed. Numerical calculations have shown the dependence of the optimum pinhole size on the Fresnel number of the system, the truncation parameter and the phase fluctuation parameter.

Key words amplitude modulation, phase fluctuations, spatial filter, propagation properties