

用逐次逼近迭代法分析含空间滤波器的 多程激光放大系统的逆问题*

张 彬 吕百达

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都 610064)

摘 要 基于 Frantz-Nodvik (F-N) 方程和广义惠更斯-菲涅耳衍射积分, 提出了解决含空间滤波器的多程激光放大系统的逆问题的迭代算法, 并作了数值计算。所得的数值计算方法和有关结果可用于高功率多程激光放大系统的设计。

关键词 逆问题, 多程激光放大系统, 空间滤波器, 逐次逼近迭代法。

1 引 言

多程激光放大系统能够有效地提高系统效率, 降低系统造价, 因此多程放大技术被广泛运用于高功率激光系统的设计中, 其典型例子为新一代惯性约束聚变驱动器中的主放大系统^[1]。为了能够有效地预估激光系统的性能极限、选择高性能价格比的系统结构、分析实验并对激光系统的运行提供指导, 国内外均对激光脉冲在高功率多程激光系统中的传输特性进行了计算模拟和分析研究^[2-5]。然而, 在高功率激光放大系统的设计中, 更为关心的是激光放大系统的逆问题, 即在给定放大系统参数和满足物理实验要求的输出激光脉冲分布和能量密度前提下, 求出相应的输入激光脉冲的分布和能量密度。在不考虑衍射的情况下, 将空间滤波器简化为一种扩束、程间损耗元件, 对单程、多级和多程激光放大器的逆问题作了计算分析^[6]。由于空间滤波器在聚变驱动器中对光束质量控制起重要作用^[3, 7-11], 因此在实际高功率激光放大系统的计算模拟程序中必须包括激光在空间滤波器中的衍射传输。本文将对含空间滤波器的多程放大系统的逆问题进行研究。对于多程放大系统, 激光在同一放大介质中往返传输被放大, 但在空间滤波器传输中衍射引起的振幅和位相变化亦不容忽视。这就使问题变得复杂, 也给编制程序带来一些新的问题。对此, 可用快速傅里叶变换和逐次逼近迭代相结合的算法来解决。文中所用方法和有关结果对聚变驱动器的设计有应用意义。

2 计算方法

从 F-N 方程出发, 在集中损耗近似下, 计算多程放大的第 $m + 1$ 程能量密度和增益的公式为^[4]

* 国家高技术惯性约束聚变主题资助项目。

收稿日期: 1997-07-16; 收到修改稿日期: 1997-12-30

$$J_{m+1} = TJ_s \ln \{ G_m [\exp (J_m / J_s) - 1] + 1 \} \tag{1}$$

$$G_{m+1} = G_m \exp [- p (J_{m+1} / T - J_m) / J_s] \tag{2}$$

其中, J_s 为饱和能量密度, $T = \exp (- \alpha L)$ 为损耗因子, α 为放大介质的损耗系数, L 为放大介质长度, p 为增益恢复系数, 通常, $0.5 \leq p \leq 1$ 。

求解多程激光放大器逆问题的基本物理思想是, 首先将多程放大简化为若干个双程放大, 然后再将双程放大简化为单程放大, 其实质是将多程放大器的逆问题转化为若干单程放大器的逆问题。采用所提出的脉冲分割模型和介质薄片增益、损耗模型以及逐次逼近迭代法, 可对多程放大器逆问题进行分析^[6]。

激光脉冲通过 $ABCD$ 光学系统的传输遵从广义惠更斯-菲涅耳衍射积分^[12]

$$E_{out}(x, t) = \sqrt{\frac{k}{2\pi B}} \int E_{in}(x', t) \exp \left[- \frac{ik}{2B} (Ax'^2 - 2x'x + Dx^2) \right] dx' \tag{3}$$

式中, E_{out} 和 E_{in} 分别为出射面和入射面的场分布, A 、 B 、 C 、 D 为相应的传输矩阵元, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长。值得指出的是, (3) 式省略了对计算结果无影响的激光束的整体位相平移项 $\sqrt{i} \exp (- ikz)$, 场分布表示式中的变量 z 亦省去。

对激光脉冲通过半宽度为 a 的光阑以及空间滤波器的正、逆衍射问题可将相应的传输矩阵代入广义惠更斯-菲涅耳衍射积分公式进行计算模拟^[3]。

将激光在放大介质、自由空间以及空间滤波器中传输统一处理时, 应在合理近似下解决

好三者间的“接口”问题。下面以含空间滤波器的双程激光放大系统逆问题的求解为例作具体说明。在图 1 所示含空间滤波器的双程放大系统中, 半宽度为 a 的光阑 A 位于双程激光放大系统前端注入透镜 F_1 前方 l_1 处, 注入透镜的焦距为 f_1 , 在注入透镜和空间滤波器的前透镜 F_2 的共同焦面处置一反射镜 M_1 , 长度为 L 的放大介质置于空间滤波器前透镜左侧 l_2 处, 反射镜 M_2 位于放大介质左侧, 空间滤波器前、后透镜 F_2 、 F_3 的焦距分别为 f_2 、 f_3 , 半宽度为 b 的滤波小孔 B 置于二透镜的共同焦面上, 放大系统的输出参考面位于后透镜 F_3 后 l_3 处。

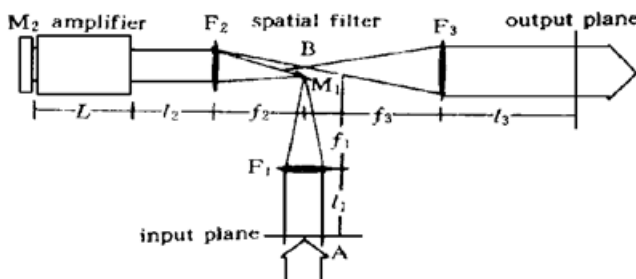


Fig. 1 Schematic of the two-pass amplifier system containing a spatial filter. A-aperture, B-pin-hole, M1, M2-mirrors, F1, F2, F3-lenses

对图 1 所示含空间滤波器等光学元件的双程放大系统逆问题的迭代计算过程为: 1) 选择

初始场分布, 例如 $E_{out}^{(0)} = \sqrt{I_{out}} \exp (i\Phi_{out}^{(0)})$, 式中, I_{out} 为出射参考面处 (位于空间滤波器后透镜 F_3 后 l_3 处) 所要求的光强分布, $\Phi_{out}^{(0)}$ 为可以在 $(0, 2\pi)$ 范围内随机取值的分布函数。2) 进行逆傅里叶变换, 得到放大介质第二程出射场分布 $E_{am, 2out}^{(0)}$ 。3) 由求解双程放大器逆算问题的逐次逼近迭代法得到放大介质第一程的入射光强分布 $I_{am, 1in}^{(0)}$ ^[15]。通常对激光脉冲通过放大介质传输进行数值模拟时, 均忽略放大介质孔径的衍射效应, 因此, 放大介质的入射面和出射面处的位相分布相同, 即 $\Phi_{am, 1in}^{(0)} = \Phi_{am, 2out}^{(0)}$ 。4) 由逆傅里叶变换可得到光阑处 (位于透镜 F_1 前方 l_1 处) 的场分布 $E_{in}^{(0)}$ 。5) 乘以光阑函数 T_{ap} , 由傅里叶变换求得放大介质第一程入射面的激光场分布 $E_{am, 1in}^{(1)}$ 。6) 由多程放大计算公式得到放大介质第二程出射面的光强分布 $I_{am, 2out}^{(1)}$, 同样, $\Phi_{am, 1in}^{(1)} = \Phi_{am, 2out}^{(1)}$ 。7) 由傅里叶变换求得空间滤波器的透镜焦面处的空间频谱分布, 乘以滤波小孔的光阑函数后经逆傅里叶变换得到空间滤波器出射参考面的场分布 $E_{out}^{(1)}$ 。 $E_{out}^{(1)}$ 一般与所

要求的 $E_{\text{out}}^{(0)}$ 不相同, 于是作振幅强制, 即令 $|E_{\text{out}}^{(1)}| = |E_{\text{out}}^{(0)}| = \sqrt{I_{\text{out}}}$, 但保留位相, 作为下一轮迭代过程的初始分布。这样的迭代过程重复地进行下去, 直到计算精度得到满足为止。由最后的输出函数 E_{in} 可得到所求的入射参考面上激光的场分布, 该场分布既包含有空间分布, 还包含有时间波形, 对时间积分便得到入射激光的能量密度。

3 数值计算和结果分析

用上述计算模型和方法对双程磷酸盐钕玻璃放大系统进行数值计算。为计算方便且不失一般性, 设 $l_2 = f_1 = f_2 = f_3 = f$, 典型数值计算例示于图 2、图 3。计算程序的计算精度(相对误差) 小于 1%。本文计算仅涉及三维(x, z, t) 情况, 对于(x, y, z, t) 的情况, 将文中一维傅里叶变换和逆傅里叶变换算法用二维傅里叶变换和逆傅里叶变换代替, 就可解决。除计算机用时增加外, 不会遇到原则性困难。本文的计算程序在 586-120 微机上所花的计算时间不超过 30 分钟。计算所使用的参数为: 放大介质长度 $L = 20 \text{ cm}$, 饱和能量密度 $J_s = 2.7 \text{ J/cm}^2$, 损耗系数 $\alpha = 0.4 \% \text{ cm}^{-1}$, 增益分布 $g_0(x) = 0.05 \text{ cm}^{-1}$, 要求得到的输出脉冲时间和空间分布均为 6 阶超高斯分布, 输出脉冲宽度 $\Delta t = 2 \text{ ns}$, 输出激光的束宽 $w = 1.2 \text{ cm}$, 光阑

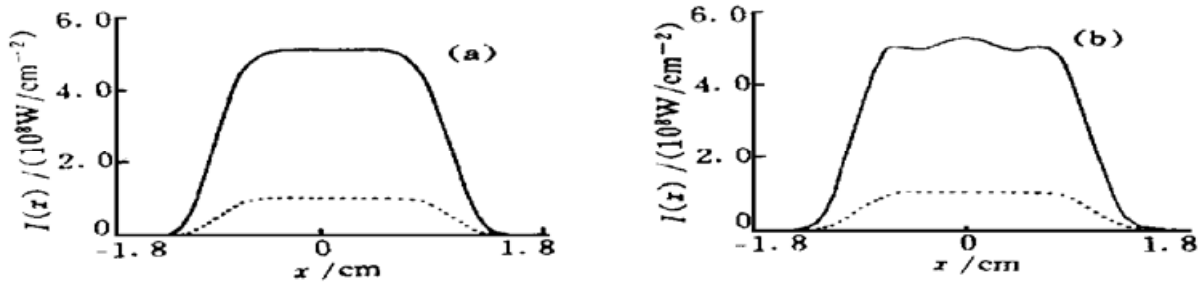


Fig. 2 The initial and output spatial pulse profiles at $t = -0.3 \text{ ns}$ of an amplifier system holding the image relaying condition under different pinhole widths of the spatial filter. (a) $b = 600 \mu\text{m}$; (b) $b = 72 \mu\text{m}$. “—”: output pulse profile, “- -”: initial pulse profile

尺寸 $a = 1.2 \text{ cm}$, 激光波长 $\lambda = 1.05 \mu\text{m}$, 透镜焦距 $f = 2.7 \text{ m}$ 。图 2 给出不同空间滤波器滤波小孔尺寸情况下, 满足像传递的系统在 $t = -0.3 \text{ ns}$ 时的输入和输出脉冲光强空间分布。增益恢复系数 $p = 0.5$, 传输距离 $l_1 = l_3 = 2.7 \text{ m}$, 输出能量密度 $J_{\text{out}}|_{x=0} = 1 \text{ J/cm}^2$, 滤波小孔尺寸(a) $b = 600 \mu\text{m}$; (b) $b = 72 \mu\text{m}$ 。图 3 给出不满足像传递的情况下, 输入和输出脉冲空间和时间分布。(a) $t = -0.3 \text{ ns}$ 时的光强分布; (b) $t = -0.3 \text{ ns}$ 时的位相分布; (c) $x = 0$ 处的时间波形; (d) $t = -0.3 \text{ ns}$ 时进入空间滤波器之前的光强分布。

分析图 2, 图 3 可得以下几点结论:

1) 由图 2 知, 对于满足像传递的系统, 当空间滤波器的滤波小孔选取合适时[见图 2 (a)], 要获得所要求的输出光强分布, 输入的光强分布应具有的形状与放大器的增益分布以及激光脉冲能量密度等有关, 相应的输入脉冲位相分布与设定的输出脉冲位相分布相同。增益均匀分布以及激光脉冲能量密度小于饱和能量密度的图 2(a) 中的输入脉冲光强分布与输出脉冲光强分布相似, 只是由于放大器的放大作用使输入激光脉冲的光强小于输出脉冲的光强。若将图 2(b) 中计算出的输入激光作为具有相同参数的系统的入射, 通过数值计算可得到在空间滤波器的傅里叶变换面上光强分布的中心亮斑尺寸为 $b' = 120 \mu\text{m}$ 。由图 2(b) 可知, 当滤波小孔尺寸 b 小于 b' 时(图中 $b = 72 \mu\text{m}$), 输出激光光强分布与所要求的分布相比, 存在

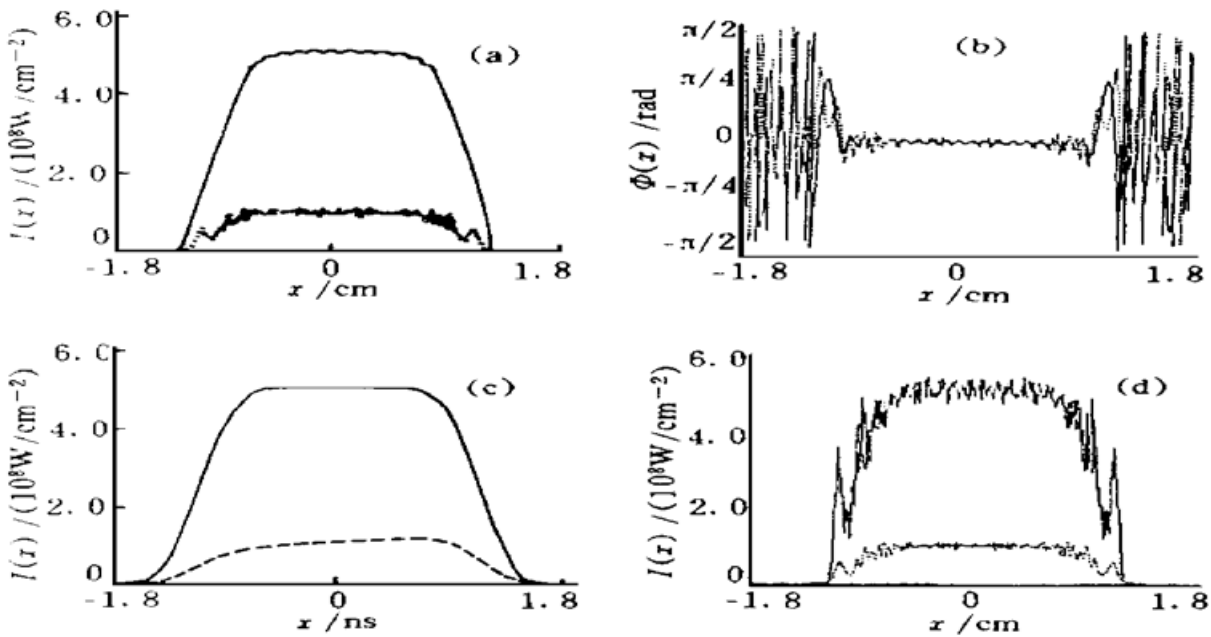


Fig. 3 The initial and output spatial and temporal pulse profiles of an amplifier system, if the condition for the image relaying is not fulfilled. $b = 600 \mu\text{m}$, $l_1 = l_3 = 8.1 \text{ m}$, other calculation parameters are same as Fig. 2. (a) The initial and output spatial profiles at $t = -0.3 \text{ ns}$; (b) The initial and output pulse phases at $t = -0.3 \text{ ns}$; (c) The initial and output temporal pulse profiles at $x = 0$; (d) The initial and output spatial profiles just before the spatial filter at $t = -0.3 \text{ ns}$. “—”: output pulse profile, “- -”: initial pulse profile

大尺度的空间调制。这是由于滤波小孔太小所引起的强烈的衍射效应所造成的，因此，滤波小孔的合理选取在高功率激光放大系统中是至关重要。

2) 进一步分析图 2(a) 知，即使在存在光阑衍射效应 ($a = w$) 的情况下，对于满足像传递的系统，相应的输出脉冲光强分布仍然很光滑，几乎不存在光强分布的衍射调制。由此可见，在放大系统的设计中，满足像传递对于减小衍射效应、改善系统的光束质量是极为重要的。

3) 由图 3(a)~ 图 3(c) 可以看出，对于不满足像传递条件的系统，若存在光阑的衍射效应，要得到要求的输出光强分布，其输入激光脉冲的光强分布存在小尺度调制，且相应的光束中心附近的位相分布变化较其边缘部分平缓得多。由于增益饱和效应使激光脉冲的后沿比前沿获得更小的增益，因此，如果要获得图中所要求的时间波形输出脉冲，相应的输入时间波形的前沿应更缓。比较图 3(a) 和图 3(d) 可以看出，空间滤波器的作用是在其傅里叶变换面上，用滤波小孔滤除入射光束中的高频分量，以减小输出激光光强分布的小尺度调制。因此，在激光放大系统中，设计合理的空间滤波器对控制激光光束质量起重要作用。

结束语 本文提出了分析含空间滤波器的高功率多程激光放大系统逆问题的一种数值计算方法，并作了详细的数值模拟。数值计算结果表明，输入激光脉冲的时间波形与输出激光脉冲空间分布、时间波形、能量密度和激光放大介质参数有关，而其空间分布则与输出激光空间分布、时间波形、放大介质增益分布、空间滤波器参数、光阑尺寸以及传输距离等有关。本文所用方法是作者提出的解决多程放大器逆问题的逐次逼近迭代法加上处理逆衍射问题的迭代算法。后者与二元光学元件设计算法^[12]类似，但取消了对输入场的振幅强制，亦无位相分级量化问题。将本文提出的方法推广用于解决程数更多的多程激光放大系统逆问题是直截了当

的,除程序编制更复杂外,不会遇到原则性问题。虽然可以用其它一些方法对放大系统的逆问题作计算模拟,但本文提出的这种模型和计算程序不失为解决含时间和空间变量放大系统逆问题的一个有效方法。

参 考 文 献

- [1] J. A. Paisner, J. D. Boyes, S. A. Kumpan, Conceptual design of the national ignition facility. *Proc. SPIE*, 1995, **2633**: 2~ 12
- [2] 范滇元, 余文炎, 高功率激光放大器. *激光*, 1980, **7**(9): 1~ 6
- [3] W. W. Simmons, J. T. Hunt, W. E. Warren, Light propagation through large laser system. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**(9): 1727~ 1744
- [4] W. H. Lowdermilk, J. E. Murray, The multipass amplifier: Theory and numerical analysis. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(5): 2436~ 2444
- [5] J. M. Auerbach, V. P. Karpenko, Serrated-aperture apodizers for high-energy laser systems. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(15): 3179~ 3183
- [6] 张 彬, 吕百达, 多级和多程脉冲激光放大器的逆问题. *中国激光*, 1997, **A24**(6): 495~ 500
- [7] J. T. Hunt, P. A. Renard, W. W. Simmons, Improved performance of fusion lasers using the imaging properties of multiple spatial filter. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(4): 779~ 782
- [8] W. W. Simmons, S. Guch, F. Rainer *et al.*, High energy spatial filter for removal of small-scale beam instabilities in high-power lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1975, **QE-11**(9): 30D
- [9] E. S. Bliss, J. T. Hunt, P. A. Renard, Effects of nonlinear propagation on laser focusing properties. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1976, **QE-12**(7): 402~ 406
- [10] 王桂英, 赵九源, 张明科等, 钽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~ 181
- [11] 陈时胜, 毕无忌, 王笑琴, 空间滤波器在提高光束亮度中的作用. *光学学报*, 1983, **3**(3): 259~ 264
- [12] 吕百达, *激光光学——激光束的传输变换和光束质量控制*. 第二版, 四川成都: 四川大学出版社, 1992. 54
- [13] 陈岩松, 二元衍射光学. *量子电子学*, 1996, **13**(3): 193~ 200

Analyzing the Inverse Problem of the Multipass Laser Amplifier System Containing a Spatial Filter by Using Successive Iteration Method

Zhang Bin Lü Baida

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

(Received 16 July 1997; revised 30 December 1997)

Abstract Based on the Frantz-Nodvik equation and Huygens-Fresnel diffraction integral, an successive iteration method has been presented to solve the inverse problem of a multipass laser amplifier system containing a spatial filter. Numerical calculations have been performed. The numerical calculation method and results obtained can be used to design high-power multipass laser amplifiers.

Key words inverse problem, multipass laser amplifier system, spatial filter, successive iteration method.